

Hacia el pronóstico anticipado del rendimiento potencial de maíz en el centro-sudeste bonaerense: relaciones con la duración de los subperíodos vegetativo y reproductivo

Irigoyen, A.I., Panunzio Moscoso, M.P., Cambareri, M.A. y Echarte, L.

RESUMEN

Cambios en los patrones climáticos modifican la estación de crecimiento de los cultivos y así las condiciones ambientales a las que quedan expuestos y, por ende, el rendimiento resultante. 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. El objetivo fue evaluar la relación entre el rendimiento potencial (Y_{max}) y la duración de la estación de crecimiento (EC) y de los subperíodos vegetativo (S-R1) y reproductivo (R1-R6) para maíz por efecto de la fecha de siembra y madurez del cultivar en el centro-sudeste de Buenos Aires. Los escenarios agrícolas seleccionados para la presente evaluación combinaron seis fechas de siembra y tres ciclos de madurez. Las estaciones de crecimiento (serie 1971-2010) fueron simuladas mediante un modelo de desarrollo basado en la temperatura del aire. El método de simulación fue aplicado para cuatro localidades (Azul, Tandil, Balcarce y Mar del Plata). Los subperíodos vegetativo y reproductivo de la estación de crecimiento (EC) fueron calculados con base en la fecha de ocurrencia de floración (R1) y madurez fisiológica (R6). El rendimiento potencial (Y_{max}) de cada escenario fue estimado mediante el producto de evapotranspiración máxima (ETM) y la eficiencia de uso de agua (EUA). Índices de productividad ambiental fueron propuestos para evaluar los efectos de la fecha de siembra sobre el rendimiento potencial para cada ciclo de madurez y localidad mediante la variación de la duración de los subperíodos de desarrollo. El atraso de la fecha de siembra expone al cultivo a condiciones del ambiente más productivas durante el subperíodo vegetativo. Los beneficios de la cuantificación de la productividad ambiental pueden ser extendidos a la evaluación de estrategias agronómicas bajo un clima cambiante.

Palabras clave: fechas de siembra, ciclos de madurez, floración, madurez fisiológica, índices de productividad ambiental

Irigoyen, A.I., Panunzio Moscoso, M.P., Cambareri, M.A. and Echarte, L., 2018. Towards early prediction of potential yield for maize in center-southeastern of Buenos Aires: Relationships with the extension of vegetative and reproductive subperiods. RADA IX: 31-45

SUMMARY

Changes in climate patterns modify the crop growing season and the environment of exposure and then, the resultant yield. The assessment of agricultural practices by generation of scenarios is useful to identify options of adaptation to minimize risks and improve the benefits. The objective was to assess the relation of potential yield (Y_{max}) to the extension of growing season (EC) and the vegetative (S-R1) and reproductive (R1-R6) subperiods for maize as affected by planting date and maturity cultivar in center-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 (flowering, R1 and physiological maturity, R6) were predicted. Vegetative and reproductive subperiods were calculated based on timing of occurrence of R1 and R6. Potential yield (Y_{max}) of each scenario was estimated by the product between maximum evapotranspiration (ETM) and water use efficiency (EUA). Environmental indexes were proposed to assess the effect of planting dates on potential yield for each maturity cultivar and location through the variation on duration of developmental subperiods. Delay in planting date exposes the crop to more productive conditions during vegetative subperiod. Benefits of quantification of environmental productivity could be extended to the assessment the agricultural strategies for a changing climate.

Key words: planting date, contrasting maturity cultivars, flowering, physiological maturity, environmental productivity indices

Irigoyen, A.I., Panunzio Moscoso, M.P., Cambareri, M.A., Echarte, L.: 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.gov.ar

INTRODUCCIÓN

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 descrito 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 los estados fenológicos sensibles del cultivo y así sobre el grado de exposición a las amenazas, que también pueden cambiar en el tiempo.

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.

En maíz, el momento de ocurrencia de la floración (R1) y de la madurez fisiológica (R6) dentro de la estación de crecimiento (EC) definen la duración de los subperíodos vegetativo y reproductivo (o también denominados pre y posfloración). La variabilidad de las fechas de R1 y R6 en la zona centro-sudeste bonaerense ya fue descrita al caracterizar probabilísticamente los riesgos de adversidades como temperaturas extremas y

deficiencias de agua (Panunzio Moscoso *et al.*, 2016 a y b). En esos casos se aplicó un modelo de tiempo térmico para simular el desarrollo fenológico para diferentes escenarios que combinaron fechas de siembra y ciclos de madurez del cultivo.

