

Revista Argentina de Agrometeorología

ISSN 2545-8418

Editada por la
Asociación Argentina
de Agrometeorología

Revista Digital | Volumen VII - Número Especial - Año 2016



ISSN 2545-8418

Revista Argentina de **Agrometeorología**

Volumen VII - Número Especial - Año 2016



Asociación Argentina de Agrometeorología

Comisión Directiva

Presidente: Marta Vinocur

Vicepresidente: Graciela Vergara

Secretario: Andrea Rivarola

Prosecretario: Rafael Hurtado

Secretario de Actas: Carolina Munka

Tesorero: Roberto Zanvettor

Protesorero: Marta Costanzo

Vocales Titulares: Aida Della Magiora

Gabriela Cruz

Vocales Suplentes: Silvina Maio

Angel Blasón

Revista Argentina de Agrometeorología

Director: Pedro Enrique Boletta

Comité Científico

Coordinador: Andrés C. Ravelo

Integrantes del Comité Científico

Antonio de la Casa

Homero Bergamaschi

Patricia Figuerola

Denice Fontana

Ana María Planchuelo

Roberto Seiler

Paulo Senthelas

Andrés C. Ravelo

Rafael Rodríguez

Marta Vinocur

RADA

REVISTA ARGENTINA DE AGROMETEOROLOGÍA
Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos
Agrícolas y Naturales Av. Valparaiso s/n - C.C. 509 -
C.P. 5000
Ciudad de Córdoba - ARGENTINA
www.crean.unc.edu
Email: pecbol@gmail.com

Presentación

La Asociación Argentina de Agrometeorología (AADA) es una organización sin fines de lucro que fomenta el desarrollo de la ciencia agrometeorológica en el país, reuniendo a investigadores, docentes, profesionales, empresarios etc., vinculados directa o indirectamente a ella. Tiene entre sus objetivos la misión de difundir las contribuciones originales en el área de su especialidad.

Consecuente con esa misión, en el año 2001 y luego del arduo trabajo de las autoridades anteriores y de ese momento, se concretó la aparición del primer tomo de la Revista Argentina de Agrometeorología (RADA). RADA se convirtió así en el medio de difusión científica de la AADA, permitiendo establecer un valioso vínculo entre los profesionales argentinos y también latinoamericanos dedicados a la Especialidad. Con muchos esfuerzos la Revista continuó publicándose hasta el 2006, año en el que las dificultades para continuar marcaron la salida del último número, Volumen 5-6.

Hoy con el propósito de retomar esa tarea de difusión científica, me llena de expectativa y es a la vez un honor para mí presentar este primer número de RADA en formato digital. En este marco deseo también expresar en nombre de la AADA, el agradecimiento y felicitación a los Profesores Ing. Ftal. M.Sc. Pedro Boletta y Dr. Andrés Ravelo en sus funciones de Director y de Coordinador del Comité Científico de RADA, respectivamente, por el excelente trabajo realizado, augurándoles el mayor de los éxitos para los próximos números de la Revista.

Dra. Marta G. Vinocur
Presidente de AADA

Nota Editorial

La Asociación Argentina de Agrometeorología (AADA) es un organismo dedicado a la promoción de las actividades de investigación, docencia y extensión en las áreas de Agrometeorología, Agroclimatología y Fenología Agrícola. Un mecanismo de promoción es la publicación de artículos científicos en una revista lo cual se ve materializado en la Revista Argentina de Agrometeorología (RADA). Después de un largo paréntesis en la publicación de RADA en forma impresa (soporte papel), en la Asamblea General de la I Reunión Binacional Uruguay- Argentina de Agrometeorología y XV Reunión Argentina de Agrometeorología, realizada en Piriápolis (Uruguay) durante los días 1 al 3 de Octubre de 2014, se decidió retomar la publicación de RADA en formato digital. Para el cumplimiento de la misión de la publicación de la revista en su nuevo formato se designó como director a Pedro Enrique Boletta, socio fundador de la AADA.

Después de dos años de trabajo intenso junto al Coordinador del Comité Científico el Dr. Andrés C. Ravelo tengo el placer de presentarles el primer número de RADA en su nuevo formato y con los deseos de que de aquí en más no se produzca su interrupción, para lo cual invito a todos los que se desempeñan en las áreas de incumbencia de nuestra Asociación nos hagan llegar sus importantes y valiosas contribuciones.

Ing. Ftal (M Sc.) Pedro Enrique Boletta

Director RADA

CONTENIDO

Evaluación de un lote de maíz bajo riego y siembra variable con el modelo AquaCrop en Córdoba, Argentina

de la Casa, A.; G. Ovando, L. Bressanini, J. Martínez, C. Miranda y G. Díaz.....1

Monitoreo y evaluación de las condiciones hídricas extremas (sequías y excesos de humedad) en Argentina

Zanvettor R.E.; A.C. Ravelo y P.E.C. Boletta.....15

Pesquisas desenvolvidas pelo grupo de agrometeorologia da UFRGS no contexto do monitoramento e previsão de safras usando imagens orbitais

Fontana, D.C.; R.W. Melo, A.H. Junges, E.V. Klering, A.P. Cordeiro, M.A. Berlato y H. Bergamaschi ...27

Riesgos climáticos para el cultivo de maíz en el centro-sudeste bonaerense: A. Temperaturas extremas

Panunzio Moscoso, M. P.; A. I. Irigoyen, A. I. Della Maggiora y R.H. Rizzalli.....41

Riesgos climáticos para el cultivo de maíz en el centro-sudeste bonaerense: B. Deficiencias de agua y rendimientos

Panunzio Moscoso, M. P.; A. I. Irigoyen, A. I. Della Maggiora y R. H. Rizzalli.....57

Monitoreo de la fenología y fenometría del olivar a través de la dinámica del NDVI-MODIS en Vichigasta, La Rioja

Luna Toledo, E. S. y P.I. Figuerola73

Influencia del envejecimiento del polietileno sobre la transmisión de radiación fotosintéticamente activa (PAR) hacia el interior de un invernadero parabólico

Martinez, S.; A. Carbone, M. Garbi, J. Somoza, M.C. Grimaldi y C. Cerisola ex aequo83

Evaluación de un lote de maíz bajo riego y siembra variable con el modelo AquaCrop en Córdoba, Argentina

de la Casa, A.; G. Ovando, L. Bressanini, J. Martínez, C. Miranda y G. Díaz

RESUMEN

Los modelos de cultivo constituyen herramientas apropiadas para estudiar la variabilidad espacial y analizar las causas determinantes del comportamiento productivo de un lote. El modelo AquaCrop V4.0, que emplea la cobertura del cultivo (CC) como parámetro central para representar el crecimiento y desarrollo vegetal, se utilizó a fin de estimar la productividad e inferir las causas determinantes de las diferencias de rendimiento en un lote de maíz (*Zea mays* L.) bajo riego sembrado a tasa variable en Córdoba, Argentina. Por medio de fotografías digitales se obtuvieron datos de CC para representar la evolución del cultivo durante el ciclo que se extendió del 4/10/2013 (siembra) al 24/4/2014 (cosecha). Además, en seis sectores del lote establecidos de acuerdo a la densidad de siembra y la distancia a la cabecera de riego, se registró periódicamente la biomasa aérea y el contenido de agua del suelo y, a la cosecha, el rendimiento de grano. AquaCrop se aplicó bajo dos modalidades: potencial y real. Mientras las determinaciones a tasa potencial permiten convalidar un valor de productividad del agua (WP*) característico para maíz de 34,4 g m⁻² y establecer la lámina de riego total requerida para suprimir el estrés hídrico (entre 411 y 433 mm), bajo condiciones reales el agua de riego se ajustó con un valor de eficiencia particular para cada sector del lote. El análisis estadístico de la relación entre los valores observados y estimados por AquaCrop arrojó resultados muy aceptables en el caso de CC y la producción de materia seca (Coeficiente de determinación, Eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe e Índice de Willmott $\geq 0,81$). Si bien estos indicadores expresan mayor dispersión para el contenido de agua del suelo en cada sector por separado, los resultados en conjunto son estadísticamente aceptables, al igual que cuando se evaluó el rendimiento de granos. Hacia el norte del lote la productividad resultó marcadamente inferior que en el sur. A los efectos de establecer de manera integral relaciones consistentes entre los valores observados y estimados de CC, materia seca, contenido de agua del suelo y rendimiento de grano, la simulación del riego en AquaCrop debió considerar una eficiencia de aplicación de 40% en los sectores ubicados al norte del lote y mayor de 60 % en los del sur.

Palabras Clave: agricultura de precisión, productividad del agua, cobertura del cultivo, eficiencia de riego

de la Casa, A.; G. Ovando, L. Bressanini, J. Martínez, C. Miranda and G. Díaz, 2016. Irrigated and variable planting corn field assessment with aquacrop model in Córdoba, Argentina. RADA VII:

SUMMARY

Crop models are suitable tools for studying spatial variability and analyzing those factors that are determinants of the productive performance within a field. The AquaCrop V4.0 model, which uses crop cover (CC) as a central parameter to represent the plant growth and development, was used to estimate productivity and infer the determinants of performance differences in a field of corn (*Zea mays* L.) crop planted at variable rates in Cordoba, Argentina. The CC data were obtained through digital photographs to represent the crop evolution during the crop cycle from 04/10/2013 (seeding) to 24/04/2014 (harvest). Moreover, in 6 sectors of the field determined according to planting density and distance from the head of irrigation, biomass and water content of the soil was recorded periodically and also the corn yield at harvest. AquaCrop was applied under two modalities: potential and actual. While the potential rate allowed to validate a water productivity (WP*) characteristic for corn of 34.4 g m⁻² and set the total irrigation requirement to remove water stress (between 411 and 433 mm), under real conditions the irrigation of water was adjusted with a particular efficiency value for each sector in the field. Statistical analysis of the relationship between observed and estimated values with AquaCrop yielded very acceptable results in the case of CC and dry matter production (Coefficient of determination, Efficiency Nash-Sutcliffe model and Willmott index ≥ 0.81). Productivity to the north of the field was markedly lower than in the south. Looking for establishing in a comprehensive manner consistent relationships between observed and estimated values of CC, dry matter, soil water content and grain yield, irrigation simulation of AquaCrop should consider an application efficiency of 40% in the north sectors of the field and over 60% in the south.

Keywords: precision agriculture, water productivity, cover crop, irrigation efficiency

A. de la Casa, G. Ovando y G. Díaz: Agrometeorología. L. Bressanini: Agrotecnia. J. Martínez: Física. Facultad de Ciencias Agropecuarias (FCA-UNC), Córdoba CP: 5000, Argentina. C. Miranda: Establecimiento Las Delicias. Correspondencia a: delacasa@agro.unc.edu.ar

INTRODUCCIÓN

La agricultura dispone de un caudal cada vez mayor de información respecto a la variabilidad espacial del suelo y del comportamiento productivo de los cultivos a partir de los mapas de rendimiento, análisis de suelo y datos que provee la teledetección (Moran *et al.*, 1997; Oliver *et al.*, 2010). Este conocimiento debidamente sistematizado, sumado al desarrollo de la mecanización, la electrónica y la informática, han dado lugar a la agricultura sitio-específica que consiste en la aplicación de principios y tecnología destinada a manejar la variabilidad espacial y temporal asociada a todos los aspectos de la producción agrícola, con el propósito de mejorar la productividad de los cultivos y preservar la calidad ambiental (Pierce & Novak, 1999).

El estudio de la variabilidad espacial y las causas determinantes del comportamiento productivo

de un lote puede ser realizado con la ayuda de los modelos de cultivo (Batchelor *et al.*, 2002; Oliver *et al.*, 2010). Estas herramientas informáticas permiten cuantificar el rendimiento potencial, como así también evaluar el incremento de rendimiento y los beneficios financieros que produce una eventual decisión de manejo, relacionada con el aprovechamiento de los sectores más productivos del lote o la corrección de aquellos que presentan alguna limitación.

El modelo AquaCrop es una evolución del método FAO para estimar el rendimiento de los cultivos que ha mejorado su base conceptual en los siguientes aspectos (Steduto *et al.*, 2009): (i) separa la evapotranspiración (ET) entre la transpiración del cultivo (Tr) y la evaporación del suelo (E), (ii) considera un modelo simple de crecimiento y senescencia de la cobertura del follaje (CC) como base para estimar Tr, (iii) determina el rendimiento (Y) en función de la biomasa (B) y del índice de

cosecha (HI), y (iv) considera el efecto del estrés hídrico en distintas etapas y procesos del cultivo: crecimiento, senescencia, Tr, e HI. La función que simula el crecimiento en AquaCrop es:

$$B = WP^* \times \sum Tr$$

donde WP^* es la productividad del agua (cociente entre la biomasa por unidad de superficie y la unidad relativa de transpiración acumulada), que tiende a ser constante bajo distintas condiciones climáticas y de manejo (Steduto *et al.*, 2007). De acuerdo a resultados obtenidos en otras regiones y bajo distintas condiciones de producción, WP^* presenta para maíz valores superiores a 30 g m⁻² (Hsiao *et al.*, 2009).

Desde la aparición de AquaCrop en 2009 (Steduto *et al.*, 2009; Raes *et al.*, 2009), el modelo ha sido usado extensivamente para analizar el comportamiento productivo de distintos cultivos y bajo condiciones de manejo muy diversas. Abedinpour *et al.* (2012) lo aplicaron en maíz para evaluar tres niveles de fertilización nitrogenada y cuatro de riego; Stricevic *et al.* (2011) lo usaron en Serbia bajo dos escenarios (en secano y bajo riego, con suministro de nutrientes adecuado) para los cultivos de maíz, remolacha y girasol; también para maíz, Flores-Gallardo *et al.* (2013) lo emplearon al norte de Sinaloa, México, para evaluar tres condiciones de disponibilidad hídrica: riego total (RT) y riego deficitario (80 % y 60 % respecto a RT). Andarzian *et al.* (2011) evaluaron la producción de trigo en Irán bajo distintos manejos del agua de riego; Mkhabela & Bullock (2012) lo adaptaron para simular el rendimiento de trigo y el contenido de agua del suelo en Canadá; etc.

AquaCrop emplea CC para modular la interacción entre la planta y la atmósfera y, en base a ella, estructura la dinámica de crecimiento, consumo de agua y productividad del cultivo (Raes *et al.*, 2009). Por otra parte, los estudios demuestran que la CC constituye un parámetro biofísico que se puede obtener fácilmente de medios digitales, a través del procesamiento de imágenes de cámaras tanto convencionales como modificadas (Gitelson, 2004; Li *et al.*, 2010; de la Casa *et al.*, 2013b).

La agricultura de precisión (AP) integra un conjunto de tecnologías destinadas a optimizar la producción en un lote a partir del manejo localizado de cada sector. El monitoreo remoto constituye una tecnología clave para la AP ya que permite evaluar y seguir a tiempo real la condición de los cultivos (Moran *et al.*, 1997). Sin embargo, las imágenes que proveen los sistemas comerciales de alta resolución espacial a partir de aviones no tripulados o de plataformas satelitales suelen resultar poco accesibles

por su costo (Hunt *et al.*, 2010) y, si bien se han realizado muchos avances en la aplicación de los sensores remotos para el manejo sitio específico, aún subsisten baches en el conocimiento que es necesario subsanar (Mulla, 2013).

Reconocida la influencia fundamental del agua en la productividad vegetal, es indudable que una parte importante de la variabilidad en los mapas de rendimiento es producida por la variación espacial de propiedades edáficas, topográficas y de la vegetación que condicionan el contenido de agua del suelo (Timlin *et al.*, 2001; Batchelor *et al.*, 2002; Kitchen *et al.*, 2003). Si bien el riego asegura en tiempo y forma el abastecimiento de agua para la agricultura, su disponibilidad efectiva para los cultivos en cada lugar del lote puede estar limitada, además de los factores anteriores, por razones de orden operativo y, de manera particular, cuando la distribución del agua de riego se realiza por surcos.

La integración del recurso informático que provee AquaCrop con diversos medios digitales apropiados para obtener información espectral de la vegetación y, en particular para determinar CC, no sólo permite estimar detalladamente el crecimiento, desarrollo y productividad de los cultivos, sino que también constituye una plataforma analítica para evaluar el impacto y eficiencia de distintas prácticas agronómicas en cada sector del lote (Batchelor *et al.*, 2002; de la Casa *et al.*, 2013a). De esta forma, resulta viable analizar el comportamiento de los cultivos a una escala compatible con la que requiere la AP para identificar a los factores responsables que imponen restricciones sobre la productividad.

A partir de datos de cobertura del cultivo (CC) de maíz observados a campo durante el ciclo se evaluó la capacidad predictiva del modelo AquaCrop para estimar la biomasa producida en base a la productividad del uso del agua, analizando la brecha de rendimiento del cultivo de maíz bajo riego en un contexto de agricultura de precisión en Córdoba, Argentina. Asimismo, a fin de identificar y analizar los principales factores responsables de las diferencias productivas en el lote y explicar las causas probables del comportamiento monitoreado, la herramienta informática se empleó haciendo el ajuste de la lámina de riego de manera particular en cada sector.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó sobre un cultivo de maíz (*Zea mays* L.), con la variedad MK 960 - TD, TG de SINGENTA. Las mediciones se realizaron entre el 4/10/2013 (siembra) y el 2/04/2014 (madurez fisiológica), en un lote de 45 ha ubicado al sur de

la ciudad de Córdoba (31°33' S, 64°05' O, 400 m/snm) que se cosechó el 24/4/2014. El suelo del lote es un Haplustol éntico, serie Manfredi, cuyo perfil presenta tres horizontes de textura franco y franco-limosa (Dardanelli *et al.*, 1997), con las características que presenta la Tabla 1. Esta información se utilizó para crear el archivo de suelo que AquaCrop necesita para la simulación.

En base a un mapa de rendimiento de un cultivo de soja precedente, se identificó en el lote una franja de mayor productividad real hacia el sur (S), donde la densidad de siembra se ajustó a 10 pl m⁻², y otra hacia el norte (N), donde la densidad se estableció con 8 pl m⁻². En cada una de las franjas se dispusieron 3 áreas de muestreo: en la cabecera de riego (O), en el centro (C) y en el final o

Tabla 1. Propiedades edáficas utilizadas para representar el suelo del lote al sur de la ciudad de Córdoba, Argentina (Dardanelli *et al.*, 1997).

Horizonte	Textura	Profundidad (m)	Saturación	CC (m ³ m ⁻³)	PMP	ADT (mm m ⁻¹)	Ksat (mm día ⁻¹)	tau
A	Franco	0-0,23	0,46	0,327	0,145	182	250	0,60
AC	Franco-limoso	0,24-0,46	0,46	0,330	0,130	200	150	0,50
C	Limoso	>0,47	0,43	0,270	0,115	155	50	0,34

Referencias. CC: Capacidad de campo; PMP: Punto de marchitamiento permanente; ADT: Agua disponible total; Ksat: Coeficiente de saturación; tau: Coeficiente de drenaje.

cola del surco (E), estableciendo en total 6 sectores (SO, SC, SE, NO, NC y NE) designados por su posición geográfica en el lote.

Los datos meteorológicos utilizados (temperatura máxima y mínima, precipitación y evapotranspiración de referencia calculada con el método de Penman-Monteith) proceden de una estación automática que se encuentra en la proximidad del lote. La información sobre la variación de la concentración atmosférica de CO₂ se adoptó de los registros anuales del archivo MaunaLoa.CO2 original (Etheridge *et al.*, 1996), que es utilizado por defecto en la ejecución de AquaCrop.

En base a la información de un análisis de suelo el cultivo recibió a la siembra 150 kg ha⁻¹ de urea y 150 kg ha⁻¹ de sulfato de amonio. La fertilización se completó diez días después de la siembra con 50 kg ha⁻¹ de urea adicionales. De acuerdo con esto, la simulación no consideró mermas productivas por deficiencia de nutrientes. Por su parte, se aplicaron cinco riegos por surco de 80 mm cada uno, tres antes (los días 13/11/2013, 7/12/2013 y 18/12/2013) y dos posteriores (los días 4/01/2014 y 19/01/2014) a floración. La dinámica de la reposición y consumo de agua de cada sector del lote se simuló siguiendo dos modalidades. La primera simulación asumió el carácter de potencial, en base a un modo de ejecución del modelo que realiza la reposición automática del agua para mantener el contenido del suelo siempre por encima de 50% del agua útil. Conocido el valor de la evapotranspiración máxima, es posible de esta forma estimar el agua de riego necesaria para mantener el cultivo sin restricciones de agua. Bajo esta modalidad, la CC y la biomasa aérea fueron las variables utiliza-

das para calibrar la estimación en cada sector. La segunda simulación, para representar la condición real del lote, se ejecutó modificando el archivo de riego de cada sector de acuerdo a un valor de eficiencia ajustado por prueba y error. En este caso, además de CC y la biomasa, la humedad del suelo observada en el perfil sirvió como información de referencia para ajustar la simulación.

Con una frecuencia media de 15 días se tomaron 12 fotografías verticales en cada sector de muestreo con una cámara digital modificada para producir registros de NDVI. Las imágenes se obtuvieron manteniendo la cámara a una altura constante de 2,5 m sobre el cultivo a lo largo del ciclo. La CC se calculó con un procedimiento de análisis digital que clasifica cada píxel como vegetación o suelo de acuerdo al valor de NDVI (de la Casa *et al.*, 2013b). La CC que estima AquaCrop se obtuvo modificando los coeficientes CC₀: tamaño inicial del canopeo (en t = 0) en base a la densidad de siembra observada; CC_x: cobertura máxima en condiciones óptimas de crecimiento; CGC: coeficiente de crecimiento del canopeo; CDC: coeficiente de declinación del canopeo, hasta producir la función de ajuste entre observados y estimados similar a la recta identidad.

En cada fecha de muestreo se determinó la densidad de plantas contando los ejemplares de dos filas contiguas de 5 m de largo, y se extrajo la parte aérea de dos de ellas para obtener la materia seca. La biomasa por unidad de superficie se calculó de acuerdo a la población de plantas de cada sector. Además, en cada sector se registró el contenido de humedad del suelo con el método gravimétrico, haciendo un sondeo del perfil a cinco profundidades: 0,1; 0,3; 0,7; 0,9 y 1,1 m. Estas mediciones se

integraron a los efectos de obtener el contenido de agua del perfil compatible con el requerimiento del modelo. La determinación del contenido volumétrico de agua que se realizó dos días después de la siembra se utilizó para elaborar los archivos de la humedad inicial de cada sector.

Por su parte, para estimar la biomasa de maíz AquaCrop empleó un valor de Productividad del agua (WP*) de 33,7 g m⁻² (Hsiao *et al.*, 2009; Heng *et al.*, 2009) que, ajustado por un coeficiente de corrección de acuerdo a la concentración atmosférica de CO₂ en 2013 (Steduto *et al.*, 2007), corresponde a una tasa de 34,4 g m⁻².

El procedimiento de análisis se realizó principalmente por correlación y regresión entre los valores observados de CC, biomasa aérea y contenido de agua del suelo y las respectivas estimaciones de AquaCrop en cada sector. A tal efecto se emplearon, adoptando los mismos indicadores que utiliza AquaCrop, diferentes estadísticos para evaluar el desempeño del modelo que incluyen el coeficiente de determinación, la raíz cuadrada del error cuadrático medio, el coeficiente de eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe (1970) y el índice de concordancia de Willmott (1981).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

a. Evaluación de la productividad del agua en maíz bajo condiciones potenciales

Los coeficientes de desarrollo del canopeo bajo condiciones potenciales, que se obtuvieron por prueba y error considerando la diferente densidad de siembra de cada sector, se presentan en la Tabla 2. La relación entre la cobertura observada y estimada por AquaCrop presenta funciones de ajuste lineal en todos los sectores analizados que no difieren estadísticamente de la función identidad, el

coeficiente de correlación es igual o superior a 0,98, la raíz cuadrada del error cuadrático medio no supera 7,8% y el índice de concordancia de Willmott se aproxima a 1 en todos los casos.

La Figura 1 muestra la variación de la cobertura del cultivo de maíz en los sectores SO y NO del lote. Los puntos corresponden al valor de CC observado a partir de las fotografías digitales, en tanto el trazo con líneas muestra las estimaciones de AquaCrop para las condiciones meteorológicas, edáficas y de manejo del lote monitoreado en ausencia de restricciones de agua. Estas curvas describen de manera muy estrecha la variación observada, como se pone de manifiesto a partir de los índices estadísticos de la Tabla 2, en tanto un análisis comparativo expone diferencias marcadas entre ambos sectores a partir de los 80 días después de la siembra, que acontece próximo a la floración, con una declinación de CC más rápida en los sectores ubicados al norte del lote.

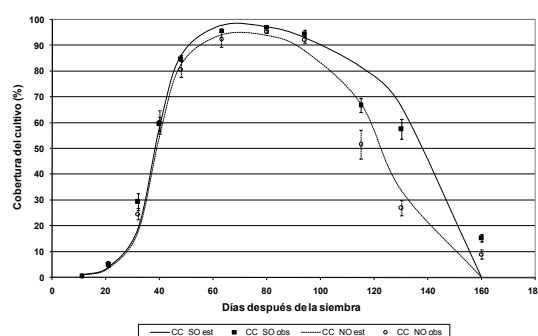


Figura 1. Variación de la cobertura observada (± 1 desvío estándar) y estimada por AquaCrop a partir de los coeficientes de desarrollo de la cobertura que muestra la Tabla 2, de acuerdo a los días después de la siembra en los sectores SO y NO del lote de maíz durante el ciclo 2013-14 en Córdoba, Argentina.

La Figura 2 presenta los valores de biomasa

Tabla 2. Coeficientes del modelo de desarrollo de la cobertura de maíz que utiliza AquaCrop y coeficientes de regresión (a: ordenada al origen; b: pendiente), coeficiente de determinación (R^2), raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), coeficiente de eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe (EF) e índice de concordancia de Willmott (d) para la relación entre los valores observados y estimados de cobertura en los diferentes sectores del lote en Córdoba, Argentina, durante el ciclo de maíz 2013-14.

Sector	Densidad (pl m ⁻²)	CC ₀ (%)	CCx	CGC (% d ⁻¹)	CDC	a	b	R ²	RMSE (%)	EF	d
SO	9,4	0,47	100	14,3	3,4	6,2	0,89	0,97	7,7	0,95	0,99
SC	9,6	0,48	100	14,3	3,4	6,4	0,91	0,97	7,3	0,96	0,99
SE	9,6	0,48	98	13,8	3,5	6,8	0,91	0,97	7,6	0,96	0,99
NO	8,4	0,42	96	14,5	4,5	2,8	0,95	0,97	6,7	0,96	0,99
NC	8,0	0,40	96	14,6	4,6	1,9	0,95	0,96	7,1	0,96	0,99
NE	8,4	0,42	95	15,0	4,0	4,0	0,90	0,96	7,7	0,95	0,99

Referencias. CC₀: tamaño inicial del canopeo (en t = 0) estimado de acuerdo a la densidad de plantas; CCx: cobertura máxima en condiciones óptimas de crecimiento; CGC: coeficiente de crecimiento del canopeo; CDC: coeficiente de declinación del canopeo.

aérea de maíz observada y las estimaciones de AquaCrop con la CC ajustada para cada sector del lote y considerando la ausencia de limitaciones por agua, nutrientes o salinidad. En general, se aprecia que los valores de biomasa observada son sistemáticamente inferiores a las estimaciones del modelo para un valor de WP^* de $34,4 \text{ g m}^{-2}$. La productividad del agua en el sector SE, no obstante, alcanza un valor muy próximo al que define el modelo de carácter potencial, de modo que este parámetro conservativo se puede considerar inicialmente adecuado para representar la eficiencia del uso del agua y convalidar el valor propuesto por Hsiao *et al.* (2009), que analizaron la estabilidad de los parámetros del modelo en distintos cultivos de maíz, y por Heng *et al.* (2009), quienes lo validaron bajo riego y en seco. A partir de relaciones lineales de carácter significativas ($P < 0,01$) en todos los casos, los resultados de la Figura 2 muestran que la productividad de biomasa observada a campo durante el ciclo 2013-14 es menor a la que estima AquaCrop, y pone en evidencia la ocurrencia de factores limitantes sobre la productividad, con una brecha productiva particularmente más notable en los sectores del norte donde ocurre una marcada disminución de la producción de materia seca, con pendientes muy similares entre si entre 0,65 y 0,67.

Habiendo convalidado la adecuación del valor de WP^* que se utiliza para estimar la producción de biomasa, se deduce que las condiciones productivas en el sector norte del lote, ya sea anteriores o preexistentes como las que se presentaron durante 2013-14, resultaron restrictivas para que el cultivo exprese su potencial. La diferencia productiva entre los sectores norte y sur ya se había expresado en los rendimientos de un cultivo de soja previo, de modo que estos resultados confirman la diferente aptitud territorial del lote y avalan la implementación de un manejo localizado. La información sobre el uso del agua que AquaCrop estima asumiendo una reposición ilimitada, se presenta en la Tabla 3, alcanzando valores entre 411 y 433 mm de acuerdo al sector. De este modo, la aplicación de una dotación de agua total de 400 mm en cinco riegos se aproxima en buena medida a los requerimientos netos del cultivo de maíz durante el ciclo 2013-14. Las láminas establecidas son similares a las que Flores-Gallardo *et al.* (2013) determinaron con AquaCrop para maíz en Sinaloa, México, cuando aplican 80% del agua respecto al tratamiento de riego sin limitación. Por su parte, estas láminas de riego también están comprendidas por las aplicadas por Heng *et al.* (2009) para validar el modelo AquaCrop en maíz bajo diferentes

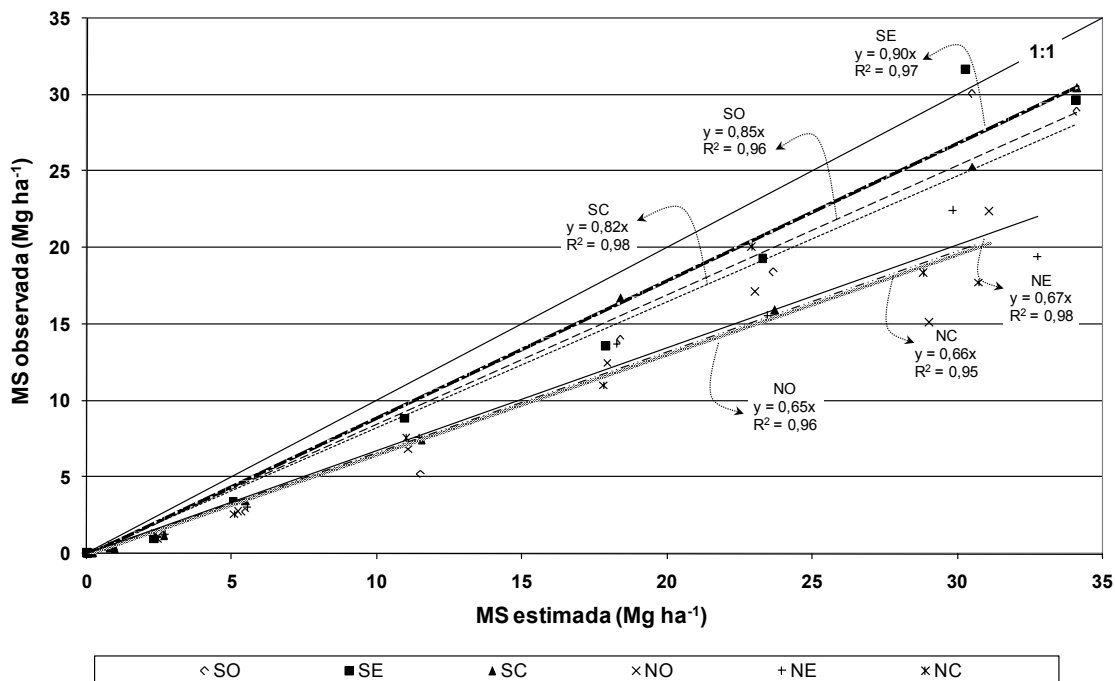


Figura 2. Relación entre la materia seca (MS) observada en distintos sectores del lote de maíz próximo a la ciudad de Córdoba, Argentina y los valores estimados por AquaCrop con una Productividad del agua (WP^*) de $34,4 \text{ g m}^{-2}$.

Tabla 3. Estimación del requerimiento neto de riego, del agua evaporada (Ev) y transpirada (T) por el cultivo de maíz en los distintos sectores del lote al sur de la ciudad de Córdoba en 2013-14.

Sector	Requerimiento neto de riego	Agua aplicada total (mm)	Ev	T	Eficiencia de aplicación %
SO	418,4	400	114,4	566,4	60
SE	424,2	400	117,2	569,7	90
SC	422,1	400	114,9	566,8	60
NO	411,3	400	137,6	508,7	40
NE	422,3	400	131,9	535,5	40
NC	432,7	400	139,6	503,3	40

condiciones climáticas.

Sin embargo, cualquier valor de eficiencia de riego que se considere representa un aumento de la diferencia entre el agua requerida y la aplicada, y pone de manifiesto que el agua disponible resultó insuficiente para mantener el crecimiento a tasa potencial. Además, si bien los valores de la tabla expresan un requerimiento de agua relativamente uniforme en el lote, la menor producción de biomasa registrada en los sectores del norte significa que la eficiencia de aplicación allí debió ser en principio más reducida.

b. Evaluación bajo condiciones reales

A partir del calendario y las láminas de riego que se aplicaron al cultivo durante el ciclo, el análisis se completa considerando distintos valores de eficiencia de aplicación y distribución del agua para cada uno de los sectores del lote, cuyos montos se establecieron por prueba y error comparando la condición del cultivo observada a campo con las estimaciones que produce AquaCrop. De esta forma, conjuntamente con la CC y la biomasa aérea, cuya evolución temporal se muestra en las Figuras 3 y 4, respectivamente, el contenido de agua del perfil se incorpora a la evaluación a modo de variable independiente y ligada directamente con la dinámica del agua (Figura 5). Los resultados del análisis estadístico para la relación entre valores observados y estimados, utilizando distintos indicadores del ajuste alcanzado, se presentan en la Tabla 4.

En tanto los indicadores estadísticos expresan una marcada correspondencia entre los valores observados y estimados de CC (Tabla 4), su variación a lo largo del ciclo de maíz muestra diferencias entre los sectores, siendo la CC de los sectores ubicados al norte sensiblemente menores que los del sur. Si bien la diferencia queda establecida desde el comienzo del ciclo por una densidad de siembra más baja, el contraste se acentúa particularmente en el tramo descendente de la cobertura

durante la etapa reproductiva. La CC más reducida representa una menor capacidad de transpiración que repercute directamente sobre la producción de biomasa y, como muestra la Figura 4, ocasiona una tasa de productividad del agua más baja.

La producción de materia seca en los tres lugares monitoreados al norte del lote presenta hacia el final del ciclo valores que están reducidos en una tercera parte respecto a los del sur. Al igual que con la CC, los indicadores estadísticos de la Tabla 4 en términos del coeficiente de determinación, del coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (1970) y el índice de concordancia de Willmott (1981), con valores muy próximos a 1 en todos los casos, expresan que la relación lineal entre la biomasa aérea observada y los valores estimados por el modelo es muy consistente, si bien en la Figura 4 se aprecia una ligera tendencia a la sobrestimación.

La producción final de biomasa en los sectores ubicados al sur del lote de maíz alcanzaron valores, tanto observados como estimados, ligeramente mayores a 30 Mg ha⁻¹. Esta productividad es superior a la que obtuvo Heng *et al.* (2009) para tratamientos sometidos a irrigación completa que, dependiendo de la ubicación geográfica, presentan valores entre 22 y 28 Mg ha⁻¹. Sin embargo, Hsiao *et al.* (2009) presentan algunos resultados de experimentos bajo riego con valores de biomasa aún más elevados entre 35 y 36 Mg ha⁻¹, de modo que los resultados alcanzados en Córdoba, Argentina, con una extensión de ciclo similar se pueden considerar comparables. Abedinpoura *et al.* (2012), quienes evaluaron AquaCrop en un ambiente semiárido de la India, presentan valores máximos de producción de biomasa de maíz sólo de 18 Mg ha⁻¹ en los tratamientos que recibieron un nivel de fertilización nitrogenada sin restricción y la mayor asignación de riego. Este valor notablemente más bajo se asocia con una menor densidad de siembra y un ciclo de cultivo más corto de entre 80 y 90 días.

Habiendo asignado por prueba y error los valores de eficiencia de riego para cada sector que

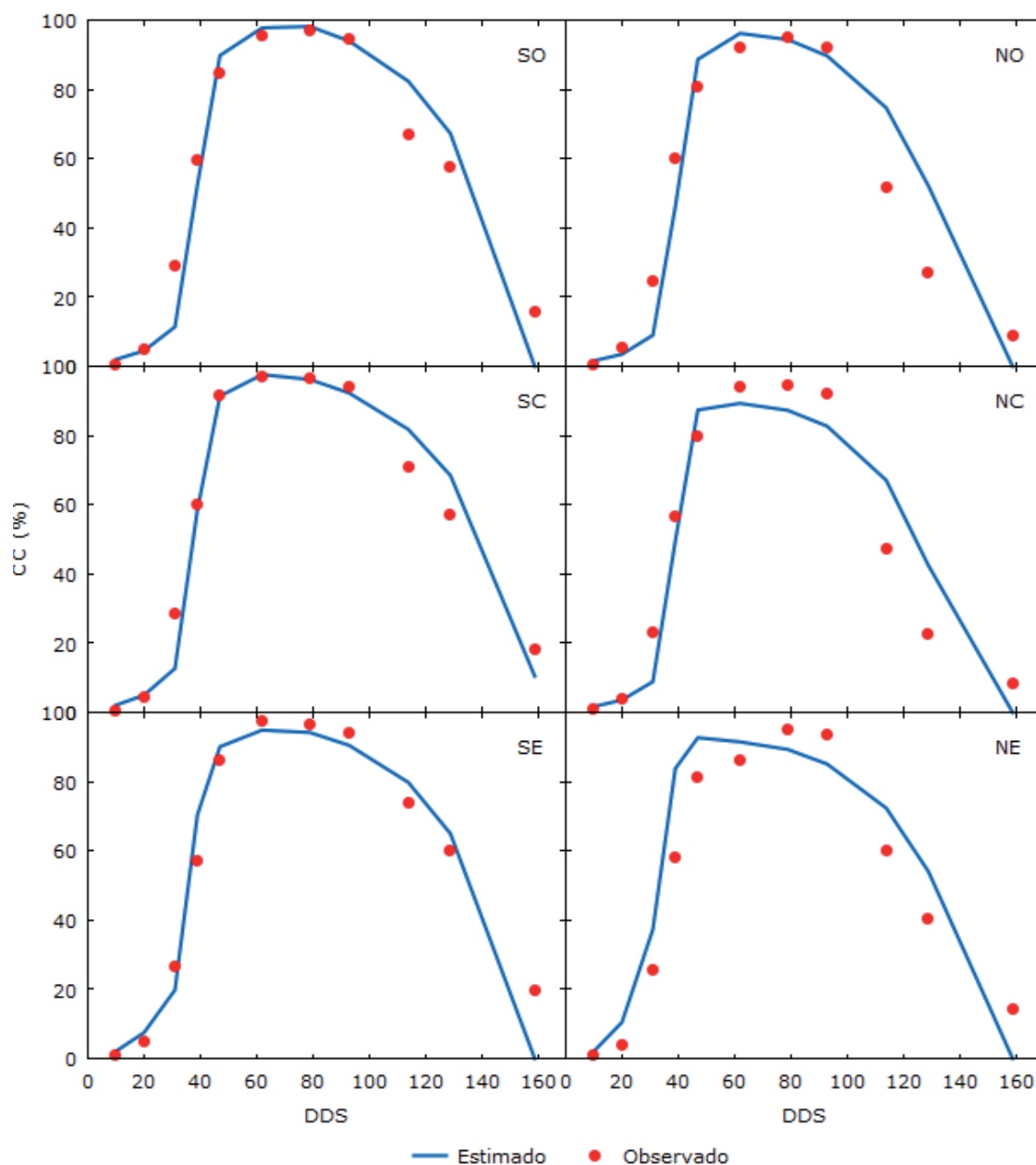


Figura 3. Cobertura del cultivo (CC) observada en distintos sectores del lote de maíz en Córdoba, Argentina, y estimados con AquaCrop de acuerdo a los valores observados y estimados del contenido de agua del suelo hasta 1,1 m de profundidad. Comparado con CC y la producción de biomasa, los indicadores estadísticos de la Tabla 4 ponen de manifiesto que la asociación es menos ajustada en este caso, incluso con cierta falta de

muestra la Tabla 3, la Figura 5 presenta la relación lineal entre los valores observados y estimados del contenido de agua del suelo hasta 1,1 m de profundidad. Comparado con CC y la producción de biomasa, los indicadores estadísticos de la Tabla 4 ponen de manifiesto que la asociación es menos ajustada en este caso, incluso con cierta falta de

consistencia en el sector SC, de acuerdo al valor negativo que acusa allí el coeficiente de Nash-Sutcliffe. De todos modos, como muestra la Figura 5 la relación lineal para el conjunto completo de la información sobre el contenido de agua se presenta estadísticamente muy significativa ($P < 0,001$), en tanto los indicadores de la capacidad predictiva

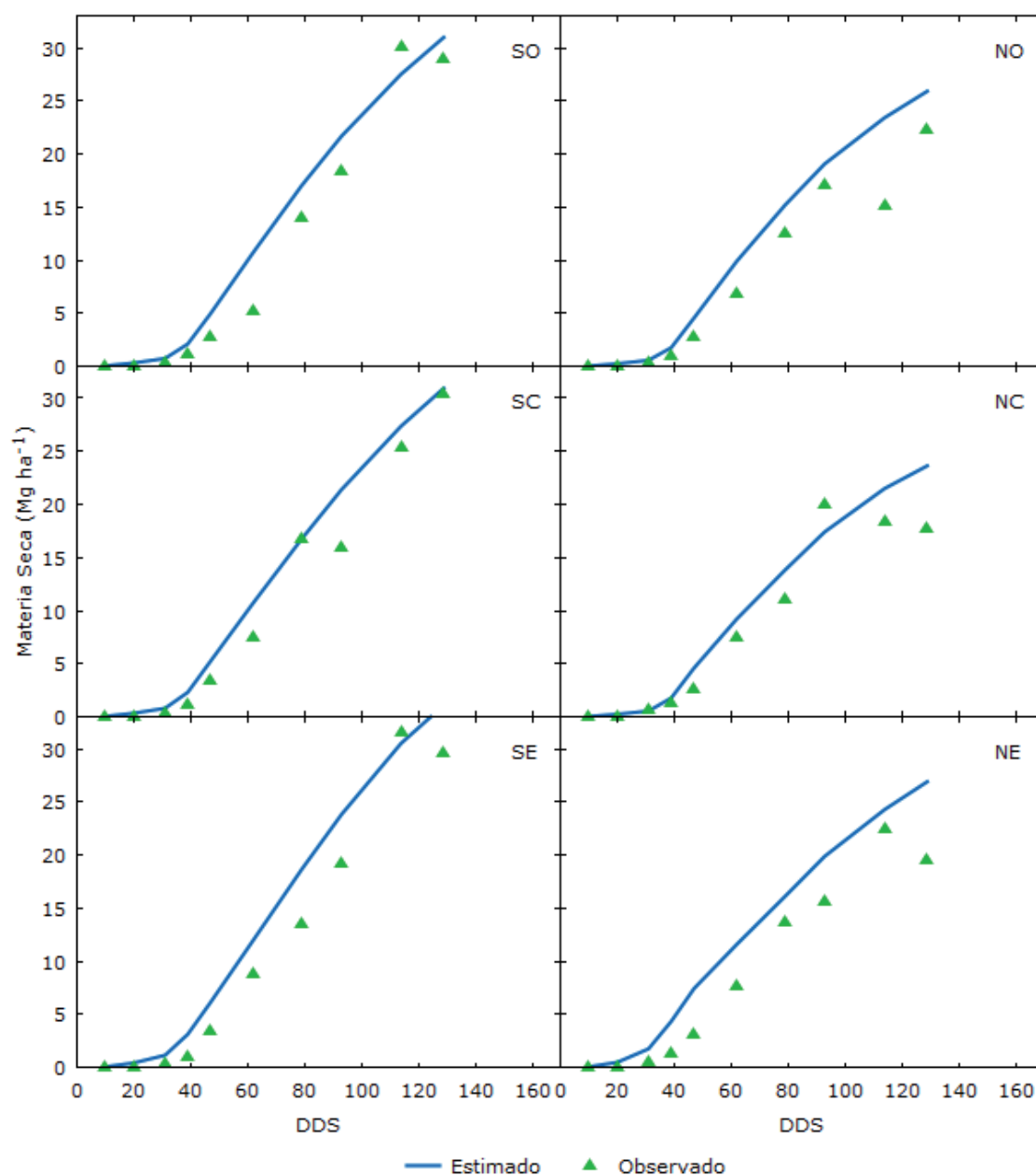


Figura 4. Materia seca observada en distintos sectores del lote de maíz en Córdoba, Argentina, y valores estimados con AquaCrop de acuerdo a los días después de la siembra (DDS) en 2013-14.

del modelo tienen valores aceptables. Además, el trazado de la curva de regresión no se aparta demasiado de la función de identidad en el rango de agua útil, incluso en el caso de los valores medidos y estimados en SE.

La merma productiva registrada hacia el norte del lote se explica, de acuerdo a la información de

la Figura 5, en razón del contenido de agua del suelo relativamente menor que se registró en esos sectores a los 79 y 114 días después de la siembra, es decir entre floración y maduración del cultivo, y que se pone de manifiesto por igual a partir de los registros observados de humedad como con los estimados por el modelo. Es probable que

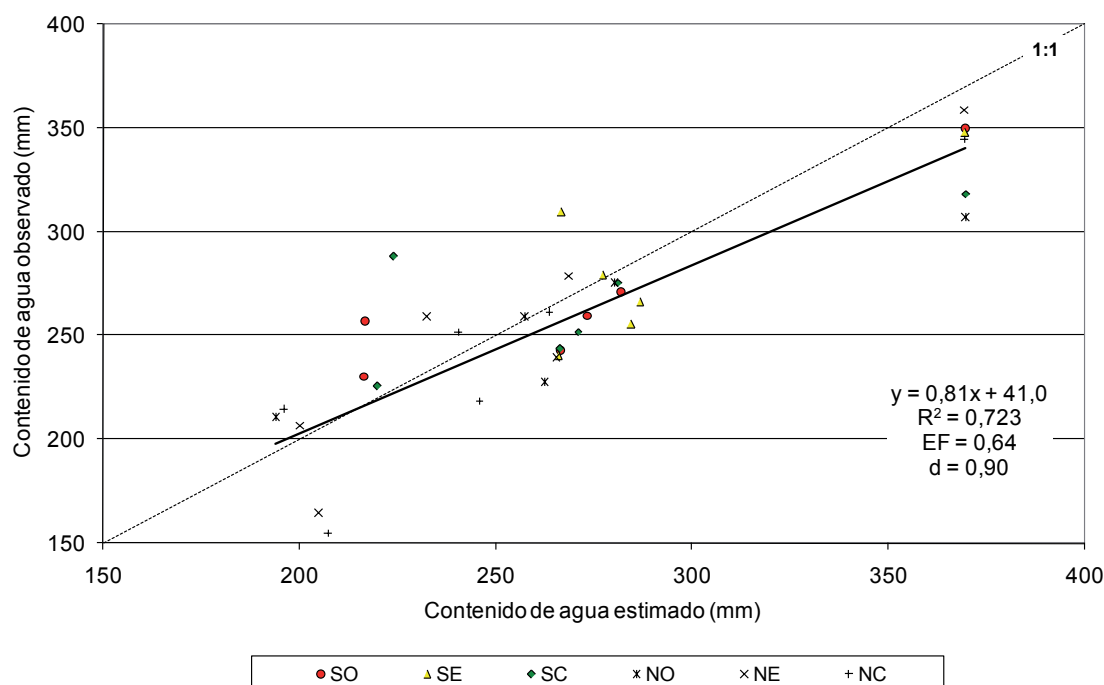


Figura 5. Relación entre el contenido de agua del suelo observado hasta 1,1 m y los valores estimados por AquaCrop en distintos sectores del lote de maíz en Córdoba, Argentina, en 2013-14. Las referencias son iguales a la Tabla 4.

Tabla 4. Valoración estadística de la relación lineal entre valores observados de cobertura del cultivo, materia seca y contenido de agua del suelo del perfil hasta 1,2 m y estimados por AquaCrop en los distintos sectores del lote de maíz en Córdoba, durante el ciclo 2013-14.

Variable	Indicador estadístico		Sector					
			SO	SC	SE	NO	NC	NE
Cobertura del cultivo (n=11)	R ²	%	0,95	0,97	0,96	0,89	0,91	0,91
	RMSE		9,5	7,1	8	12,7	11,1	12,2
	EF		0,93	0,96	0,95	0,87	0,91	0,87
	d		0,98	0,99	0,99	0,97	0,98	0,97
Materia seca (n=10)	R ²	Mg ha ⁻¹	0,97	0,98	0,97	0,97	0,94	0,96
	RMSE		2,58	2,23	3,00	3,26	2,57	3,58
	EF		0,95	0,96	0,93	0,83	0,89	0,81
	d		0,99	0,99	0,98	0,97	0,98	0,96
Contenido de agua del suelo (n=6)	R ²	mm	0,83	0,49	0,57	0,70	0,83	0,86
	RMSE		22,7	35,9	26,5	41,4	27,5	23,5
	EF		0,65	-0,37	0,46	0,45	0,77	0,85
	d		0,93	0,79	0,86	0,86	0,94	0,96

Referencias. R²: Coeficiente de determinación; RMSE: Raíz cuadrada del error cuadrático medio; EF: Coeficiente de eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe; d: Índice de concordancia de Willmott.

este contenido de agua más reducido, consecuente con la menor eficiencia de riego utilizada en la simulación, además de repercutir sobre los componentes del rendimiento, haya provocado el adelanto de la senescencia como muestra la disminución anticipada de CC en la Figura 3.

Otra forma de mostrar los resultados de la simulación tendiente a evaluar de manera integral la capacidad predictiva de AquaCrop se presenta en la Figura 6, que confronta los valores observados y estimados del rendimiento de granos en los distintos sectores. Los valores observados y esti-

mados de rendimiento, como variable que sintetiza la interacción genotipo-ambiente, presentan una correlación estadísticamente aceptable ($P < 0,016$), si bien se registra una sistemática y acentuada sobrestimación por parte de AquaCrop. Más allá de cierta imprecisión del modelo, claramente se pone de manifiesto el marcado contraste productivo entre los sectores del lote asociado, en primer lugar, a la menor densidad de siembra, y en segundo término a la falta de agua que redujo la biomasa y la productividad del maíz.

La capacidad para simular la variación temporal del contenido de agua agregado espacialmente es importante en los modelos utilizados con fines agrícolas e hidrológicos (Batchelor et al., 2002). Los modelos suelo-planta-atmósfera como AquaCrop han probado ser efectivos para simular el balance de agua del suelo cuando el drenaje se asume vertical (Garrison et al., 1999). No obstante, esta suposición no es correcta en todos los casos, siendo necesario recurrir en muchos lotes a modelos más complejos como SALUS-TERRAE para simular el flujo de agua superficial y sub superficial de manera tridimensional (Basso, 2000). Este modelo tiene la capacidad de simular el agua estancada en las depresiones, el movimiento superficial y subsuperficial del agua, así como los procesos de escorren-

tía que reproducen el ingreso o egreso del agua en cada sector del lote.

Reconociendo la limitación que AquaCrop presenta en este sentido, la buena aptitud para reproducir conjuntamente la dinámica temporal de CC, la materia seca producida, la variación del contenido de agua durante el ciclo y el rendimiento de granos en diferentes sectores de un lote de maíz regado por surcos y siembra variable, avalan el empleo del modelo en su capacidad para expresar la productividad del cultivo. Asimismo, su simpleza y versatilidad lo hacen apropiado para ser usado con la finalidad de analizar las consecuencias económicas de ciertas prescripciones o, como en este caso, a los efectos de evaluar el comportamiento productivo de un lote de maíz con un manejo del agua de riego que, por causas operativas o de su naturaleza intrínseca, no resultó uniforme.

CONCLUSIONES

Una vez calibrado de acuerdo a las condiciones de cobertura del cultivo registradas a campo, AquaCrop estimó de manera adecuada la producción de biomasa de maíz a tasa potencial a partir de un valor de WP^* de $34,4 \text{ g m}^{-2}$, con un requerimiento neto de

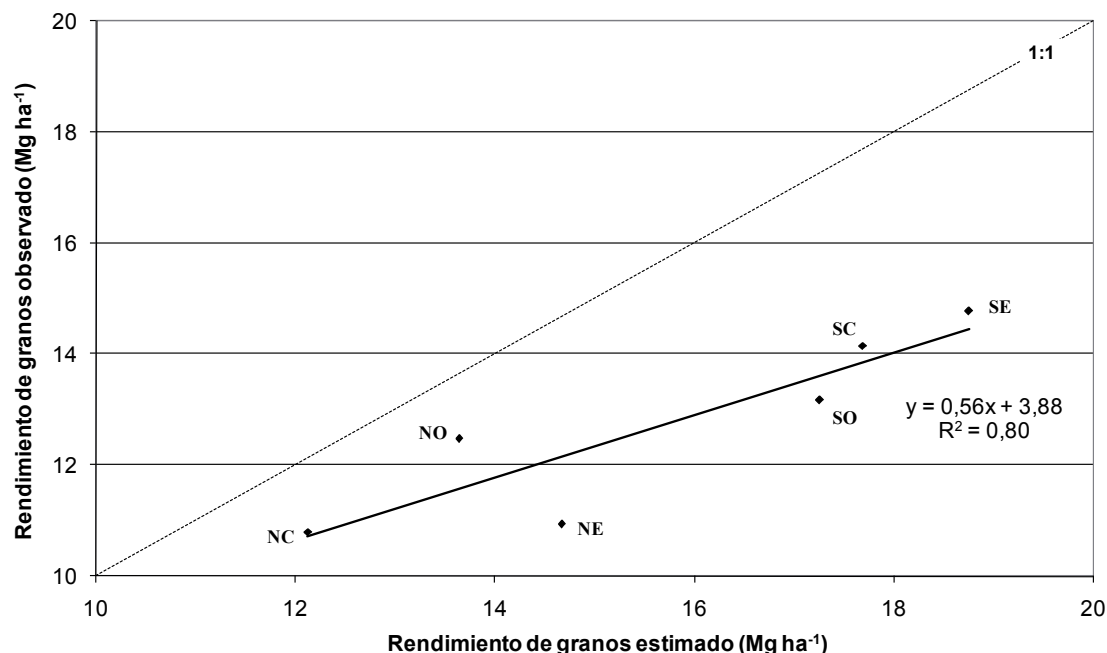


Figura 6. Relación entre el rendimiento observado y estimado por AquaCrop en los sectores monitoreados del lote de maíz en Córdoba, durante el ciclo 2013-14.

riego entre 411 y 433 mm. Si bien el cultivo recibió 5 riegos por surco de 80 mm cada uno, el lote presentó diferencias productivas en el ciclo 2013-14, de modo que la productividad del sector norte resultó marcadamente inferior a la del sector sur. Este comportamiento productivo sistemático respecto al de otros años/cultivos confirma la conveniencia de adoptar un manejo localizado del lote. Por otra parte, a los efectos de producir de manera integral relaciones consistentes entre los valores observados y estimados de CC, materia seca, contenido de agua del suelo y rendimiento de grano la simulación de riego debió considerar una eficiencia de aplicación diferente para los sectores monitoreados, de 40% en el norte y mayor o igual a 60 % en los sectores del sur del lote.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Córdoba por el apoyo económico recibido para realizar esta investigación.

REFERENCIAS

- Abedinpour, M., A. Sarangi, T.B.S. Rajput, Man Singh, H. Pathak, and T. Ahmad, 2012. Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management* 110:55-66.
- Andarzian, B., M. Bannayan, P. Steduto, H. Mazraeh, M.E. Barati, M.A. Barati, and A. Rahnama, 2011. Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agricultural Water Management* 100:1-8.
- Basso, B., 2000. Digital terrain analysis and simulation modeling to assess spatial variability of soil water balance and crop production. Ph.D. Dissertation, Michigan State University, East Lansing, MI.
- Batchelor, W.D., B. Basso, and J.O. Paz, 2002. Examples of strategies to analyze spatial and temporal yield variability using crop models. *Europ. J. Agronomy* 18:141-158.
- Dardanelli, J.D., O.A. Bachmeier, R. Sereno, and R. Gil, 1997. Rooting depth and soil water extraction patterns of different crops in a silty loam Haplustoll. *Field Crop Res.* 54:29-38.
- de la Casa, A., G. Ovando, L. Bressanini, and J. Martínez, 2013a. AquaCrop model calibration in potato and its use to estimate yield variability under field conditions. *Atmospheric and Climate Sciences* 2013(3):397-407.
- de la Casa, A., G. Ovando, L. Bressanini y J. Martínez, 2013b. Estimación de la cobertura del suelo y evaluación de la fertilización en papa con registros de cámaras digitales convencionales y modificadas. *Anales 42 Jornadas Argentinas de Informática* 94-104.
- Etheridge, D.M., L.P. Steele, R.L. Langenfelds, R.J. Francey, J.-M. Barnola, and V.I. Morgan, 1996. Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO₂ over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn. *J. Geophys. Res.* 101(D2):4115-4128. doi: 10.1029/95JD03410.
- Flores-Gallardo, H., W. Ojeda-Bustamante, H. Flores-Magdaleno, E. Sifuentes-Ibarra y E. Mejía-Saénz, 2013. Simulación del rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) en el norte de Sinaloa usando el modelo Aquacrop. *Agrociencia* 47:347-359.
- Garrison, M.V., W.D. Batchelor, R.S. Kanwar, and J.T. Ritchie, 1999. Validation of the CERES-Maize water and nitrogen balances under tile drained conditions. *Agric. Syst.* 62:189-200.
- Gitelson, A.A., 2004. Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. *Journal of Plant Physiology* 161(2):165-173.
- Heng, L.K., T.C. Hsiao, S.R. Evett, T.A. Howell, and P. Steduto, 2009. Testing of FAO AquaCrop model for rain-fed and irrigated maize. *Agron. J.* 101:488-498.
- Hsiao, T.C., L.K. Heng, P. Steduto, B. Rojas-Lara, D. Raes, and E. Fereres, 2009. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agron. J.* 101:448-459.
- Hunt, E.R., W.D. Hively, S. Fujikawa, D. Linden, C.S. Daughtry, and G. McCarty, 2010. Acquisition of NIR-green-blue digital photographs from unmanned aircraft for crop monitoring. *Remote Sensing* 2(1):290-305.
- Kitchen, N.R., S.T. Drummond, E.D. Lund, K.A. Sudduth, and G.W. Buchleiter, 2003. Soil electrical conductivity and topography to yield for three contrasting soil-crop systems. *Agron. J.* 95:483-495.
- Li, Y., D. Chena, C.N. Walker, and J.F. Angus, 2010. Estimating the nitrogen status of crops using a digital camera. *Field Crops Research* 118:221-227.
- Mkhabela, M.S., and P.R. Bullock, 2012. Performance of the FAO AquaCrop model for wheat grain yield and soil moisture simulation in Western Canada. *Agricultural Water Management* 110:16-24.
- Moran, M.S., Y. Inoue, and E.M. Barnes, 1997. Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. *Rem. Sens. Environ.* 61:319-346.
- Mulla, D.J., 2013. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering* 114:358-371.
- Nash, J.E., and J.V. Sutcliffe, 1970. River flow forecasting

- through conceptual models. Part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10:282-290.
- Oliver, Y.M., M.J. Robertson, and M.T.F. Wong, 2010. Integrating farmer knowledge, precision agriculture tools, and crop simulation modelling to evaluate management options for poor-performing patches in cropping fields. *Europ. J. Agronomy* 32:40-50.
- Pierce, F.J., and P. Nowak. 1999. Aspects of precision agriculture. *Adv. Agron.* 67:1-85.
- Raes, D., P.Steduto, T.C. Hsiao, and E. Fereres, 2009. AquaCrop-The FAO crop model to predict yield response to water: II Main algorithms and software description. *Agron. J.* 101:438-447.
- Steduto, P., T.C. Hsiao, D. Raes, and E. Fereres, 2009. AquaCrop-The FAO crop model for predicting yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agron. J.* 101:426-437.
- Steduto, P., T.C. Hsiao, and E. Fereres, 2007. On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrig. Sci.* 25:189-207.
- Stricevic, R., M. Cosic, N. Djurovic, B. Pejic, and L. Maksimovic, 2011. Assessment of the FAO AquaCrop model in the simulation of rainfed and supplementally irrigated maize, sugar beet and sunflower. *Agricultural Water Management* 98:1615-1621.
- Timlin, D., Y. Pachepsky, C. Walthall, and S. Loechel, 2001. The use of a water budget model and yield maps to characterize water availability in a landscape. *Soil & Tillage Research* 58:219-231.
- Willmott, C., 1981. On the validation of models. *Physical Geography* 2:181-194.

Monitoreo y evaluación de las condiciones hídricas extremas (sequías y excesos de humedad) en Argentina

Zanvettor R.E.; A.C. Ravelo y P.E.C. Boletta

RESUMEN

Los extremos hídricos (sequías y excesos de humedad) son adversidades que ocurren en casi todas las regiones de Argentina. Dichos eventos generan enormes perjuicios a los sistemas productivos agrícolas en las distintas etapas de sus ciclos, dependiendo de su intensidad y duración. La variabilidad y la recurrencia de dichos extremos hídricos fue determinada mediante un continuo monitoreo y evaluación a nivel nacional por medio de indicadores agrometeorológicos y se pudo visualizar claramente su variabilidad temporal y geográfica para el período 1980-2016. Los resultados son difundidos a través de una página web en internet y actualizados mensualmente. Se evaluaron las pérdidas económicas en soja durante períodos recientes con sequías (2012) y con excesos de humedad (2016).

Palabras clave: Índices agrometeorológicos, variabilidad hídrica, pérdidas agrícolas

Zanvettor R.E.; A.C. Ravelo and P.E.C. Boletta, 2016. Monitoring and assessment of hydrological extremes (drought and moisture excess) in Argentina. RADA VII: 15-25

SUMMARY

Hydrological extremes (droughts and moisture excess) are adversities happening in most regions of Argentina. Such events cause large damages to the agriculture productive systems in different stages of the cycles, depending of their intensity and duration. The variability and recurrence of such hydrological extremes was determined by a continuing monitoring and assessment at national level using agrometeorological indices and the time and geographic variability for the period 1980-2016 was clearly established. The results are placed in internet web page and updated in a monthly basis. The economic losses in soybean crop were assessed during recent drought (2012) and excess moisture (2016) periods.

Key words: Agrometeorological indexes, hydrological variability, agriculture losses

R.E. Zanvettor y A.C. Ravelo y P.E.C. Boletta: CREA-IMBIV/CONICET, Ing. Agr. Félix A. Marrone 746, C. Universitaria, Córdoba. Correspondencia a: zanvetor@agro.unc.edu.ar

INTRODUCCIÓN

Los conocimientos que se disponen en la actualidad no permiten evitar la ocurrencia de sequías o excesos de humedad, pero si es posible con series de tiempo de 30 o más años de datos agrometeorológicos que permitan un análisis estadístico confiable, realizar una identificación, ponderación y previsión de dichos fenómenos ambientales adversos.

El incremento de la variabilidad climática que se registra en las últimas décadas se pone en evidencia por una mayor frecuencia de ocurrencia de extremos hídricos cuya visualización más evidente son las sequías y las zonas afectadas por los excesos hídricos con superficies anegadas que permanecen cubiertas por las aguas durante un tiempo prolongado. En algunos casos y que una vez que las aguas se han retirado, los suelos recién recuperan su fertilidad luego de un tiempo prolongado de hasta tres o cuatro años. La sequía se la considera en la categoría de las adversidades naturales complejas porque su inicio es difícil de detectar y recién se manifiesta después que ha causado muchos efectos perjudiciales para el ambiente y la sociedad. Por lo general, hay áreas geográficas donde las sequías son recurrentes con distintas frecuencias y otras en las que ésta adversidad es un fenómeno esporádico, pero cuando se presenta provoca muchos daños ambientales, con sus afectaciones sociales y económicas derivadas.

Es necesario establecer la diferencia que existe entre las sequías y la aridez, dado que las regiones áridas poseen normalmente escasas precipitaciones y es una característica permanente del clima, mientras que las sequías son situaciones de adversidades climáticas temporarias (Ravelo, 2000).

Las sequías se clasifican, según su génesis y/o efectos adversos. Por lo general, se registra “sequía meteorológica” cuando las precipitaciones son muy inferiores a la esperada y la deficiencia hídrica se prolonga por un espacio de tiempo bastante largo. Cuando las condiciones de sequías se producen en zonas agrícolas y determinan una disminución de las reservas de agua del suelo y una elevada evapotranspiración, esa situación se denomina “sequía agrícola” y sus efectos son una considerable disminución de los rendimientos de los cultivos y de la productividad del ganado por la pérdida de la calidad de las pasturas o por la carencia de las mismas. En los casos donde la sequedad ambiental produce una pérdida considerable del caudal de las

aguas superficiales y un descenso del nivel de las napas de aguas subterráneas, se dice que se trata de una “sequía hidrológica”. Todos estos tipos de sequías determinan fuertes pérdidas económicas en las actividades agrícolas, ganaderas e industriales y también consecuencias sociales conexas, como son la inseguridad en los suministros alimentarios, estos efectos son propios de lo que se denomina una “sequía económica” (Ravelo, 1980; Planchuelo & Ravelo, 1985; White & Walcott, 2009; Ravelo, 2012). La carencia de agua suficiente para satisfacer la demanda que exige la atmósfera y los sistemas productivos, produce un estado de estrés en las plantas, que conduce a una disminución de los rendimientos de los cultivos y de la biomasa de las pasturas y de la calidad nutritiva. Las pérdidas económicas ocasionadas por las sequías son en algunos casos semejantes o superiores a las producidas por otras catástrofes naturales como son los huracanes, inundaciones, incendios y tsunamis.

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) ha centralizado los esfuerzos internacionales para establecer estrategias de respuesta y mitigación a las sequías (EIRD/ONU, 2009). El reciente congreso sobre las sequías en Valencia (España) refleja la activa participación europea y de varios países a nivel mundial en las investigaciones y actividades relacionadas a la adversidad climática (ICD, 2015). En Argentina, existen varias instituciones que contribuyen al proceso de detección y evaluación de las sequías siendo entre ellas el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) mediante el registro de las precipitaciones y evaluación de variables ambientales, la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) con el suministro y utilización de información satelital, el Instituto Nacional de Tecnología Agrícola (INTA) y el Centro de Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales (CREAN/CONICET-UNC) la generación de índices específicos para evaluar los extremos hídricos.

Los extremos hídricos producen cuantiosas pérdidas económicas e importantes repercusiones negativas en la sociedad y el ambiente. Por lo tanto, es importante conocer su variabilidad temporal y geográfica de los excesos o deficiencias hídricas a los fines de lograr su mitigación e incrementar la resiliencia social y ambiental.

MATERIALES Y METODOS

Se utilizó un banco de datos agrometeorológicos consistente en series históricas de 1980 a 2016 de precipitación diaria y valores promedios de evapotranspiración para la red nacional de

estaciones climatológicas (CREAN, 2016; SMN, 2016). La base de datos ha incorporado valores mensuales del índice satelital de vegetación NDVI (USGS, 2016).

La identificación y evaluación de ocurrencia de extremos hídricos se ha realizado mediante la utilización de índices *ad hoc* cuya efectividad ha sido comprobada en varios países y se emplean con éxito en sistemas operativos de información ambiental (CONAGUA, 2014; CREAN, 2016; JRC, 2016; Ravelo et al., 2014a; UNL, 2016). Los índices utilizados son los siguientes:

- El Índice Estandarizado de Precipitación (SPI por sus siglas en inglés), fue desarrollado por McKee (1993) y clasifica los períodos húmedos y secos en distintas categorías en una escala de nueve valores que van desde la sequía extrema a la humedad extrema. El SPI ha demostrado ser muy confiable para determinar la ocurrencia y evaluación de las sequías en la pradera pampeana argentina (Zanvetor y Ravelo, 2000).

- El Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PSDI por sus siglas en inglés) (Palmer, 1965) fue concebido para medir deficiencias y excesos de humedad en el suelo. Este índice se basa en el cálculo del balance hídrico del suelo mediante la consideración de los ingresos de agua pluviométrica y las pérdidas de agua por efecto de la demanda atmosférica. Este índice permite evaluar los períodos secos y húmedos, la variabilidad mensual y la tendencia de los extremos hídricos en una serie histórica de años.

- El Índice de Humedad de Cultivos (CMI por sus siglas en inglés) fue diseñado para evaluar el estado hídrico de los cultivos en las principales regiones productoras de Estados Unidos (Palmer, 1968), y se basa en los procedimientos para el cálculo del PSDI para monitorear en forma periódica las condiciones de cultivos o pasturas. A diferencia del PSDI que monitorea condiciones húmedas y secas en períodos extendidos, el CMI fue diseñado para evaluar las condiciones hídricas a corto plazo. El CMI responde rápidamente a las condiciones cambiantes y se puede utilizar para comparar las condiciones de humedad en diferentes lugares. La rápida respuesta de CMI a las condiciones reinantes no permite evaluar las condiciones hídricas a largo plazo. Por ejemplo, una lluvia corta y cuantiosa durante un período de sequía puede elevar considerablemente el valor de CMI y por lo tanto indique condiciones adecuadas o de exceso de humedad, mientras que el período de sequía a largo plazo aún continúa.

- El índice de vegetación normalizado (NDVI, por sus siglas en inglés) (Tucker, 1979; Liu and Kogan,

1996; Kogan, 1997) fue utilizado usando diferencia de imágenes (NDVIdif) del satélite MODIS (Justice & Townshend, 2002). Estas se generaron al restar una imagen de un mes determinado, en el cual los índices de sequía indicaban la ocurrencia del evento y una imagen promedio obtenida de la serie 1998-2015. La magnitud de las diferencias negativas o positivas indican la intensidad de la sequía o el exceso de humedad.

Los índices citados más arriba son una aproximación para describir la situación hídrica real y ellos en forma individual no se pueden considerar ideales. Por lo tanto, es importante utilizar dos o más índices simultáneamente para verificar la convergencia de resultados que pone en evidencia la ocurrencia de los extremos hídricos. Por otro lado, la ventaja de usar índices es que ellos pueden ser representados en gráficos o mapas para visualizar de una forma clara su variabilidad temporal o geográfica y así monitorear la presencia de una sequía o de exceso hídrico.

Ravelo et al. (2014b) proponen un sistema de monitoreo, evaluación y pronóstico de las sequías que puede ser utilizado para la planificación de acciones de alerta temprana y mitigación de los fenómenos de sequía. Dicho sistema ha sido implementado en forma operativa en el CREAN para generar índices mensuales utilizados en el monitoreo y evaluación de los extremos hídricos. Los resultados se generan mensualmente y están disponibles la página web (www.crean.unc.edu.ar). La Figura 1 muestra los índices disponibles en una serie histórica desde 1980 a la fecha en dos tipos de formatos digitales.

El sistema de monitoreo y evaluación de los extremos hídricos que posee el CREAN es utilizado en distintas escalas geográficas tanto a nivel provincial como nacional. El cálculo de los índices y su representación gráfica se realiza mediante el programa de computadora denominado Sistema Operativo de Sequias (SOS). El SOS consiste en un programa desarrollado en lenguaje multiplataforma C++ y utiliza módulos del sistema operativo Windows e IDRISI para su ejecución y obtención de resultados numéricos y cartográficos (Ravelo, 2012).

Las pérdidas agro-económicas causadas por sequías o excesos hídricos en el país han sido estimadas considerando las reducciones en los rendimientos por el efecto de las deficiencias o excesos hídricos, respecto a los rendimientos promedios para la región. Las estadísticas de los cultivos (serie 1990-2014) fueron provistas por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGyP, 2013) y la Bolsa de Cereales de Córdoba

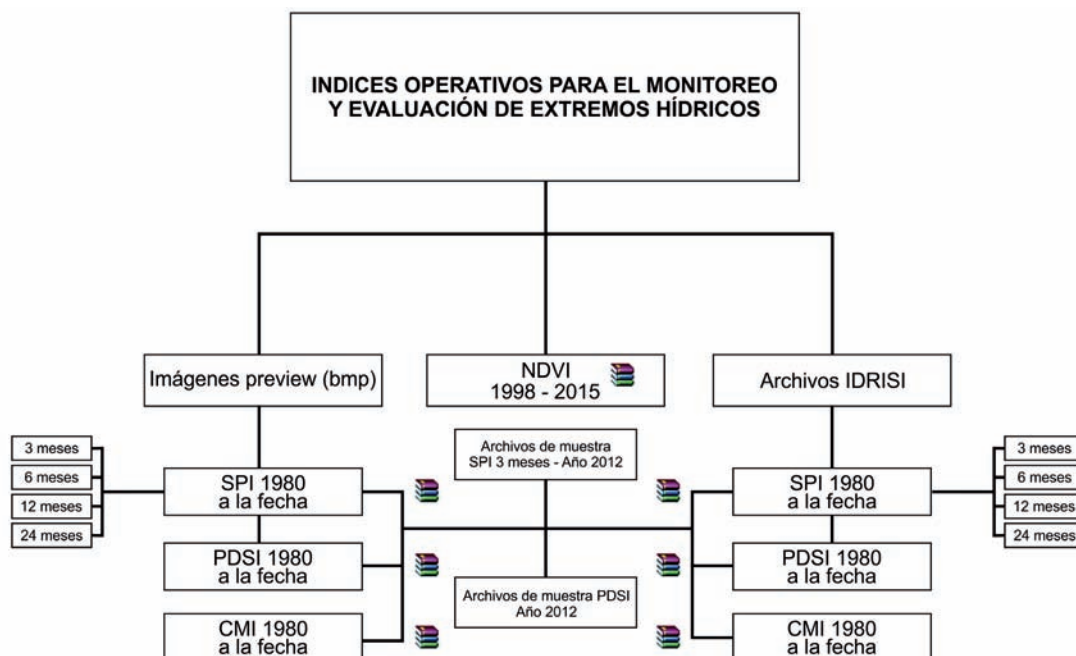


Figura 1. Diagrama de flujo de los índices operativos para el monitoreo y evaluación de los extremos hídricos disponibles en la página web del CREAN (www.crean.unc.edu.ar).

(BCC, 2016). Para el análisis de daños por sequías se compararon porcentualmente los rendimientos registrados en 2011-2012 con los rendimientos promedios de los años sin la ocurrencia de sequías extraídos de la serie de valores de PDSI que marcaron un índice superior a -0,9. La reducción porcentual se utilizó para determinar las pérdidas en producción de granos (toneladas) y sus valores monetarios (en dólares) según el precio de los granos en el momento de cosecha. En el caso de daños por excesos de humedad durante 2015/16 se presentan las producciones perdidas y sus montos económicos para departamentos seleccionados de la provincia de Córdoba.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como consecuencia de un episodio de sequía extrema ocurrido durante el período primavera-vernal de 2008-2009 en la provincia de Córdoba se puso en marcha un programa de "Monitoreo, Evaluación e Impacto de las Sequías en la Provincia de Córdoba". Los objetivos del programa fueron generar boletines cada diez días o decádicos que evaluaran la situación agrometeorológica provincial y los impactos de la sequía sobre los cultivos y difundir esa información en forma impresa y digital

a las autoridades provinciales y a los agricultores.

La Figura 2 muestra la carátula de un Boletín elaborado por el CREAN y los mapas de la provincia de Córdoba en donde se representan las condiciones de sequía usando el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) para fines de agosto y principios de setiembre de 2008.

En el primer mapa (3ra década de agosto) se puede observar que una sequía moderada indicada con color amarillo, se extiende en forma de medialuna por el oeste de la provincia, sequías severas indicadas en color marrón claro y sequías extremas señaladas con color rojo, se extienden hacia el Este provincial. En el mapa que se encuentra a continuación (2da. década de setiembre) se observa una retracción en las áreas con sequías, en particular en la zona noroeste como resultado de precipitaciones registradas en la zona centro y norte de la provincia; sin embargo, el epicentro de las sequías extremas se mantiene en el Departamento de Marcos Juárez que es una de las zonas más importante de la producción agrícola provincial. En el Boletín se dan a conocer también los estados de los principales cultivos y la afectación por la falta de agua. Se pudo comprobar la efectividad de la información suministrada en los boletines para establecer la vulnerabilidad de los cultivos durante una de las sequías de mayor

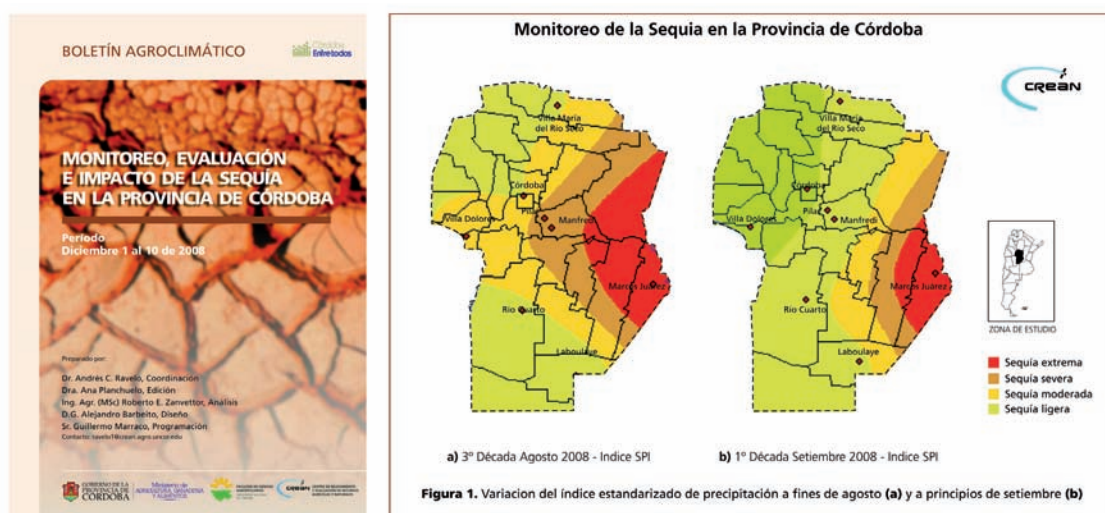


Figura 2. Carátula del Boletín y mapas de la provincia de Córdoba mostrando las áreas afectadas por sequías según la escala de colores del Índice Estandarizado de Precipitación, para los meses de agosto (3ra década) y septiembre (1ra década) de 2008.

magnitud alcanzada en los últimos 28 años para Marcos Juárez y alrededores.

La Figura 3 muestra un ejemplo del PSDI mensual para la localidad de Marcos Juárez (provincia de Córdoba, Argentina) en una serie de 30 años, desde 1985 al 2016. En la figura se puede apreciar que las sequías de mayor intensidad en épocas recientes corresponden a los períodos 2007-2009 y 2011-2012. Las sequías de los meses del primer período variaron desde sequía extrema a sequía

severa, siendo los meses de marzo de 2008 hasta agosto de 2009 los más críticos. En 2011-2012 el período ha sido más corto y las sequías no fueron tan intensas, pero se presentaron durante el ciclo de estado fenológico crítico de los cultivos termófilos, produciendo una fuerte caída de la superficie cosechada y de los rendimientos. Los excesos de humedad corresponden a meses muy húmedos desde octubre de 2012 hasta el mes de abril de 2014 (oscilando entre humedad extrema

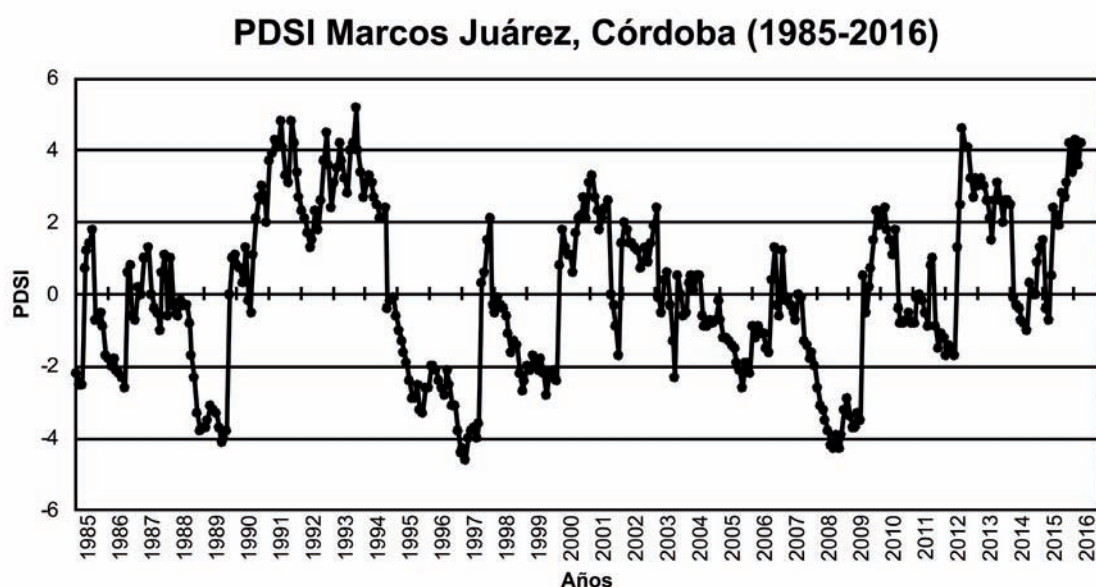


Figura 3. Variabilidad mensual del Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PSDI) para una serie de años (1985-2016) de la localidad de Marcos Juárez, Argentina.

a humedad excesiva). Se observa un período seco hacia fines de 2014 y se reinicia el período húmedo nuevamente en el mes de enero de 2015, prolongándose durante todo el año y hasta la primera parte de 2016.

La necesidad de disponer con un monitoreo de los extremos hídricos a nivel nacional y la predisposición del Servicio Meteorológico Nacional de proveer datos pluviométricos, permitió realizar, a partir del año 2000 hasta la fecha, el cálculo mensual de los índices agrometeorológicos para todo el país. Los mapas generados fueron puestos a disposición de todos los usuarios a través de la página web del CREA.

La Figura 4 presenta los mapas generados con los valores de los índices PDSI, SPI3 y CMI para el mes de enero de 2012, el cual fue un mes crítico

por la severidad de una sequía generalizada en todo el país.

Puede apreciarse la importante extensión de la ocurrencia de la adversidad climática así como la intensidad de la misma. Los tres índices registraron valores de sequía severa a extrema en amplias áreas de la zona central del país (área agrícola por excelencia) cuyas consecuencias fueron importantes pérdidas de rendimientos en los cultivos de soja y maíz (Figura 5). Asimismo, la sequía afectó el noroeste de Patagonia (área de pasturas naturales y bosques) con la ocurrencia de grandes incendios rurales.

En el otro extremo del espectro hídrico se encuentran los excesos de humedad resultantes de precipitaciones anormalmente elevadas por un tiempo considerable, en el cual se supera la

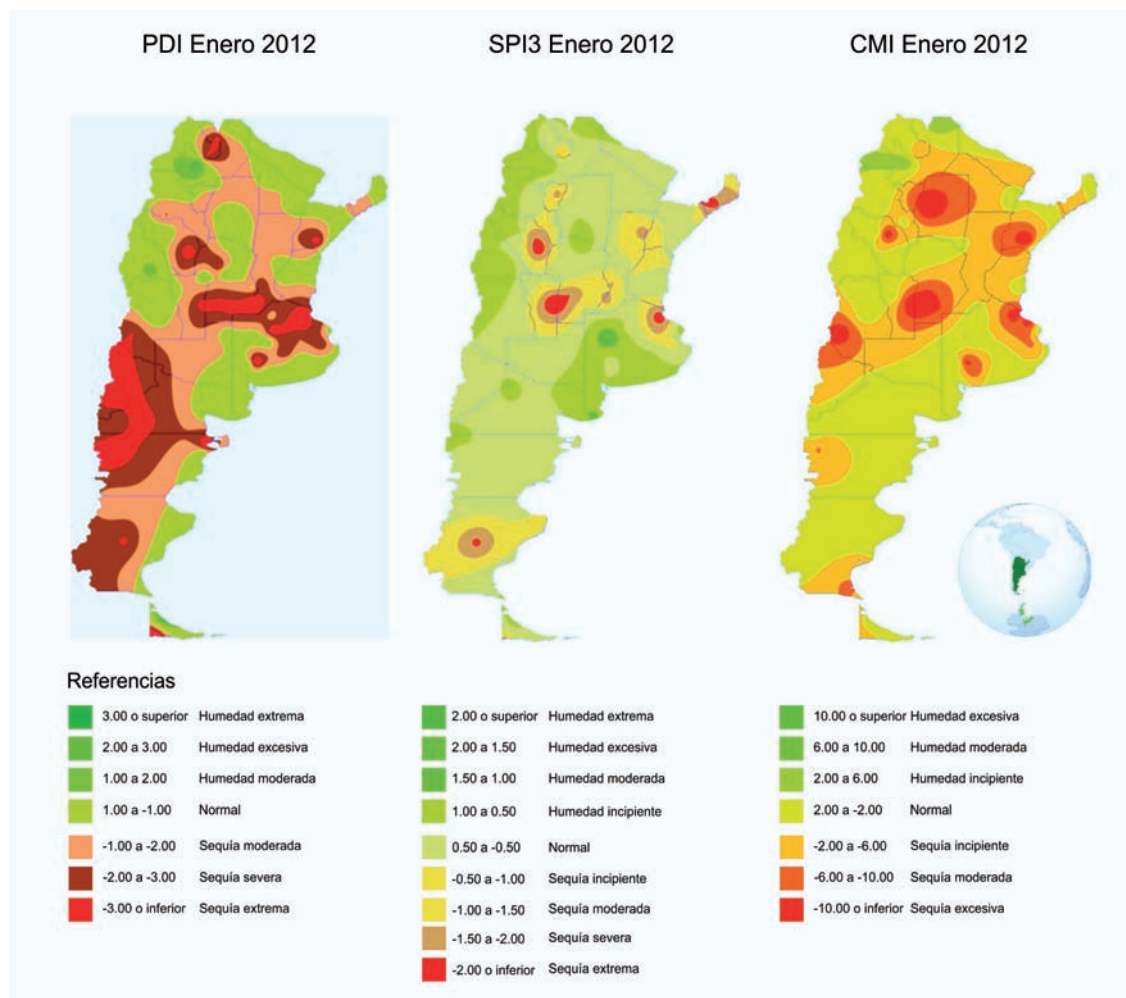


Figura 4. Ocurrencia de sequías severas y extremas en amplias zonas del país indicadas por el PDSI, SPI3 y el CMI durante Enero 2012

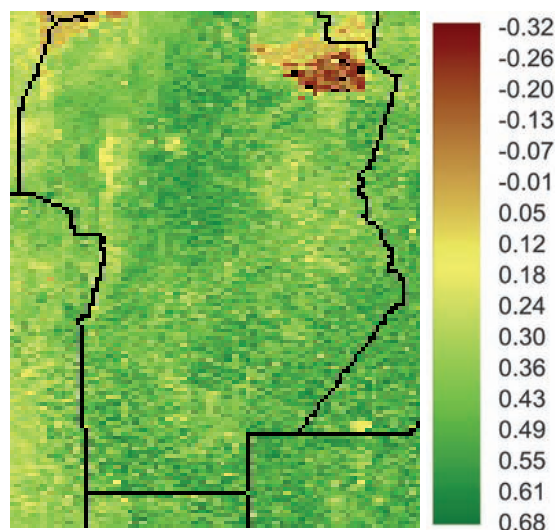


Figura 5. Imagen de la diferencia del NDVI (NDVI dif) del satélite MODIS para Febrero 2012. Las áreas amarillas indican vegetación con condiciones por debajo de lo normal asociadas con sequías.

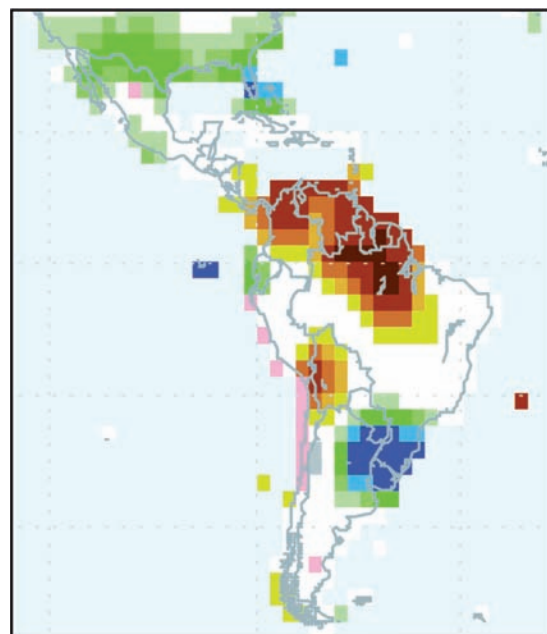


Figura 6. Anomalías pluviométricas durante la campaña agrícola 2015/16. Los colores indican ocurrencia de sequías (áreas en marrón-amarillo) y de excesos hídricos (áreas en verde-azul). (Fuente: IRI-Columbia, 2015).

capacidad de almacenaje de agua de los suelos. Las consecuencias resultantes son campos anegados, pérdida de fertilidad de los suelos, proliferación de enfermedades criptogámicas y bacterianas y consecuentemente pérdidas de superficies cultivadas y bajos rendimientos.

Durante 2015 y 2016 se registra la ocurrencia del fenómeno El Niño que produjo excesos de precipitaciones en numerosas regiones del continente americano (Figura 6), así como también deficiencias pluviométricas en Centroamérica y norte de Sudamérica. En Argentina, puede observarse que los excesos hídricos se ubican en la pradera pampeana, y en la región noreste del país.

Durante la campaña agrícola 2015/16 se registraron precipitaciones elevadas y por encima de los valores normales, principalmente durante el mes de Febrero de 2016 en el centro del país. Como consecuencia de esas precipitaciones extremas, los excesos de humedad afectaron durante varios meses a grandes extensiones del

Noreste argentino y varias provincias. La Figura 7 presenta al PDSI mensual para los meses de enero a junio 2016. Pueden observarse las zonas afectadas que se indican en verde en una extensa región en el centro del país que se extiende desde el litoral hasta Cuyo.

Las Figuras 8, 9 y 10 presentan ejemplos de las consecuencias de los excesos hídricos registrados durante la campaña agrícola 2015/16 en la provincia de Córdoba.

Las pérdidas agro-económicas causadas por la sequía observada en 2011-2012 en la zona central del país resultaron de reducciones de los rendimientos de soja del orden del 19 al 30% en los tres departamentos considerados donde las pérdidas económicas superaron los 350 millones de dólares (Tabla 1).

Tabla 1. Evaluación de los rendimientos de soja en la campaña con sequía agrícola (2011/2012) y los rendimientos promedios de los años sin sequías (serie 1990-2014) y pérdidas económicas para Departamentos seleccionados de Santa Fe y Córdoba. (Precio del grano: 261 USD/tn).

Depto. / Partido	Campaña Agrícola	Sup. cosechada (ha)	Rend. (kg/ha)	Rend. medio sin Sequía (kg/ha)	Dif. en rendimiento (%)	Pérdidas (tn)	Pérdidas econón. (miles de USD)
Marcos Juárez (Cba.)	2011/12	548.700	2.709	3.484	22,26	425.211	111.065
Unión (Cba.)	2011/12	526.400	2.312	3.327	30,50	533.526	139.357
Gral. López (S. Fe)	2011/12	660.000	2.725	3.402	19,91	446.820	116.709

Indice de Palmer - Palmer Drought Severity Index (PDSI)

Abril de 2016

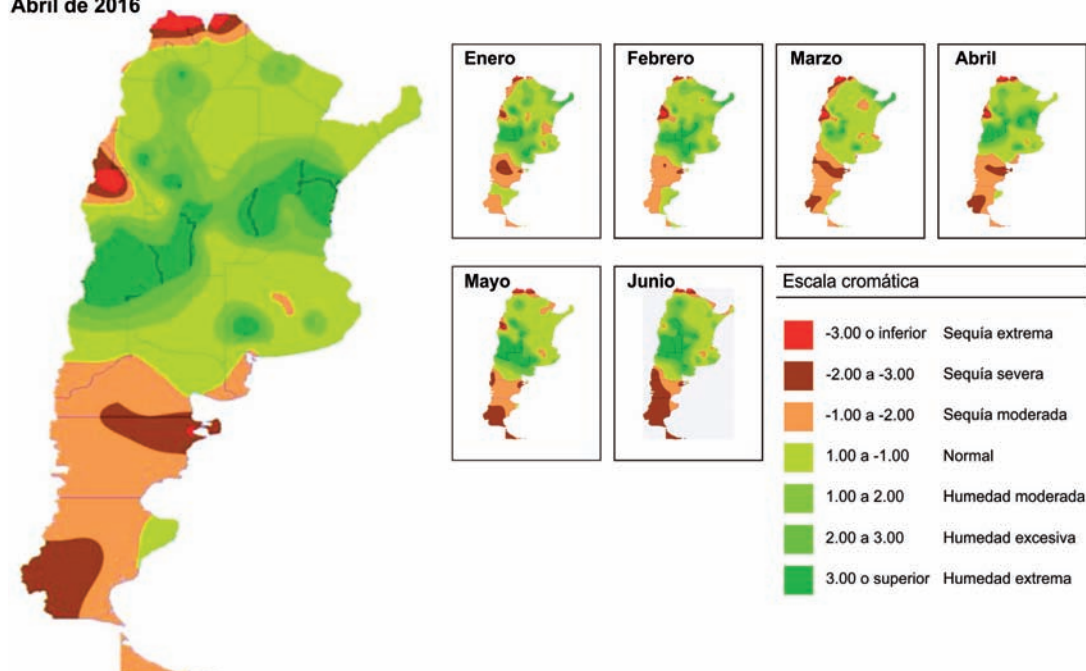


Figura 7. Zonas con excesos hídricos (en verde) según el PDSI para los meses de enero a junio 2016.

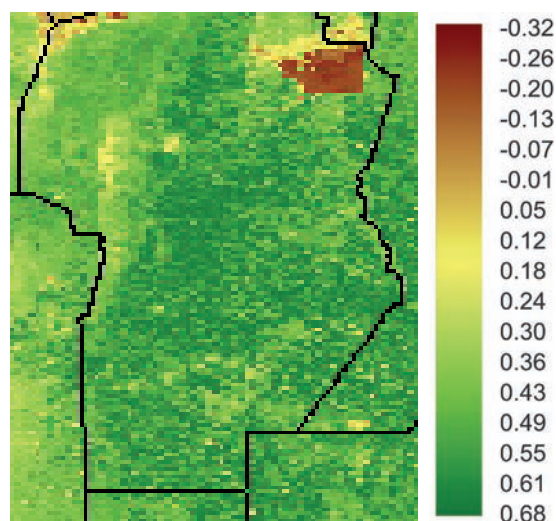


Figura 8. Imágen de la diferencia del NDVI (NDVIdif) del satélite MODIS para Febrero 2016. Las áreas verdes más intensas indican vegetación con condiciones sobre lo normal asociadas con excesos hídricos.

Como consecuencia de las lluvias excesivas asociadas al fenómeno de El Niño, durante de la campaña 2015/2016 y en los departamentos Unión y Marcos Juárez de Córdoba, se han registrado pérdidas significativas de producción en los cultivos de ciclo estival. Los resultados preliminares sobre la producción de soja se ubica en los 15,4 millones de toneladas, con pérdidas de 410.000 toneladas. El rendimiento ponderado es de 35 qq/ha mientras que el promedio provincial de daños a nivel de comercialización se encuentra cercano al 10% o sea aproximadamente 1.500.000 toneladas a nivel provincial. Los departamentos más afectados son Gral. San Martín (17%), San Justo (21%), Tercero Arriba (18%) y Unión (17%).

La Tabla 2 presenta las pérdidas de áreas cultivadas causadas por los excesos hídricos de la campaña 2015/16 en dos departamentos de la provincia de Córdoba.

El análisis comparativo de los daños resultantes de extremos hídricos durante la campaña

Tabla 2. Pérdidas estimadas de soja en los departamentos Unión y Marcos Juárez de la provincia de Córdoba durante la campaña 2015/16 (Fuente: Bolsa de Cereales de Córdoba)

Departamentos	Cultivo	Producción perdida (tn)	Pérdidas en millones de dólares
Marcos Juárez	Soja	790.376	208,00
Unión	Soja	367.557	99,69



Figura 9. Vista aérea de campos anegados durante la campaña agrícola 2015/16 por excesos de humedad en la provincia de Córdoba. (Fuente: Bolsa de Cereales de Córdoba, 2016).



Figura 10. Daños observados en el cultivo de soja durante la campaña agrícola 2015/16 por excesos de humedad en la provincia de Córdoba. (Fuente: Bolsa de Cereales de Córdoba, 2016).

agrícola con sequía (2011/12) y con excesos de humedad (2015/16) indica que el nivel de pérdidas económicas son similares y ascienden a cientos de millones de dólares a nivel de la provincia de Córdoba. Algo similar puede aseverarse para las otras provincias productoras de granos donde se

observaron los extremos hídricos. Los excesos hídricos son más espectaculares y de mayor impacto mediático que las sequías; sin embargo, ambos eventos son responsables de la disrupción de las actividades económicas y alteraciones importantes en las comunidades rurales y urbanas.

CONCLUSIONES

En este trabajo se muestra la efectividad del monitoreo y evaluación de los extremos hídricos (sequías y excesos de humedad) mediante la utilización de índices agrometeorológicos. Dicha actividad desarrollada a escala nacional está dirigida a reducir los impactos negativos de dichos extremos y aumentar la resiliencia de las comunidades más vulnerables. La información relativa a la distribución geográfica de los eventos extremos, así como su duración e intensidad, puede ser utilizada para la toma de decisiones y el establecimiento de mecanismos de mitigación y respuesta a la adversidad climática. Esta información puede ser integrada al conjunto de los aspectos ambientales y socio-económicos que deben ser adecuadamente considerados para lograr un uso sustentable del recurso agua.

AGRADECIMIENTOS

A Alejandro Barbeito por la preparación de las ilustraciones y a Alfredo J. Santa por el procesamiento de las imágenes satelitales.

BIBLIOGRAFÍA

- BCC, 2016. Bolsa de Cereales de Córdoba. <http://www.agrovoz.com.ar/actualidad/lasinundaciones-dejan-una-perdida-de-13000-millones-en-cordoba>. Consultada el 15/07/2016.
- CONAGUA, 2014. Comisión Nacional del Agua/ Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Programa de Medidas Preventivas y de Mitigación de la Sequía, Consejos de Cuenca Ríos Presidio al San Pedro, Ríos Mocorito al Quelite y Fuerte al Sinaloa. <<http://www.conagua.gob.mx/pronacose/Contenido.aspx?n1=7&n2=54>> Consultada el 12/01/2014.
- CREAN, 2016. Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales, CONICET/UNC. Monitoreo de Sequías. <<http://crean.org.ar/monitoreo>> Consultada el 15/07/2016.
- EIRD/ONU, 2009. Estrategia internacional para la reducción de desastres. Organización de las Naciones Unidas. <www.eird.org/eng/revista/no-16-2009/art18.html> Consultada el 20/10/2013.
- ICD, 2015. International Conference on Drought. Research and Science-Policy Interfacing. 10-13 March 2015, Valencia, Spain.
- JRC, 2016. Drought European Observatory, Joint Research Centre, European Union. <http://edo.jrc.ec.europa.eu>
- Justice, C.O., J.R.G. Townshend, 2002. Special issue on the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): A new generation of land surface monitoring. *Remote Sens. Environ.* 83: 1-2.
- Kogan, F.N. (1997) Global drought watch from space. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78: 621-636.
- IRI-Columbia, 2015. International Research Institute for Climate and Society, Columbia University. <http://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/forecasts/seasonal-climate-forecasts/> Consultada el 15/10/2015
- Liu, W.T., F.N. Kogan, 1996. Monitoring regional drought using the vegetation condition index, *International Journal of Remote Sensing* 17(14):2761-2782.
- MAGyP, 2013. Estadísticas agrícolas. Sistema Integrado de Información Agropecuaria. Min. Agric., Gan. y Pesca, Argentina. <http://www.siiia.gov.ar/series>
- McKee, T.B., N.J. Doeskenand, J. Kleist, 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Preprints, Eighth Conference on Applied Climatology, Anaheim, California, Amer. Meteor. Soc., pp. 179-184.
- Palmer, W.C., 1965. Meteorological drought. *Research Paper No. 45*. U.S. Weather Bureau. [NOAA Library and Information Services Division, Washington, D.C. 20852]
- Palmer, W.C., 1968: Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: The new crop moisture index. *Weatherwise*, 21, 156-161.
- Planchuelo, A.M., A.C. Ravelo, 1985. Drought/Crop Condition Assessment Methods for Northeast Brazil, Mexico, Paraguay and Uruguay. Edit. Univ. Missouri Press. Missouri, U.S.A. 128 pp.
- Ravelo, A.C., 1980. Drought/Food production problems in Haiti: A case study for 1978. Tech. Report to USAID/ OFDA, 57 pp.
- Ravelo, A.C., 2000. Caracterización Agroclimática de las sequías extremas en la región pampeana argentina. *Rev. Facultad Agronomía* 20(2): 187-192.
- Ravelo, A.C., 2012. Informes Finales del Proyecto PREMIA. OMM - CONAGUA. <<https://sites.google.com/a/wmo.int/mex/system/app/pages/search?scope=search-site&q=ravelo>> Consultada el 22/08/2013.
- Ravelo, A.C., R. Sanz Ramos, C. Douriet Cárdenas, 2014a. Detección, evaluación y pronóstico de las sequías en la región del Organismo de Cuenca Pacífico Norte, México. *AgriScientia* 31(1):11-24.
- Ravelo, A.C., Zanvettor, R.E y P. Boletta. 2014b. Atlas de Sequías de la república Argentina. ISBN 978-950-33-1198-0. http://www.crean.unc.edu.ar/atlas/atlas_sequia.html.
- SMN, 2016, Servicio Meteorológico Nacional. Datos pluviométricos mensuales, en línea: <http://www.smn.gov.ar/> consultado 3/8/2016.

- Tucker, C.J., 1979. Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation, Remote Sensing of Environment, 8(2),127-150.
- UNL, 2016. The National Drought Mitigation Center, University of Nebraska Lincoln. <http://droughtmonitor.unl.edu/>.
- USGS, 2016. MODIS satellite images. https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mod13a3.
- White, D.H., J.J. Walcott, 2009, 'The role of seasonal indices in monitoring and assessing agricultural and other droughts: a review'. Crop and Pasture Science 60 (7): 599-616.
- Zanvettor R.E & A.C. Ravelo, 2000. Using the SPI to monitor the 1999-2000 drought in Northeastern Argentina. Drought Network News 12(3): 3-4.

Pesquisas desenvolvidas pelo grupo de agrometeorologia da UFRGS no contexto do monitoramento e previsão de safras usando imagens orbitais

Fontana, D.C.; R.W. Melo, A.H. Junges, E.V. Klering, A.P. Cordeiro, M.A. Berlatto y H. Bergamaschi

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo relatar alguns estudos desenvolvidos na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), nas áreas de monitoramento das culturas e de previsão de safras, especificamente no que diz respeito à pesquisa realizada pelo Grupo de Agrometeorologia - GA e pelo Laboratório de Estudos em Agricultura e Agrometeorologia - LEAA, ambos localizados em Porto Alegre, Brasil. Este grupo acumula uma história sólida, construída a partir de uma sequência constante e progressiva das pesquisas. O texto aborda os mais relevantes avanços do GA e do LEAA sobre os principais segmentos de um sistema de monitoramento de culturas, a saber: a estimativa de área cultivada e do rendimento de grãos e ferramentas de monitoramento para estimar a cobertura vegetal do solo. O método mais utilizado para quantificar as áreas de cultivo combina o uso de sensores de resolução espacial moderada e alta, utilizando amplamente o atributo espectro-temporal. Culturas anuais têm variações na resposta espectral ao longo do ciclo, que as distingue de outros alvos, permite a utilização da variabilidade temporal do índice de vegetação para a construção de máscaras de culturas. As estimativas de rendimento das culturas foram feitas por um modelo agrometeorológico-espectral, que adiciona parâmetros de biomassa vegetal, obtidos através de sensoriamento remoto, a equações que utilizam dados meteorológicos. Este tipo de modelo pressupõe que o termo agrometeorológico expressa a influência da radiação solar, temperatura e umidade do ar e disponibilidade de água na produção de grãos, enquanto o componente espectral expressa também alterações nas práticas de manejo das culturas, cultivares e outros estresses não incluído no modelo agrometeorológico. Um banco de dados de índices de vegetação é usado, principalmente, para o monitoramento da cobertura vegetal, considerando que eles são indicadores consistentes da resposta da vegetação aos efeitos ambientais, como do clima, de ações antrópicas ou de mudanças no uso e na cobertura da terra. Os grupos GA e LEAA têm estreita relação entre pesquisadores, incluindo um intercâmbio de estudantes entre o Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia (PPGFit/UFRGS) e o Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto (PPGSR/UFRGS). É dada especial atenção à formação de recursos humanos qualificados e à interação com outros grupos de pesquisa, em nível nacional e internacional. Os avanços do ponto de vista técnico, listados no texto, estão focados no desenvolvimento e teste de ferramentas e instrumentos que podem ser incorporados ao sistema de produção, a fim de qualificar os programas de monitoramento existentes na agricultura brasileira.

Palavras-Chave: modelo agrometeorológico-espectral, máscaras de cultivo, MODIS

Fontana, D.C.; R.W. Melo, A.H. Junges, E.V. Klering, A.P. Cordeiro, M.A. Berlato and H. Bergamaschi, 2016. Research developed by UFRGS agrometeorology group in the context of monitoring and crop forecasting, using satellite images. RADA VII: 27-40

SUMMARY

This work aims to report some studies developed at the Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS), in the areas of crops monitoring and harvest forecasting, specifically with regard to research undertaken by the Agrometeorology Group - GA and the Research Laboratory Agriculture and Agrometeorology - LEEA, located in Porto Alegre, Brazil. This group accumulates a solid history, built from a constant and progressive sequence of researches. The text addresses the major advances made by the GA and LEEA on the main segments of a crops monitoring system, namely: estimation of cropping area and of grain yield, and monitoring tools for estimating the soil vegetation cover. The most commonly used method for quantifying cropping areas combines the use of moderate and high spatial resolution sensors, using widely the spectrum-temporal attribute. Annual crops have variations in spectral response throughout the cycle, which distinguishes them from other targets, permits the use of the temporal variability of vegetation index for constructing of crop masks. Estimations of crop yields have been made by an agrometeorological-spectral model, which adds parameters of vegetative biomass, obtained through remote sensing, to a weather database. This kind of model assumes that the agrometeorological term expresses the influence of solar radiation, air temperature and humidity, and water availability on the grain production, while the spectral component expresses also alterations in practices of crop management, cultivars, and other stresses not included in the agrometeorological model. A database of vegetation indexes is mostly used for monitoring the vegetation cover, considering that they are consistent indicators of vegetation response to environmental effects, such as climate, anthropogenic actions, or changes in use and land cover. The GA and LEEA groups have close relationship among researchers, including an interchange of students between the Post-graduation Program in Plant Science (PPGFito/UFRGS) and Post-graduation Program in Remote Sensing (PPGSR/UFRGS). Special attention is given to the training of qualified human resources and to the interaction with other research groups, at national and international level. Advances from the technical point of view, listed in the text, are focused on developing and testing of tools and instruments that can be incorporated to the production system, in order to qualify the existing monitoring programs of the Brazilian agriculture.

Key-word: agrometeorological-spectral models, crop mask, MODIS

D.C. Fontana, R.W. Melo, M.A. Berlato e H. Bergamaschi: Faculdade de Agronomia/UFRGS. A.H. Junges: Fundação de pesquisa Agropecuária – FEPAGRO. E.V. Klering e A.P. Cordeiro: Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia. Correspondencia a: dfontana@ufrgs.br

INTRODUÇÃO

Informações e parâmetros sobre monitoramento e previsão de safras são fundamentais tanto para o planejamento e definição de prioridades do setor agrícola, como para o estabelecimento da políticas de preços e manejo dos estoques reguladores, os quais, de modo geral, são de responsabilidade governamental. A grande extensão da área agrícola no Brasil, entretanto, faz com que a metodologia

de previsão de safras empregada pelos órgãos oficiais brasileiros, baseada em questionários aplicados a agricultores ou a entidades relacionadas ao setor agrícola, contenha certo grau de subjetividade. Este contexto evidencia a necessidade de desenvolver pesquisas que disponibilizem métodos que possam compor o sistema oficial brasileiro de previsão de safras, incorporando técnicas objetivas e que possibilitem estimar os erros inerentes às estimativas.

Este trabalho tem como objetivo relatar parte dos estudos desenvolvidos na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), no tema de monitoramento e previsão de safras, especificamente no que se refere às pesquisas desenvolvidas pelo Grupo de Agrometeorologia – GA e pelo Laboratório de Estudos em Agricultura e Agrometeorologia – LEAA, localizados em Porto Alegre, Brasil.

O Grupo de Agrometeorologia da UFRGS tem extensa tradição em pesquisa e ensino, sendo referência nacional nesta área de conhecimento. O GA está situado na Faculdade de Agronomia/UFRGS (<http://www.ufrgs.br/agronomia/>). As principais atividades são desenvolvidas nas linhas de pesquisa Relações Clima-Planta, Relações Hídricas no Sistema Solo-Planta-Atmosfera, Variabilidade e Tendências Climáticas Aplicada à Agricultura e Sensoriamento Remoto Aplicado à Agrometeorologia. Neste trabalho, estão relatadas as principais atividades relacionadas ao tema específico do Monitoramento e Previsão de Safras, desenvolvidas no âmbito da linha de pesquisa Sensoriamento Remoto Aplicado à Agrometeorologia.

Por sua vez, o LEAA/UFRGS (<http://www.ufrgs.br/leaa/>) tem sede física no Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM/UFRGS). Neste laboratório são desenvolvidas atividades de pesquisa relacionadas ao desenvolvimento de metodologias para previsão de safras, envolvendo, principalmente, o mapeamento e monitoramento de áreas ocupadas com culturas agrícolas e pastagens, utilizando, para isto, tecnologias de sensoriamento remoto e geoprocessamento.

A maior parte das pesquisas desenvolvidas foi amparada por dois grandes projetos de pesquisa, nos quais atuaram equipes multidisciplinares formadas por pesquisadores de diversas instituições. O primeiro projeto foi denominado GeoSafras, o qual foi financiado pela CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento), tendo início em 1998. Neste projeto participaram diversas instituições brasileiras como UNICAMP (Universidade Estadual de Campinas), INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), SIMEPAR (Sistema Meteorológico do Paraná) e outras, sendo que o LEAA/UFRGS coordenou as ações na Região Sul do Brasil. Outro projeto relevante desenvolvido no tema foi o MAPAGRI (Mapeamento da Atividade Agrícola Brasileira), o qual foi coordenado e financiado pela EMBRAPA e, novamente, constituído por diversas instituições brasileiras.

Importante ressaltar ainda que, apesar do presente relato ter como foco principal os resultados

de pesquisa oriundos destes dois grandes projetos, tem sido de fundamental importância o suporte teórico e experimental gerado pelo próprio grupo, nas demais linhas de pesquisa desenvolvidas, na experimentação de campo e na análise de séries históricas em bancos de dados. De forma semelhante, as parcerias internacionais estabelecidas tem contribuído de forma marcante às ações do grupo.

Para fins de organização, neste trabalho são abordados os principais avanços obtidos pelos GA e LEAA nos três principais segmentos de um sistema de previsão de safras, quais sejam: estimativa de área cultivada, estimativa da produtividade de grãos e ferramentas de monitoramento da cobertura vegetal.

1. Estimativa de área cultivada

Avanços importantes, nos últimos 10 anos, foram obtidos no LEAA/UFRGS em relação à definição da área ocupada por diversos cultivos agrícolas, especialmente, quando a estimativa abrange a escala regional.

A metodologia mais utilizada para a definição de áreas cultivadas (mais frequentemente denominada de máscara de cultivos) tem sido o uso combinado de sensores de moderada e alta resolução espacial. Os sensores com alta resolução espacial (LANDSAT, Aster, CBERS e outros) podem contribuir com sistemas de previsão de safra por permitir o detalhamento das informações, essencial para a caracterização e distinção de determinadas áreas agrícolas. Por sua vez, sensores de moderada resolução espacial (MODIS, NOAA, SPOTVeg e outros) podem contribuir para a generalização das informações e estimativas de safra em caráter regional.

É importante lembrar que, tradicionalmente, o emprego dos sistemas de alta resolução espacial é restrito à frequência de revisita (18 dias para os sistemas LANDSAT e 26 dias para o SPOT e CBERS, por exemplo), a qual, seguidamente, resulta em insuficiente número de imagens disponíveis para que as mudanças da vegetação, ao longo de um ciclo, sejam observadas de forma adequada. Devido ao volume excessivo de dados, estudos com estes satélites são restritos, ainda, a análises locais, ou seja, abrangendo áreas relativamente pequenas e não contemplando o desafio de estimativas de safras para um Estado ou País inteiro, especialmente quando se refere ao Brasil. Apesar desta situação estar sendo alterada pela disponibilização de sensores mais modernos e adequados à realidade agrícola, estes ainda não

estão sendo operacionalmente utilizados.

Em termos de satélites de moderada resolução espacial, mas com alta resolução temporal, salientam-se os sensores AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) a bordo do satélite NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) e o sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo do satélite TERRA, os quais são considerados, na literatura internacional, como os mais consistentes para a geração de produtos capazes de atender às necessidades agrícolas (Justice *et al.*, 1991; Maselli *et al.*, 1993; Huete *et al.*, 2002; Boken & Shaykewich, 2002; Manjunath *et al.*, 2002, entre outros). Esta peculiaridade é consequência de características como cobertura global diária da Terra, larga faixa de imageamento, disponibilidade de bandas espectrais próprias ao monitoramento da vegetação e, também, de uma série contínua de imagens a partir de 1982, no caso do AVHRR/NOAA (Kidwell, 1990), e a partir de 1999, no caso do MODIS/TERRA (Huete *et al.*, 2002).

As imagens do sensor MODIS/TERRA, na forma de índices de vegetação, têm sido muito utilizadas para o monitoramento da evolução da vegetação agrícola de diversas regiões do globo (Huete *et al.*, 2002; Rizzi 2005, Wardlow *et al.* 2007, Risso *et al.*, 2009). Com esse sensor, que opera com 36 bandas espectrais, é possível um recobrimento global e contínuo a cada dois dias, com resoluções espaciais variando de 250 a 1.000m. Uma característica importante em relação ao MODIS é de que os dados, já corrigidos para efeitos atmosféricos (nuvens, aerossóis, etc...) e georeferenciados, são distribuídos gratuitamente na forma de diferentes produtos, entre os quais destacam-se os índices de vegetação: NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, do inglês *Normalized Difference Vegetation Index*) e EVI (Índice de Vegetação Realçado, do inglês *Enhanced Vegetation Index*), produzidos a cada 16 dias, com resoluções de 250, 500 e 1.000m. As imagens NDVI/MODIS/TERRA representam uma possibilidade de estender a série histórica de imagens NDVI/AVHRR/NOAA, ampliando a disponibilidade de dados para estudos de monitoramento. Nas imagens EVI/MODIS/TERRA foram introduzidas melhorias na qualidade da informação espectral (Huete *et al.*, 1997) através do aumento na sensibilidade em condições de alta biomassa e de correções para a redução da influência atmosférica e do fundo (solo, palha, água,...). As imagens MODIS têm sido utilizadas para o monitoramento das mudanças sazonais e da fenologia da vegetação em grandes áreas (Sakamoto *et al.*, 2006 e 2007), o que é essencial para a estimar a área e o rendimento de culturas agrícolas. A partir de março de 2016, o EOS (*Earth*

Observing System Data Gateway) da NASA iniciou a disponibilização da coleção 6 de imagens NDVI e EVI/MODIS, na qual as imagens de toda a série histórica disponível foi reprocessada, tornando as imagens ainda mais confiáveis. Esta é uma característica interessante deste programa e que se repete em intervalos de tempo, permitindo a cada avanço tecnológico a manutenção do aspecto de comparação temporal.

No LEAA/UFRGS os estudos com imagens MODIS, para fins de mapeamento das principais culturas agrícolas estabelecidas no Rio Grande do Sul, têm utilizado extensamente o atributo espectro-temporal. Culturas anuais apresentam, ao longo do ciclo, variações na resposta espectral que permitem distingui-las de outros alvos e, assim, a variabilidade temporal dos índices de vegetação tem sido utilizada para a construção de máscaras de cultivo.

O primeiro estudo do LEAA empregando máscaras de cultivo foi desenvolvido por Fontana *et al.* (2007), numa parceria com a University of Southern Queensland (USQ), Austrália, e motivou uma série de trabalhos subsequentes. Neste, foi construída uma máscara de cultivo para trigo em dois departamentos da Austrália. A técnica usada foi a de "imagem diferença", obtida pela subtração da imagem de mínimo NDVI e EVI/MODIS (imagem do período de implantação da cultura) daquela de máximo valor dos índices (imagem do período de pleno desenvolvimento da cultura). Sobre a imagem diferença foi estabelecido um limiar de corte, o qual determina a delimitação das áreas de cultivo e não-cultivo. As áreas que apresentam variação de NDVI ao longo do período de crescimento compatível com a variação de biomassa verde de uma cultura anual são inseridas na máscara de cultivo. Estabelecida a máscara, foram extraídos os valores médios dos índices de vegetação das áreas de cultivo e elaborados os perfis temporais para quatro safras (2000 a 2004). Nesse trabalho, as variações interanuais nos perfis temporais de NDVI e EVI/MODIS foram atribuídas às variações no aporte de água à cultura (precipitação pluvial).

Alguns trabalhos subsequentes evidenciaram, entretanto, que a técnica da imagem diferença apresenta uma limitação importante no contexto da previsão de safras, que é a forte dependência da determinação de um valor arbitrário (limiar de corte), o qual apresenta variações de safra para safra, visto que o objetivo era estabelecer uma máscara de cultivo com área semelhante à área oficial. Em função disso, diversas pesquisas foram desenvolvidas no LEAA visando obter metodologias mais robustas e objetivas e que tivessem menor grau de interferência de dados subjetivos ou mesmo da

aptidão do operador do sistema.

Wagner *et al.* (2007) propuseram uma metodologia baseada na utilização de duas cenas LANDSAT – TM5 abrangendo parte de uma das mais importantes regiões produtoras de grãos no Rio Grande do Sul. A partir da identificação da área cultivada com soja por metodologia de máscara de cultivo (uma imagem do início do ciclo (novembro) e outra de pleno desenvolvimento (fevereiro)), foi feita a sobreposição das imagens LANDSAT classificadas com as imagens MODIS e extraídos os valores de média e desvio padrão do NDVI/MODIS característicos das áreas mapeadas com soja nestes dois períodos. Os valores estatísticos, obtidos na área de sobreposição das imagens foram utilizados para a determinação da área de soja em uma região mais ampla, no noroeste do Rio Grande do Sul. As imagens foram reamostradas para dados binários, de modo que todos os valores de NDVI dentro do intervalo definido ($\text{média} \pm 1,125$ desvio padrão) passaram a assumir valor 1 e todos os outros assumiram o valor zero. A etapa final do processamento consistiu no cruzamento (multiplicação cruzada das imagens binárias das imagens dos dois períodos), o que resultou em uma imagem de soja e 'não-soja'. Os resultados mostraram alta correlação entre os mapeamentos, se observados em escala municipal (Figura 1).

Ainda para a cultura da soja, Santos *et al.* (2013) compararam a acurácia de várias metodologias de mapeamento das áreas de cultivo e verificaram a robustez da proposta metodológica de uso do atributo espectro-temporal para identificar as áreas de ocupadas com soja no norte do Rio Grande do Sul. Todas as metodologias testadas apresentaram coeficientes de determinação superiores a 0,85 entre a área estimada com as imagens e os dados oficiais (Figura 2).

Para a cultura do arroz irrigado, Klering *et al.* (2013) propuseram a construção das máscaras de cultivo através da classificação digital supervisionada, para as 6 regiões orizícolas do Rio Grande do Sul, também utilizando o atributo espectro-temporal. As amostras para treinamento do classificador foram coletadas em uma imagem de composição colorida, frequentemente denominada composição RGB (R=vermelho, G=verde, B=azul), elaborada a partir de imagens multitemporais NDVI/MODIS, de determinados períodos do ciclo da cultura. A imagem correspondente ao menor crescimento vegetativo (período de entrada de água na lavoura - primeira quinzena de novembro – e primeira imagem de mínimo) foi alocada no canal verde. No canal azul foi colocada a imagem correspondente ao período de implementação da cultura (primeira quinzena de outubro - segunda imagem de míni-

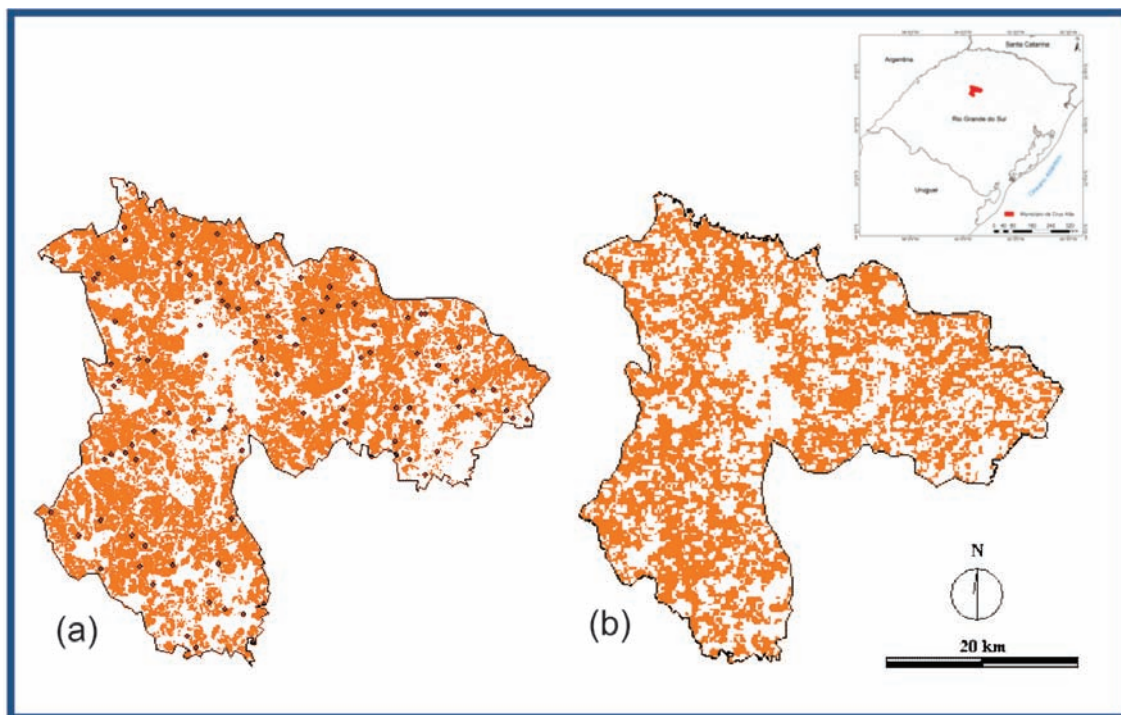


Figura 1. Área mapeada como de cultivo de soja no município de Cruz Alta –RS, Brasil, utilizando imagens LANDSAT (a) e MODIS (b), safra 2005/06. Fonte: Wagner *et al.* (2005).

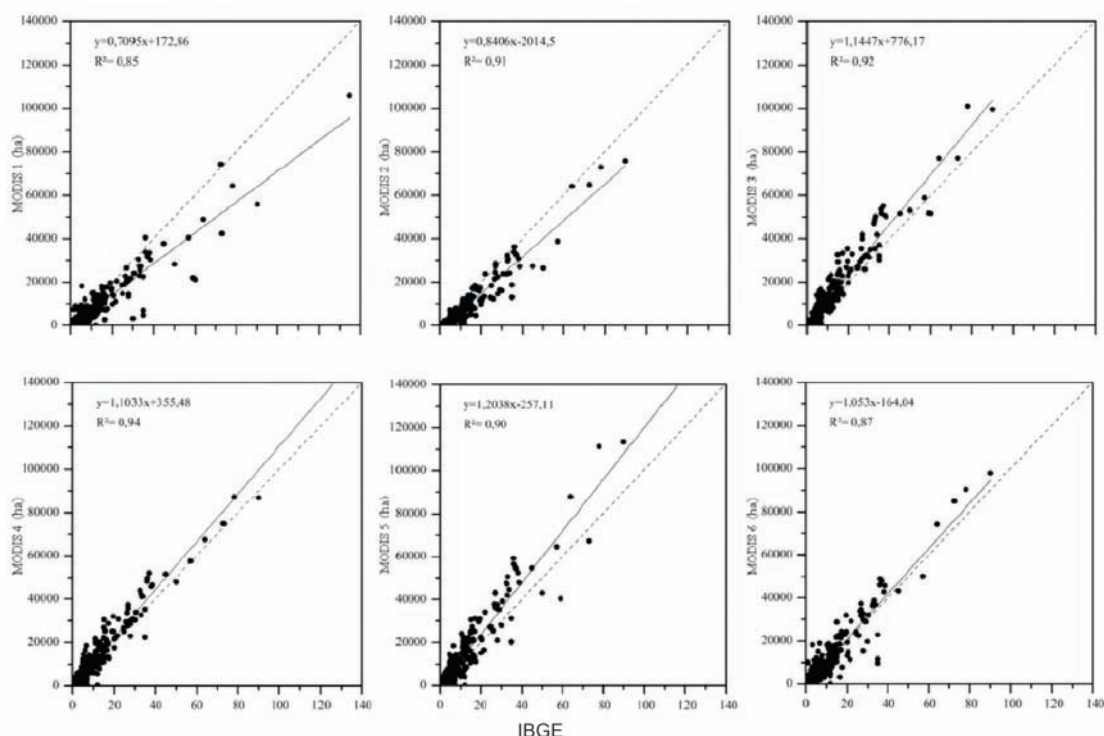


Figura 2. Comparação das estimativas de área cultivada com soja, entre os dados oficiais do IBGE e os obtidos por meio de imagens NDVI/MODIS, para 255 municípios avaliados no Rio Grande do Sul. A linha tracejada representa a linha 1:1. Fonte: Santos *et al.* (2014).

mo) e no canal vermelho foi colocada a imagem correspondente ao período de maior crescimento vegetativo (primeira quinzena de janeiro - imagem de máximo). Foram, então, selecionadas amostras em áreas com maior crescimento vegetativo dentro de cada composição RGB, as quais, provavelmente, estavam associadas às lavouras de arroz irrigado. A imagem classificada foi gerada tendo somente duas classes, sendo uma denominada “arroz” e a outra, “não arroz”. O índice de concordância de Willmott, que mede a dispersão dos dados em relação à reta (1:1), foi utilizado para mostrar a concordância dos valores de área de cultivo estimados em relação aos oficiais (de 95%). O estudo utilizou imagens de 2000/01 a 2009/10 e permitiu gerar uma imagem com as áreas potenciais de cultivo de arroz irrigado no Estado (Figura 3), o qual é um importante produto, que pode ser usado para fins de planejamento do setor.

Posterior a este trabalho, Mengue *et al.* (2015) propuseram um processamento extra para o mapeamento das áreas cultivadas com arroz irrigado, buscando melhorar, ainda mais, a acurácia dos resultados. Após a utilização do método proposto por Klering *et al.* (2013), os autores adicionaram um critério de exclusão de áreas mapeadas como

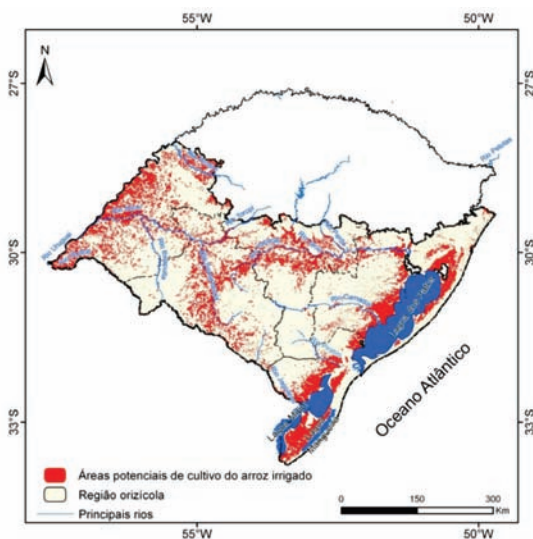


Figura 3. Áreas potenciais de cultivo do arroz irrigado na região orizícola do Rio Grande do Sul, Brasil. Fonte: Klering *et al.* (2013).

arroz que não se situavam nas áreas de várzea, visto serem estas as áreas tradicionalmente destinadas ao cultivo de arroz irrigado no Rio Grande do Sul. Com o uso apenas do atributo de variação temporal dos índices de vegetação, é grande a

confusão na classificação entre soja e arroz irrigado, culturas agrícolas estabelecidas no mesmo período no Estado. O critério proposto por Mengue *et al.* (2015) foi baseado no modelo HAND, que calcula as alturas em relação à drenagem mais próxima (Figura 4). A exatidão global obtida no mapeamento da cultura do arroz irrigado, nesse trabalho, foi de 91,99%. Esse estudo foi um importante aprimoramento, na medida em que, dados os preços altos da soja no mercado internacional, esta cultura tem tido expressiva expansão no sul do Estado do Rio Grande do Sul, avançando sobre áreas tradicionalmente cultivadas com arroz irrigado e pastagens.

A principal cultura estabelecida no período

de outono-inverno no Rio Grande do Sul é o trigo, que foi estudada por Junges *et al.* (2013). Os autores elaboraram máscaras de cultivo usando dois critérios. Inicialmente, foi feita a subtração de imagens de mínimo NDVI (abril e maio, época de semeadura), daquelas de máximo NDVI (junho a outubro), buscando a identificação dos pixels com as maiores variações de biomassa verde, associadas ou não à produção de grãos. Em seguida, foi realizada uma classificação não supervisionada das imagens (algoritmo Isodata), considerando as áreas pertencentes às máscaras de cultivo. Esta classificação gerou classes cujos perfis temporais foram condizentes com diversos tipos de usos e coberturas do solo. Os perfis temporais de áreas

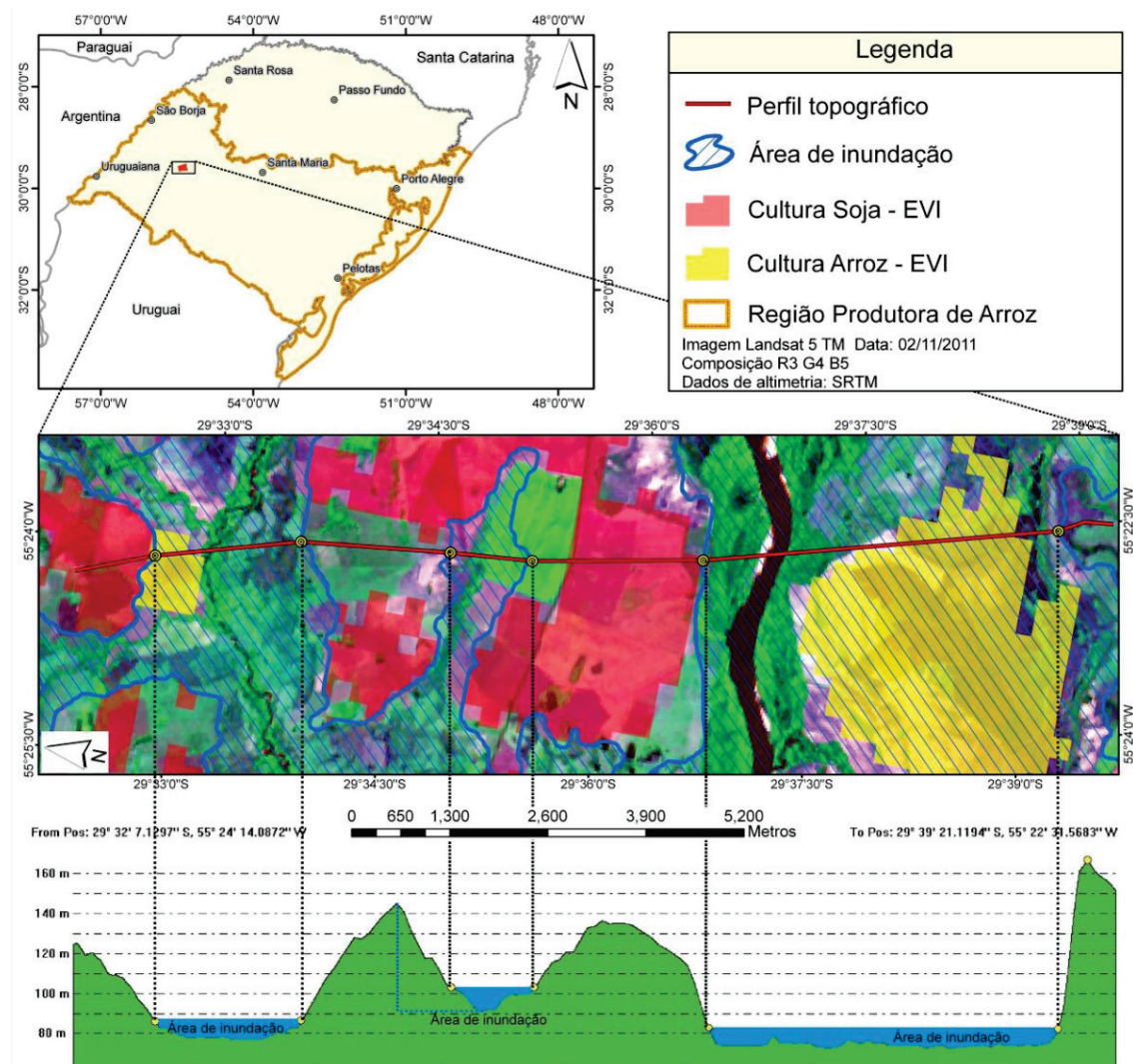


Figura 4. Corte transversal do terreno, ilustrando as áreas de várzea (inundação) do Estado do Rio Grande do Sul. Dados de altimetria: SRTM. Imagem: Landsat 5 TM. Data: 02/11/2011 Fonte: Mengue & Fontana (2015).

destinadas à produção de grãos concordaram com os padrões de cultivo dos cereais de inverno na região (ciclo de desenvolvimento, manejo e épocas de semeadura). Identificada a área de cultivo, foi possível traçar perfis temporais associados à cultura do trigo nas diversas regiões de produção avaliadas (Figura 5).

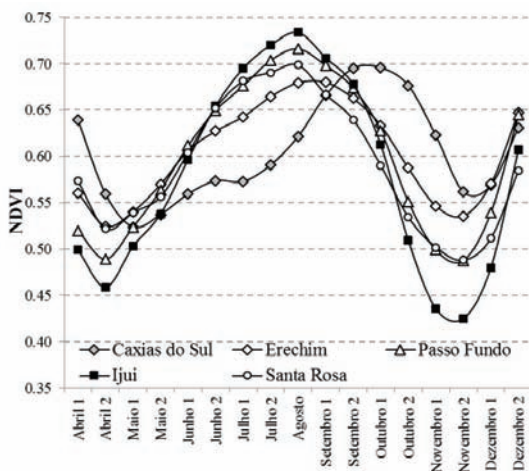


Figura 5. Perfis temporais de NDVI/MODIS, de abril a dezembro, das áreas agrícolas identificadas por meio da metodologia de máscaras de cultivo, nas regionais EMATER/RS de Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa (Rio Grande do Sul, Brasil), média dos anos 2000 a 2008. Fonte: Junges *et al.* (2013).

2. Estimativa da produtividade

No contexto da estimativa da produtividade, muitos trabalhos nacionais e internacionais têm comprovado a viabilidade da incorporação da modelagem agrometeorológica aos levantamentos oficiais de safras, introduzindo maior objetividade aos resultados obtidos. Estes modelos são fundamentados no fato de que a definição da produtividade da cultura é, principalmente, influenciada pelas condições meteorológicas. Seguem alguns exemplos de trabalhos realizados pelo Grupo de Agrometeorologia da UFRGS: Berlatto (1987), Fontana *et al.* (2001) e Kruger *et al.* (2007) para a cultura da soja, Barni (1994) para o girassol, Matzenauer *et al.* (1995) e Bergamaschi *et al.* (2006 e 2013) para a cultura do milho, e Carmona (2002) e Klering *et al.* (2008) para a cultura do arroz irrigado. Nestes estudos, destacam-se as parcerias estabelecidas entre o grupo e outras instituições, especialmente a FEPAGRO (Fundação de Pesquisa Agropecuária do Estado do Rio Grande do Sul) e a University of Reading, Inglaterra.

Com o avanço tecnológico, entretanto, novas

abordagens têm sido sugeridas. A abordagem que o GA tem trabalhado de forma mais sistemática é o modelo agrometeorológico-espectral, o qual agrega às informações meteorológicas dados de biomassa vegetal obtidos através de sensores remotos. Neste tipo de modelo, o pressuposto é que o termo agrometeorológico expresse a influência sobre a produção de grãos das condições de radiação solar, temperatura e umidade do ar e disponibilidade hídrica, enquanto que o componente espectral expresse, além destas, também as diferenças de práticas de manejo, cultivares e estresses não incluídos no modelo agrometeorológico. Alguns dos trabalhos realizados nos últimos anos pelos GA e LEAA, os quais são descritos a seguir, buscaram ajustar modelos agrometeorológicos-espectrais de estimativa da produtividade para as culturas da soja, arroz e trigo no Estado do Rio Grande do Sul.

Os primeiros trabalhos no tema iniciaram ainda usando imagens oriundas do sensor AVHRR/NOAA, cuja resolução espacial é de 1 Km x 1 Km no nadir. Nestes, a área considerada para extração dos valores de NDVI (componente espectral) era de grande dimensão e não considerava o uso de máscaras de cultivo. A principal cultura estudada foi a soja. Os estudos partiam do pressuposto de que, sendo a soja uma cultura agrícola implantada no Rio Grande do Sul, majoritariamente sem irrigação, em safras caracterizadas pela ocorrência de maiores precipitações pluviais as plantas teriam maior vigor vegetativo. O oposto ocorreria nas safras com limitação de água à cultura. Independentemente da área de abrangência, portanto, o índice de vegetação poderia ser representativo das condições hídricas regionais. Neste contexto, Melo *et al.* (2005) trabalharam com uma série de imagens NDVI/NOAA de 1975 a 2000 (termo espectral - TE) aliado ao termo agrometeorológico (TA - modelo de Jensen, 1968, adaptado por Berlatto, 1987), o qual foi baseado no atendimento da demanda hídrica, ponderado pela sensibilidade da cultura ao longo do ciclo. A equação ajustada (Eq. 1) foi uma regressão múltipla do tipo:

$$Y = -2,63487 + 1084TA + 4,63420TE \quad (1)$$

sendo que o termo TE é o NDVI médio de dezembro e janeiro e o termo TA é dado pela equação 2:

$$Y = Y_m \prod_{i=1}^n \left(\frac{ETr}{ETm} \right)_i^{\lambda_i} \quad (2)$$

sendo ETr e ETm a evapotranspiração real e máxima, respectivamente, i o período do ciclo e λ_i a

sensibilidade do período i ao déficit hídrico.

Os coeficientes λ_i ajustados para o Rio Grande do Sul foram 0,404, 0,192 e 0,475, respectivamente, para os meses de janeiro, fevereiro e março. Os coeficientes de correlação entre dados estimados e observados foram de 0,96 e 0,94 para o ajuste e a validação, respectivamente (Figura 6), demonstrando a robustez do modelo e a real possibilidade do uso do mesmo no contexto da previsão de safras, visto que a estimativa poderia ser realizada, pelo menos, um mês antes da colheita.

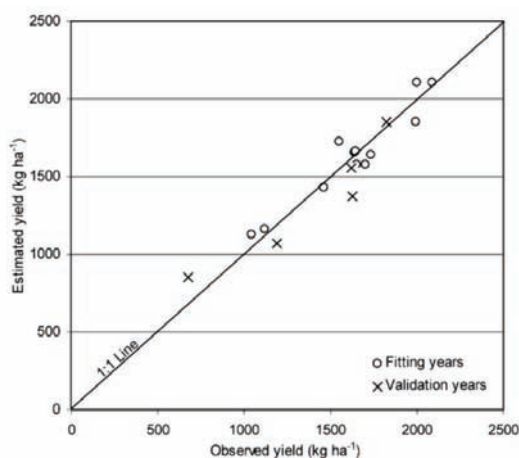


Figura 6. Rendimento de grãos de soja estimados a partir de modelos espectrais, em função dos rendimentos observados, considerando os anos de ajuste ($R=0,94$) e validação ($R=0,94$) no período de 1982 a 2000. Fonte: Melo *et al.* (2008).

Posteriormente, utilizando também abordagem agrometeorológica-espectral, mas com variações relacionadas ao tipo de sensor, variável agrometeorológica, ou forma de seleção das variáveis, novos modelos foram ajustados para estimativas da produtividade das culturas do trigo e arroz irrigado no Rio Grande do Sul.

Para o arroz irrigado, Klering *et al.* (2016) ajustou um modelo utilizando a técnica *stepwise* para a seleção das variáveis de entrada do modelo. A variável espectral foi o NDVI proveniente de imagens MODIS, enquanto que as variáveis agrometeorológicas foram o número de dias com temperatura mínima do ar igual ou inferior a 15°C (NDIAS) e a temperatura mínima absoluta do ar (TMINABS), provenientes de estações meteorológicas situadas nas regiões orizícolas do Rio Grande do Sul. Em virtude de, independente da região, o rendimento de grãos responder de maneira semelhante às condições meteorológicas e de biomassa acumulada (NDVI), ajustou-se um único modelo para cultura do arroz no Estado. A variabilidade regional em termos da produtividade potencial de grãos de

arroz foi inserida no modelo, na forma de variáveis *dummies* (binárias) para indicação de cada região, conforme a Eq. 3.

$$Y = 15,43 - 0,82Reg1 - 0,82Reg3 - 0,92Reg4 - 1,82Reg5 - 1,47Reg6 - 5,17NDVI_{Nov1} - 6,04NDVI_{Mar2} - 0,06NDIAS_{Out2} - 0,12NDIAS_{Mar2} - 0,09TMINABS_{Mar1}$$

onde: Y é a produtividade estimada de grãos de arroz irrigado ($t \cdot ha^{-1}$); $Reg1$, $Reg3$, $Reg4$, $Reg5$ e $Reg6$ correspondem, respectivamente, às regiões da Fronteira Oeste, Depressão Central, Planície Interna à Lagoa dos Patos, Planície Externa à Lagoa dos Patos e Zona Sul; $NDVINov1$, $NDVIMar2$, é o NDVI observado, respectivamente, no primeiro período de novembro, no segundo período de março; $NDIAS_{Out2}$ e $NDIAS_{Mar2}$ é, respectivamente, o número de dias com temperatura mínima do ar igual ou inferior a 15 °C no segundo período de outubro e no segundo período de março; $TMINMar1$ é a temperatura mínima do ar no primeiro período de março

Os resultados apresentados na Tabela 1 mostram que o enfoque metodológico é consistente e que o modelo atende às demandas da modelagem da produtividade de grãos em grandes áreas.

Pode-se citar, ainda, a modelagem proposta para a cultura do trigo. Junges & Fontana (2011) mostraram o avanço na precisão das estimativas da produtividade de grãos pela incorporação dos dados espectrais aos modelos agrometeorológicos. Os autores propuseram uma equação de regressão múltipla que usa as variáveis NDVI e graus-dia (GD) como indicadoras do desenvolvimento vegetativo da cultura, o qual é penalizado com a ocorrência de geadas (IG) e de precipitação pluvial na colheita (PP). A regressão linear múltipla ajustada

Tabela 1. Coeficientes de correlação de Pearson entre os rendimentos de grãos de arroz irrigado oficiais e os estimados; Diferença média ($t \cdot ha^{-1}$) entre os rendimentos oficiais e os estimados a partir do modelo agrometeorológico-espectral, para as diferentes regiões orizícolas do Rio Grande do Sul, Brasil. Período: safras agrícolas 2000/2001 até 2009/2010. Fonte: Klering *et al.* (2016).

Região orizícola	r^{**}	Diferença média ($t \cdot ha^{-1}$)
Fronteira Oeste	0,86	0,40
Campanha	0,84	0,27
Depressão Central	0,66	0,35
Planície Interna à Lagoa dos Patos	0,79	0,29
Planície Externa à Lagoa dos Patos	0,91	0,23
Zona Sul	0,89	0,31

$**$ Significativo a 5% pelo teste t-Student.

(Eq. 4 e Figura 7) apresentou um coeficiente de determinação de 0,99, sendo definida por:

$$Y = -18929 + (5,94NDVI) - (0,41IG) - (1,24PP) + 5,73GD \quad (4)$$

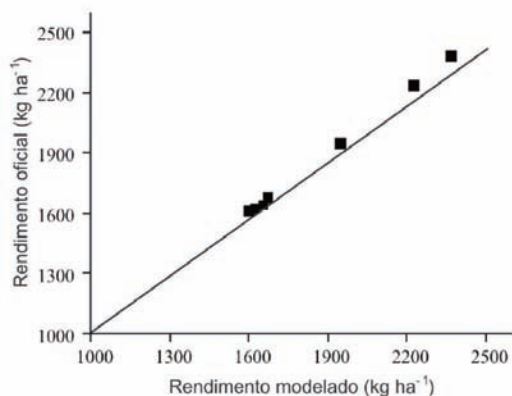


Figura 7. Relação entre rendimento de grãos de trigo (kg ha^{-1}) oficial e estimado pelas equações de regressão linear múltipla, sendo as variáveis independentes NDVI, índice de geada de setembro, precipitação pluvial de outubro e graus-dia acumulados de maio a outubro, de 2000 a 2006, na região de abrangência da Cooperativa Triticola do Alto Uruguai - Cotrijal (13 municípios localizados ao norte do Estado do Rio Grande do Sul). Fonte: Junges & Fontana (2013).

3. Ferramentas de monitoramento da cobertura vegetal

Os estudos desenvolvidos neste tema no âmbito do LEAA e do GA, em sua maioria, utilizam como base os dados de índices de vegetação, tomando como premissa o fato de que os mesmos são consistentes indicadores da resposta da vegetação aos efeitos climáticos, antrópicos ou decorrentes de alteração no uso e cobertura do solo. Neste tema, foram desenvolvidos vários trabalhos, com destaque para os que serão descritos, a seguir, de forma sucinta.

Marques *et al.* (2005) utilizaram imagens AVHRR/NOAA para avaliar a correlação entre a temperatura da superfície do mar (TSM), em regiões dos oceanos Atlântico e Pacífico (TSM), e a cobertura vegetal (NDVI) no Rio Grande do Sul, mensalmente, de forma simultânea e com defasagem de 1, 2 e 3 meses. As imagens NOAA, de baixa resolução espacial, se mostraram úteis em estudos regionais, especialmente aqueles associados a eventos de grande escala. Os autores verificaram que há associação entre a TSM e o NDVI, a qual é dependente da época do ano e da região do Estado (Figura 8).

Nesse trabalho foram lançadas algumas hipóteses sobre os mecanismos de conexão entre as alterações de grande escala nos oceanos Pacífico e Atlântico e as condições meteorológicas do Estado.

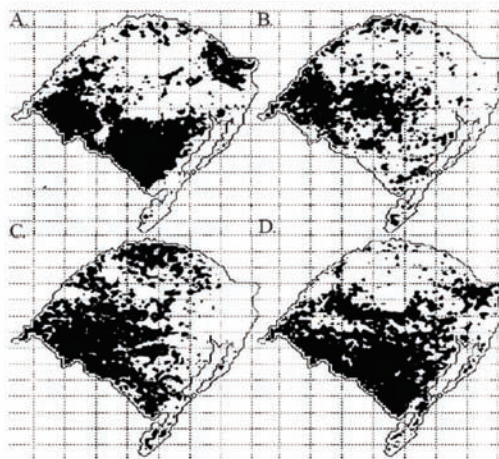


Figura 8. Áreas do Rio Grande do Sul com coeficientes de correlação significativos a nível de 5% entre NDVI e TSM (em preto), no período de 1982 a 1999: A) TSM do Oceano Pacífico Equatorial no Niño 3.4 de novembro e NDVI de janeiro; B) TSM do Oceano Atlântico Subtropical de julho e NDVI de julho; C) TSM do Oceano Atlântico Subtropical de julho e NDVI de agosto e D) TSM do Oceano Atlântico Subtropical de julho e NDVI de setembro. Fonte: Marques *et al.* (2005).

Também com o AVHRR/NOAA e relacionado-se ao monitoramento do efeito de eventos de grande escala, Jacobsen *et al.* (2005) analisaram os efeitos associados a El Niño e La Niña na vegetação do Rio Grande do Sul, dada a associação já extensamente comprovada de relação entre ENOS e o clima e a agricultura no Estado (Berlato & Fontana, 2003).

Ainda com o AVHRR/NOAA, mas com uma série mais longa (GIMMS - *Global Inventory Modeling and Mapping Studies* - de 1982 a 2008), Cordeiro (2014) verificou que, através dos perfis temporais de NDVI, é possível monitorar variações fenológicas da vegetação em decorrência da sua dinâmica temporal, a qual está associada às condições meteorológicas, sendo que a variável meteorológica limitante ao crescimento depende da estação do ano. A autora, também, verificou que a variabilidade de NDVI permite agrupar regiões homogêneas, de forma a identificar e mapear os principais grupos vegetais do Rio Grande do Sul. Além disso, através de análises espaço-temporais e de anomalias no padrão normal da vegetação foi observado que maiores valores de NDVI estão associados, em geral, a eventos El Niño no Rio Grande do Sul, enquanto que menores à La Niña.

Sobre El Niño e La Niña, é importante ressaltar

que o fenômeno teve grande destaque, especialmente no âmbito do GA da UFRGS no final da década de 1990 e início da década de 2000. Foram diversos os estudos realizados, os quais foram compilados em um livro que objetivou analisar os efeitos associados a este fenômeno no clima e na agricultura do Rio Grande do Sul (Berlato & Fontana, 2003).

Destaca-se, ainda, outro relevante estudo realizado no LEAA acerca de monitoramento da cobertura vegetal. Wagner *et al.* (2007), por meio de séries temporais de NDVI/MODIS, observaram e quantificaram a dinâmica temporal da cobertura vegetal de áreas campestres do Bioma Pampa do Rio Grande do Sul e do Uruguai. Os resultados mostraram que, em regiões com predomínio de campos, há uma declividade negativa na tendência linear da média temporal dos índices de vegetação. A tendência negativa dos índices de vegetação, relacionada à combinação da ocor-

rência de déficit hídrico em solos rasos e com sobrepastoreio, indica alterações no padrão de cobertura vegetal do Pampa, com redução do vigor vegetativo. Wagner (2013) também analisou os efeitos do fenômeno ENOS (El Niño Oscilação Sul) sobre o "verdor" dos campos desse Bioma. Foi observado que a variabilidade interanual das condições meteorológicas no Estado é alta, a qual, em parte, está associada ao fenômeno ENOS. No período do verão é quando o fenômeno mostra as maiores alterações no padrão climático da região (Figura 9), com aumento na precipitação pluvial e na amplitude térmica durante o El Niño. O oposto é verificado na fase La Niña. Os autores concluíram que os índices de vegetação são adequados para retratar as relações entre a variabilidade espaço-temporal dos padrões de vegetação campestre e o clima do Pampa do Rio Grande do Sul e Uruguai.

Por fim, extrapolando os limites geográficos do

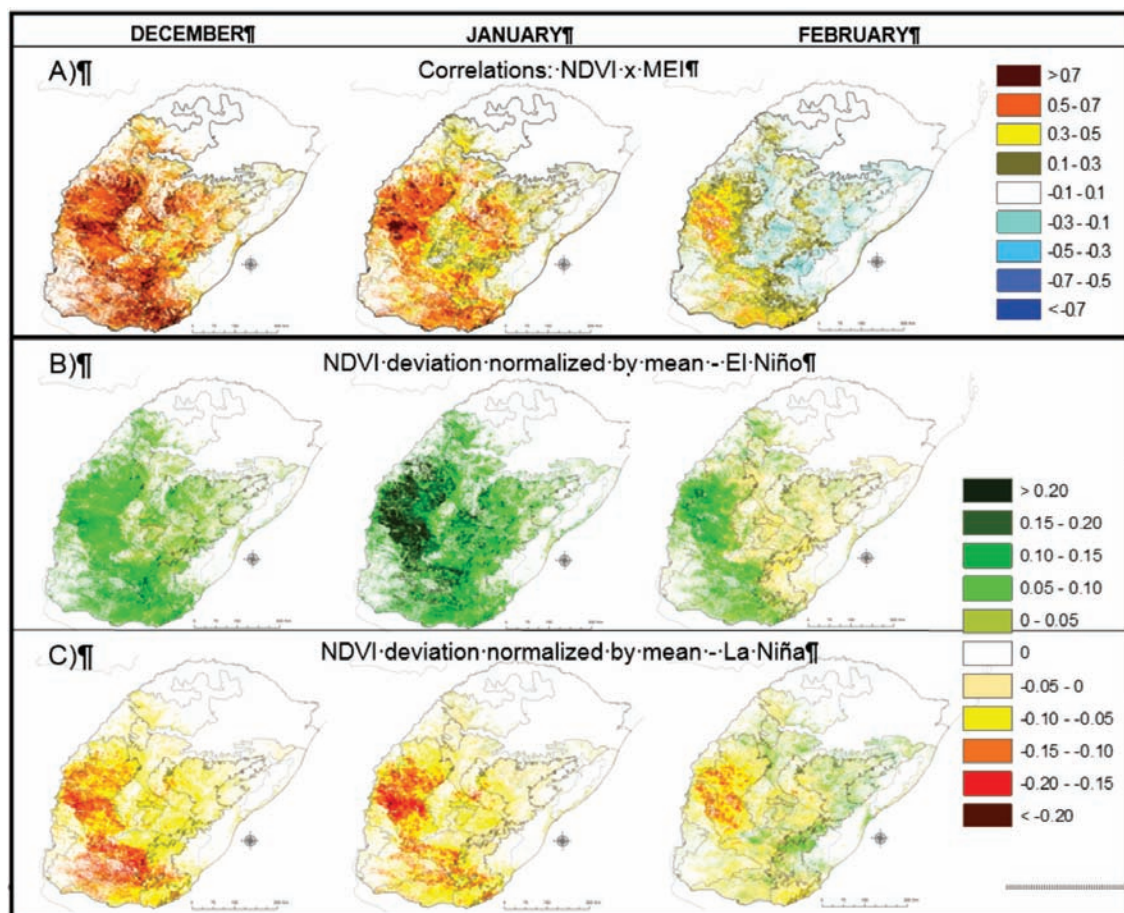


Figura 3. A) correlações entre NDVI e MEI – *Multivariate ENSO Index* ($p < 0.05$, lag 0), e B), C) Desvio padrão de NDVI normalizado pela média em eventos ENOS, em dezembro, janeiro e fevereiro. Análises nos campos do Pampa do Rio Grande do Sul, Brasil, e Uruguai, para o período de Fevereiro de 2000 – agosto de 2011. Fonte: Wagner (2013).

Estado do Rio Grande do Sul, é importante registrar dois relevantes estudos com a cultura do milho em que integrantes do GA e LEAA realizaram em parcerias com grupos de pesquisa de outros países. Ambos utilizaram imagens MODIS e apresentaram enfoques metodológicos relacionados aos descritos nos três segmentos de pesquisa abordados neste trabalho. Mabilana et al. (2012) ajustaram um modelo de estimativa da produtividade do milho na província de Manica, Moçambique. De la Casa et al. (2014) testaram o NDVI como estimador da percentagem de cobertura do solo de dossel de milho em Córdoba, Argentina. Os resultados destes e outros trabalhos conduzidos em diversas regiões do Globo apontam para a robustez das metodologias propostas em condições ambientais diversas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A equipe de pesquisadores do Grupo de Agrometeorologia – GA e do Laboratório de Estudos em Agricultura e Agrometeorologia – LEAA da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, localizado em Porto Alegre, Brasil, tem contribuído na geração de conhecimento em temas relacionados à Agrometeorologia, assim como, para a formação de recursos humanos qualificados na área de monitoramento e previsão de safras, usando imagens orbitais. É um grupo que acumula uma história sólida, construída a partir de uma constante e progressiva sequência de pesquisas, as quais estão listadas nesta revisão. No GA a maior parte dos trabalhos tem foco na modelagem da produtividade, enquanto que no LEAA se concentram os trabalhos prioritariamente relacionados com as estimativas de área cultivada e monitoramento da cobertura vegetal. Os dois grupos têm estreita relação, tanto no que se refere aos pesquisadores que atuam, como um trânsito constante dos estudantes entre os Programas de Pós Graduação em Fitotecnia (PPGFito/UFRGS) e Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto (PPGSR/UFRGS). Os avanços são, prioritariamente, decorrentes de quatro itens: i) desenvolvimento de pesquisas em um ambiente acadêmico, no qual os estudantes são parte ativa das pesquisas, questionando temas, propondo inovações e assegurando a continuidade de estudos; ii) disponibilidade de infraestrutura na UFRGS que, apesar de limitações existentes, abriga o grupo e viabiliza o desenvolvimento das pesquisas; iii) aporte de recursos para o financiamento das pesquisas, majoritariamente proveniente de recursos públicos, através da própria Universidade ou editais de pesquisa oriundos das principais agências nacionais de fomento que,

apesar das limitações, têm sido suficientes; iv) diversas parcerias de trabalho com instituições nacionais e estrangeiras, cuja integração tem permitido a troca de ideias, o intercâmbio de estudantes e pesquisadores, a geração de pesquisas em rede, que são de fundamental importância no contexto brasileiro, dadas as dimensões que o País ocupa, bem como para a consolidação de fortes linhas de pesquisa. Os avanços do ponto de vista técnico foram listados ao longo do texto e estão focados no teste e desenvolvimento de ferramentas e instrumentos que possam ser incorporadas de forma a qualificar os programas de monitoramento da atividade agrícola existente no Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G.A.; COMIRAN, F.; BERGONCI, J.I.; MÜLLER, A.G.; FRANÇA, S.; SANTOS, A.O.; RADIN, B.; BIANCHI, C.A.M.; PEREIRA, P.G. 2006. Déficit Hídrico e produtividade na cultura do milho. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, 41(2):243-249.
- BERGAMASCHI, H.; COSTA, S.M.S.; WHEELER, T. R; Challinor, A.J. 2013. Simulating maize yield in sub tropical conditions of southern Brazil using Glam model. Pesquisa Agropecuária Brasileira (1977. Impressa), 48:132-140.
- BERLATO, M.A. 1987. Modelo de relação entre o rendimento de grãos de soja e deficiência hídrica para o Estado do Rio Grande do Sul. São José dos Campos: INPE, 1987. 103f. Thesis (Doctorate in Meteorology) - Pós Graduação Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- BERLATO, M.A.; FONTANA, D.C. 2003. El Niño e La Niña: Impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul. Aplicações de previsões climáticas na agricultura. Porto Alegre, Ed UFRGS, 110p.
- BOKEN, V.K., SHAYKEWICH, C.F. 2002. Improving an operational wheat yield model using phenological phase-based normalized difference vegetation index. Int. J. Remote Sensing, 23:4155-4168.
- CARMONA, L.C.; BERLATO, M.A.; BERGONCI, J.I. 2002. Relação entre elementos meteorológicos e rendimento do arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul. Revista Brasileira de Agrometeorologia, 10:289-294.
- CORDEIRO, A.P.A.C. 2014. Padrões do Índice de Vegetação associados à variabilidade climática do Estado do Rio Grande do Sul. Tese (doutorado) Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia / Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 154p.
- DE LA CASA, G.G. OVANDO, A.C. RAVELO, E.G. ABRIL & H. BERGAMASCH. 2014. Estimating maize ground cover using spectral data from Aqua-MODIS in Cór-

- doba, Argentina, *International Journal of Remote Sensing*, 35(4):1295-1308,
- FONTANA, D. C., POTGIETER, A., APAN, A. 2007. Assessing the relationship between shire winter crop yield and seasonal variability of the MODIS NDVI and EVI images. *Applied GIS*, 3:1 – 16.
- FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A.; LAUSCHNER, M.H.; MELO, R.W. 2001. Modelo de estimativa de rendimento de soja no Estado do Rio Grande do Sul. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, 36(3):399-403.
- HUETE, A.R.; DIDAN, K.; MIURA, T. et al. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 83:195-213.
- HUETE, A.R.; LIU, H.Q.; BATCHILY, K.; LEEUWN, W. 1997. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 59:440-451.
- JACÓBSEN, L. O.; FONTANA, D.C.; SHIMABUKURO, Y. 2005. Efeitos associados a El Niño e La Niña na vegetação do Estado do Rio Grande do Sul, observados através do NDVI/NOAA. *Revista Brasileira de Meteorologia*, Brasília, 19(2):129-140.
- JENSEN, M. E. 1968. Water consumptions by agricultural plants. In: KOZLOWSKY, T. T.; (ed.) *Water deficits and plant growth*. New York: Academic Press, Cap.2, p.1-22.
- JUNGES, A. H.; FONTANA, D. C. 2011. Modelo agrometeorológico-espectral de estimativa de rendimento de grãos de trigo no Rio Grande do Sul. *Revista Ceres*, 58:9-16.
- JUNGES, A. H.; FONTANA, D. C.; PINTO, D.G. 2013. Identification of croplands of winter cereals in Rio Grande do Sul state, Brazil, through unsupervised classification of normalized difference vegetation index images. *Engenharia Agrícola (Impresso)*, 33:883-895.
- JUSTICE, C.O., TOWNSHEND, J.R.G. & KALB, V.L. 1991. Representation of vegetation by continental data sets derived from NOAA-AVHRR data, *International Journal of Remote Sensing*, 12(5):999-1021
- KIDWELL, K. B. C. 1990. *Global Vegetation Index: User Guide*. Washington, US Department of Commerce. 40p.
- KLERING, E. V.; FONTANA, D. C.; ROGLIO, V.; BERLATO, M. A.; ALVES, R. C. A. 2016. Modelo agrometeorológico-espectral para estimativa da produtividade de grãos de arroz irrigado no Rio Grande do Sul. *Bragantia*. (ahead) KLERING, E. V.; FONTANA, D. C.; ALVES, R. C. M.; ROCHA, J.V.; BERLATO, M. A. 2013. Estimativa de área cultivada com arroz irrigado para o estado do rio grande do sul a partir de imagens Modis. *Ciência e Natura*, 35:126-135.
- KLERING, E. V., FONTANA, D. C., CARGNELUTTI FILHO, A. 2008. Modelagem agrometeorológica do rendimento de arroz irrigado no Rio Grande do Sul. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 43:549 – 558.
- KRUGER, C.A.M.B, FONTANA, D. C., MELO, R. W. 2007. Estimativa do rendimento de grãos da soja no Rio Grande do Sul usando um modelo agrometeorológico-espectral regionalizado. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 15:210 – 219.
- MABILANA, H. ; FONTANA, D. C. ; FONSECA, E. L. 2012. Desenvolvimento de modelo agrometeorológico espectral para estimativa de rendimento do milho na Província de Manica-Moçambique. *Revista Ceres*, 59:337-349. MANJUNATH, K.R., POTDAR, M.B., PUROHIT, N.L. 2002. Large area operational wheat yield model development and validation based on spectral and meteorological data. *Int. J. Remote Sensing*; 23:3023-3038.
- MARQUES, J.R.Q; FONTANA, D. C. ; MELO, R. W. 2005. Estudo da correlação entre a temperatura da superfície dos oceanos Atlântico e Pacífico e o NDVI, no Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, 9(4):520-526.
- MASSELI, F.; CONESE, C.; PETKOV, L.; GILABERT, M.A. 1993. Environmental monitoring and crop forecasting in the Sahel through the use of NOAA NDVI data. A case study: Niger 1986-89. *International Journal of Remote Sensing*, Basingstoke, 14:3471-87.
- MELO, R.W.; FONTANA, D. C., BERLATO, M. ADUCATI, J. R. 2008. An agrometeorological-spectral model to estimate soybean yield, applied to southern Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, 29:4013 – 4028.
- MENGUE, V.P.; FONTANA, D.C. 2015. Avaliação da dinâmica espectro-temporal visando o mapeamento dos principais cultivos de verão no Rio Grande do Sul. *Bragantia (São Paulo, SP. Eletrônico)*, 74(3):331-340.
- RISSE, J.; RIZZI, R.; EPIPHANIO, R. D. V.; RUDORFF, B. F. T.; FORMAGGIO, A. R.; SHIMABUKURO, Y.; FERNANDES, S. L. 2009. Potencialidade dos índices de vegetação EVI e NDVI dos produtos MODIS na separabilidade espectral de áreas de soja. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2009, Natal, RN. *Anais... INPE*, p. 379 – 386.
- RIZZI, R. 2005. Geotecnologias em um sistema de estimativa da produção de soja: estudo de caso no Rio Grande do Sul. 2005. 121f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- SANTOS, JULIANA S.; FONTANA, DENISE C.; SILVA, THIAGO S. F.; RUDORFF, BERNARDO F. T. 2014. Identificação da dinâmica espaço-temporal para estimar área cultivada de soja a partir de imagens MODIS no Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (Online)*, 18:54-63.

WAGNER, A.P.L., WEBER, E., FONTANA, D. C., DUCATI, J. R., KLERING, E. 2007. Estimativa de Área de Soja no Rio Grande do Sul Utilizando Imagens NDVI/MODIS In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2007, Florianópolis. Anais. São José dos Campos: INPE, v.1. p.457 – 464.

WAGNER, A.P.L.; FONTANA, D. C.; Fraise, C.; WEBER, E.; HASENACK, H. 2013. Tendências temporais de índices de vegetação nos campos do Pampa do Brasil e do Uruguai. Pesquisa Agropecuária Brasileira (Online), 48:1192-1200.

Riesgos climáticos para el cultivo de maíz en el centro-sudeste bonaerense:

A. Temperaturas extremas

Panunzio Moscoso, M. P.; A. I. Irigoyen, A. I. Della Maggiora y R.H. Rizzalli

RESUMEN

Deficiencias de agua y temperaturas extremas son factores limitantes en la producción de maíz que a menudo provocan importantes pérdidas económicas. Los impactos dependen del estado fenológico del cultivo cuando la adversidad ocurre, la intensidad y el tiempo de exposición. El objetivo del trabajo fue evaluar el riesgo climático para la producción de maíz en el centro-sudeste bonaerense, debido a la exposición a temperaturas extremas. Los escenarios agrícolas seleccionados para la evaluación combinaron seis fechas de siembra y tres ciclos de madurez en las localidades de Azul, Tandil, Balcarce y Mar del Plata. Las estaciones de crecimiento (serie 1971-2010) fueron simuladas mediante un modelo de desarrollo basado en la temperatura del aire. El riesgo de daño por heladas en estados tempranos del desarrollo del cultivo fue determinado, en cada localidad, a partir de la ocurrencia de la adversidad después de la fecha estimada del estado de cuatro hojas expandidas (V4) para cada fecha de siembra. El riesgo de heladas antes de la fecha de madurez fisiológica (R6) del cultivo fue determinado en cada localidad para los escenarios de fecha de siembra x ciclo. Se determinó la frecuencia relativa de días con temperatura máxima mayor a 30 °C durante la estación de crecimiento y en el período crítico para la definición de rendimiento. En siembras tempranas, siempre hay mayor riesgo de daños para el cultivo, debido a la ocurrencia de heladas tardías después de V4. A medida que se atrasa la siembra, el riesgo disminuye en toda la región. Balcarce presentó menor riesgo de heladas tardías. Los escenarios de siembras tardías y ciclos largos aumentan el riesgo de heladas durante el llenado de granos. En Azul y Tandil se observa mayor frecuencia de años con heladas antes de R6. Ambas localidades muestran una tendencia significativa a adelantar las heladas tempranas. El riesgo asociado a temperaturas elevadas es menor que el riesgo por heladas. Los escenarios evaluados muestran que el riesgo de exposición a temperaturas elevadas es mayor en Azul.

Palabras clave: fechas de siembra, ciclos de madurez, heladas, temperaturas elevadas

Panunzio Moscoso, M. P.; A. I. Irigoyen, A. I. Della Maggiora and R.H. Rizzalli, 2016. Climate risks in maize crop in the southeastern of Buenos Aires Province: A. Extreme temperatures. RADA VII: 41-56

SUMMARY

Water deficiencies and extremes temperatures are two environmental factors that limit maize production, often causing extensive economic losses. The impacts on crop depend upon the growth stage when adverse condition occurs, intensity and time of exposure. The objective was to assess the climatic risks for maize production due extreme temperatures in southeastern of Buenos Aires. Six planting dates and three cultivars with contrasting maturity were selected for the simulation scenarios. The maize growing season agroclimatology (1971-2010) was based on a simple model of crop development using growing degree-days as estimator. The approach was performed for four locations of the region. Dates of key stages of development (V4, R1 and R6) were predicted. A subperiod of development was considered as completed when a given accumulation of daily temperatures above the base temperature (8 °C) has been achieved from planting (P), under the assumption of no other limiting conditions than temperature. Frost risks were computed from the occurrence of frosts after V4 and before R6 stages for each scenario. Relative frequency of days with maximum temperature above 30°C was computed for critical period and growing season. Late frosts are less frequent at Balcarce. Late planting should be avoided for long season cultivars. Early maturing cultivars and middle planting dates are more suitable options to reduce the frost damage risks in maize across all area. Scenarios with early planting had risks of occurrence of late frosts after V4 stage, whereas scenarios with late planting and long season cultivars increased the frost risks during the grain filling period. Frosts before R6 stage are most frequent at Azul and Tandil. Moreover, significant trends to anticipate the occurrence of early frosts were detected over time in both locations. In general, stress due to elevated temperatures is less feasible than damages by frost. The scenarios performed showed that the crop has more exposure to stress due elevated temperatures in Azul.

Key-words: planting date, contrasting maturity cultivars, frosts, high temperature

M.P. Panunzio Moscoso, A. I. Irigoyen, A. I. Della Maggiora y R.H. Rizzalli: Unidad Integrada Balcarce: Facultad de Ciencias Agrarias UNMdP -INTA Balcarce. Ruta Nac. 226, km 73,5, Balcarce CC 276 (7620), Argentina. Correspondencia a: irigoyen.andrea@inta.gob.ar

INTRODUCCIÓN

La producción agropecuaria es una de las actividades más expuestas a los riesgos climáticos. Las evidencias de cambio climático son contundentes y a su vez, la frecuencia de eventos extremos ha incrementado (IPCC, 2013). Los sistemas productivos dependientes del tiempo y clima se han tornado, entonces, cada vez más vulnerables (FAO, 2009).

La evaluación de riesgos para un sistema específico requiere identificar los alcances de algunos términos relacionados como la amenaza y la vulnerabilidad. La amenaza involucra un factor externo que puede causar perjuicios en un lugar específico, con determinada intensidad y duración. En términos agrometeorológicos, la caracterización de la amenaza se corresponde con la caracterización de la adversidad. La vulnerabilidad indica la susceptibilidad de un sistema que se encuentra expuesto a un factor adverso. En el caso de la producción agrícola, la vulnerabilidad implica la pérdida de rendimiento o incluso la pérdida total

del cultivo debido a su exposición a la condición adversa. El riesgo resulta de la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad.

En la región pampeana, principal área agrícola del país, se han detectado cambios en los patrones climáticos y en la producción agrícola (Magrin *et al.*, 2005; Barros, 2007, Magrin *et al.*, 2007; Travasso *et al.*, 2007; Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2015). Fernández Long *et al.* (2013) indicaron un calentamiento regional sobre el área agrícola de Argentina, debido principalmente al aumento de las temperaturas mínimas. No obstante, las tendencias de los índices bioclimáticos basados en la temperatura no se distribuyeron de manera uniforme en toda la región. Los cambios observados en índices bioclimáticos pueden indicar cambios en las estaciones de crecimiento de los cultivos.

En el sudeste de la provincia de Buenos Aires, Irigoyen *et al.* (2011) han descripto una tendencia creciente en los grados-días acumulados durante dos trimestres que son coincidentes con la estación de crecimiento del cultivo de maíz para

un conjunto de combinaciones de prácticas de manejo. En virtud de las tendencias descriptas en los índices bioclimáticos, se esperan cambios en la ocurrencia de estados fenológicos sensibles del cultivo y así sobre el tiempo y el grado de exposición a las amenazas, que también pueden cambiar en el tiempo.

La valoración simultánea de la variabilidad de las amenazas y de la variabilidad de la ocurrencia de los períodos susceptibles del cultivo permite cuantificar los riesgos y contribuir a la toma de decisiones de manejo agrícola.

En ese sentido, la generación de escenarios agrícolas (estaciones de crecimiento asociadas a prácticas de manejo), a partir de modelos de simulación del desarrollo del cultivo con base en series meteorológicas, provee información factible de ser analizada probabilísticamente y como serie de tiempo.

Deficiencias de agua y temperaturas extremas son factores limitantes de la producción de maíz, que a menudo provocan importantes pérdidas económicas. En este trabajo fue abordado el análisis de riesgo por temperaturas extremas.

Una helada tardía puede provocar serios daños al cultivo, especialmente si ocurre en estados de desarrollo sensibles a bajas temperaturas. Después de cuatro hojas desarrolladas (V4), la helada es perjudicial porque el ápice de crecimiento de la planta de maíz comienza a elongarse y emerge sobre la superficie del suelo (Ritchie *et al.* 1997, Nielsen, 2008). Por su parte, las heladas tempranas también pueden producir severos daños hacia fin de ciclo, interrumpiendo el período de llenado de granos, provocando así, disminución de rendimiento (Andrade *et al.*, 1996). De esa forma se pueden identificar dos momentos claves para definir los períodos durante la estación de crecimiento (EC), en los cuales el cultivo es susceptible a bajas temperaturas.

Además de los daños previstos por bajas temperaturas, algunos perjuicios a la producción pueden originarse por temperaturas elevadas durante la fijación de granos (Cheikh & Jones, 1994; Cárcova & Otegui, 2001; Cicchino *et al.*, 2010 a; Rattalino Edreira *et al.*, 2011; Rattalino Edreira & Otegui, 2012) e incluso por efectos en la fenología, retrasando la floración y reduciendo las tasas de desarrollo (Cicchino *et al.*, 2010 b). Por esa razón, pueden considerarse vulnerables a temperaturas elevadas, tanto el período crítico del cultivo para la determinación del rendimiento (PC) como la estación completa de crecimiento (EC), aunque sea con diferente grado de susceptibilidad,

Cambios en la distribución temporal de las

amenazas y en el momento de ocurrencia de los estados sensibles han sido descriptos, mediante el análisis de las series de tiempo, en la región sudeste de Buenos Aires. Robles *et al.* (2012), a partir del análisis de la serie histórica 1971-2010 de la localidad de Balcarce, reportaron que en las últimas décadas disminuyó el riesgo de daños por heladas tardías en fechas de siembra tempranas, para cultivos de ciclo intermedio. Por otra parte, algunas diferencias en el ambiente térmico, asociadas a diferentes escenarios agrícolas generados por las fechas de siembra, han permitido detectar diferencias en el desarrollo simulado de cultivos de ciclo intermedio (Balbuena, 2006; Irigoyen *et al.*, 2011).

Aún cuando se dispone de alguna información local y regional sobre la variabilidad climática y sobre algunos efectos de la fecha de siembra sobre el desarrollo del cultivo, se debería evaluar un conjunto más completo de posibles escenarios que incluyan también el efecto de la duración de la estación de crecimiento (cultivos de diferente madurez).

El objetivo principal fue evaluar el riesgo climático debido a temperaturas extremas para la producción de maíz en el centro-sudeste bonaerense, mediante el análisis probabilístico del desarrollo simulado del cultivo para escenarios agrícolas que combinan diferentes fechas de siembra y ciclos de madurez. Los objetivos específicos para cada escenario agrícola y localidad fueron: a) confeccionar series históricas de la estación de crecimiento del cultivo de maíz a partir de un modelo de simulación del desarrollo basado en la temperatura del aire; b) determinar el riesgo de daños por heladas en estados de desarrollo sensibles a la adversidad; c) determinar la frecuencia de ocurrencia de temperaturas elevadas durante la estación de crecimiento y el período crítico para la determinación del rendimiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

Escenarios agrícolas por simulación del desarrollo del cultivo

Los escenarios agrícolas evaluados en cuatro localidades de la zona centro-sudeste de Buenos Aires (Tabla 1) fueron generados combinando seis fechas de siembra, desde fines de septiembre (25-09) hasta mediados de noviembre (15-11) y tres ciclos de madurez del cultivo de maíz (corto, intermedio y largo).

La estación de crecimiento (EC) en cada escenario (fecha de siembra x ciclo) fue simulada para cada localidad y cada campaña agrícola (1971-1972 a 2009-2010), mediante un modelo simple

de desarrollo del cultivo basado en el concepto de tiempo térmico (Ritchie y NeSmith, 1991). Un subperíodo específico se consideró completo cuando fue alcanzada una determinada suma térmica preestablecida por encima de la temperatura base del cultivo (8 °C). Si bien existe una variedad de modelos de predicción fenológica basados en la relación entre desarrollo y temperatura (Kumudini *et al.*, 2014), la simplicidad de cálculo fue el criterio seguido para seleccionar el modelo residual. En este modelo, el tiempo térmico se determina como la sumatoria de las diferencias entre la temperatura media diaria del aire y la temperatura base.

La duración de la estación de crecimiento (EC) para cada escenario y cada campaña agrícola (1971-1972 a 2009-2010) quedó definida como el período comprendido entre la siembra (S) y la fecha estimada de madurez fisiológica (R6). La ocurrencia de otros estados fenológicos claves para la definición de riesgos debidos a temperaturas extremas, como cuatro hojas desarrolladas (V4) y floración (R1), también se estimó con base en los requerimientos térmicos informados por la literatura. El cultivo de maíz requiere aproximadamente 60 °Cd para desarrollar cada hoja (Cirilo, 1994) y no se consideraron, en este trabajo, diferencias en el tiempo térmico requerido para alcanzar V4 (240 °Cd) entre los cultivares de diferente madurez. Los requerimientos térmicos utilizados para simular las fechas de ocurrencia de R1 y R6 (Tabla 2) fueron seleccionados a partir de la información reportada para un grupo de cultivares empleados en la zona de estudio (Capristo *et al.*, 2007). Se consideró período crítico (PC) para la definición de rendimiento el período que se extiende desde 20 días antes a 20 días después de la floración (R1).

Tabla 1. Ubicación geográfica de las localidades en estudio.

Localidad	Latitud	Longitud	Altura sobre nivel del mar (m)
Azul	-36° 50'	59° 51'	132
Tandil	-37° 19'	59° 08'	175
Balcarce	-37° 45'	58° 18'	130
Mar del Plata	-38° 00'	57° 32'	21

Tabla 2. Requerimiento térmico de los subperíodos siembra-floración (S-R1) y floración-madurez fisiológica (R1-R6) para cultivares de maíz de corta (Ciclo 1), intermedia (Ciclo 2) y larga (Ciclo 3) duración de la estación de crecimiento (EC).

Cultivar	Tiempo térmico (°Cd)	
	S-R1	R1-R6
Ciclo 1	660	840
Ciclo 2	760	870
Ciclo 3	870	860

La variabilidad de la EC para cada escenario (fecha de siembra x ciclo) fue descripta mediante la variabilidad interanual en las fechas de ocurrencia de estados clave y en la duración de subperíodos fenológicos. Se calcularon estadísticos descriptivos básicos para las fechas de ocurrencia de V4, R1 y R6. Se utilizó el test de Shapiro-Wilks ($p > 0,05$) para evaluar la normalidad de la duración de los subperíodos fenológicos. Se realizaron comparaciones entre los escenarios por localidad y entre las localidades por escenario. Se aplicó el test no paramétrico de Kruskal-Wallis ($p < 0,05$), por suma de rangos, para evaluar las diferencias entre grupos: a) entre las fechas de siembra para cada localidad y para cada ciclo y b) entre las localidades para cada escenario (fecha de siembra x ciclo de madurez). El test de Tukey fue aplicado cuando se detectaron diferencias significativas entre los grupos en la distribución de frecuencias.

Se aplicó el análisis de correlación de Spearman ($p < 0,05$) para evaluar las tendencias en las series de tiempo para cada escenario y localidad en: a) la duración de la EC y de subperíodos fenológicos EC; b) fechas de ocurrencia de eventos fenológicos clave (V4, R1 y R6).

Ocurrencia de heladas durante períodos susceptibles del cultivo

Las series de temperatura mínima del aire (1971-2010) de las cuatro localidades fueron empleadas para determinar la ocurrencia de heladas meteorológicas (HM), temperaturas iguales o inferiores a 0°C registradas en abrigo meteorológico.

Para caracterizar la variabilidad de la amenaza se determinaron, para cada localidad, las fechas media y extrema de últimas heladas (FMUHM y FEUHM) y de primeras heladas (FMPHM y FEPHM) de la serie histórica.

La exposición del cultivo a bajas temperaturas fue descripta según dos subperíodos susceptibles: a) ocurrencia de HM después del estado de cuatro hojas desarrolladas (V4) y b) ocurrencia de HM antes de la madurez fisiológica (R6).

El riesgo de daño por heladas en estados tempranos del desarrollo del cultivo fue evaluado en cada localidad a partir de la ocurrencia de la adversidad (amenaza) después de la fecha estimada del estado V4 (período vulnerable) para cada fecha de siembra. Se representó el riesgo en estados tempranos mediante gráficos box-plot (mediana, cuartiles 1 y 3, valores máximo y mínimo) con la distribución de frecuencia de las fechas estimadas de ocurrencia del estado V4 en cada escenario en comparación con las fechas media y extrema de

última helada de cada localidad.

Se consideraron escenarios libres de riesgo en estados tempranos de desarrollo aquellos escenarios cuya fecha estimada de ocurrencia de V4 fue siempre posterior a la fecha extrema de última HM (FEUHM) de la serie histórica. Por su parte, cualquier escenario con la ocurrencia estimada de V4 durante el período con heladas (previo a la FEUHM) representa algún nivel de riesgo para el cultivo.

En cada localidad, el nivel de riesgo de heladas en estadios tempranos se cuantificó mediante el análisis probabilístico de la ocurrencia de la amenaza durante el período susceptible. Se empleó el descriptivo número de años con HM, ya que la ocurrencia de una única helada durante la campaña agrícola puede ocasionar daño. Se representó la frecuencia relativa de campañas agrícolas en la serie histórica con al menos una HM después de la fecha estimada de V4 (FRHM después de V4) para cada fecha de siembra.

El riesgo de heladas en los estados avanzados del cultivo fue evaluado en cada localidad a partir de la ocurrencia de la adversidad (amenaza) durante el llenado y antes de la fecha estimada de R6 (período vulnerable), de acuerdo a los escenarios (fecha de siembra x ciclo del cultivo). Se representó el riesgo en estados avanzados mediante gráficos box-plot (mediana, cuartiles 1 y 3, valores máximo y mínimo) con la distribución de frecuencia de las fechas estimadas de ocurrencia del estado R6 en cada escenario en comparación con las fechas extrema y media de primera helada de cada localidad.

Se consideraron como escenarios libres de riesgo en estados avanzados de desarrollo a aquellos escenarios cuya fecha estimada de ocurrencia de R6 es siempre previa a la fecha extrema de primera HM de la serie histórica (FEPHM). Por su parte, cualquier escenario con la ocurrencia de R6 durante el período con heladas (posterior a FEPHM) representa algún nivel de riesgo para el cultivo.

En cada localidad, el nivel de riesgo de heladas en estadios avanzados se cuantificó mediante el análisis probabilístico de la ocurrencia de la amenaza durante el período susceptible. Se representó la frecuencia relativa de campañas agrícolas en la serie histórica con al menos una HM antes de la fecha estimada de R6 (FRHM antes de R6) para cada escenario.

Se establecieron cuatro categorías para describir el nivel de riesgo de acuerdo a la frecuencia relativa de ocurrencia: bajo (0 a 0,25), moderado a bajo (0,26 a 0,50), moderado a alto (0,51 a 0,75) y alto (0,76 a 1,00).

Se aplicó el análisis de correlación de Spearman ($p < 0,05$) para evaluar la presencia de tendencias en las series de tiempo de las fechas medias de ocurrencia de heladas tempranas (FMPHM) y tardías (FMUHM) en cada localidad.

Ocurrencia de condiciones de estrés por temperaturas elevadas

Las series históricas (1971-2010) de temperatura máxima del aire (T_{max}) de las cuatro localidades fueron empleadas para determinar la ocurrencia de condiciones de estrés por elevadas temperaturas, considerando como una amenaza la ocurrencia de T_{max} superior a 30°C .

La exposición a temperaturas elevadas fue descripta para dos subperíodos con diferente susceptibilidad: a) estación de crecimiento (EC) y b) período crítico para la definición de rendimiento (PC).

El número de días con temperatura máxima mayor a 30°C (NDTM30) durante la estación de crecimiento (EC) y durante el período crítico (PC) del cultivo fue calculado para cada una de las campañas analizadas (1971-2010) en cada localidad y para cada uno de los escenarios (fecha de siembra x ciclo). Se representó la variabilidad interanual de la amenaza de temperaturas elevadas mediante gráficos boxplots (mediana, cuartiles 1 y 3, valores máximo y mínimo) con la distribución de frecuencia de NDTM30 durante el PC y la EC. Se consideró al cociente entre NDTM30 y la duración del período analizado (EC o PC) como un indicador del grado de exposición a condiciones adversas por temperaturas elevadas (ExpTM30).

Se realizaron comparaciones para NDTM30 durante la EC y el PC, como así también para el tiempo de exposición (ExpTM30, como fracción) a condiciones adversas en la EC, entre los escenarios por localidad y entre las localidades por escenario. Se aplicó el test no paramétrico de Kruskal-Wallis ($p < 0,05$), por suma de rangos, para evaluar las diferencias entre grupos: a) entre las fechas de siembra para cada localidad y ciclo y b) entre las localidades para cada escenario. El test de Tukey fue aplicado cuando se detectaron diferencias significativas en la distribución de frecuencias entre los grupos.

Se aplicó el análisis de correlación de Spearman ($p < 0,05$) para evaluar la presencia de tendencias en las series de tiempo de NDTM30 en cada localidad y escenario.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estación de crecimiento (EC) en escenarios por simulación del desarrollo del cultivo

En toda la región, la mediana de la duración de la estación de crecimiento (EC) del cultivo de maíz varió desde 125 a 160 días para los cultivares de ciclo corto, 137 a 171 para los cultivares de ciclo intermedio y 150 a 180 para los cultivares de ciclo largo (Tabla 3). Se observaron diferencias significativas entre las fechas de siembra (FS) en la duración de la EC, con tendencia a acortarse a medida que se retrasa la fecha de siembra. Entre las fechas de siembra tardías, 25-10, 5-11 y 15-11, no se encontraron diferencias significativas en Azul, Mar del Plata y Tandil, con excepción de esta última para ciclo largo. En Balcarce no se encontraron diferencias significativas entre las últimas dos fechas de siembra.

No se encontraron diferencias significativas en la duración de la EC entre las localidades de Mar del Plata, Tandil y Balcarce, pero sí entre éstas y Azul. En Azul, la estación fue más corta en todas las fechas de siembra y para los tres cultivares. La duración máxima extrema de la EC se obtuvo en el escenario de cultivares de ciclo largo y siembra tardía con 232 días en Azul y 326 días en Balcarce (datos no mostrados). Se ha reportado que las estaciones de crecimiento más extendidas coinciden con campañas agrícolas con eventos La Niña, cuando fue evaluado un cultivar de madurez intermedia (Irigoyen *et al.*, 2011a).

La duración del subperíodo S-R1 para cada ciclo de madurez se redujo, en cada localidad, en las siembras tardías, pero no se observaron diferencias significativas entre dos fechas de siembra consecutivas (Tabla 4). Al comparar los escenarios (fecha de siembra x ciclo de madurez) entre las localidades, se detectaron diferencias significativas en la duración del subperíodo S-R1, siendo

Tabla 3. Valores medianos de la duración de la estación de crecimiento de maíz (EC) en el centro-sudeste bonaerense, bajo escenarios con seis fechas de siembra (FS) y tres ciclos de madurez.

Localidad	FS	Duración (días)								
		Ciclo 1			Ciclo 2			Ciclo 3		
Azul	25-09	146	a	B	156	a	B	165	a	B
	05-10	140	ab	B	151	ab	B	159	ab	B
	15-10	134	bc	B	145	bc	B	154	bc	B
	25-10	131	cd	B	142	cd	B	152	c	B
	05-11	127	d	B	139	d	B	150	c	B
	15-11	125	d	B	137	d	B	150	c	B
Tandil	25-09	154	a	A	166	a	A	176	a	A
	05-10	149	ab	A	162	ab	A	172	ab	A
	15-10	143	bc	A	156	bc	A	168	b	A
	25-10	140	cd	A	153	c	A	168	b	A
	05-11	137	d	A	152	c	A	168	b	A
	15-11	135	d	A	152	c	A	174	a	A
Balcarce	25-09	160	a	A	171	a	A	180	c	A
	05-10	151	ab	A	163	ab	A	173	a	A
	15-10	146	bc	A	158	bc	A	168	ab	A
	25-10	141	c	A	154	bc	A	166	b	A
	05-11	137	cd	A	150	c	A	162	b	A
	15-11	135	d	A	152	c	A	165	ab	A
Mar del Plata	25-09	158	a	A	170	a	A	180	a	A
	05-10	152	ab	A	165	ab	A	175	ab	A
	15-10	147	bc	A	159	bc	A	170	b	A
	25-10	144	cd	A	156	c	A	169	b	A
	05-11	139	d	A	154	c	A	168	b	A
	15-11	136	d	A	153	c	A	171	b	A

Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre las fechas de siembra para cada combinación de localidad y ciclo. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre localidades para cada escenario (fecha de siembra x ciclo). Ciclo 1: ciclo corto, Ciclo 2: ciclo intermedio, Ciclo 3: ciclo largo.

menor para la mayoría de las fechas de siembra en las localidades de Tandil y Azul. La duración del subperíodo R1-R6 fue más corta en Azul respecto de las restantes localidades, las cuales no se diferenciaron significativamente entre ellas (Tabla 5). Los valores máximos de la duración del subperíodo R1-R6 se distanciaron por unos 100 días entre Balcarce y Azul (datos no presentados).

Cabe destacar que la menor diferencia entre los ciclos de madurez en la duración del subperíodo reproductivo con respecto al subperíodo S-R1 está relacionada, en parte, con una menor diferencia entre ciclos en el requerimiento térmico (Tabla 2), aunque también con una mayor variabilidad interanual en la duración del mismo. La importancia de la duración de este subperíodo reproductivo radica en que ha sido asociada positivamente con el rendimiento en grano, cuando fue evaluado en Balcarce para diferentes ciclos de madurez (Carpisto *et al.*, 2007).

Ocurrencia de heladas durante períodos susceptibles del cultivo

Dado que se consideró igual requerimiento térmico desde la siembra hasta la fase de cuatro hojas desarrolladas (V4) para todos los ciclos de madurez, se evaluaron solamente las combinaciones de fechas de siembra y localidades para caracterizar el riesgo en estados tempranos de desarrollo del cultivo.

En la Figura 1 se presentan por cada localidad las fechas de ocurrencia de heladas meteorológicas (HM) tardías (media y extrema) y la variabilidad interanual en las fechas de ocurrencia de V4 para cada fecha de siembra. El estado V4 siempre ocurrió después de la fecha media de última helada meteorológica (FMUHM) en cualquiera de los escenarios. Por esa razón, los riesgos de heladas meteorológicas (HM) luego de V4 quedaron determinados en el período entre la fecha media y la fecha extrema de última helada. En todas las localidades, el cultivo estuvo libre de riesgo por heladas

Tabla 4. Valores medianos de la duración del subperíodo siembra-floración de maíz (S-R1) en el centro-sudeste bonaerense, bajo escenarios con seis fechas de siembra (FS) y tres ciclos de madurez.

Localidad	FS	Duración (días)								
		Ciclo 1			Ciclo 2			Ciclo 3		
Azul	25-09	83	a	B	91	a	B	99	a	B
	05-10	77	ab	B	85	ab	B	93	ab	B
	15-10	73	bc	B	78	bc	B	86	bc	B
	25-10	66	cd	B	73	cd	B	82	cd	B
	05-11	61	de	B	69	de	B	77	de	B
	15-11	57	e	B	64	e	B	72	e	B
Tandil	25-09	88	a	AB	97	a	AB	104	a	A
	05-10	81	ab	A	89	ab	AB	97	ab	A
	15-10	76	bc	AB	83	bc	AB	91	bc	AB
	25-10	69	cd	AB	77	cd	AB	85	cd	AB
	05-11	65	de	AB	72	de	AB	81	de	AB
	15-11	60	e	AB	68	e	AB	76	e	AB
Balcarce	25-9	92	a	A	99	a	A	108	a	A
	05-10	83	ab	A	91	ab	A	99	ab	A
	15-10	77	bc	A	84	bc	A	92	bc	A
	25-10	71	cd	A	78	cd	A	87	cd	A
	05-11	65	de	A	75	de	A	83	de	A
	15-11	61	e	A	69	e	A	78	e	A
Mar del Plata	25-09	91	a	A	97	a	A	106	a	A
	05-10	84	ab	A	91	ab	A	99	ab	A
	15-10	77	bc	A	85	bc	A	93	bc	A
	25-10	71	cd	A	79	cd	A	88	cd	A
	05-11	66	de	A	74	de	A	83	de	A
	15-11	62	e	A	70	e	A	79	e	A

Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre las fechas de siembra para cada combinación de localidad y ciclo. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre localidades para cada escenario (fecha de siembra x ciclo). Ciclo 1: ciclo corto, Ciclo 2: ciclo intermedio, Ciclo 3: ciclo largo.

Tabla 5. Valores medianos de la duración del subperíodo floración-madurez fisiológica de maíz (R1-R6) en el centro-sudeste bonaerense, bajo escenarios con seis fechas de siembra (FS) y tres ciclos de madurez.

Localidad	FS	Duración (días)								
		Ciclo 1			Ciclo 2			Ciclo 3		
Azul	25-09	63	b	B	65	b	B	67	d	B
	05-10	63	b	B	65	b	B	68	cd	B
	15-10	63	b	B	67	b	B	69	cd	B
	25-10	64	b	B	69	ab	B	71	bc	B
	05-11	66	ab	B	71	a	B	74	ab	B
	15-11	68	a	B	73	a	B	78	a	B
Tandil	25-09	68	b	A	72	d	A	74	d	A
	05-10	67	b	A	72	cd	A	74	cd	A
	15-10	69	b	A	74	c	A	77	c	A
	25-10	71	ab	A	76	bc	A	81	bc	A
	05-11	72	a	A	80	ab	A	87	ab	A
	15-11	74	a	A	83	a	A	97	a	A
Balcarce	25-09	68	b	A	72	c	A	73	c	A
	05-10	69	b	A	73	bc	A	74	c	A
	15-10	69	ab	A	73	bc	A	76	c	A
	25-10	70	a	A	74	abc	A	81	bc	A
	05-11	71	a	A	78	ab	A	85	ab	A
	15-11	72	a	A	84	a	A	90	a	A
Mar del Plata	25-09	69	b	A	73	c	A	75	c	A
	05-10	69	b	A	74	bc	A	75	c	A
	15-10	70	ab	A	74	bc	A	76	c	A
	25-10	71	ab	A	77	bc	A	78	bc	A
	05-11	73	ab	A	78	ab	A	84	ab	A
	15-11	74	a	AB	82	a	AB	87	a	AB

Se indican solamente los contrastes que resultaron significativos (Kruskal Wallis $<0,05$). Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre las fechas de siembra para cada combinación de localidad y ciclo. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre localidades para cada escenario (fecha de siembra x ciclo). (Ciclo 1: ciclo corto, Ciclo 2: ciclo intermedio, Ciclo 3: ciclo largo).

tardías en la última fecha de siembra (15-11), ya que el estado de V4 ocurrió en todas las campañas agrícolas con posterioridad a la fecha extrema de última HM (FEUHM). En el caso particular de Balcarce, esto fue válido para las últimas tres fechas de siembra. En todos los demás escenarios analizados para esas localidades existió riesgo de daño en estados tempranos y, que de esa forma, se afecte al rendimiento del cultivo.

De modo general, las fechas de siembra más tempranas son las que presentaron mayor riesgo de ocurrencia de heladas luego de V4 en todas las localidades. Balcarce y Tandil fueron las localidades con menor frecuencia relativa de ocurrencia de años con HM luego de V4 en las dos primeras fechas de siembra, no detectándose diferencias entre las localidades evaluadas para las fechas de siembra del 05-11 al 15-11 (Figura 2).

En la Figura 3 se muestra la variabilidad interanual de las fechas de ocurrencia de madurez fisiológica (R6) según los escenarios evaluados jun-

to con las fechas media y extrema de ocurrencia de primeras heladas en cada localidad. Se distingue en la zona, la localidad de Azul donde las primeras heladas (FEPHM y FMPHM) ocurrieron más anticipadamente. Solamente los escenarios con fechas de siembra tempranas y cultivares de ciclo corto (ciclo 1) estuvieron libres de riesgo en todas las localidades. Los escenarios de fechas de siembras tardías y ciclos largos aumentaron la exposición del cultivo a heladas tempranas (la distribución de frecuencias de ocurrencia de R6 se ubica en su mayor parte después de la FEPHM). Por su parte, en Mar del Plata las heladas tempranas ocurrieron más tardíamente (30 días en promedio comparado con Azul) y por esa razón, hubo menor exposición a heladas antes de R6 para los tres ciclos y todas las fechas de siembra. En esta localidad todos los escenarios con cultivares de ciclo corto estuvieron completamente libres de riesgo (la distribución de frecuencias de ocurrencia de R6 se ubica completamente antes de la FEPHM), con excepción de

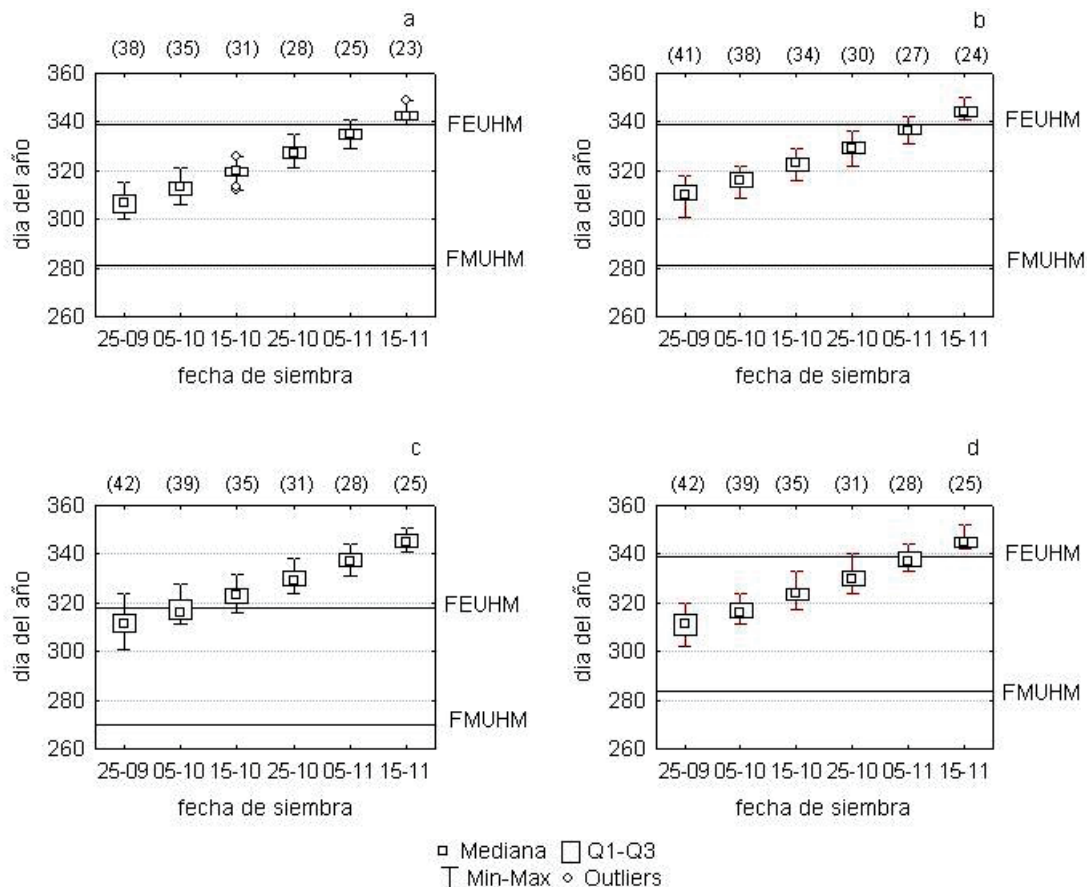


Figura 1. Variabilidad interanual de las fechas de ocurrencia del estado de cuatro hojas desarrolladas de maíz (V4) según fecha de siembra y localidad. a. Azul. b. Tandil. c. Balcarce. d. Mar del Plata. Las líneas enteras indican las fechas media y extrema de ocurrencia de últimas heladas meteorológicas en cada localidad (serie 1971 2010). FMUHM: fecha media de última helada meteorológica. FEUHM: fecha extrema de última helada meteorológica. Entre paréntesis se indica la duración del subperíodo siembra-V4.

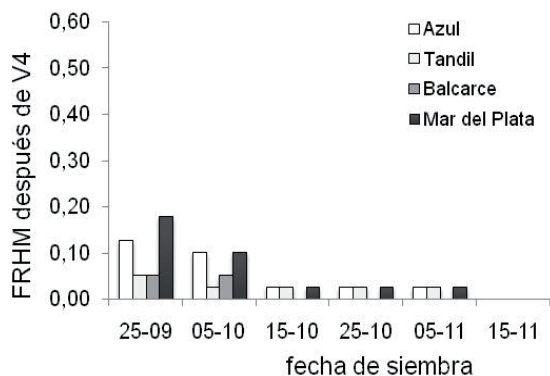


Figura 2. Frecuencia relativa de ocurrencia de años con heladas meteorológicas en localidades del centro-sudeste bonaerense (serie 1971-2010) después del estado de cuatro hojas desarrolladas de maíz (FRHM después de V4) según fecha de siembra.

una campaña con valor extremo en la última fecha de siembra).

En las cuatro localidades, las fechas de siembra tempranas, estuvieron libres de riesgo de daños por heladas meteorológicas hacia fines de ciclo del cultivo cualquiera sea el ciclo de madurez. En Tandil y Balcarce, todos los escenarios con cultivos de ciclos largo estuvieron expuestos a heladas antes de R6. La variabilidad interanual de las fechas de ocurrencia de R6, de modo general, aumenta con el atraso en la fecha de siembra y con el aumento en la longitud del ciclo.

En la Figura 4 se presenta la frecuencia relativa de años con ocurrencia de heladas meteorológicas (FRHM) antes de R6 para los diferentes ciclos de madurez. De modo general, los ciclos cortos prácticamente no exhibieron riesgo por heladas

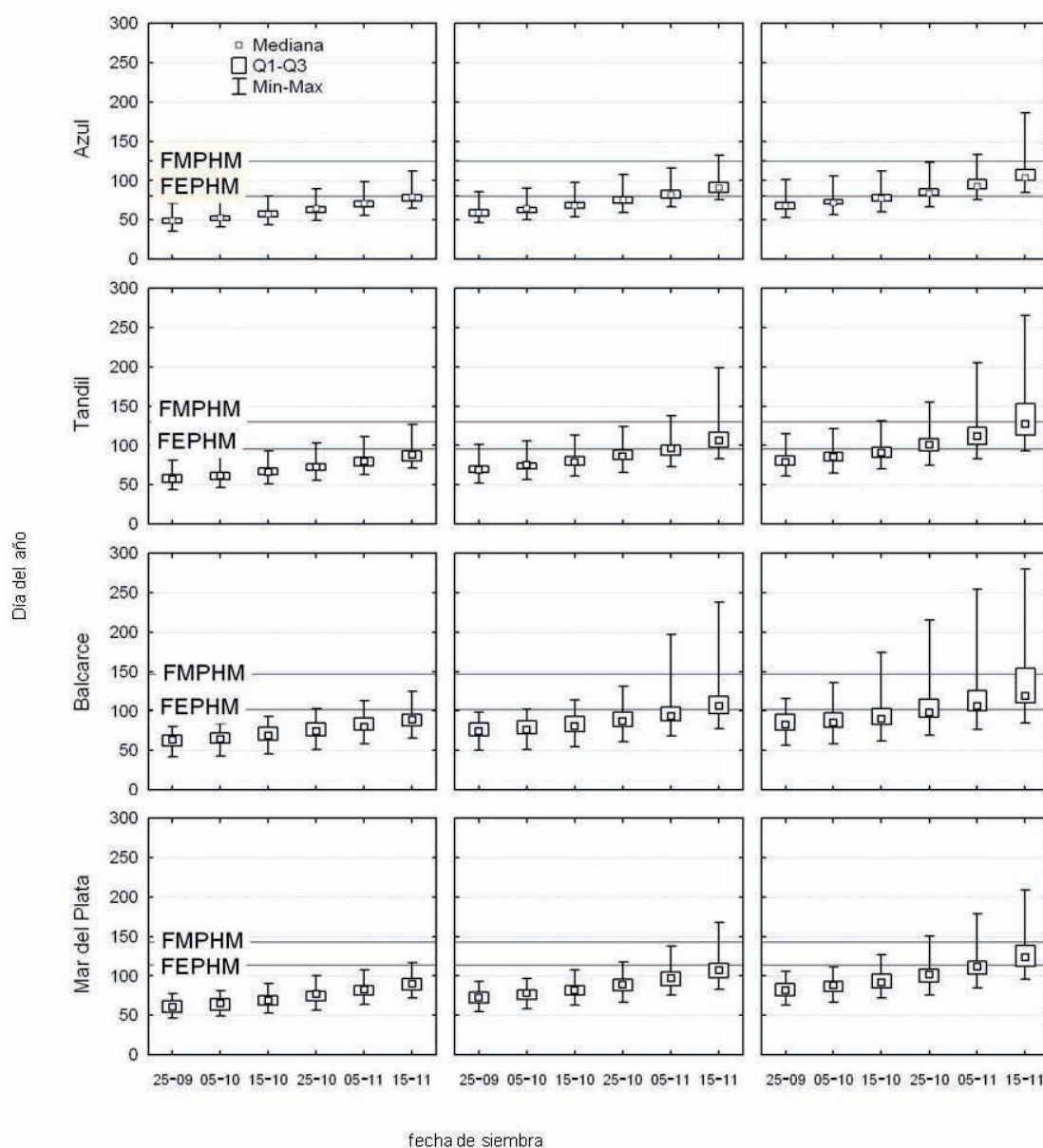


Figura 3. Variabilidad interanual de las fechas de ocurrencia del estado de madurez fisiológica de maíz (R6) según fecha de siembra, ciclo de madurez y localidad. a. Azul. b. Tandil. c. Balcarce. d. Mar del Plata. Las líneas enteras indican las fechas media y extrema de ocurrencia de primeras heladas meteorológicas en cada localidad (serie 1971-2010). FMPHM: fecha media de primera helada meteorológica. FEPHM: fecha extrema de primera helada meteorológica.

tempranas, mientras que los intermedios y largos estuvieron expuestos a mayor riesgo en siembras tardías. La FRHM antes de R6 aumenta con ciclos más largos y con el retraso en la fecha de siembra. Los ciclos largos están expuestos a riesgos por ocurrencia de primeras heladas en fechas de siembra más tempranas que los ciclos intermedios. Tandil y Azul son las localidades con mayor FRHM antes de R6 en las últimas dos fechas de

siembra, siendo dicha frecuencia más del doble en ciclos largos que intermedios. Azul no presenta riesgo por heladas tempranas para ciclos intermedios, pero en ciclos largos la FRHM antes de R6 es similar a la de Tandil en las últimas tres fechas de siembra.

Para caracterizar las estrategias de manejo más apropiadas en la zona se discuten los riesgos de daños por heladas durante los dos períodos sen-

sibles (luego de V4 y antes de R6). Las combinaciones evaluadas para los ciclos intermedios (Figuras 2 y 4b) que exhibieron menores riesgos por heladas, tanto tempranas como tardías, fueron con las fechas 15-10 y 25-10. Por su parte, la elección de cultivares de ciclo largo debería evitarse para siembras tardías, especialmente en Azul y Tandil (Figura 4c).

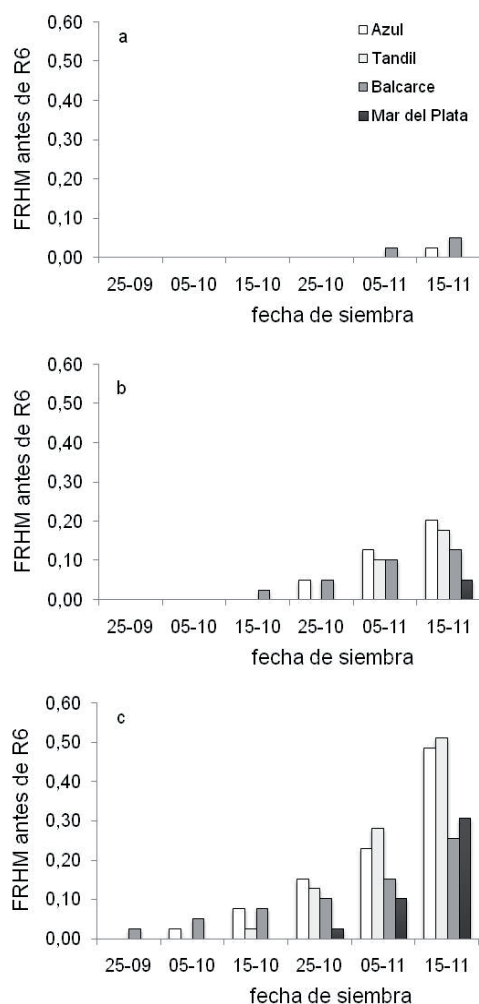


Figura 4. Frecuencia relativa de ocurrencia de años con heladas meteorológicas (serie 1971-2010) en localidades del centro-sudeste bonaerense antes del estado de madurez fisiológica de maíz (FRHM antes de R6), según fecha de siembra y ciclo de madurez. a. Ciclo 1: ciclo corto. b. Ciclo 2: ciclo intermedio. c. Ciclo 3: ciclo largo.

No fueron detectadas tendencias significativas en las series históricas para la fecha de ocurrencia de V4 en cada escenario (fecha de siembra x ciclo

de madurez) evaluado, de acuerdo al test de correlación de Spearman ($p > 0,05$), con excepción de las series en Balcarce, las cuales mostraron una tendencia significativa a adelantar la ocurrencia de este estado, en todos los escenarios. Tampoco fueron detectadas tendencias significativas para la fecha de ocurrencia de R1 en cada escenario evaluado, con excepción de los correspondientes a Balcarce que mostraron una tendencia a adelantar la ocurrencia de este estado en todos los escenarios. Por su parte, la ocurrencia del estado R6 no mostró tendencias significativas en la fecha de ocurrencia en ningún escenario. Con respecto a las fechas medias de ocurrencia de HM, en la localidad de Balcarce se detectó tendencia significativa para la ocurrencia más temprana de las heladas tardías. Por su parte, se observó una tendencia significativa para la ocurrencia más temprana de las heladas de otoño en Azul y Tandil.

La elección de siembras tardías y cultivares de ciclo largo debería ser evitada en todas las localidades, dada la frecuencia de ocurrencia (moderada) de heladas tempranas antes de madurez fisiológica. El empleo de cultivares de ciclo corto podría minimizar estos riesgos en escenarios de siembras tardías. Los cultivares de ciclo intermedio requieren más atención en la elección de la fecha de siembra, ya que exhiben riesgos equiparables en los extremos (tempranos y tardíos) de fecha de siembra.

Ocurrencia de condiciones de estrés por temperaturas elevadas

El número de días con temperatura máxima mayor a 30 °C (NDTM30) registrada durante el período crítico, no varió significativamente entre fechas de siembra (Kruskal Wallis $> 0,05$) en cada una de las combinaciones de localidad x ciclo de madurez. Dentro de la región, se distinguió Azul como la localidad con mayor NDTM30 (Tabla 6) tanto durante el PC como durante la EC (Tabla 7), cualquiera sea el escenario (fecha de siembra x ciclo de madurez). No se detectaron diferencias significativas entre las tres localidades restantes para NDTM30 durante el PC ni durante la EC, cualquiera sea el escenario agrícola.

Si se describe la ExpTM30PC en comparación con ExpTM30EC, siempre es mayor durante el período crítico que durante la EC, esto es debido a la ubicación relativa del PC en la EC que coincide con el período más cálido de la estación de crecimiento. Los escenarios simulados para Azul generaron condiciones de mayor variabilidad en ExpTM30PC (Figura 5). En algunas campañas agrícolas más cá-

lidas, la ExpTM30PC exhibió una frecuencia mayor a 0,75, especialmente para las combinaciones con fechas de siembra tardías, cualquiera sea el ciclo. Por el contrario, los escenarios para Mar del Plata mostraron menor variabilidad en la ExpTM30PC.

Los escenarios evaluados también resultaron en mayor ExpTM30EC en Azul (Figura 6), debido a un mayor NDTM30 y menor duración de EC que las de las otras localidades (Tabla 3). Se evidencia, entonces, que en esta localidad es muy importante la elección de la fecha de siembra y del ciclo del cultivar, por las condiciones adversas a la que se expone tanto en el PC, como en períodos de menor susceptibilidad.

Es de destacar, que se observaron diferencias significativas entre las fechas de siembra (Kruskal Wallis $<0,05$) en el ExpTM30EC solamente en algunas de las combinaciones localidad x ciclo, pero

nunca con ciclos largos. Así se detectaron diferencias entre fechas de siembra con el ciclo corto para Azul y Mar del Plata y con el ciclo intermedio de madurez para Azul (Figura 6), con una tendencia a aumentar la ExpTM30 y su variabilidad en las siembras tardías.

Entre los ciclos de madurez no se observaron diferencias significativas para ExpTM30EC. Esto indica, que en la región bajo estudio, para una determinada fecha de siembra, no se requiere mayor esfuerzo en la elección del ciclo de madurez, de acuerdo al criterio de grado de exposición a temperaturas elevadas durante la EC.

No fueron detectadas tendencias significativas en las series históricas, de acuerdo al test de correlación de Spearman ($p>0,05$), para el NDTM30 durante el PC, en cualquiera de los escenarios y para todas las localidades.

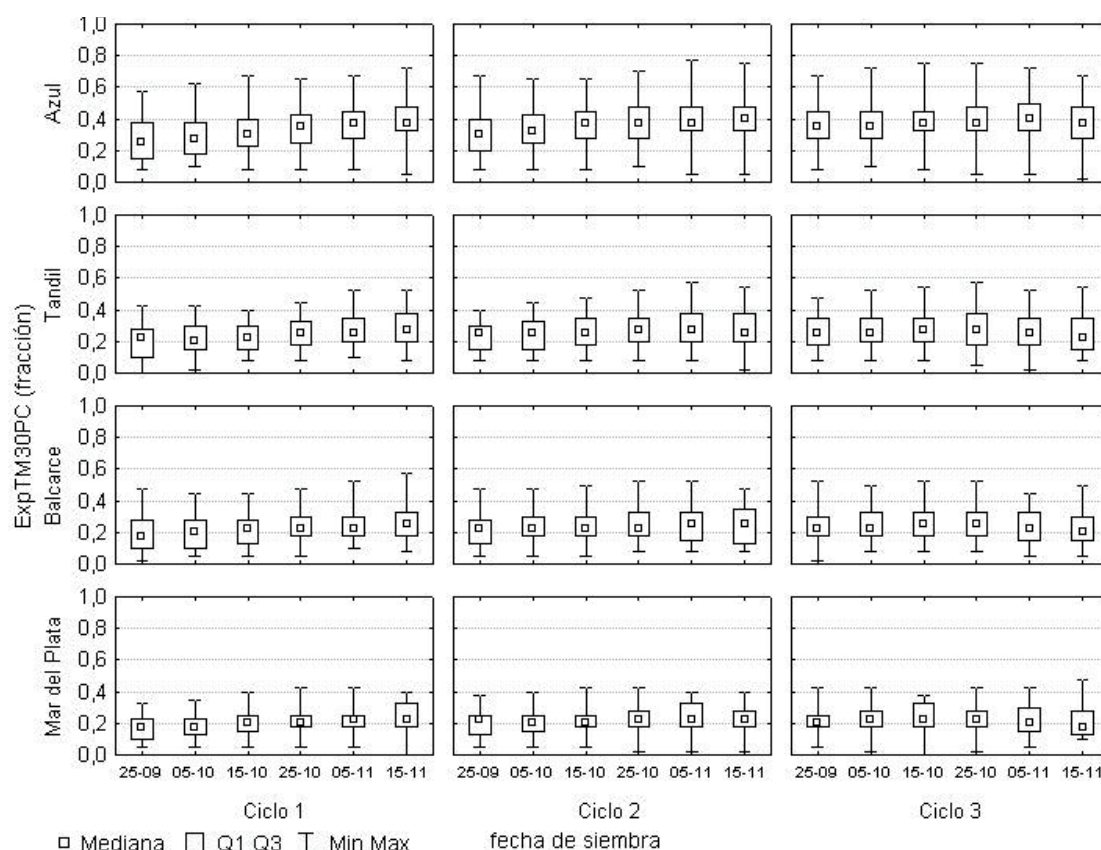


Figura 5. Grado de exposición a temperaturas elevadas durante el período crítico de maíz (ExpTM30PC=NDTM30/40 días) en el centro-sudeste bonaerense bajo escenarios con fecha de siembra y ciclo de madurez. Ciclo 1: ciclo corto, Ciclo 2: ciclo intermedio, Ciclo 3: ciclo largo. El análisis de los contrastes es equivalente al presentado en la Tabla 6, dado que la duración del PC es igual en todos los casos.

Tabla 6. Valores medianos del número de días con temperaturas máximas mayores a 30°C (NDTM30) durante el período crítico de maíz (PC), bajo escenarios con seis fechas de siembra (FS) y tres ciclos de madurez en localidades del centro-sudeste bonaerense.

Localidad	FS	NDTM30 durante el PC					
		Ciclo 1		Ciclo 2		Ciclo 3	
Azul	25-09	10	A	12	A	14	A
	05-10	11	A	13	A	14	A
	15-10	12	A	15	A	15	A
	25-10	14	A	15	A	15	A
	05-11	15	A	15	A	16	A
	15-11	15	A	16	A	15	A
Tandil	25-09	9	B	10	B	10	B
	05-10	8	B	10	B	10	B
	15-10	9	B	10	B	11	B
	25-10	10	B	11	B	11	B
	05-11	10	B	11	B	10	B
	15-11	11	B	10	B	9	B
Balcarce	25-9	7	B	9	B	9	B
	05-10	8	B	9	B	9	B
	15-10	9	B	9	B	10	B
	25-10	9	B	9	B	10	B
	05-11	9	B	10	B	9	B
	15-11	10	B	10	B	8	B
Mar del Plata	25-09	7	B	9	B	8	B
	05-10	7	B	8	B	9	B
	15-10	8	B	8	B	9	B
	25-10	8	B	9	B	9	B
	05-11	9	B	9	B	8	B
	15-11	9	B	9	B	7	B

Se indican solamente los contrastes que resultaron significativos (Kruskal Wallis <0,05). Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre localidades para cada escenario (fecha de siembra x ciclo). Ciclo 1: ciclo corto, Ciclo 2: ciclo intermedio, Ciclo 3: ciclo largo.

Tabla 7. Valores medianos del número de días con temperaturas máximas mayores a 30°C (NDTM30) durante la estación de crecimiento de maíz (EC), bajo escenarios con seis fechas de siembra (FS) y tres ciclos de madurez en localidades del centro-sudeste bonaerense.

Localidad	FS	NDTM30 durante la EC					
		Ciclo 1		Ciclo 2		Ciclo 3	
Azul	25-09	28	A	30	A	31	A
	05-10	29	A	31	A	31	A
	15-10	30	A	31	A	32	A
	25-10	31	A	32	A	34	A
	05-11	31	A	34	A	34	A
	15-11	32	A	33	A	34	A
Tandil	25-09	20	B	22	B	22	B
	05-10	21	B	22	B	22	B
	15-10	21	B	22	B	22	B
	25-10	22	B	22	B	22	B
	05-11	22	B	22	B	22	B
	15-11	22	B	22	B	22	B
Balcarce	25-9	20	B	21	B	21	B
	05-10	20	B	21	B	21	B
	15-10	21	B	21	B	21	B
	25-10	21	B	21	B	21	B
	05-11	21	B	21	B	21	B
	15-11	20	B	21	B	21	B
Mar del Plata	25-09	18	B	20	B	21	B
	05-10	19	B	20	B	21	B
	15-10	20	B	21	B	21	B
	25-10	20	B	21	B	21	B
	05-11	20	B	21	B	21	B
	15-11	20	B	21	B	21	B

Se indican solamente los contrastes que resultaron significativos (Kruskal Wallis <0,05). Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre localidades para cada escenario (fecha de siembra x ciclo). Ciclo 1: ciclo corto, Ciclo 2: ciclo intermedio, Ciclo 3: ciclo largo.

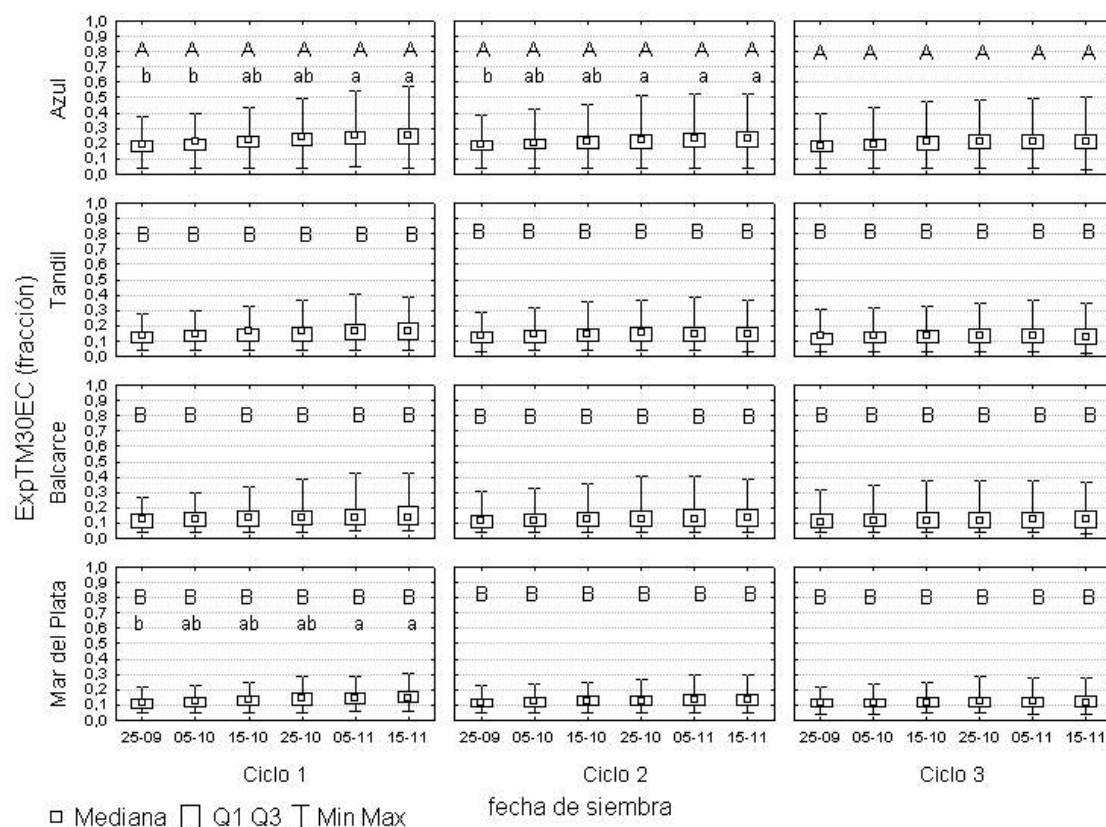


Figura 6. Grado de exposición a temperaturas elevadas durante la estación de crecimiento de maíz (ExpTM30EC=NDTM30/duración de la EC) en el centro-sudeste bonaerense bajo escenarios con fecha de siembra y ciclo de madurez. Ciclo 1: ciclo corto, Ciclo 2: ciclo intermedio, Ciclo 3: ciclo largo. Se indican solamente los contrastes que resultaron significativos (Kruskal Wallis <0,05). Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre las fechas de siembra para cada combinación de localidad y ciclo. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre localidades para cada escenario (fecha de siembra x ciclo).

CONCLUSIONES

Los escenarios evaluados para la serie histórica 1971-2010 permiten distinguir algunas estrategias de manejo agrícola como más apropiadas de acuerdo al riesgo climático debido a la acción de las temperaturas extremas. En siembras tempranas siempre hay mayor riesgo de daños para el cultivo debido a la ocurrencia de heladas tardías luego del estado de cuatro hojas desarrolladas. A medida que se atrasa la siembra, el riesgo disminuye en la región del sudeste bonaerense. Aunque la duración del subperíodo siembra-cuatro hojas desarrolladas (S-V4) disminuye a medida que se retrasa la fecha de siembra, debido a que se expone al cultivo a temperaturas medias más elevadas, y de esa forma el tiempo térmico requerido para alcanzar dicho estado se logra en menos tiempo y la ocurrencia del estado susceptible coincide con un período con menor frecuencia de heladas que el

correspondiente a siembras tempranas. Los escenarios de siembras tardías y ciclos largos aumentan el riesgo de heladas durante el llenado de granos. En dos localidades de la zona centro-sudeste ubicadas al norte y más alejadas del mar (Azul y Tandil) se observa mayor frecuencia de años con heladas antes de madurez fisiológica (R6). Asimismo, se detecta una tendencia significativa a adelantar las heladas tempranas en ambas localidades. En Azul se registra el mayor número de días con temperaturas elevadas, tanto durante la estación de crecimiento completa como durante el período crítico del cultivo. No se observaron tendencias significativas en las series de tiempo del número de días con condiciones adversas por temperaturas elevadas para los escenarios de fecha de siembra y ciclo de madurez evaluados en las localidades en estudio.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMdP) que ha provisto la financiación del presente trabajo (AGR387/12). M. P. Panunzio Moscoso ha sido beneficiada con una Beca de Entrenamiento por la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC). El trabajo es parte del trabajo de graduación de M.P. Panunzio Moscoso.

BIBLIOGRAFÍA

- Andrade, F.H.; A. Cirilo, S. Uhart y M.E. Otegui, 1996. *Ecofisiología del cultivo de maíz*. DekalbPress. 292 p.
- Balbuena, H.H., 2006. Caracterización del ambiente térmico y de la respuesta fenológica simulada de un cultivo de maíz ciclo intermedio en el centro sudeste de Buenos Aires. Trabajo de Graduación. Ing. Agr. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata, Balcarce, Argentina. 41 p.
- Barros, V., 2007. Adaptation to climate trends: lessons from the Argentine experience. In: N. Leary, J. Adejuwon, V. Barros, I. Burton, J. Kulkarni and R. Lasco (eds.) *Climate Change and Adaptation*. pp. 296-314.
- Capristo, P.; R.H. Rizzalli and F.H. Andrade, 2007. Ecophysiological yield components of maize hybrids with contrasting maturity. *Agronomy Journal* 99: 1111-1118.
- Cárcova, J. and M.E. Otegui, 2001. Ear temperature and pollination timing effects on maize kernel set. *Crop Science* 41: 1809-1815.
- Cheikh N. and R.J. Jones, 1994. Disruption of maize kernel growth and development by heat stress. Role of cytokine/abscisic acid balance. *Plant Physiology* 106: 45p.
- Cicchino, M.; J.I. Rattalino Edreira, M. Uribe Larrea and M.E. Otegui, 2010 a. Heat stress in field grown maize: response of physiological determinants of grain yield. *Crop Science* 50: 1438-1448.
- Cicchino, M.; J.I. Rattalino Edreira and M.E. Otegui, 2010 b. Heat stress during late vegetative growth of maize: effects on phenology and assessment of optimum temperature. *Crop Science* 50: 1431-1437.
- Cirilo, A.G., 1994. Desarrollo, crecimiento y partición de materia seca en cultivos de maíz sembrados en diferentes fechas. Tesis Magister Scientiae. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata. Balcarce, Argentina. 86 p.
- Della Maggiora, A.I.; A.I. Irigoyen, L. Malena y M. Cambaeri, 2012. Deficiencia hídrica para el cultivo de maíz en el centro-sudeste según fecha de siembra. *Actas de XIV Reunión Argentina de Agrometeorología*. 2 p. Malargüe, Argentina. pp. 45-46.
- Food and Agriculture Organization of United Nations (FAO), 2009. *Coping with a changing climate: considerations for adaptation and mitigation in agriculture*, Rome. Environment and Natural Resources. 120 p.
- Fernández Long, M.E.; G.V. Muller, A. Beltrán-Przekurat and O.E. Scarpati, 2013. Long-term and recent changes in temperature-based agroclimatic indices in Argentina. *International Journal of Climatology* 33: 1673-1686.
- Irigoyen, A.I.; R.H. Rizzalli, A.I. Della Maggiora, L.R. Angelocci and L.C. Malena, 2011. Seasonal growing degree-days and predicted phenology of maize at Southern Buenos Aires Province (Argentina). *Anais de V Congresso Brasileiro de Biometeorologia Piracicaba, Brasil*. En CD.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Kumudini, S.; F. H. Andrade, K.J. Boote, G.A. Brown, K.A. Dzotsi, G.O. Edmeades, T. Gocken, M. Goodwin, A.L. Halter, G. Hammer, J.L. Hatfield, J. W. Jones, A. Keremian, S.H. Kim, J. Kiniry, J.I. Lizaso, C. Nendel, C.R.L. Nielsen, B. Parent, C.O. Stöckle, F. Tardieu, P.R. Thomison, D.J. Timlin, T.J. VYN, D. Wallach, H.S. Yang and M. Tollenaar, 2014. Predicting maize phenology: intercomparison of functions for developmental response to temperature. *Agronomy Journal* 106: 2087-2097.
- Magrin, G.O.; M.I. Travasso and G. Rodríguez, 2005. Changes in climate and crop production during the 20th century in Argentina. *Climatic Changes*. 72: 229-249.
- Magrin, G.O.; M.I. Travasso, W.E. Baethgen and R.T. Boca, 2007. *Improving Applications in Agriculture of ENSO-based Seasonal Rainfall Forecasts considering Atlantic Ocean Surface Temperatures*. Sivakumar and Hansen (ed.) *Climate Predictions and Agriculture: Advances and Challenges*, Springer. pp 249-527.
- Nielsen, R.L., 2008. Growing point location in corn at different growth stages. *Purdue Univ., West Lafayette*.
<<https://www.agry.purdue.edu/ext/corn/news/timeless/growingpointsgallery.html>> Consultada el 02/12/2013.
- Rattalino Edreira, J.I.; E. Budakli Carpici, G. Sammarro and M.E. Otegui, 2011. Kernel set of temperate and tropical maize hybrids exposed to heat stress around flowering. *Field Crops Research* 123: 62-73.
- Rattalino Edreira, J.I. and M.E. Otegui, 2012. Heat stress in temperate and tropical maize hybrids: differences in

- crop growth, biomass partitioning and reserves use. *Field Crops Research* 130: 87-98.
- Ritchie, S.W.; J.H. Hanway and G.O. Benson, 1997. How a corn plant develops. Ames: Coop. Extension Service. 21p.
- Ritchie, J. T. and D.S NeSmith, 1991. Temperature and crop development. *Modeling plant and soil systems. Agronomy Monograph*, 31, 5-29.
- Robles, M.; L. Bonelli, A.I. Irigoyen, R.H. Rizzalli y A.I. Della Maggiora, 2012. Riesgo de heladas en siembras tempranas de maíz en Balcarce. XIV Reunión Argentina de Agrometeorología, Malargüe, Argentina. 2p.
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 2015. Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático. Modelos Climáticos. [en línea] <http://www.ambiente.gov.ar/> [consulta 10 setiembre 2015]
- Travasso, M.I.; G. O. Magrin, W.E. Baethgen, J.P. Castañño, G.R. Rodríguez, J.L. Pires, A. Giménez, G. Cunha and M. Fernández, 2007. Maize and Soybean Cultivation in Southeastern South America: Adapting to Climate Change. In: N. Leary, J. Adejuwon, V. Barros, I. Burton, J. Kulkarni and R. Lasco (eds) *Climate Change and Adaptation*. pp. 332-352.

Riesgos climáticos para el cultivo de maíz en el centro-sudeste bonaerense:

B. Deficiencias de agua y rendimientos

Panunzio Moscoso, M. P.; A. I. Irigoyen, A. I. Della Maggiora y R. H. Rizzalli

RESUMEN

Cambios en los patrones climáticos modifican la estación de crecimiento de los cultivos y así los riesgos de su exposición a las condiciones adversas. La evaluación de prácticas de manejo agrícola mediante generación de escenarios de simulación permite formular estrategias de adaptación para minimizar los riesgos y aprovechar los beneficios. Los objetivos del trabajo fueron a) caracterizar las deficiencias de agua en maíz en el centro-sudeste bonaerense para escenarios que combinan ciclos de madurez y fechas de siembra y b) evaluar el impacto de la deficiencia de agua sobre el rendimiento del cultivo. Se seleccionaron escenarios agrícolas con seis fechas de siembra y tres cultivares de diferente madurez. La evaluación agroclimática del régimen hídrico durante la estación de crecimiento y el período crítico se realizó a partir de un modelo de balance de agua ligado a un modelo de desarrollo del cultivo basado en la temperatura del aire (serie 1971-2010). El método fue aplicado para cuatro localidades (Azul, Tandil, Balcarce y Mar del Plata). Se calculó la deficiencia de agua como la diferencia entre la evapotranspiración máxima (ETM) y la evapotranspiración real (ETR) obtenida mediante el balance de agua, a paso diario y siguiendo un modelo calibrado localmente. La evapotranspiración relativa (ETR/ETM) fue calculada para cada escenario y campaña agrícola. El rendimiento máximo o potencial (Y_m) fue estimado a partir del producto entre ETM estacional y la eficiencia de uso del agua (EUA) del cultivo. El rendimiento real (Y_a) se obtuvo a partir de los valores de Y_m , el factor de respuesta al agua (k_y) del cultivo y la evapotranspiración relativa (ETR/ETM). Contrastes estadísticos preestablecidos fueron realizados para comparar las deficiencias de agua acumuladas durante la estación de crecimiento (DAEC) y el período crítico (DAPC), así como los rendimientos potenciales y reales (Y_m y Y_a). La magnitud de las DAEC describe un patrón homogéneo en la región, sin diferencias entre ciclos de madurez y sin diferencias entre fechas de siembra (excepto en Mar del Plata). Se detectan diferencias significativas entre los ciclos corto y largo en las DAPC, aunque esto no ocurre en todas las fechas de siembra y también varía con la localidad. Los Y_a simulados para los ciclos intermedios no se diferencian significativamente de los simulados para los ciclos corto y largo, aunque éstos últimos difieren entre sí.

Palabras clave: fechas de siembra, madurez relativa, balance de agua, evapotranspiración relativa

Panunzio Moscoso, M. P.; A. I. Irigoyen, A. I. Della Maggiora and R. H. Rizzalli, 2016. Climate risks in maize crop in the southeastern of Buenos Aires Province: B. water deficiencies and yields. RADA VII: 57-71

SUMMARY

Changes in climate patterns modify the crop growing season and, then, the risks of exposure to adverse conditions. The assessment of agricultural practices by generation of scenarios is useful to identify options of adaptation to minimize risks and improve the benefits. The objectives were a) to describe the water deficits and b) to evaluate the impact of water deficit on crop yield for agricultural scenarios in center-southeastern of Province of Buenos Aires, Argentina. Scenarios with three maturity cultivars were simulated for six planting dates over the region. The maize growing season agroclimatology (1971-2010) was based on a simple model of crop development using growing degree-days as estimator. The approach was performed for four locations of the region (Azul, Tandil, Balcarce and Mar del Plata). Water deficit for each scenario was computed as difference between maximum and actual evapotranspiration (ETM-ETR). Soil water balance were computed following an adjusted locally model with daily step. Relative evapotranspiration (ETR/ETM) was computed for each scenario and growing season at each location. Maximum yield was estimated from the product between seasonal ETM and water use efficiency. The response of yield to water supply was quantified through the yield response factor (k_y) which relates relative yield decrease to relative evapotranspiration deficit ($1 - \text{ETR/ETM}$). Intensity of water deficits during the growing season (DAEC) is homogeneous over the region, without significant differences among locations for each scenario. No significant differences among maturity cultivars or planting dates were detected, except in Mar del Plata. DAEC. Late maturity cultivar yields significantly more than early one, the intermediate cultivar do no differ from each other.

Key words: planting date, relative maturity cultivar, soil water balance, relative evapotranspiration

M. P. Panunzio Moscoso, A. I. Irigoyen, A. I. Della Maggiora y R. H. Rizzalli: Unidad Integrada Balcarce: Facultad de Ciencias Agrarias UNMdP -INTA Balcarce. Ruta Nac. 226, km 73,5, Balcarce CC 276 (7620), Argentina. Correspondencia a: irigoyen.andrea@inta.gob.ar

INTRODUCCIÓN

La producción agropecuaria es una de las actividades expuestas a los riesgos climáticos. En el quinto informe del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2013) se concluyó que las evidencias de cambio climático son contundentes y que a su vez, la frecuencia de eventos extremos se ha incrementado. Los sistemas productivos dependientes del tiempo y clima se han tornado, entonces, cada vez más vulnerables (FAO, 2009).

En la región sudeste de la provincia de Buenos Aires, la información obtenida desde ensayos a campo ha sugerido que es posible seleccionar opciones de manejo agrícola más productivas, si se adecuan los requerimientos del cultivo a la oferta ambiental (Andrade y Cirilo, 2002; Capristo *et al.*, 2007; Bonelli, 2014). Los ensayos de largo plazo no siempre están diseñados para evaluar la

sensibilidad de los sistemas al ambiente. En ese sentido, la generación de escenarios por simulación permiten formular estrategias de adaptación para minimizar los riesgos y aprovechar los beneficios de acuerdo a las condiciones climáticas de cada región (Maddonni, 2012). Por su parte, las estimaciones de rendimiento y los análisis de la brecha entre condiciones reales y potenciales son útiles para guiar una intensificación sustentable de la agricultura (Grassini *et al.*, 2011; van Ittersum *et al.*, 2013).

Particularmente en la región se han evaluado algunas opciones de manejo agrícola vinculadas con la variabilidad climática de corto y largo plazo (Irigoyen *et al.*, 2011a, b; Della Maggiora *et al.*, 2012; Della Maggiora e Irigoyen, 2012; Irigoyen *et al.*, 2012; Moreno *et al.*, 2012). Los resultados sugieren que la deficiencia de agua acumulada durante la estación de crecimiento (DAEC) de

ciclos de madurez intermedia disminuye a medida que se atrasa la fecha de siembra. Esto se debe a una menor duración de la estación de crecimiento al exponer al cultivo a temperaturas crecientes desde siembra a floración. Por su parte la deficiencia acumulada durante el periodo crítico (DAPC) varía entre 40 mm y 60 mm en la zona, sin diferencias entre fechas de siembra (Della Maggiora *et al.*, 2012). Esto indica que la elección de la fecha de siembra no sería una práctica muy sensible para adecuar la oferta hídrica en el período crítico de definición de rendimiento de este ciclo de cultivo. No obstante sería de interés evaluar otros ciclos de madurez, dado que existen evidencias locales de mayor consumo de agua en el período vegetativo en ciclos largos, por su mayor duración, y por esa razón, menor disponibilidad de agua durante el período crítico (Della Maggiora *et al.*, 2001). De acuerdo a estos resultados se considera que las mayores deficiencias de agua acumuladas durante el período crítico (DAPC) pueden ocurrir en los escenarios de siembras tempranas y ciclos largos.

Los objetivos del trabajo fueron a) caracterizar las deficiencias de agua en el centro-sudeste bonaerense para escenarios que combinan ciclos de madurez y fechas de siembra y b) evaluar el impacto de la deficiencia de agua sobre el rendimiento del cultivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Escenarios agrícolas y deficiencia hídrica

Los escenarios agrícolas seleccionados combinaron seis fechas de siembra y tres cultivares de diferente madurez en las localidades de Azul, Tandil, Balcarce y Mar del Plata. La evaluación agroclimática del régimen hídrico, para la serie 1971-2010, se realizó a partir de un modelo de balance de agua, asociado a un modelo simple de simulación del desarrollo del cultivo a partir de la temperatura del aire, tal como fue descrito en Panunzio Moscoso *et al.* (2016).

La deficiencia hídrica fue calculada como la diferencia entre la evapotranspiración máxima (ETM) y la evapotranspiración real (ETR) que fue obtenida mediante el balance de agua en el suelo, calculado a paso diario y siguiendo un modelo calibrado localmente (Della Maggiora *et al.*, 2002). Las variables de entrada del modelo fueron: precipitación (P), evapotranspiración de referencia (ET₀), coeficiente de cultivo (K_c), profundidad de suelo, límites máximo y mínimo de almacenaje de agua en el suelo y contenido de agua inicial.

La evapotranspiración real (ETR) fue calculada a partir de la corrección de ET₀ por el coeficiente de cultivo (K_c) para obtener la evapotranspiración máxima (ETM), cuando el agua del suelo estaba fácilmente disponible. Si el suelo se estaba secando por debajo de un umbral crítico (UC; ajustado para las condiciones locales de clima y suelo como 0,80 del agua disponible), fue considerada una disminución lineal de la evapotranspiración relativa (ETR/ETM) en función de la fracción de agua disponible.

El coeficiente K_c en cada estación de crecimiento de la serie histórica se calculó en función del tiempo térmico acumulado (Della Maggiora *et al.*, 2003) para el período comprendido entre 0,20 y 1,00 de la fracción de tiempo térmico acumulado en el total de la estación de crecimiento (ocurrencia de R₆). En el período previo, desde 90 días antes de la siembra y hasta el 0,20 de la fracción de tiempo térmico acumulado, el valor de K_c se estimó siguiendo las recomendaciones de Allen *et al.* (1998). Las variaciones en la evolución del K_c de acuerdo a los escenarios agrícolas han sido discutidas en Panunzio Moscoso *et al.* (2014).

Se consideraron valores de 3,7 y 2,0 mm cm⁻¹ como límites máximo y mínimo de almacenaje de agua en el suelo, respectivamente y una profundidad de suelo testigo de 1 m. Se inició el balance de cada escenario 90 días antes de la primera fecha de siembra, con un valor inicial igual al límite máximo de almacenaje, criterio seguido de acuerdo a los resultados de los balances de agua seriados calculados previamente (Irigoyen *et al.*, 2004).

El test de Shapiro-Wilks ($p > 0,05$) fue empleado para evaluar la normalidad de las series de componentes del balance de agua. Se calcularon los estadísticos descriptivos para cada uno de los componentes del balance de agua en cada escenario agrícola (fecha de siembra x ciclo) por localidad.

El test no paramétrico Kruskal-Wallis ($p < 0,05$) fue aplicado, por suma de rangos, para evaluar la presencia de diferencias de deficiencias de agua acumuladas durante el periodo crítico (DAPC) y de deficiencias de agua acumuladas durante la estación de crecimiento (DAEC) según tres tipos de contrastes: a) entre las localidades para cada uno de los escenarios (fecha de siembra x ciclo de madurez), b) entre fechas de siembra para cada una de las combinaciones de ciclo x localidad y c) entre ciclos para cada una de las combinaciones de fechas de siembra x localidad. El test de Tukey fue aplicado cuando se detectaron diferencias significativas en la distribución de frecuencias

entre grupos.

El test Kolmogorov-Smirnov fue utilizado para evaluar la igualdad de distribución entre la evapotranspiración relativa del período crítico (ET relativa PC) y la evapotranspiración relativa de la estación de crecimiento (ET relativa EC) para cada escenario.

El análisis de correlación de Spearman ($p < 0,05$) fue empleado para evaluar la presencia de tendencia en cada uno de los componentes del balance de agua: precipitación (P), evapotranspiración de referencia (ET₀), evapotranspiración máxima (ETM), evapotranspiración real (ETR), excesos y deficiencias, para la estación completa de crecimiento del cultivo (EC) y para el período crítico (PC).

Con la finalidad de integrar la caracterización de la amenaza y de la vulnerabilidad para períodos específicos del desarrollo se sintetizó la información por localidad. El grado de exposición de un escenario agrícola a condiciones de deficiencia de agua se presentó como la frecuencia de ocurrencia de láminas mayores a un determinado valor, con intervalos de 50 mm para la EC y con intervalos de 20 mm para el PC. Se establecieron cuatro categorías de riesgo de acuerdo a la frecuencia relativa de ocurrencia: bajo (0 a 0,25), moderado a bajo (0,26 a 0,50), moderado a alto (0,51 a 0,75) y alto (0,76 a 1,00).

Estimación de pérdidas de rendimiento

Los efectos de deficiencia de agua sobre el rendimiento del cultivo se calcularon mediante el factor respuesta (k_y) de Doorenbos y Kassam (1979). El rendimiento máximo o potencial (Y_m) fue estimado a partir del producto entre ETM estacional y la eficiencia de uso del agua (EUA) del cultivo. Se asumió un valor de EUA de $22 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ de acuerdo a la relación entre rendimientos potenciales de los cultivares actuales y la ETM estacional (Bonelli, 2014). El rendimiento real (Y_a) se obtuvo a partir de los valores de Y_m , el factor k_y del cultivo y la evapotranspiración relativa (ET relativa = ETR/ETM) en la estación de crecimiento para cada escenario empleando la relación: $1 - (Y_a/Y_m) = k_y \cdot (1 - (\text{ETR}/\text{ETM}))$. El criterio de aplicar en este trabajo un único factor de respuesta sobre la estación completa (EC) estuvo basado en el supuesto que la ET relativa durante el PC no es diferente de ET relativa durante la EC en cualquier escenario. Ese supuesto estuvo fundamentado en la información obtenida cuando se simuló el balance de agua para Balcarce bajo escenarios con tres fechas de siembra y un ciclo

de madurez intermedia (Irigoyen *et al.*, 2011). Dado que no se dispone de información local que permita diferenciar valores de k_y según ciclo de madurez, se aplicó un mismo valor ($K_y = 1,25$, Doorenbos y Kassam, 1979, Steduto *et al.*, 2012) para los tres ciclos estudiados.

Se determinó la brecha de rendimiento ($Y_m - Y_a$), que en este trabajo se refiere a la pérdida de rendimiento respecto al potencial debida exclusivamente a deficiencias de agua, para cada escenario agrícola en cada localidad y campaña agrícola.

La variabilidad interanual (serie 1971-2010) de los rendimientos estimados (Y_m y Y_a) y de la brecha ($Y_m - Y_a$) fue caracterizada para cada localidad mediante estadísticos básicos de posición (valor mínimo, valor máximo, mediana y cuartiles) para cada escenario (fecha de siembra x ciclo de madurez).

El test no paramétrico Kruskal-Wallis ($p < 0,05$) fue aplicado, por suma de rangos, para evaluar la presencia de diferencias de rendimiento potencial (Y_m), de rendimiento real (Y_a) y de brecha ($Y_m - Y_a$) según tres tipos de contrastes: a) entre las localidades para cada uno de los escenarios (fecha de siembra x ciclo de madurez), b) entre fechas de siembra para cada una de las combinaciones de ciclo x localidad y c) entre ciclos para cada una de las combinaciones de fechas de siembra x localidad. El test de Tukey fue aplicado cuando se detectaron diferencias significativas en la distribución de frecuencias entre grupos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Deficiencias de agua

Se analizaron las deficiencias de agua acumuladas durante la estación de crecimiento (DAEC) y durante el período crítico (DAPC) para los escenarios (fecha de siembra x ciclo) generados en cada localidad.

En Azul, Tandil y Balcarce no hubo diferencias significativas en DAEC (Kruskal-Wallis $p > 0,05$) entre fechas de siembra para ninguno de los ciclos evaluados, por lo tanto en esas localidades se puede seleccionar cualquiera de los seis escenarios si se emplea como criterio el riesgo de deficiencias en la estación completa (Figura 1). Ya se había evaluado esta adversidad en escenarios con ciclos intermedios y tres fechas de siembra para Balcarce (Irigoyen *et al.*, 2011a, 2012), y este trabajo amplía el espectro de escenarios estudiados brindando información útil para definir las estrategias de manejo más adecuadas.

Se puede describir un patrón homogéneo de la adversidad en la región, a pesar de existir diferencias en algunos componentes del balance de agua (ETM o ETR, datos no mostrados) en algunos escenarios. En la localidad de Mar del Plata hubo diferencias significativas en las DAEC entre la fecha de siembra más temprana (25-09) y las más tardía (15-11) para los tres ciclos, resultando las fechas intermedias sin diferencias entre sí.

Se encontraron diferencias significativas entre las localidades de Balcarce y Tandil en las DAEC para las fechas de siembra comprendidas entre el 25-09 y el 25-10, cualquiera sea el cultivar. En base a las DAEC, con siembras a partir del 05-11 las deficiencias de agua son homogéneas en la región. No se encontraron diferencias significativas entre los ciclos de madurez en ninguna de las combinaciones fecha de siembra x localidad.

No se registraron tendencias significativas en las series históricas de DAEC, mediante el análisis de correlación de Spearman ($p > 0,05$), en ninguno de los escenarios en cada localidad.

En la Figura 2 se presentan la variabilidad interanual de las DAPC de acuerdo a cada escenario agrícola y localidad. No se encontraron diferencias significativas para las comparaciones de DAPC entre fechas de siembra, cualquiera sea la combinación localidad x ciclo (Kruskal-Wallis $p > 0,05$). Dentro de la zona, se encontraron diferencias significativas de DAPC entre las localidades en algunas de las fechas de siembra evaluadas (25-09 al 25-10). En Balcarce se registraron las DAPC menos severas.

Por su parte, al contrastar ciclos de madurez, se observa un patrón diferente dentro de la región. Por una parte, las diferencias de DAPC entre ciclos

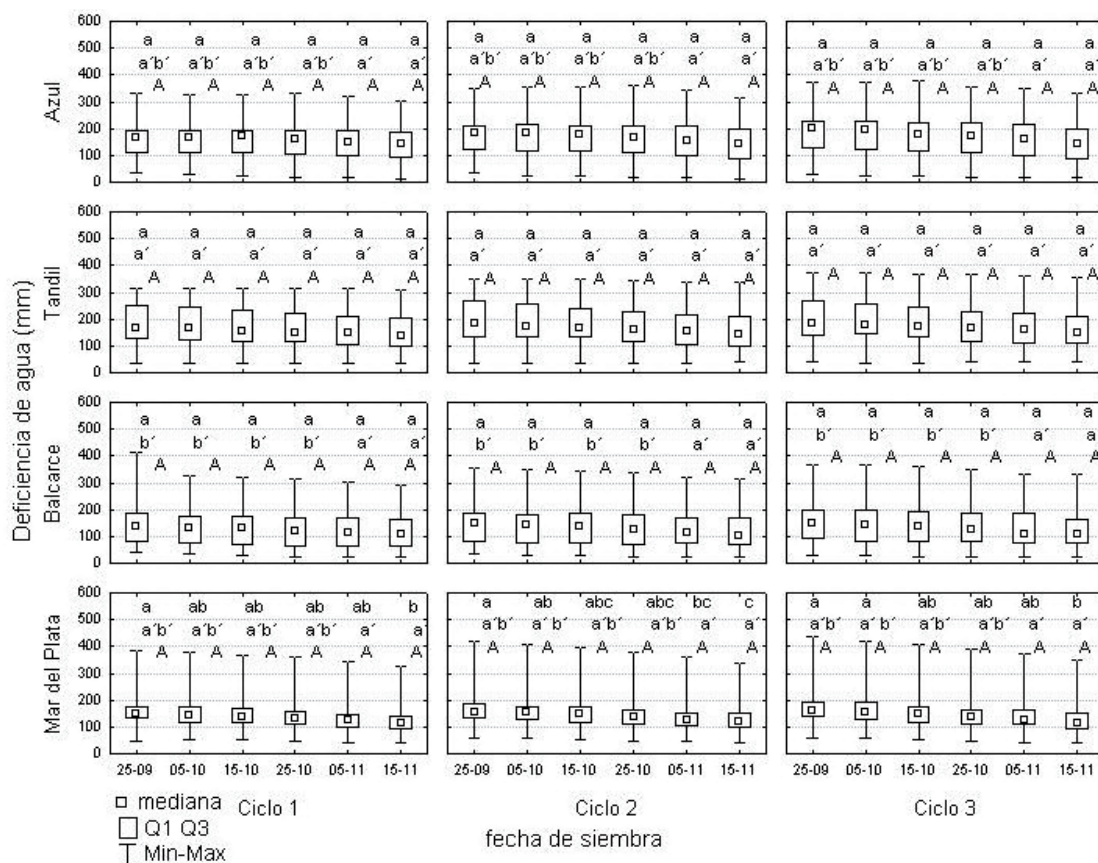


Figura 1. Variabilidad interanual (serie 1971-2010) de la deficiencia de agua acumulada durante la estación de crecimiento (DAEC) del cultivo de maíz bajo escenarios con seis fechas de siembra y tres ciclos de madurez en cuatro localidades del centro-sudeste bonaerense. Ciclo 1: ciclo corto. Ciclo 2: ciclo intermedio. Ciclo 3: ciclo largo. Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) de DAEC entre fechas de siembra para cada combinación de localidad y ciclo. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) de DAEC entre localidades para cada escenario (fecha de siembra x ciclo de madurez). Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) de DAEC entre ciclos para cada combinación de localidad y fecha de siembra.

largos y cortos se manifestaron más claramente en Mar del Plata (5 escenarios) y Azul (3 escenarios), aunque la magnitud de las diferencias entre ciclos varió en cada localidad (i.e., en la primera fecha de siembra, la DAPC mediana del ciclo largo supera a la DAPC del ciclo corto en 33 y 22 mm en Azul y Mar del Plata, respectivamente). En Tandil, en ninguna de las fechas de siembra evaluadas se encontraron diferencias significativas de DAPC entre los ciclos de madurez. Mientras que en Balcarce solamente fueron significativas las diferencias de DAPC entre ciclos para los escenarios con la fecha más temprana.

En las Tablas 1 a 4 se muestra información sobre la frecuencia de ocurrencia de DAEC y DAPC organizada para diferentes niveles de intensidad de la adversidad y permiten evaluar comparativamente la magnitud de los riesgos para el cultivo. Las mayores diferencias entre fechas de siembra y entre ciclos en la frecuencia

de ocurrencia de deficiencias durante la EC se observó en las categorías de riesgo moderado que se corresponden con los niveles intermedios de deficiencia (i.e. 150 mm o más en EC; diferencias en la frecuencia de ocurrencia de 0,2 a 0,3 entre fechas de siembra extremas para ciclos largos). En general se observó dentro de esta categoría de riesgo moderado una reducción en la frecuencia de ocurrencia de DAEC con el atraso en la fecha de siembra y un incremento con el aumento de la duración del ciclo. Por otra parte, las menores o las mayores intensidades de la adversidad que se corresponden a las categorías de riesgo que se acercan a los extremos de la distribución (rangos de frecuencia relativa acumulada 0,00-0,25 y 0,76-1,00) no varían o varían poco con el ciclo o la fecha de siembra. Con respecto a la frecuencia de ocurrencia de deficiencias en el período crítico, el patrón es bastante similar a la descripta para la DAEC. Las mayores diferencias entre fechas de

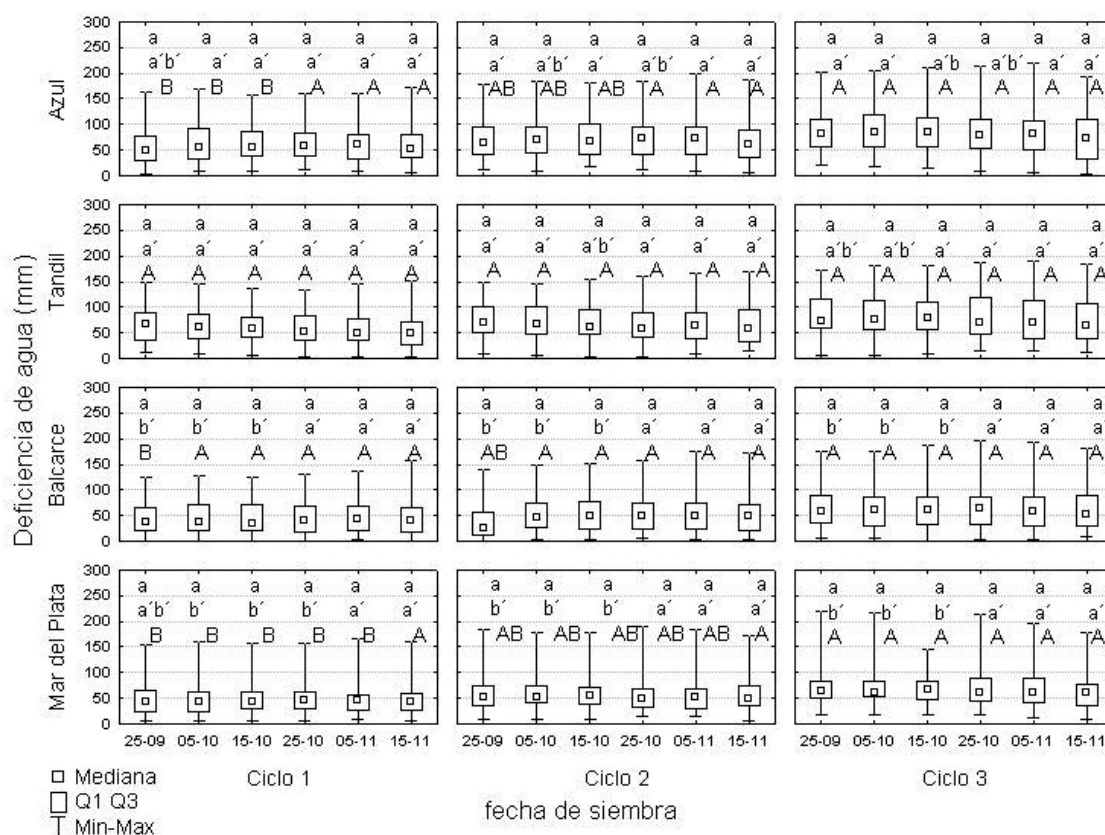


Figura 2. Variabilidad interanual (serie 1971-2010) de la deficiencia de agua acumulada durante el período crítico (DAPC) del cultivo de maíz bajo escenarios con seis fechas de siembra y tres ciclos de madurez en cuatro localidades del centro-sudeste bonaerense. Ciclo 1: ciclo corto. Ciclo 2: ciclo intermedio. Ciclo 3: ciclo largo. Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) de DAPC entre fechas de siembra para cada combinación de localidad y ciclo. Letras minúsculas con apóstrofo diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) de DAPC entre localidades para cada escenario (fecha de siembra x ciclo de madurez). Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) de DAPC entre ciclos para cada combinación de localidad y fecha de siembra.

siembra y ciclos se dan en categorías de riesgo moderado, correspondientes a una intensidad de deficiencia intermedia (i.e. 60 mm en el PC con diferencias en la frecuencia de ocurrencia de 0,02 a 0,2 entre fechas de siembra extremas). La frecuencia relativa de DAPC, en general

disminuyó con el atrasa en la fecha de siembra y aumentó desde ciclos cortos a largos, con algunas excepciones. En particular, Balcarce, no respondió estrictamente con este patrón sobre todo para los ciclos 1 y 2.

Tabla 1. Frecuencia de ocurrencia de deficiencias de agua durante la estación de crecimiento (EC) y el periodo crítico (PC) del cultivo de maíz en la localidad de Azul (serie 1971-2010).

Período	Ciclo	Deficiencia (mm)	Frecuencia relativa acumulada Fecha de siembra					
			25-09	05-10	15-10	25-10	05-11	15-11
EC	1	mayor a 50	0,97	0,95	0,95	0,92	0,92	0,90
		mayor a 100	0,82	0,82	0,82	0,79	0,74	0,72
		mayor a 150	0,64	0,62	0,62	0,56	0,49	0,46
		mayor a 200	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,15
		mayor a 250	0,13	0,13	0,13	0,15	0,10	0,10
	2	mayor a 50	0,97	0,95	0,95	0,92	0,92	0,90
		mayor a 100	0,85	0,85	0,82	0,79	0,79	0,74
		mayor a 150	0,64	0,67	0,64	0,62	0,56	0,41
		mayor a 200	0,36	0,31	0,31	0,33	0,33	0,23
		mayor a 250	0,15	0,18	0,18	0,13	0,10	0,08
	3	mayor a 50	0,97	0,97	0,97	0,95	0,92	0,87
		mayor a 100	0,85	0,85	0,85	0,82	0,77	0,72
		mayor a 150	0,69	0,69	0,67	0,67	0,59	0,44
		mayor a 200	0,51	0,38	0,33	0,33	0,33	0,23
		mayor a 250	0,18	0,18	0,18	0,15	0,13	0,10
PC	1	mayor a 20	0,85	0,90	0,87	0,92	0,92	0,87
		mayor a 40	0,62	0,69	0,74	0,72	0,64	0,64
		mayor a 60	0,33	0,44	0,44	0,49	0,51	0,46
		mayor a 80	0,21	0,28	0,28	0,28	0,23	0,28
		mayor a 100	0,21	0,18	0,13	0,13	0,10	0,10
		mayor a 120	0,21	0,18	0,13	0,13	0,10	0,10
	2	mayor a 20	0,92	0,95	0,95	0,92	0,92	0,90
		mayor a 40	0,77	0,82	0,82	0,79	0,79	0,69
		mayor a 60	0,62	0,64	0,62	0,59	0,59	0,54
		mayor a 80	0,36	0,41	0,44	0,46	0,36	0,31
		mayor a 100	0,21	0,23	0,26	0,21	0,21	0,18
		mayor a 120	0,21	0,23	0,26	0,21	0,21	0,18
	3	mayor a 20	1,00	0,97	0,95	0,92	0,95	0,95
		mayor a 40	0,85	0,87	0,87	0,82	0,82	0,74
		mayor a 60	0,69	0,69	0,72	0,69	0,62	0,59
		mayor a 80	0,56	0,56	0,51	0,49	0,51	0,44
		mayor a 100	0,36	0,41	0,38	0,31	0,31	0,31
		mayor a 120	0,36	0,41	0,38	0,31	0,31	0,31

Ciclo 1: ciclo corto. Ciclo 2: ciclo intermedio. Ciclo 3: ciclo largo.

Las áreas sombreadas distinguen cuatro categorías de riesgo de acuerdo a frecuencia de ocurrencia. Bajo: 0,00 a 0,25, bajo a moderado: 0,26 a 0,50, moderado a alto: 0,51 a 0,75, alto: 0,76 a 1,00.

Tabla 2. Frecuencia de ocurrencia de deficiencias de agua durante la estación de crecimiento (EC) y el periodo crítico (PC) del cultivo de maíz en la localidad de Tandil (serie 1971-2010).

Período	Ciclo	Deficiencia (mm)	Frecuencia relativa acumulada					
			Fecha de siembra					
			25-09	05-10	15-10	25-10	05-11	15-11
EC	1	mayor a 50	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
		mayor a 100	0,92	0,92	0,90	0,85	0,82	0,74
		mayor a 150	0,56	0,56	0,56	0,54	0,46	0,41
		mayor a 200	0,36	0,33	0,36	0,36	0,31	0,26
		mayor a 250	0,26	0,23	0,18	0,18	0,10	0,08
	2	mayor a 50	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
		mayor a 100	0,92	0,92	0,90	0,87	0,85	0,79
		mayor a 150	0,64	0,64	0,67	0,56	0,56	0,46
		mayor a 200	0,38	0,38	0,38	0,33	0,31	0,26
		mayor a 250	0,28	0,28	0,18	0,15	0,10	0,10
	3	mayor a 50	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
		mayor a 100	0,92	0,92	0,90	0,90	0,85	0,82
		mayor a 150	0,74	0,74	0,74	0,64	0,59	0,49
		mayor a 200	0,44	0,38	0,41	0,36	0,28	0,26
		mayor a 250	0,28	0,28	0,21	0,18	0,13	0,13
PC	1	mayor a 20	0,90	0,92	0,92	0,95	0,90	0,87
		mayor a 40	0,69	0,74	0,77	0,72	0,67	0,62
		mayor a 60	0,56	0,54	0,49	0,46	0,44	0,44
		mayor a 80	0,31	0,28	0,28	0,28	0,20	0,20
		mayor a 100	0,18	0,20	0,17	0,17	0,15	0,15
		mayor a 120	0,18	0,20	0,17	0,17	0,15	0,15
	2	mayor a 20	0,95	0,95	0,95	0,95	0,92	0,90
		mayor a 40	0,85	0,90	0,85	0,82	0,72	0,67
		mayor a 60	0,69	0,59	0,54	0,49	0,51	0,49
		mayor a 80	0,43	0,46	0,43	0,43	0,35	0,33
		mayor a 100	0,25	0,28	0,20	0,20	0,20	0,20
		mayor a 120	0,25	0,28	0,20	0,20	0,20	0,20
	3	mayor a 20	0,95	0,95	0,95	0,97	0,97	0,92
		mayor a 40	0,92	0,90	0,85	0,82	0,74	0,74
		mayor a 60	0,74	0,72	0,67	0,62	0,54	0,59
		mayor a 80	0,43	0,44	0,48	0,48	0,43	0,41
		mayor a 100	0,38	0,43	0,35	0,35	0,30	0,28
		mayor a 120	0,38	0,43	0,35	0,35	0,30	0,28

Ciclo 1: ciclo corto. Ciclo 2: ciclo intermedio. Ciclo 3: ciclo largo.

Las áreas sombreadas distinguen cuatro categorías de riesgo de acuerdo a frecuencia de ocurrencia. Bajo: 0,00 a 0,25, bajo a moderado: 0,26 a 0,50, moderado a alto: 0,51 a 0,75, alto: 0,76 a 1,00.

Tabla 3. Frecuencia de ocurrencia de deficiencias de agua durante la estación de crecimiento (EC) y el periodo crítico (PC) del cultivo de maíz en la localidad de Balcarce (serie 1971-2010).

Período	Ciclo	Deficiencia (mm)	Frecuencia relativa acumulada					
			Fecha de siembra					
			25-09	05-10	15-10	25-10	05-11	15-11
EC	1	mayor a 50	0,92	0,90	0,90	0,90	0,87	0,87
		mayor a 100	0,69	0,67	0,67	0,69	0,62	0,53
		mayor a 150	0,41	0,36	0,33	0,28	0,31	0,28
		mayor a 200	0,15	0,10	0,10	0,13	0,10	0,10
		mayor a 250	0,13	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08
	2	mayor a 50	0,97	0,95	0,95	0,92	0,90	0,92
		mayor a 100	0,69	0,69	0,67	0,69	0,59	0,51
		mayor a 150	0,46	0,41	0,31	0,36	0,36	0,33
		mayor a 200	0,18	0,15	0,13	0,15	0,13	0,10
		mayor a 250	0,10	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08
	3	mayor a 50	0,97	0,97	0,97	0,95	0,92	0,92
		mayor a 100	0,72	0,69	0,69	0,64	0,62	0,56
		mayor a 150	0,51	0,44	0,36	0,36	0,36	0,36
		mayor a 200	0,21	0,21	0,18	0,18	0,15	0,15
		mayor a 250	0,10	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08
PC	1	mayor a 20	0,79	0,79	0,77	0,72	0,77	0,74
		mayor a 40	0,46	0,44	0,38	0,46	0,51	0,51
		mayor a 60	0,26	0,28	0,28	0,26	0,26	0,33
		mayor a 80	0,21	0,18	0,18	0,10	0,18	0,13
		mayor a 100	0,10	0,10	0,05	0,05	0,08	0,08
		mayor a 120	0,10	0,10	0,05	0,05	0,07	0,07
	2	mayor a 20	0,69	0,90	0,79	0,79	0,77	0,79
		mayor a 40	0,38	0,56	0,62	0,64	0,62	0,62
		mayor a 60	0,21	0,36	0,33	0,41	0,41	0,36
		mayor a 80	0,10	0,23	0,23	0,21	0,18	0,21
		mayor a 100	0,05	0,15	0,13	0,13	0,10	0,10
		mayor a 120	0,05	0,15	0,13	0,13	0,10	0,10
	3	mayor a 20	0,87	0,85	0,85	0,85	0,82	0,79
		mayor a 40	0,72	0,72	0,72	0,72	0,69	0,62
		mayor a 60	0,49	0,51	0,51	0,54	0,46	0,46
		mayor a 80	0,36	0,36	0,41	0,33	0,28	0,26
		mayor a 100	0,23	0,21	0,18	0,18	0,15	0,13
		mayor a 120	0,23	0,21	0,18	0,18	0,15	0,13

Ciclo 1: ciclo corto. Ciclo 2: ciclo intermedio. Ciclo 3: ciclo largo.

Las áreas sombreadas distinguen cuatro categorías de riesgo de acuerdo a frecuencia de ocurrencia. Bajo: 0,00 a 0,25, bajo a moderado: 0,26 a 0,50, moderado a alto: 0,51 a 0,75, alto: 0,76 a 1,00.

Tabla 4. Frecuencia de ocurrencia de deficiencias de agua durante la estación de crecimiento (EC) y el periodo crítico (PC) del cultivo de maíz en la localidad de Mar del Plata (serie 1971-2010).

Período	Ciclo	Deficiencia (mm)	Frecuencia relativa acumulada					
			Fecha de siembra					
			25-09	05-10	15-10	25-10	05-11	15-11
EC	1	mayor a 50	0,97	1,00	1,00	0,97	0,95	0,95
		mayor a 100	0,85	0,87	0,90	0,82	0,74	0,69
		mayor a 150	0,46	0,41	0,36	0,26	0,23	0,21
		mayor a 200	0,13	0,13	0,13	0,10	0,10	0,10
		mayor a 250	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,08
	2	mayor a 50	1,00	1,00	1,00	0,97	0,95	0,95
		mayor a 100	0,87	0,87	0,87	0,85	0,79	0,72
		mayor a 150	0,59	0,54	0,44	0,33	0,26	0,28
		mayor a 200	0,18	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
		mayor a 250	0,10	0,10	0,10	0,08	0,08	0,08
	3	mayor a 50	1,00	1,00	1,00	0,97	0,95	0,92
		mayor a 100	0,90	0,90	0,90	0,87	0,79	0,64
		mayor a 150	0,62	0,59	0,49	0,41	0,31	0,28
		mayor a 200	0,21	0,18	0,13	0,13	0,13	0,13
		mayor a 250	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
PC	1	mayor a 20	0,82	0,85	0,87	0,85	0,79	0,85
		mayor a 40	0,54	0,51	0,56	0,56	0,56	0,54
		mayor a 60	0,36	0,31	0,28	0,28	0,23	0,26
		mayor a 80	0,18	0,18	0,18	0,15	0,10	0,10
		mayor a 100	0,10	0,05	0,03	0,05	0,05	0,05
		mayor a 120	0,10	0,05	0,03	0,05	0,05	0,05
	2	mayor a 20	0,92	0,92	0,92	0,87	0,85	0,85
		mayor a 40	0,72	0,77	0,72	0,72	0,67	0,64
		mayor a 60	0,41	0,39	0,36	0,33	0,39	0,39
		mayor a 80	0,20	0,20	0,20	0,20	0,15	0,15
		mayor a 100	0,10	0,10	0,10	0,08	0,08	0,10
		mayor a 120	0,10	0,10	0,10	0,08	0,08	0,10
	3	mayor a 20	0,92	0,97	0,97	0,95	0,92	0,92
		mayor a 40	0,87	0,82	0,85	0,79	0,79	0,69
		mayor a 60	0,62	0,59	0,51	0,51	0,51	0,51
		mayor a 80	0,28	0,26	0,28	0,36	0,31	0,23
		mayor a 100	0,15	0,21	0,18	0,15	0,10	0,10
		mayor a 120	0,15	0,21	0,18	0,15	0,10	0,10

Ciclo 1: ciclo corto. Ciclo 2: ciclo intermedio. Ciclo 3: ciclo largo.

Las áreas sombreadas distinguen cuatro categorías de riesgo de acuerdo a frecuencia de ocurrencia. Bajo: 0,00 a 0,25, bajo a moderado: 0,26 a 0,50, moderado a alto: 0,51 a 0,75, alto: 0,76 a 1,00.

En la literatura local, las siembras tempranas se asociaron a una mayor disponibilidad de agua en el suelo al inicio del período crítico (Andrade *et al.*, 1996). Por esa razón, en los planteos de manejo propuestos se ha insistido en adecuar el desarrollo de modo que el período crítico coincida con menor demanda atmosférica y si es posible con un período con mayores precipitaciones. Cabe destacar que la precipitación acumulada durante el PC no presentó diferencias significativas (Kruskal Wallis, $p>0,05$) en ninguna de las combinaciones analizadas, ni entre localidades, ni entre ciclos, ni entre fechas de siembra (datos no mostrados), por lo que las variaciones en la condición hídrica para cada escenario depende del ambiente previo al PC y de la evapotranspiración máxima (ETM).

No se encontraron diferencias significativas (Kruskal Wallis, $p>0,05$) en la relación ETR/ETM entre localidades para cada escenario, tampoco entre ciclos para cada combinación localidad y ciclo.

Estimación de pérdidas de rendimiento por deficiencias de agua

La decisión de manejo agrícola deberá contemplar los riesgos integrando probabilidad, intensidad e impacto de las amenazas en la producción del cultivo. En ese sentido, el análisis probabilístico de los rendimientos potenciales (Ym) y reales (Ya, con efecto de la deficiencia de agua) permite estimar las pérdidas posibles de rendimiento debido a esta adversidad. En la Figura 3 se presentan los Ym estimados según la relación evapotranspiración máxima (ETM) x eficiencia en el uso de agua (EUA) para todos los escenarios (fecha de siembra x ciclo) en cada localidad analizada.

Se encontraron diferencias significativas (Kruskal-Wallis $p<0,05$) en Ym en cada una de las comparaciones analizadas, tanto entre fechas de siembra para las combinaciones de localidad x ciclo, como entre ciclos para fechas de siembra x localidad y entre localidades para los escenarios fecha de siembra x ciclo. Esto implica que en la zona, se pueden distinguir una o más estrategias como las más favorables para alcanzar mayores rendimientos.

Por un lado, se encontraron diferencias significativas ($p<0,05$) entre los ciclos de madurez en Ym para cada una de las combinaciones de fecha de siembra y localidad, con la secuencia ciclo 3 > ciclo 2 > ciclo 1 en la mayoría de los casos, fueron excepción las combinaciones de las tres últimas fechas en MdP, de una fecha de siembra en Azul

y Balcarce, combinaciones con la secuencia ciclo 3=ciclo 2 > ciclo 1 para Ym. Los Ym estimados para Tandil y Azul no se diferenciaron entre sí y fueron mayores que los estimados para Balcarce y Mar del Plata (que tampoco se diferenciaron entre sí) bajo cualquier escenario, excepto para la siembra del 15-11 de ciclo largo. En este escenario, a la generalización anterior, debe adicionarse que el rendimiento potencial en Balcarce no fue diferente del estimado para Tandil.

En cada una de las localidades, al comparar fechas de siembra, solamente se encontraron diferencias significativas ($p<0,05$) entre los escenarios extremos de siembras tempranas y tardías. Los escenarios que mostraron los mayores Ym son los que combinan fechas de siembra temprana con cultivares de ciclo largo. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Bonelli (2014), en Balcarce, con simulación en base a la eficiencia de uso de radiación y con fechas de siembra que varían desde octubre a inicios de enero. Según este autor, la siembra de los ciclos cortos en siembras aún más tardías que las evaluadas en este trabajo permite aumentar rendimientos potenciales, reducir el riesgo de heladas durante la etapa reproductiva y anticipar la madurez de modo de exponer a condiciones más favorables para el secado de granos.

En la Figura 4 se presentan los rendimientos reales (Ya) simulados a partir de los componentes del balance de agua (ETR y ETM) y del factor respuesta k_y para cada combinación de localidad, ciclo y fecha de siembra.

No se encontraron diferencias significativas (Kruskal-Wallis $p>0,05$) entre fechas de siembra para cada una de las combinaciones ciclo x localidad. Aunque con un número más reducido de fechas de siembra y un cultivar de ciclo intermedio, tampoco, en Balcarce, se habían encontrado diferencias significativas entre fechas de siembra, cuando la variabilidad interanual fue discriminada de acuerdo a la fase ENSO (Irigoyen *et al.*, 2011). Tampoco se encontraron diferencias significativas (Kruskal-Wallis $p>0,05$) entre las localidades en Ya para cada uno de los escenarios (fecha de siembra x ciclo). Sin embargo, se encontraron diferencias significativas de Ya entre los ciclos de madurez para las combinaciones de fecha de siembra y localidad. En todas las localidades y fechas de siembra los cultivares de ciclo largo presentaron Ya significativamente mayores que los de ciclo corto, mientras que los Ya de ciclo intermedio no se diferenciaron significativamente de los de ciclo largo y corto.

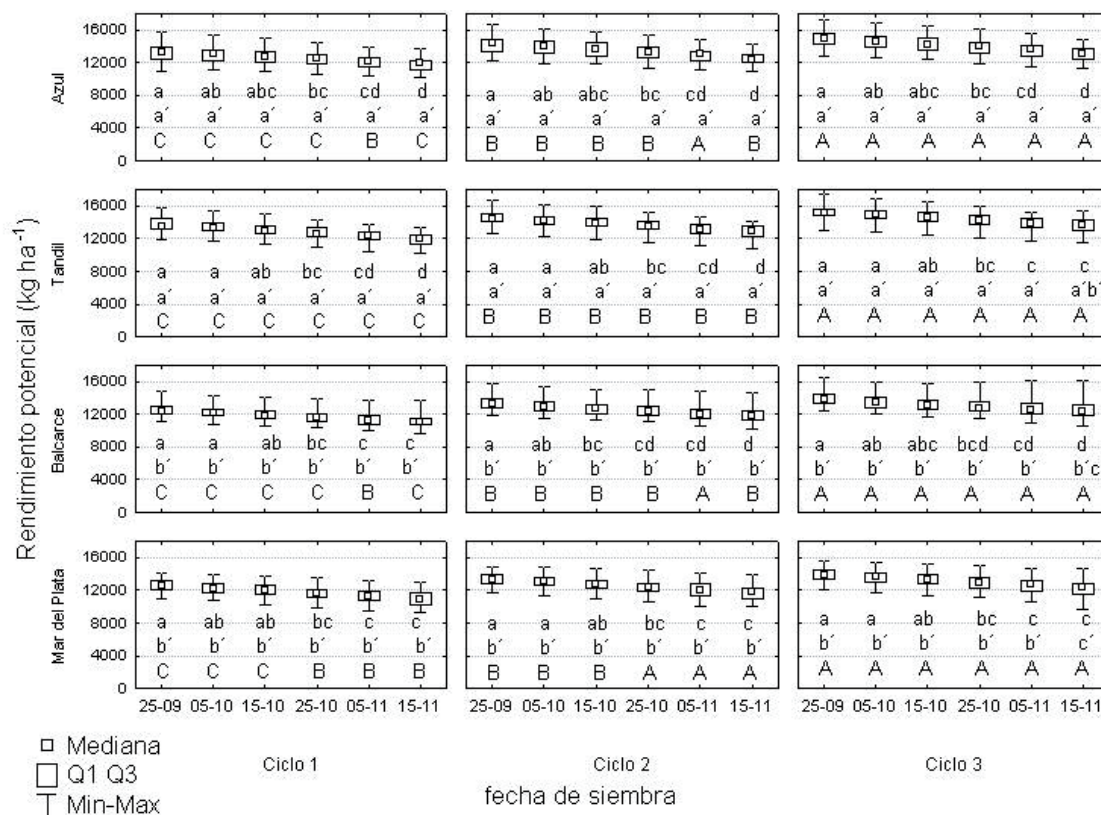


Figura 3. Variabilidad interanual del rendimiento potencial simulado (Y_m) del cultivo de maíz bajo escenarios con seis fechas de siembra y tres ciclos de madurez en cuatro localidades del centro-sudeste bonaerense. Ciclo 1: ciclo corto. Ciclo 2: ciclo intermedio. Ciclo 3: ciclo largo. Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$) de Y_m entre fechas de siembra para cada combinación de localidad y ciclo. Letras minúsculas con apóstrofe diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$) de Y_m entre localidades para cada escenario (fecha de siembra x ciclo de madurez). Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$) de Y_m entre ciclos para cada combinación de localidad y fecha de siembra.

La falta de respuesta en Y_a debido a cambios en las fechas de siembra, se debe en parte a que las fechas de siembra propuestas se distancian entre sí en apenas 10 días, y el ambiente hídrico al que se expone el cultivo no varía significativamente de acuerdo a los resultados del balance. Otro aspecto que merece discutir respecto a la estimación de rendimiento se relaciona con la metodología de estimación empleada: a) se aplicó el factor respuesta K_y sobre la evapotranspiración relativa de la EC completa, sin considerar una respuesta diferente de acuerdo a la susceptibilidad a la falta de agua, b) el factor respuesta K_y aplicado fue el mismo para los diferentes ciclos de madurez. Se puede considerar válido el procedimiento indicado en a) para estimar Y_a cuando la ET relativa PC no es significativamente diferente de la ET relativa EC. Los resultados de este trabajo indican? el cumplimiento de esta condición siendo que en la mayoría de los escenarios simulados para

cada localidad la ET relativa PC fue similar a la ET relativa EC, de acuerdo al test de Kolmogorov-Smirnov ($p < 0.05$), con excepción de algunos escenarios simulados para Mar del Plata (ciclo corto con siembras del 05-10 y 15-10 con ET relativa PC mayor que ET relativa EC y ciclo largo con siembra del 05-11 con ET relativa durante EC mayor que la correspondiente a PC). Con respecto al punto b) no se dispone en la actualidad de suficiente información a nivel local que permita asumir valores de K_y diferentes de acuerdo al ciclo de madurez, aunque algunos resultados obtenidos en Balcarce (Della Maggiora et al., 2001) pueden sugerir la necesidad de estudiar con más detalle este aspecto y también así lo indican las recomendaciones de la FAO (Steduto et al., 2012). Figura 4. Variabilidad interanual (serie 1971-2010) del rendimiento real simulado (Y_a) del cultivo de maíz bajo escenarios con seis fechas de siembra y tres ciclos de madurez en cuatro localidades

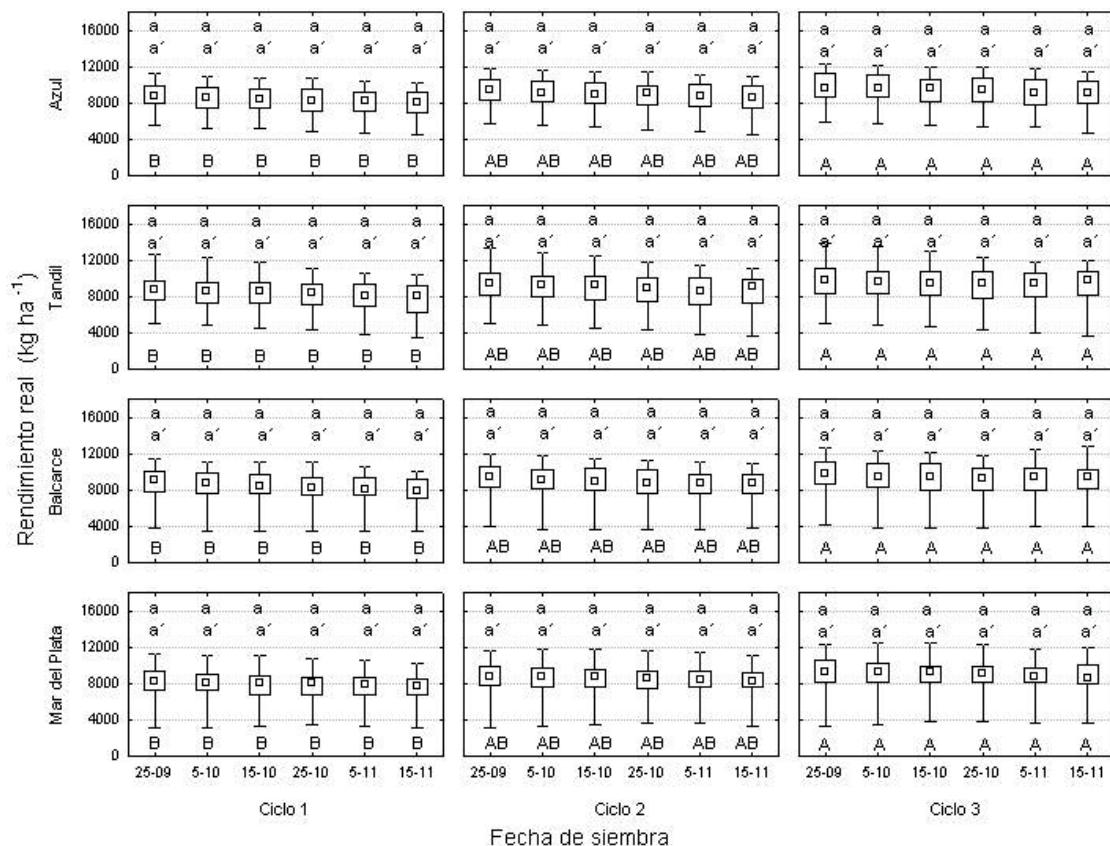


Figura 4. Variabilidad interanual (serie 1971 2010) del rendimiento real simulado (Y_a) del cultivo de maíz bajo escenarios con seis fechas de siembra y tres ciclos de madurez en cuatro localidades del centro-sudeste bonaerense. Ciclo 1: ciclo corto. Ciclo 2: ciclo intermedio. Ciclo 3: ciclo largo. Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) de Y_a entre fechas de siembra para cada combinación de localidad y ciclo. Letras minúsculas con apóstrofe diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) de Y_a entre localidades para cada escenario (fecha de siembra x ciclo de madurez). Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) de Y_a entre ciclos para cada combinación de localidad y fecha de siembra.

del centro-sudeste bonaerense. Ciclo 1: ciclo corto. Ciclo 2: ciclo intermedio. Ciclo 3: ciclo largo. Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) de Y_a entre fechas de siembra para cada combinación de localidad y ciclo. Letras minúsculas con apóstrofe diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) de Y_a entre localidades para cada escenario (fecha de siembra x ciclo de madurez). Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) de Y_a entre ciclos para cada combinación de localidad y fecha de siembra.

En la zona, no fueron detectadas diferencias significativas entre las fechas de siembra para la disminución de rendimiento debido a las deficiencias de agua ($Y_m - Y_a$) en cualquier combinación ciclo

de madurez y localidad, excepto en Mar del Plata (Tabla 5). En esta localidad, la reducción de rendimiento fue menor en las siembras más tardías, para cada uno de los ciclos de madurez. A su vez, la brecha obtenida en Mar del Plata se diferenció significativamente, en cualquier escenario de la obtenida para los escenarios simulados para Azul, mientras que los escenarios simulados para Tandil y Balcarce, no se diferenciaron significativamente entre sí, tampoco cada uno respectivamente de los obtenidos en la localidad más próxima (Azul=Tandil y Balcarce=Mar del Plata). No se detectaron diferencias significativas entre los ciclos de madurez en la brecha de rendimiento, cualquiera sea la combinación fecha de siembra x localidad.

Tabla 5. Valores medianos de la diferencia entre el rendimiento potencial y el rendimiento real (Ym-Ya) en localidades del centro-sudeste bonaerense bajo escenarios con fechas de siembra (FS) y ciclos de madurez.

Localidad	FS	Diferencia entre rendimiento potencial y real (kg ha ⁻¹)								
		Ciclo 1			Ciclo 2			Ciclo 3		
Azul	25-09	4602	a	a' A	5096	a	a' A	5521	a	a' A
	05-10	4596	a	a' A	5116	a	a' A	5404	a	a' A
	15-10	4673	a	a' A	4886	a	a' A	4899	a	a' A
	25-10	4488	a	a' A	4602	a	a' A	4759	a	a' A
	05-11	4091	a	a' A	4248	a	a' A	4457	a	a' A
	15-11	3889	a	a' A	3892	a	a' A	3947	a	a' A
Tandil	25-09	4648	a	a'b' A	5011	a	a'b' A	5098	a	a'b' A
	05-10	4597	a	a'b' A	4793	a	a'b' A	4958	a	a'b' A
	15-10	4335	a	a'b' A	4642	a	a'b' A	4706	a	a'b' A
	25-10	4166	a	a'b' A	4377	a	a'b' A	4630	a	a'b' A
	05-11	4037	a	a'b' A	4225	a	a'b' A	4390	a	a'b' A
	15-11	3843	a	a'b' A	3954	a	a'b' A	4049	a	a'b' A
Balcarce	25-09	3770	a	a'b' A	4056	a	a'b' A	4148	a	a'b' A
	05-10	3677	a	a'b' A	3898	a	a'b' A	3934	a	a'b' A
	15-10	3667	a	a'b' A	3747	a	a'b' A	3779	a	a'b' A
	25-10	3294	a	a'b' A	3487	a	a'b' A	3403	a	a'b' A
	05-11	3127	a	a'b' A	3060	a	a'b' A	2977	a	a'b' A
	15-11	2946	a	a'b' A	2786	a	a'b' A	3036	a	a'b' A
Mar del Plata	25-09	4059	a	b' A	4306	a	b' A	4430	a	b' A
	05-10	3948	a	b' A	4234	a	b' A	4292	a	b' A
	15-10	3820	ab	b' A	4063	a	b' A	4109	a	b' A
	25-10	3576	ab	b' A	3759	a	b' A	3761	abc	b' A
	05-11	3379	ab	b' A	3502	a	b' A	3423	bc	b' A
	15-11	3201	b	b' A	3221	a	b' A	3096	c	b' A

Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) de Ym-Ya entre fechas de siembra para cada combinación de localidad y ciclo. Letras minúsculas con apóstrofe diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) de Ym-Ya entre localidades para cada escenario (fecha de siembra x ciclo de madurez). Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) de Ym-Ya entre ciclos para cada combinación de localidad y fecha de siembra. (Ciclo 1: ciclo corto, Ciclo 2: ciclo intermedio, Ciclo 3: ciclo largo).

CONCLUSIONES

En la zona del centro-sudeste bonaerense, los escenarios evaluados para la serie histórica 1971-2010 permiten distinguir algunas estrategias de manejo agrícola como más apropiadas de acuerdo al riesgo climático debido al efecto de las deficiencias de agua. Con base en el balance de agua simulado en suelos de 1m de profundidad, se observa un patrón homogéneo en la magnitud de las deficiencias de agua acumuladas durante toda la estación de crecimiento (DAEC) del cultivo de maíz, sin diferencias entre localidades para cada escenario evaluado. Las DAEC no varían de acuerdo al ciclo de madurez ni entre fechas de siembra (desde fines de setiembre a mediados de noviembre), excepto en una de las localidades bajo estudio. Solamente entre los ciclos de madurez cortos y largos se encuentran

diferencias significativas en las deficiencias de agua acumuladas durante el período crítico (DAPC), aunque no en todas las fechas de siembra y localidades. El análisis probabilístico del impacto de las deficiencias de agua sobre los rendimientos permite recomendar la siembra de ciclos intermedios o largos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMdP) que ha provisto la financiación del trabajo (AGR387/12). M. P. Panunzio Moscoso ha sido beneficiada con una Beca de Entrenamiento por la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC). El trabajo es parte del trabajo de graduación de M.P. Panunzio Moscoso.

BIBLIOGRAFÍA

- Allen, R.; L.S. Pereira, D. Raes and M. Smith, 1998. Crop evapotranspiration. Guides for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper N°56, 300p.
- Andrade, F.H. y A.G. Cirilo, 2002. Fecha de siembra y rendimiento de los cultivos. En: Andrade, F.H. y Sadras V.O. (eds.) Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Gráfica Sirio. pp. 137-156.
- Bonelli, L.E. 2014. Rendimiento potencial de maíz en Balcarce en función de la fecha de siembra y la duración del ciclo del híbrido. Tesis Magister Scientiae. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata. Balcarce, Buenos Aires, Argentina. 86 p.
- Capristo, P.; R.H. Rizzalli and F.H. Andrade, 2007. Ecophysiological yield components of maize hybrids with contrasting maturity. *Agronomy Journal* 99: 1111-1118.
- Della Maggiora, A.I.; Caviglia O. y F.H. Andrade, 2001. Evapotranspiración y eficiencia en el uso del agua en híbridos de maíz con diferente ciclo de crecimiento en Balcarce. Actas VII Congreso Nacional de maíz. Edición en CD. Noviembre de 2001. Pergamino.
- Della Maggiora, A.I.; A.I. Irigoyen, J.M. Gardiol, A. I., O. Caviglia y L. Echarte, 2002. Evaluación de un modelo de balance de agua en el suelo para el cultivo de maíz. *Revista Argentina de Agrometeorología* 2(2): 167-176.
- Della Maggiora, A.I.; J.M. Gardiol y A.I. Irigoyen, 2003. Coeficiente de cultivo de maíz basado en la evapotranspiración de referencia Penman-Monteith. *Congresso Brasileiro de Agrometeorologia*, Brasil. pp. 315-316.
- Della Maggiora, A.I. y A.I. Irigoyen, 2012. Balance agua y rendimiento simulado de maíz en el centro-sur de Buenos Aires: variabilidad asociada a la señal ENOS. Actas de XIV Reunión Argentina de Agrometeorología. Malargüe, Argentina. pp.43- 44.
- Della Maggiora, A.I.; A. I. Irigoyen, L. Malena y M. Cambaerri, 2012. Deficiencia hídrica para el cultivo de maíz en el centro-sudeste según fecha de siembra. Actas de XIV Reunión Argentina de Agrometeorología. 2 p. Malargüe, Argentina. pp.45-46.
- Doorenbos, J. and A.H. Kassam, 1979. Yield response to water. Irrigation and Drainage. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, N° 33. 193 p.
- Food and Agriculture Organization of United Nations (FAO), 2009. Coping with a changing climate: considerations for adaptation and mitigation in agriculture, Rome. Environment and Natural Resources. 120 p.
- Grassini, P.; Thorburn, J., Burr, C. and K.G., Cassman, 2011. High-yield irrigated maize in the Western U.S. Corn-Belt: I. On-farm yield, yield-potential, and impact of management practices. *Field Crops Research*. 120: 142-150.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Irigoyen, A.I.; A.I. Della Maggiora y F. N. Cabria, 2004. Balance de agua seriado para tres perfiles de suelo del ambiente geomorfológico Lomas Interserranas de Balcarce (Arg.). Actas de X Reunión Argentina y IV Latinoamericana de Agrometeorología. 2 p. Mar del Plata, Argentina. En CD.
- Irigoyen, A. I.; A.I. Della Maggiora and L.R. Angelocci, 2011 a. Planning the growing season for maize based on climatic variability. Soil water balance. Anais de V Congresso Brasileiro de Biometeorologia, Piracicaba, Brasil. En CD.
- Irigoyen, A.I.; A.I. Della Maggiora, R.H. Rizzalli and L.R. Angelocci, 2011 b. Planning the growing season for maize based on climatic variability. Relative evapotranspiration and yield. Anais de V Congresso Brasileiro de Biometeorologia, Piracicaba, Brasil. En CD.
- Irigoyen, A. I.; A.I. Della Maggiora and L.R. Angelocci, 2012. Señal El Niño-Oscilación sur (ENOS) y deficiencias de agua para el cultivo de maíz. Actas de XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 5 p. Mar del Plata (Arg.). En CD.
- Maddonni, G. A. 2012. Analysis of the climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina-a probabilistic approach. *Theoretical and Applied Climatology* 107: 325-345.
- Moreno, R.; A.I. Irigoyen, G.A. Studdert y G.F. Domínguez, 2012. Rendimientos de maíz en Ensayos de Larga Duración (ELD) y señal EL Niño-Oscilación SUR (ENOS). Actas de XIV Reunión Argentina de Agrometeorología, Malargüe, Argentina. 2p.
- Panunzio Moscoso, M.P.; A. I. Irigoyen, A.M. Cabrera y A.I. Della Maggiora, 2014. Coeficiente de cultivo en maíz: escenarios de fechas de siembra y ciclos de madurez para Balcarce (Argentina). Actas de Reunión Binacional Uruguay-Argentina de Agrometeorología y XV Reunión Argentina de Agrometeorología. Piriápolis, Uruguay, pp. 77- 78.
- Panunzio Moscoso, M.P.; A. I. Irigoyen, A.I. Della Maggiora y R. H. Rizzalli, 2016. Riesgos climáticos para el cultivo de maíz en el centro-sudeste bonaerense: a. Temperaturas extremas. *Revista Argentina de Agrometeorología*. Edición Especial.
- Steduto, P. ; T C. Hsiao, Fereres, E. D. Raes, 2012. Crop yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper N°66, 500p.
- van Ittersum, M.K.; K.G. Cassman, P. Grassini, J. Wolf, P. Tittonell and Z. Hochmand. 2013. Yield gap analysis with local to global relevance - A review. *Field Crops Research* 143: 4-17.

Monitoreo de la fenología y fenometría del olivar a través de la dinámica del NDVI-MODIS en Vichigasta, La Rioja

Luna Toledo, E. S. y P.I. Figuerola

RESUMEN

El conocimiento de la fenología, la fenometría y el comportamiento estacional de la vegetación constituye una herramienta valiosa para comprender el funcionamiento de un agrosistema. Las metodologías tradicionales para realizar observaciones "*in situ*" son laboriosas y costosas cuando se aplican en grandes extensiones agrícolas y/o naturales por lo que resultan inviables. El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI por sus siglas en inglés), obtenido desde sensores satelitales, puede ser usado como un estimador de la fenología y de la fenometría vegetal, y un indicador del comportamiento estacional de la vegetación.

El objetivo de este trabajo fue explorar las relaciones entre el producto NDVI del sensor MODIS (MOD13Q1) y datos de fenología y fenometría del olivo (Variedad Picual y Arbequina) medidos *in situ* en una finca comercial de la localidad de Vichigasta, Provincia de La Rioja mediante metodologías convencionales de observación y medición. La dinámica del NDVI en olivo (especie perennifolia) tuvo un comportamiento distinto a otros frutales típicos de la región (ej. vid, caducifolio). En olivo se encontraron valores de NDVI máximos para el periodo otoño-invierno y valores mínimos en el periodo primavera-verano. Se observó además una relación cuadrática entre las fases fenológicas y la dinámica del NDVI, con un alto coeficiente de determinación ($r^2=0,92$). Finalmente, se relacionó el NDVI con el volumen de copa ($r^2=0,68$) obteniendo una relación significativa entre ambos. El uso de esta metodología puede ser prometedora para el monitoreo remoto de variables fenológicas y fenométricas en olivares.

Palabras clave: Arbequina, Picual, Índice de Vegetación, Estacionalidad.

Luna Toledo, E. S. and P.I. Figuerola, 2016. Monitoring olive phenology and phenometry through NDVI - MODIS dynamics, in Vichigasta, La Rioja. RADA VII: 73-81

SUMMARY

Knowledge of the phenology, phenometry and seasonal behavior of vegetation is a valuable tool for understanding the operation of an agricultural system. Traditional methodologies for observation "*in situ*" are laborious and expensive when applied in large agricultural and/or natural areas, making them nonviable. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), obtained from satellite sensors, can be used as an estimator of plant phenology and phenometry, and as an indicator of seasonal patterns of vegetation.

The aim of this study was to explore the relationship between the NDVI-MODIS product (MOD13Q1) and olive data phenology and phenometry (Var. Picual and Arbequina), measured in situ in a commercial orchard in Vichigasta, La Rioja Province, Argentina, by conventional observation and measurement methods. NDVI dynamics in olive trees (evergreen species) showed a behavior different to other typical fruits of the region (e.g., vines, deciduous). The maximum NDVI values were found in olive in the autumn-winter period and minimum values in the spring-summer period. A nonlinear relationship was also observed between the phenological phases and the NDVI dynamics, with a high coefficient of determination ($r^2 = 0.92$). Finally, the NDVI was significantly related to canopy volume ($r^2 = 0.68$). The use of this methodology seems to be promising for the remote monitoring of phenological and phenometrical variables in olive.

Keywords: Arbequina, Picual, Vegetation index, Seasonality.

E. S. Luna Toledo: NTA EEA La Rioja, Ruta Nac. 38 Km 267, Chamical, La Rioja. E. S. Luna Toledo y P.I. Figuerola: Universidad Nacional de Chilecito, 9 de Julio 22, Chilecito, La Rioja. Correspondencia a: lunatoledo.emmanuel@inta.gob.ar

INTRODUCCIÓN

La Argentina es uno de los principales productores olivícolas fuera de la cuenca del mediterráneo, superando en la actualidad las 100.000 has. La mayor parte de la superficie implantada se concentra en las provincias de Catamarca, La Rioja, San Juan y Mendoza (Searles *et al.*, 2011).

El conocimiento de la fenología y la fenometría de este cultivo, constituyen un valioso instrumento para comprender el funcionamiento y la estacionalidad de este tipo de agrosistema, y sirve además como herramienta de manejo agronómico.

Características estacionales de la vegetación, tales como emergencia/ brotación y senescencia están estrechamente relacionadas a características de la atmósfera baja, incluyendo patrones del tiempo tales como características de temperatura y humedad (Reed *et al.*, 1994; Tucker *et al.*, 2001). Cambios en eventos fenológicos (patrones recurrentes del crecimiento y el desarrollo de la vegetación) pueden ser señales importantes de la variación climática interanual o de cambios ambientales locales o globales (Reed *et al.*, 1994; White *et al.*, 1997).

Si a esto le sumamos la variabilidad estacional en el crecimiento vegetativo y reproductivo propia del olivo, debida principalmente a la competencia por asimilados desencadenada por los frutos en crecimiento (Rallo & Cueva, 2008), tenemos que la fenología puede ser útil para la predicción de la producción.

Los datos fenológicos han tomado también una valoración especial debido a su utilidad como cali-

bradores y evaluadores de la información satelital, y por su importancia como variable ecológica (Tucker *et al.*, 2001).

En años recientes, la disponibilidad global de imágenes satelitales, como así también las mejoras en la resolución temporal de las mismas, proporcionan datos para monitorear eventos fenológicos (Reed, 1994). La fenología usando sensores remotos (Julien & Sobrino, 2009) es llevada a cabo utilizando principalmente series temporales del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI por sus siglas en inglés). Este índice, puede ser usado como un estimador de la fenología y de la fenometría vegetal, y puede ayudar a comprender el comportamiento estacional de la vegetación.

El NDVI (Rouse *et al.*, 1974) es una medida adimensional derivada desde datos radiométricos, ampliamente utilizado, que sirve para caracterizar cambios espaciales y temporales de la cantidad de vegetación verde. Se basa en la relación existente entre la radiación reflejada en la región espectral del infrarrojo cercano (R_{IRC}) que responde a la estructura de las hojas, y la radiación reflejada en la región del rojo (R_{Roj}) que es función de la radiación absorbida por pigmentos fotosintéticos (Jensen, 2000). El NDVI se calcula de la siguiente manera:

$$NDVI = (R_{IRC} - R_{Roj}) / (R_{IRC} + R_{Roj}) \quad (1)$$

La vinculación del NDVI con la radiación fotosintéticamente activa absorbida (Choudhury, 1987) explica la relación entre las imágenes de este índice y la actividad fotosintética de la cubierta vegetal (Tucker & Sellers, 1986) teniendo en cuenta los patrones climáticos (Justice *et al.*, 1985; Potter & Brooks, 1998). Consecuentemente, variaciones

de la fenología a través de varios ciclos vegetativos pueden ser registradas por series temporales de NDVI (Anyamba & Tucker, 2005). Al ser un estimador de la actividad fotosintética vegetal, imágenes de NDVI muestran sitios con más o menos vegetación, pero también puede diferenciar sitios en donde la vegetación tiene más o menos vigor. Esto hace posible monitorear cultivos y extraer de las series de tiempo parámetros relacionados a la estacionalidad (inicio/fin de la estación de crecimiento, longitud, integral anual, etc.).

El objetivo de este estudio fue analizar la dinámica del comportamiento espectral obtenido desde imágenes satelitales MODIS a través de su producto NDVI, y comparar las mismas con observaciones in situ de fenología y fenometría en las variedades de olivo Arbequina y Picual, realizada entre octubre de 2011 y diciembre de 2013. Además se compara la dinámica anual del NDVI en olivos, con otro frutal típico de la región, pero de régimen caducifolio (vid).

MATERIALES Y METODOS

Este trabajo se llevó a cabo en la finca comercial All Pack S.A. (~1300 has) ubicada en la localidad de Vichigasta, Departamento de Chilecito (La Rioja, Argentina), a los 29° 32' Lat. S; 67° 28' Long. O, sobre la ruta nacional 74. Chilecito se ubica en la ecoregión de Monte con una temperatura media anual de 18,8°C y una precipitación media anual de 146 mm (SMN-Estadística 2001-2010). En la Figura 1 se muestra las temperaturas máximas y mínimas diarias registradas en el periodo de estudio en Chilecito-AERO del Servicio Meteorológico Nacional (29°8' Lat. S; 67°15' Long. O).

En este trabajo se evaluó la dinámica de dos lotes de olivo de 8 años de edad: uno de la variedad Arbequina y el otro de variedad Picual, cuyas dimensiones son 10,5 has y 12,2 has., respectivamente. La densidad de plantación es de 312 plantas por hectárea (marco de plantación de 8 m x 4 m).

En cada lote de Arbequina y Picual se seleccionaron diez árboles de olivo ubicados en el centro del lote, oblicuamente y equidistantes para representar el estado promedio del lote. Se midieron variables fenométricas (Fig. 2): altura, cobertura, diámetro de tronco y fenológicas (Fig. 3): descanso, brotación, floración, cuajado y crecimiento de frutos, endurecimiento de carozos y coloración de las dos variedades de olivo. Estas determinaciones se realizaron con una frecuencia mensual en el caso de las mediciones fenométricas y de frecuencia variable en el caso de la fenología dependen-

do de la energía de las fases. Las observaciones y mediciones se realizaron en parcelas comerciales, y por lo tanto sometidas a labores culturales típicas del cultivo (ferti-riego, poda, cosecha).

La poda tiene como objetivo evitar sombreamiento y mantener las dimensiones adecuadas de la plantación para la mecanización de las actividades de cosecha. La máquina cosechadora que utilizan es una *Colossus* (<http://www.maqtec.com>). La finca donde se realizaron las observaciones tiene tres modalidades de poda: Primero la poda de rebaje o topping, que se realiza mecánicamente con barra de discos rotativos y cortantes. La altura promedio de los árboles fue en el caso de Arbequina (2012) de 3,78m antes del topping y 3,53m después del mismo; y de 3,95m y 3,80m antes y después del topping del año 2013. La altura promedio de Picual (2012) fue 4,83m y 4,73m antes y después del topping, y de 4,85m y 3,98m antes y después del topping del año 2013. La poda tipo topping se realizó entre los meses de julio-agosto.

Segundo, la poda lateral que consiste en mantener un ancho del seto adecuado para la máquina de recolección, esto permite conservar el eje central y evitar que el olivar se vuelva improductivo por un excesivo sombreamiento interno dentro del seto. La maquinaria utilizada es la misma que la utilizada para el topping pero con una orientación vertical. Y tercero es la poda de ramas bajas o pollera (ramas por debajo de la altura de la cruz). La altura promedio de la cruz es de 0,97m desde el suelo (Fig. 2).

El NDVI se obtuvo desde el producto MOD13Q1 del sensor MODIS ubicado en el satélite TERRA, con una resolución de pixel 250m x 250m, y con una frecuencia temporal de observación cada 16 días. Las imágenes fueron descargadas de manera gratuita desde el sitio <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Los datos fueron procesados usando los software ERDAS y ENVI. Los parámetros de estacionalidad de las plantaciones se obtuvieron usando el software TIMESAT (Jönsson & Eklundh, 2004) que analiza las series temporales y ajusta los valores del NDVI a una curva descripta mediante un modelo matemático doble-logístico, corrigiendo de esta manera datos con ruido y/o debidos a la nubosidad. A partir de estas curvas, es posible obtener variables fenológicas tales como fecha de inicio/ finalización del periodo de crecimiento, amplitud, velocidad de crecimiento, etc. Los pixeles MODIS seleccionados para el análisis de las series, corresponden a los sitios de terreno donde se realizaron las observaciones fenológicas y fenométricas.

Con la finalidad de comparar la dinámica del NDVI del olivo con otros frutales típicos de la re-

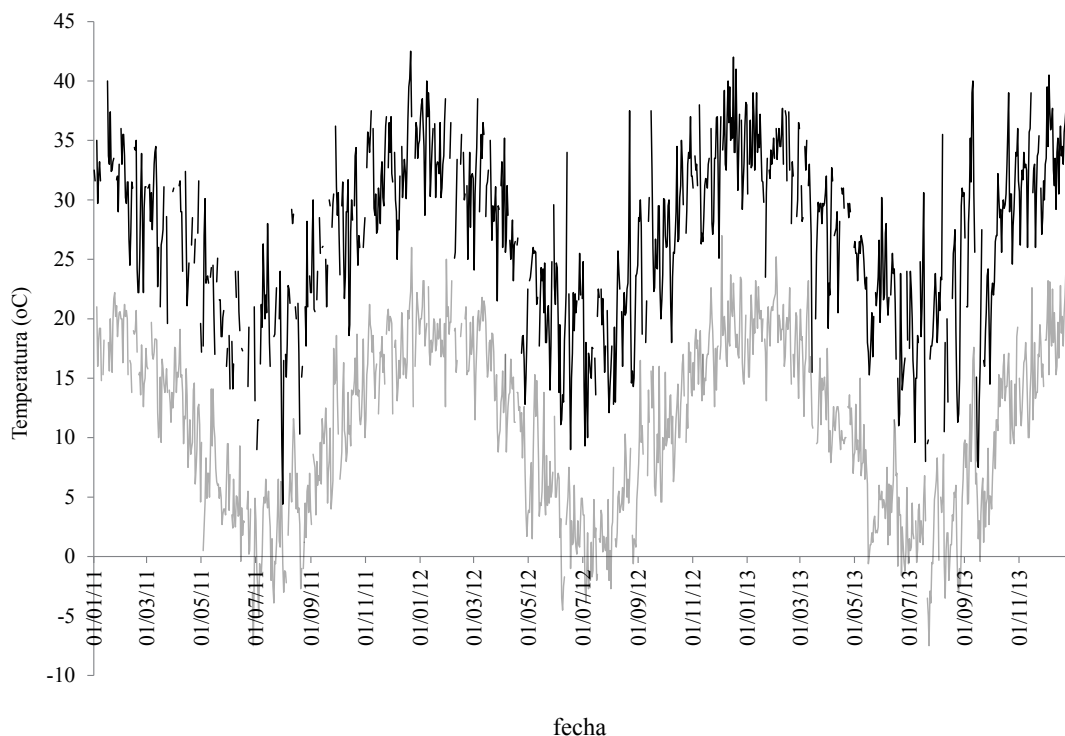


Figura 1: Variación de las temperaturas diarias máximas (en negro) y mínimas (en gris) en el periodo 2011-2013 (Fuente: SMN. St 87213).

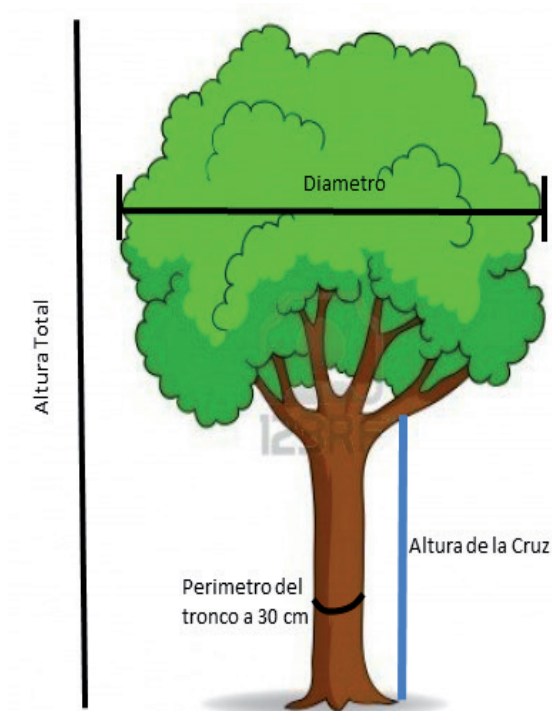


Figura 2: Esquema de medición a campo de variables fenoménicas.

gión, se seleccionó en una zona cercana a la finca de olivo, un lote de vid (especie caducifolia), con la intención de mostrar dos situaciones contrastantes.

RESULTADOS Y DISCUSION

La dinámica del NDVI en olivos es mostrada en la Figura 4. Se advierte que los valores de NDVI sobre Picual son más altos que en Arbequina debido a un mayor volumen de copa, y por lo tanto, una mayor proporción de cobertura vegetal activa. En el periodo octubre de 2011-julio de 2012, el valor promedio del volumen de copa fue: en las variedades Picual y Arbequina 20,23 m³ y 10,96 m³ respectivamente. Mientras que para el periodo 2012-2013, estos valores fueron de 24,32 m³ y 11,30 m³ respectivamente.

La Figura 5 compara valores de NDVI de lotes de olivo (Arbequina) y vid, luego de aplicarles el modelo doble-logístico. Es posible ver un comportamiento distinto de estas especies, en parcelas adyacentes. El olivo es un árbol perennifolio donde las diferencias entre valores máximos y mínimos de crecimiento a lo largo del ciclo no son tan pronunciadas como los arboles de hojas caducas. La

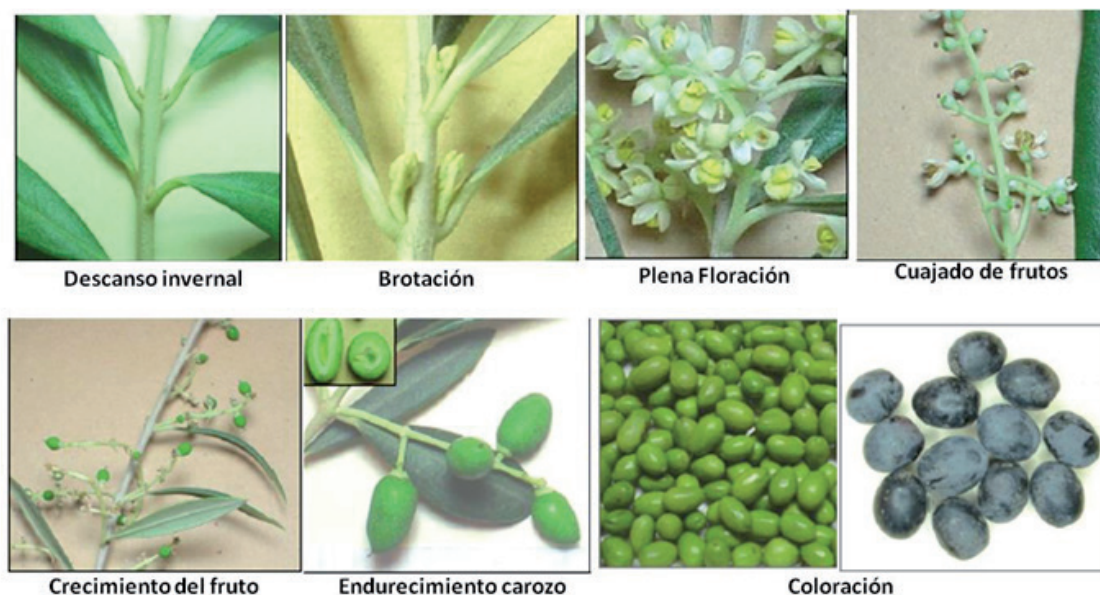


Figura 3: Fases fenológicas observadas a campo. Modificado de Aybar *et al.*, 2006.

dinámica del NDVI en olivo muestra un patrón continuo, aunque con una marcada estacionalidad. Esto puede deberse a múltiples factores entre los cuales la carga de frutos y distribución de asimilados juegan un papel fundamental (Rallo & Cuevas 2008). Otros factores ambientales como temperaturas, humedad, y factores propios de la especie

como la vecería pueden ser responsables de la estacionalidad. El análisis de datos muestra valores máximos de NDVI en el periodo otoño-invierno y valores mínimos durante el periodo primavera-verano (Figs. 4 y 5). Un comportamiento similar se observó en otra finca de la zona en la localidad de Catinzaco, Chilecito (Luna Toledo & Figuerola,

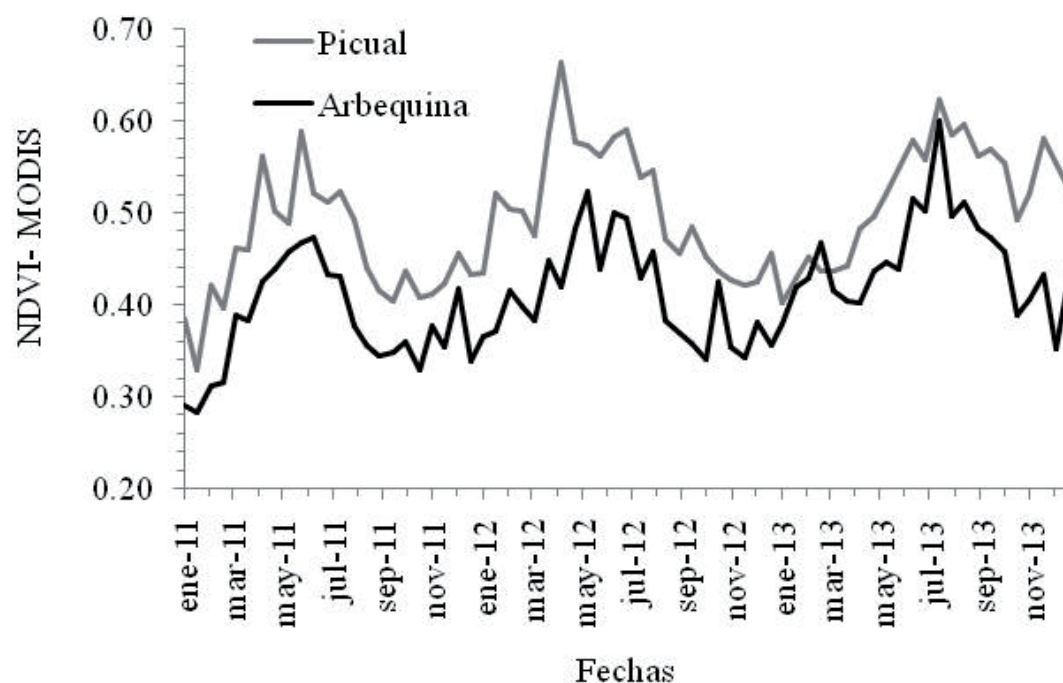


Figura 4. Variación estacional del NDVI-MODIS en pixeles correspondientes a parcelas de olivo medidas *in situ* en la localidad de Vichigasta, variedad Picual y variedad Arbequina.

2011). Cabe mencionar que el tamaño de los olivos de la zona son de mayores dimensiones que los de España, posiblemente debido a un exceso de aplicación de riego y a condiciones climáticas y de suelo más favorables para su desarrollo vegetativo (Gómez del Campo *et al.*, 2010).

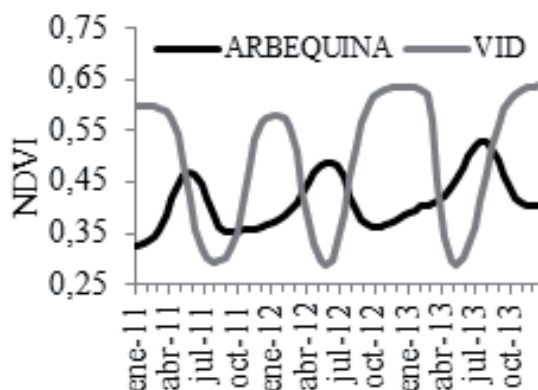


Figura 5. Variación estacional del NDVI-MODIS modelo doble-Logístico usando TIMESAT en píxeles correspondientes a parcelas de olivo (variedad Arbequina) y vid (plantación adyacente) en la localidad de Vichigasta.

La dinámica del NDVI de las parcelas de olivo (Figs. 4 y 5) muestra claramente que existe una estacionalidad interanual, que puede ser vinculada a

diferentes causas. Existe una tendencia marcada de disminución del NDVI en las fases de mayor actividad reproductiva: floración y fructificación (Fig. 6). Esto podría deberse a mecanismos eco-fisiológicos de fuente-sumidero. El crecimiento de brotes está muy afectado por la carga actual (años ON y OFF). Es decir, los frutos son destino principal de los asimilados de las plantas y por lo tanto el crecimiento vegetativo está determinado por la presencia de sumideros alternativos con mayor o menor capacidad competitiva (Rallo & Cuevas, 2008).

Así también, temperaturas elevadas, durante la primavera-verano ($>35^{\circ}\text{C}$), podrían conducir progresivamente al cierre de estomas, con el consecuente impedimento de intercambio gaseoso y fotosíntesis normal, que indirectamente reducen o anulan el crecimiento de brotes (Rallo & Cuevas, 2008). Valores superiores a 35°C son frecuentes en el valle de Chilecito (ver Fig. 1), por lo cual podrían evaluarse a futuro su efecto en el intercambio gaseoso de olivos en la región. El riego en estas fincas de olivo es por goteo y no se suprime en invierno para asegurar un llenado del fruto (Figueroa *et al.*, 2013), por lo cual las temperaturas moderadas en el invierno podrían determinar que el crecimiento no cese en esta época del año.

La Figura 6 muestra la relación entre el NDVI y las fases fenológicas del olivo variedad Picual

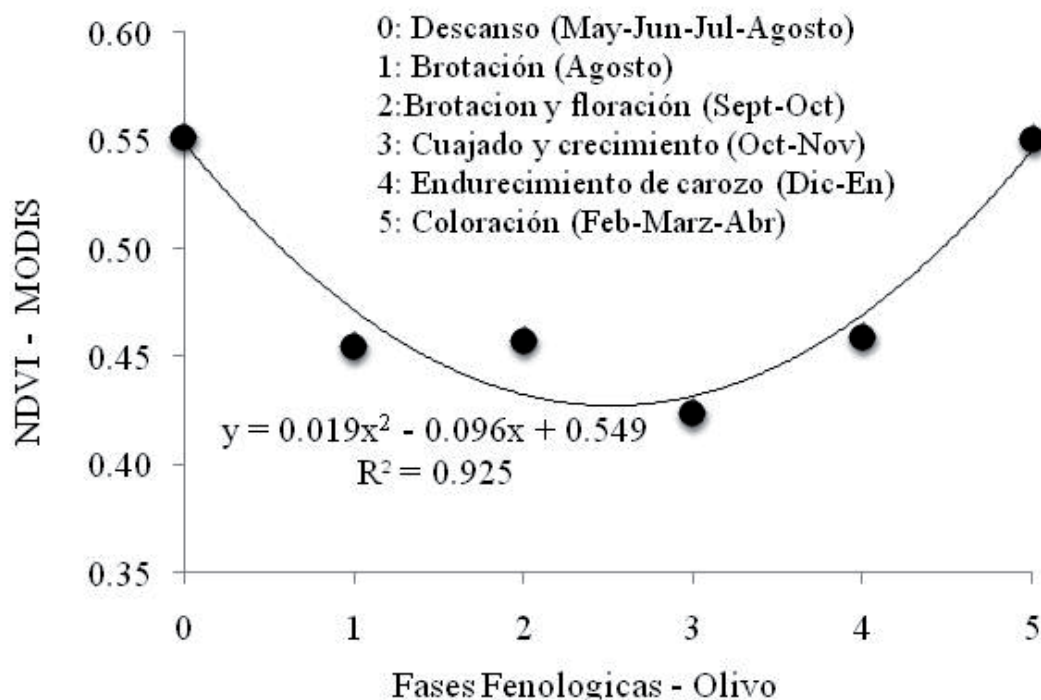


Figura 6. Variación de NDVI de acuerdo a fases fenológicas del olivo variedad Picual.

que comprenden: descanso, brotación, floración, cuajado, crecimiento de frutos, endurecimiento de carozos, y cambios en la coloración de los frutos. Con mínimo valor de NDVI en floración y cuajado, y máximo valor de NDVI en descanso y coloración de los frutos. La relación entre estas dos variables es de tipo cuadrática con un muy alto coeficiente de determinación ($r^2=0,925$).

Una variable medida a campo que mostró tener una buena relación con el NDVI fue el volumen de copa (VC) definida por $VC = \pi D^2 H / 6$, donde D es el diámetro medio y H la altura del olivo. A los valores de H se le restó la altura de la cruz (Fig. 2) debido a que en esta finca existe la práctica de eliminar la sección denominada pollera. La Figura 7 muestra la dispersión entre el NDVI de un pixel de una parcela de olivo variedad Arbequina y el volumen de copa medido a campo mensualmente. El coeficiente de determinación entre ambos es $r^2=0,677$, siendo una muy buena relación entre datos de campo y datos obtenidos desde imágenes satelitales.

Algunos autores analizaron las causas de la variación intra-pixel e identificaron los factores claves que afectan significativamente el NDVI (Pettorelli *et al.*, 2008; Markon *et al.*, 1995; Jones & Vaughan 2010). Ellos mencionan que los factores más importantes son la fracción de la cobertura vegetal, la altura del canopeo, el vigor, las propiedades de las hojas, y las condiciones de estrés. Knipling (1970) menciona cambios significativos en la reflectancia del infrarrojo cercano cuando hay un cambio en el

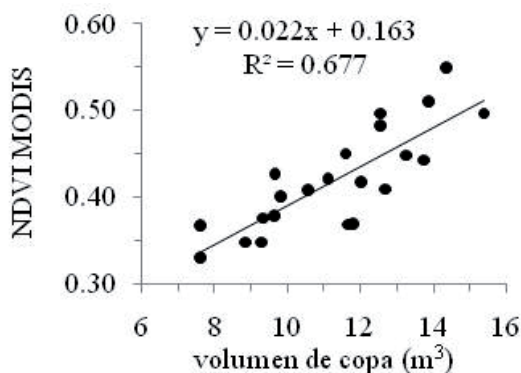


Figura 7. Relación entre el NDVI-MODIS y el volumen de copa medido sobre árboles de olivo en la variedad de Arbequina.

porcentaje de la cobertura vegetal. Sin embargo varios autores (Pettorelli *et al.*, 2008, Markon *et al.*, 1995) advierten que valores iguales de NDVI podrían representar diferentes condiciones en la vegetación, por lo cual se necesita tener un conocimiento previo de las características del cultivo en el campo.

La Figura 8 muestra la marcha de dos variables: los valores de NDVI y el volumen de copa del olivo variedad Picual, donde se puede observar una buena correspondencia entre ambas series. En este gráfico se observa como el evento de poda (línea roja) afecta la tendencia del NDVI y del VC, bajando significativamente el valor de ambas variables luego de la misma. Esto también ha sido observado en otros trabajos como Er-Raki *et al.*

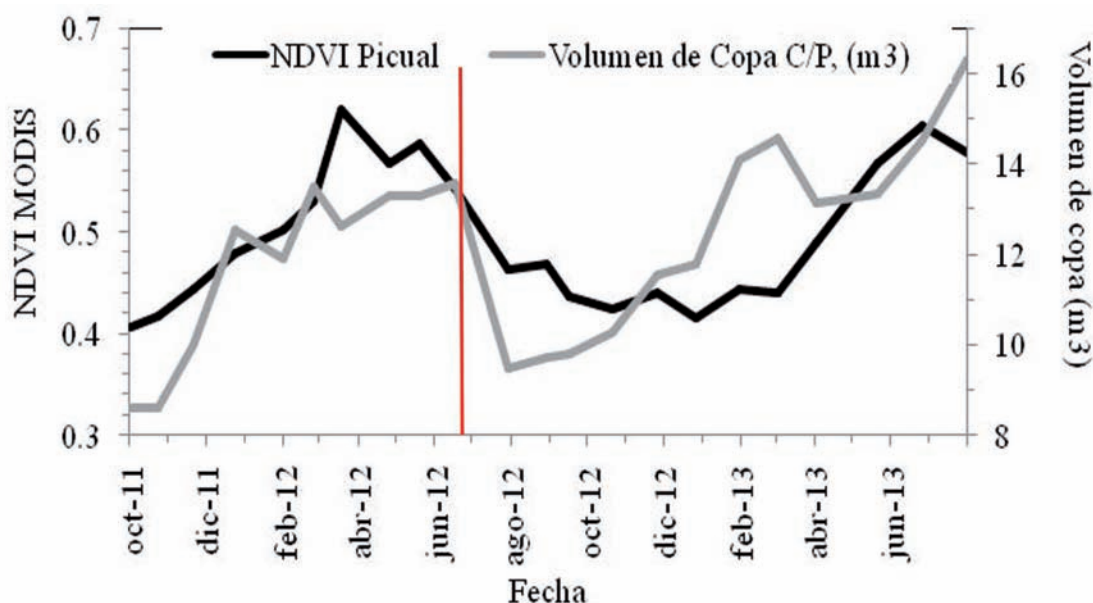


Figura 8. Variación de NDVI-MODIS y el volumen de copa (m^3). A fines de julio del 2012, se realizó la poda en la finca (línea roja).

(2013) y Pôças *et al.* (2015). El volumen de copa se recupera rápidamente entre diciembre y febrero, pero el NDVI se recupera recién en el mes de mayo en pleno descanso invernal.

El uso de índices de vegetación usando imágenes satelitales puede ser un estimador del rendimiento y una herramienta para la toma de decisiones (Valdez, 2014).

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se evaluaron las relaciones entre el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) obtenido desde el sensor MODIS y mediciones realizadas a campo sobre parcelas de olivo.

La dinámica del NDVI para olivos de la región presenta un ciclo estacional, encontrándose valores máximos en otoño-invierno, época de descanso invernal—coloración del fruto, y un mínimo en primavera-verano correspondiente a la fase de floración-cuaje.

Se obtuvo una buena relación lineal entre NDVI y el volumen de copa, lo cual permitiría determinar esa variable fenométrica desde imágenes satelitales, aunque no se descarta la importancia de conocer el lote y su historia de manejo.

En base a los resultados podemos concluir que el NDVI puede ser usado como herramienta de estimación de variables importantes para el manejo agronómico del olivar, tales como el estado fenológico y el volumen de copa, útiles en la toma de decisiones de la producción olivícola.

AGRADECIMIENTO

Este trabajo de investigación fue financiado por la Agencia Nacional de Ciencia y Tecnología (ANP-CyT –PICT #389).

REFERENCIAS

- Anyamba, A. and C. J. Tucker, 2005. Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981–2003. *Journal of Arid Environments*, 63(3), 596-614.
- Aybar, V.; D. Montalván, J. L. Ladux, J. Ortiz, M. Pérez y F. Fernández, 2006. *Fenología del Olivar*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Choudhury, B. J., 1987. Relationships between vegetation indices, radiation absorption, and net photosynthesis evaluated by a sensitivity analysis. *Remote Sensing of Environment*, 22(2), 209-233.
- Er-Raki, S.; J. C. Rodríguez, J. Garatuza-Payan, C. J. Watts and A. Chehbouni, 2013. Determination of crop evapotranspiration of table grapes in a semi-arid region of Northwest Mexico using multi-spectral vegetation index. *Agricultural Water Management*, 122, 12-19.
- Gómez del Campo, M.; A. Morales-Sillero, F. Vita Serman, M.C. Rousseaux y P.S. Searles, 2010. El Olivar en los Valles áridos del Noroeste de Argentina (provincia de Catamarca, La Rioja y San Juan). *Olivae* No. 114, 23-45.
- Jensen, J., 2000. *Remote sensing of the environment: an earth resource perspective*. Prentice-Hall, Inc.
- Jones, H. G., & Vaughan, R. A. (2010). *Remote sensing of vegetation: principles, techniques, and applications*. Oxford university press.
- Jönsson, P., & Eklundh, L. (2004). TIMESAT—a program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Computers & Geosciences*, 30(8), 833-845.
- Julien, Y., and J. A. Sobrino, 2009. Global land surface phenology trends from GIMMS database. *International Journal of Remote Sensing*, 30(13), 3495-3513.
- Justice, C. O.; J. R. G. Townshend, B. N. Holben and E. C. Tucker, 1985. Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 6(8), 1271-1318.
- Knipling, E. B. (1970). Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 1(3), 155-159.
- Luna Toledo, E. S. y P. I. Figuerola, 2011. Series temporales de NDVI-MODIS sobre olivares y campo natural en el valle de Chilecito, La Rioja, Argentina. XVII Congreso Brasileiro de Agrometeorología, Guarapari (Brasil), No14, CD 5 págs.
- Markon, C. J., Fleming, M. D., & Binnian, E. F. (1995). Characteristics of vegetation phenology over the Alaskan landscape using AVHRR time-series data. *Polar Record*, 31(177), 179-190.
- Pôças, I.; T. A. Paço, P. Paredes, M. Cunha and L. S. Pereira, 2015. Estimation of Actual Crop Coefficients Using Remotely Sensed Vegetation Indices and Soil Water Balance Modelled Data. *Remote Sensing*, 7(3), 2373-2400.
- Potter, C. S. and V. Brooks, 1998. Global analysis of empirical relations between annual climate and seasonality of NDVI. *International Journal of Remote Sensing*, 19(15), 2921-2948.
- Rallo L., y Cuevas J., 2008 *Fructificación y Producción*. Cap. 5 en Barranco D., Fernandez-Escobar R., y Rallo L., 2008 (Eds.): *El cultivo del olivo*, Madrid, Ediciones Mundi Prensa. 6ª Edic 2008. pp. 127.

- Reed, B. C.; J. F. Brown, D. Vander Zee, T. R. Loveland, J. W. Merchant and D. O. Ohlen, 1994. Measuring phenological variability from satellite imagery. *Journal of vegetation science*, 5(5), 703-714.
- Rouse, J., R. Hass, J. Schell, W. Deering and C. Harlan, 1974. Monitoring the vernal advancements and retrogradation of natural vegetation. En: NASA/GSFC, Final Report, Greenbelt, MD, USA, p.:1-137.
- Searles, P. S., Agüero Alcarás, M., & Rousseaux, M. C. 2011. El consumo del agua por el cultivo de olivo (*Olea europaea* L.) en el noroeste de Argentina: una comparación con la Cuenca Mediterránea. *Ecología austral*, 21(1), 15-28.
- Tucker, C. J. and P. J. Sellers, 1986. Satellite remote sensing of primary production. *International journal of remote sensing*, 7(11), 1395-1416.
- Tucker, C. J.; D. A. Slayback, J. E. Pinzon, S. O. Los, R. B. Myneni and M. G. Taylor, 2001. Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999. *International Journal of Biometeorology*, 45(4), 184-190.
- Valdez, J. D. 2014: Estudio sobre el olivo para el manejo de la producción en cultivares de Arbequina y Picual, en la localidad de Vichigasta. Tesina para obtener el título de Ingeniero Agrónomo. Universidad Nacional de Chilecito.
- White, M.A.; P.E. Thornton and S.W. Running, 1997. A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability. *Global Biogeochemical Cycles*, 11, pp. 217-234.

Influencia del envejecimiento del polietileno sobre la transmisión de radiación fotosintéticamente activa (PAR) hacia el interior de un invernadero parabólico

Martínez, S.; A. Carbone, M. Garbi, J. Somoza, M.C. Grimaldi y C. Cerisola ex aequo

RESUMEN

Los polietilenos usados como cubierta de invernaderos presentan una transmisión de la radiación solar de onda corta que supera el 90 %, la que disminuye con el tiempo, por alteraciones del material o acumulación de partículas sobre su superficie. Este trabajo tuvo como objetivo evaluar el efecto de la antigüedad del polietileno sobre la transmisión de radiación fotosintéticamente activa (PAR) hacia el interior de la estructura. El ensayo se realizó en un invernadero parabólico, ubicado en la Estación Experimental Julio Hirschhorn, de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad Nacional de La Plata (34° 58'S, 57° 54'W). La estructura está formada por tres naves cubiertas con polietileno de 200 µm colocados en agosto 2008 (Nave 1), agosto 2009 (Nave 2) y agosto 2010 (Nave 3). La PAR en cada una de las naves y en el exterior se midió en tres fechas: 24/02/2012, 23/03/2012 y 23/04/2012, utilizando una barra LI-COR 191. Los registros recopilados por fecha se analizaron estadísticamente por la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis. En las tres fechas, la PAR en el exterior fue más elevada, con diferencias estadísticamente significativas en dos de las determinaciones, cuando los polietilenos presentaban más tiempo de uso. En la primera fecha, correspondiente al verano, no se observaron diferencias significativas en el nivel de radiación transmitida por los distintos polietilenos, con una transmitancia de alrededor del 60 %. En las observaciones posteriores, a medida que se avanzaba hacia el otoño, las diferencias entre polietilenos comenzaron a hacerse más significativas.

Palabras clave: transmisividad, invernáculo, plástico.

Martínez, S.; A. Carbone, M. Garbi, J. Somoza, M.C. Grimaldi and C. Cerisola, 2016. Influence of polyethylene ageing on the transmission of photosynthetically active radiation (PAR) into a parabolic greenhouse. RADA VII: 83-86

SUMMARY

Polyethylenes used as greenhouse covering have a short wave solar radiation transmission exceeding 90%, which decreases over time, by changes of the material or particles collected on its surface. The aim of this work was to evaluate the effect of the age of polyethylene on the transmission of photosynthetically active radiation (PAR) into the structure. The essay was carried out in Julio

Hirschhorn Experimental Station of the Faculty of Agricultural and Forestry Sciences National University of La Plata (34° 58'S, 57° 54'W). The greenhouse consists of three naves covered with 200 µm polyethylene placed in August 2010, August 2009 and August 2008. PAR in each of the naves and outside was measured at three dates: 02/24/2012, 03/23/2012 and 04/23/2012, using a LI-COR 191 bar. Data compiled by date were analyzed statistically by the nonparametric Kruskal-Wallis test. On the three dates, outside PAR was higher, with statically differences in two determinations, when polyethylenes were more aged. On first date, corresponding to summer, no significant differences were observed in the level of radiation transmitted by the different polyethylenes, with a transmittance of about 60%. In subsequent observations, as it advanced towards the fall, the differences between polyethylenes started to become more significant.

Key words: transmissivity, greenhouse, plastic.

S. Martinez, M. Garbi, J. Somoza y M.C. Grimaldi: *Climatología y Fenología Agrícolas*. A. Carbone: *Fisiología Vegetal*. C. Cerisola: *Manejo y Conservación de suelos: Universidad Nacional de La Plata. Calles 60 y 119 (1900) La Plata, Buenos Aires. Correspondencia a: smarti@agro.unlp.edu.ar*

Introducción

El cultivo en invernadero es una práctica tradicional en el ámbito productivo del Cinturón Hortícola de La Plata para la producción de hortalizas y flores de corte. En la actualidad, el sector hortícola es el que presenta mayor nivel de utilización de cultivos protegidos. En el partido de La Plata, la generalización de esta técnica en las explotaciones hortícolas se inició en la década del 80, con naves de 6 a 6,50 m formando módulos de 3 ó 4 invernáculos con un largo variable de 40 a 90 m. Las estructuras predominantes eran de madera blanda y polietileno de 100 a 150 µm de espesor (Benencia *et al.*, 1997).

El diseño, la orientación y los materiales plásticos utilizados inciden en las condiciones climáticas disponibles para los diferentes cultivos (Castilla, 2005). En un estudio realizado sobre seis tipos de estructuras durante seis campañas de cultivo en el mes de enero en La Plata, se observó un patrón similar en el régimen térmico interno de todas las coberturas analizadas, con valores de temperaturas medias que oscilaron entre 25,6 y 30°C y medias máximas entre 33 y 42,8°C, registros significativamente superiores a las temperaturas externas; sin modificaciones en las temperaturas mínimas respecto a las exteriores (Garbi *et al.*, 2002). Una situación equivalente se registró en una evaluación realizada durante enero de 2007 por Grimaldi *et al.* (2007), quienes compararon la marcha térmica en un invernadero parabólico y otro tipo capilla, sin observar diferencias significativas entre ellos, aunque los valores de temperaturas medias máximas superaron los 41°C durante 19 días en el invernadero tipo capilla, y los 40,5°C durante 20 días en el

parabólico. Las condiciones térmicas registradas en los estudios mencionados ponen de manifiesto que en el interior de las coberturas más comunes en la zona en estudio pueden generarse condiciones que limitarían los procesos de crecimiento y desarrollo de los cultivos más frecuentemente realizados, si se consideran los valores térmicos más significativos para las especies cultivadas, como las temperaturas máximas, mínimas y óptimas diurna y nocturna (Tesi, 1974).

Otro elemento meteorológico de relevancia es la radiación solar incidente, cuya transmisión a través de la cubierta influye tanto en el balance energético del invernadero como en la actividad fotosintética del cultivo. La luz que incide sobre el techo del invernadero es reflejada, absorbida y transmitida; siendo el flujo lumínico luminoso transmitido, dispersado por el material hacia el interior del invernadero, permitiendo de esta manera una distribución más uniforme (Orden *et al.*, 1997), advirtiendo que la reflexión de la radiación solar sobre el material es mínima. El material de la cobertura produce una reducción en la intensidad de la radiación y una modificación en su distribución espectral en el invernadero (Goldberg *et al.*, 1996). Esta reducción depende principalmente del material utilizado en la cobertura, y en los materiales utilizados en la estructura. Por ello, es necesario que el material plástico favorezca la entrada de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) y el infrarrojo cercano y que limite, en horas nocturnas, la pérdida de radiación de onda larga, o sea la energía térmica acumulada durante el día; utilizándose aditivos que mejoran las cualidades mecánicas y ópticas de los polietilenos (Díaz *et al.*, 2001).

Los materiales que se utilizan como cubierta en

los invernaderos transmiten hacia el interior más del 90 % de la radiación solar recibida ($0,2 \mu\text{m}$ a $4 \mu\text{m}$), porcentaje que puede disminuir por la modificación de las propiedades ópticas de los materiales, la acumulación de partículas de polvo sobre la superficie a través del tiempo (Morelli *et al.*, 2011) y la exposición a las condiciones ambientales características del lugar y a las prácticas culturales del cultivo (Alpi & Tognioni, 1991). Sin embargo, el factor predominante en la degradación de los materiales plásticos es la radiación UV ($<0,35 \mu\text{m}$) (Nijskenst *et al.*, 1993).

Este trabajo tuvo como objetivo evaluar el efecto del envejecimiento del polietileno sobre la transmisión de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) hacia el interior de un invernadero parabólico.

MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo se realizó en un invernadero metálico parabólico de $24 \text{ m} \times 40 \text{ m}$, ubicado en la Estación Experimental Julio Hirschhorn perteneciente a la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad Nacional de La Plata ($34^\circ 58' \text{S}$, $57^\circ 54' \text{W}$). La estructura está formada por tres naves cubiertas con polietileno de $200 \mu\text{m}$ (Agrinplex®) colocados en diferentes momentos: Agosto/2008, Agosto/2009 y Agosto/2010. A fines del verano y comienzos del otoño de 2012 se realizaron determinaciones de radiación fotosintéticamente activa (PAR) en cada una de las naves y en el exterior del invernadero, en las siguientes fechas: 24/02/2012, 23/03/2012 y 23/04/2012, en las que los días fueron diáfanos. Se tomaron cuatro lecturas por medición a las 12 horas de cada día (medio día). Se utilizó una barra LI-COR 191 de 1 m de longitud, colocada $1,50 \text{ m}$ del suelo. Los registros recopilados por fecha fueron analizados estadísticamente por la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las tres fechas de observación, la radiación en el exterior fue más elevada que en el interior de la cobertura, observándose en dos de las tres determinaciones que las diferencias fueron estadísticamente significativas cuando los polietilenos presentaban más tiempo de uso, con una disminución importante en la nave con polietileno colocado en el año 2008 (Tabla 1). En la fecha 24/02/2012, correspondiente al verano, no se observaron diferencias significativas en el porcentaje de radiación transmitida por los distintos polietilenos, con una transmitancia de alrededor del 60% en los tres casos. En las observaciones de las fechas posteriores, hacia el otoño, las diferencias entre polietilenos resultaron ser más significativas (Tabla 1), en coincidencia con lo observado por Goldberg *et al.* (1996).

Esta respuesta podría relacionarse a la mayor inclinación con que llegan los rayos solares al Hemisferio Sur en la época otoñal, pues dejan de incidir perpendicularmente sobre el Trópico de Capricornio luego del solsticio de verano.

Ramírez *et al.* (1995) consideran que un material plástico está envejecido después de su exposición a la radiación solar cuando absorbe más del 50% de la misma, considerándolo no apto para su uso. En las condiciones de ensayo, esta característica se da en las determinaciones de otoño en los polietilenos colocados en 2009 y 2008. Sin embargo, las plantas C3 como el tomate, principal cultivo realizado bajo invernaderos en la Argentina, presenta un requerimiento mínimo diario de $400 \mu\text{moles.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ para satisfacer un nivel adecuado de saturación del sistema fotosintético (Castilla, 1995), valor ampliamente alcanzado, aún en las condiciones de más baja transmitancia medidas en este trabajo de $415,67 \mu\text{moles.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 15 (Tabla 1).

Tabla 1: Medición de la radiación PAR ($\mu\text{moles.m}^{-2}\text{s}^{-1}$) observada en el exterior y en el interior de cada una de las naves con polietilenos colocados en tres fechas diferentes; Agosto/2008, Agosto/2009 y Agosto/2010 en cada nave

	Fecha de medición		
	24/02/2012	23/03/2012	23/04/2012
Exterior	1795,33 (a)	1356,67 (a)	1164,00 (a)
Agosto 2010	1098,33 (b)	894,67 (a b)	728,67 (a b)
% transmitancia	61%	66%	62%
Agosto 2009	1142,33 (b)	756,67 (b c)	631,33 (b c)
% transmitancia	64%	56%	54%
Agosto 2008 %	1091,33 (b)	576,67 (c)	415,67 (c)
transmitancia	61%	43%	36%

*Letras diferentes en la columna indican diferencias estadísticamente ($p \leq 0,05$) según la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis.

CONCLUSIÓN

El envejecimiento de los polietilenos utilizados como cobertura produce una reducción de la radiación fotosintéticamente activa transmitida hacia el interior de los invernaderos, que se acentúa con el aumento de la inclinación con que llegan los rayos solares, a medida que avanza el tiempo hacia el solsticio de invierno.

Los plásticos utilizados para este ensayo permitieron la transmisión de valores admisibles de radiación fotosintéticamente activa para la producción de tomate, incluso en las condiciones más limitantes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alpi, A. y F. Tognioni, 1991. Cultivo en invernadero. Actual orientación científica y técnica. 3era. edición. Editorial Mundi-Prensa, Madrid, 347 pp.
- Benencia, R.; P. Durand, C. Souza, C. Feito, E. Margiotta y C. Cattaneo, 1997. Área Hortícola Bonaerense. 1era edición. Editorial La Colmena, Buenos Aires, pp. 81-92.
- Castilla, N., 1995. El cultivo de tomate. 1era. Edición. Nuez, F. (Eds.). Editorial Mundi-Prensa, Madrid, 793 pp.
- Castilla, N., 2005. Invernaderos de plástico. Editorial Mundi-prensa, Madrid, 462 pp.
- Díaz, T.; E. Espí, A. Fontecha, J.C. Jiménez, J. López y A. Salmerón, 2001. Los filmes plásticos en la agricultura agrícola. Editorial Mundi-Prensa, Madrid, 320 pp.
- Garbí, M.; M.C. Grimaldi, S. Martínez y A. Carbone, 2002. Influencia de invernaderos sobre la temperatura estival en el cinturón hortícola platense. *Revista Brasileira de Agrometeorología* 10:27 – 31.
- Goldberg, M.; S. Orden, L. Mascarini y E. Sierra, 1996. Transmisión espectral en la banda del PAR de las cubiertas plásticas para invernaderos. *Horticultura Argentina* 15:51-54.
- Grimaldi, M.C.; J. Somoza, S. Martínez, M.E. Strassera, 2007. Marcha de la temperatura del aire en dos invernaderos del cinturón hortícola platense durante el mes de enero de 2007. *Horticultura Argentina* 26: 109.
- Morelli, G.; A. Carbone, M.C. Grimaldi, J. Somoza y S. Martínez, 2011. Efecto de la antigüedad del polietileno sobre la radiación fotosintéticamente activa (PAR) recibida en el interior de un invernadero parabólico en La Plata, Buenos Aires, Argentina. *Horticultura Argentina* 30: 23.
- Nijskenst, J.; J. Deltour, E. Albrecht, J. Gratrud y P. Feuilloey, 1993. Estudio comparativo del envejecimiento de un filme de polietileno en laboratorio y en invernadero. *Plasticulture* 87:11-20.
- Orden, S.; D. De Oto, M. Goldberg y L. Mascarini, 1997. Transmitancia luminosa, espectral y haze de mallas de sombreado para invernaderos. 7º Reunión Argentina y 1ª Latinoamericana de Agrometeorología. Buenos Aires, Argentina. p. 53-54.
- Ramírez, E.; C. Martínez, L. Sánchez y C. Balderas, 1995. Previsión de la duración de la vida útil de los filmes para la cubierta de invernaderos con la ayuda de diversos equipos de envejecimiento artificial acelerado. *Plasticulture* 105:5-12.
- Tesi, R., 1974. Esigenze termiche delle principali specie coltivate in serra. *Encuentro: Le colture protett en ell attuale situazione energética*. p 17.



www.aada.com.ar