Debe destacarse que, experimentalmente, la duración de los subperíodos vegetativo y reproductivo ha sido relacionada con el rendimiento en grano para las condiciones ambientales de Balcarce (Andrade *et al.*, 1996; Capristo *et al.*, 2007; Bonelli *et al.* 2016). Así, Capristo *et al.*, (2007) describieron una asociación positiva y significativa entre el rendimiento de cultivares de diferente ciclo y la radiación interceptada durante el período reproductivo. En ese caso, los incrementos en radiación interceptada acumulada al aumentar el ciclo del cultivar hasta floración se explicaron, principalmente, por cambios en la duración del período y, en menor medida, por variaciones en la radiación interceptada diaria. Por su parte Bonelli *et al.*, (2016) para dos campañas agrícolas reportaron una consistente respuesta de los rendimientos y de las relaciones fuente- destino que indican que a medida que se atrasa la fecha de siembra, el suministro de asimilados (fuente) se torna más limitante que la demanda por los granos (destino) durante el subperíodo reproductivo. El efecto negativo del atraso será menor cuanto más uniforme sea la oferta radiativa y térmica durante la estación de crecimiento (Cirilo *et al.*, 1996). Según Egli (2011) existe alta potencialidad de mejora de los rendimientos de maíz mediante la modificación de la duración de los subperíodos de desarrollo.

Es de interés, por una parte, corroborar si las variaciones en la duración de los subperíodos vegetativo y reproductivo tienen el mismo efecto en la generación del rendimiento en otras localidades de la región centro-sudeste de Buenos Aires y, por otra parte, proponer índices de productividad ambiental que permitan comparar estrategias de manejo agronómico que afectan tanto el desarrollo como el rendimiento de los cultivos.

Se han descripto las variaciones en el rendimiento potencial (Y_{max}) y en el rendimiento real (Y) asociadas a diferentes escenarios de fecha de siembra y ciclo de madurez, pero aún no se profundizó la evaluación de la relación entre los rendimientos del cultivo y la duración de los subperíodos. El enfoque probabilístico y de comparación específica de escenarios como el abordado en los trabajos de Panunzio *et al.* (2016, a y b) es útil para la toma de decisiones, mientras que este enfoque basado en productividad ambiental puede contribuir por una parte con la modelización del desarrollo y la producción y con metodologías de pronóstico anticipado de rendimiento y por otra,

con la propuesta de estrategias de manejo que maximicen el rendimiento del cultivo.

El objetivo principal de este trabajo fue evaluar las relaciones entre el rendimiento potencial y la duración de los subperíodos fenológicos de maíz en localidades del centro-sudeste bonaerense, obtenida mediante el análisis del desarrollo simulado del cultivo para escenarios agrícolas que combinan diferentes fechas de siembra y ciclos de madurez. Los objetivos específicos fueron: a) evaluar la relación entre la duración del subperíodo vegetativo y la duración de la estación de crecimiento para los diferentes escenarios; b) cuantificar la productividad ambiental asociada a cambios en la duración de los subperíodos vegetativo y reproductivo mediante índices que integran la duración relativa de los subperíodos.

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 (1), intermedio (2) y largo (3)).

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

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). Los requerimientos térmicos utilizados para simular las fechas de ocurrencia de la floración (R1) y la madurez fisiológica (R6) fueron seleccionados a partir de la información reportada para un grupo de cultivares de diferente madurez comúnmente empleados en la zona de estudio (Tabla 2) (Capristo *et al.*, 2007).

Tabla 2. Requerimiento térmico de los subperíodos siembra-floración (S-R1) y floración-madurez fisiológica (R1-R6) para cultivares de maíz de corto (Ciclo 1), intermedio (Ciclo 2) y largo (Ciclo 3) ciclo de madurez.

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

Además de la duración (en días) de la estación de crecimiento (EC) y de los subperíodos vegetativo (S-R1) y reproductivo (R1-R6) se calcularon otras expresiones adimensionales asociadas: i) relación de duración entre subperíodos vegetativo y reproductivo (DRVR), ii) relación de duración del subperíodo vegetativo al total de la estación de crecimiento (DRVEC) como:

$$DRVR = \frac{\text{duración del subperíodo vegetativo (días)}}{\text{duración del subperíodo reproductivo (días)}} \quad (1)$$

$$DRVEC = \frac{\text{duración del subperíodo vegetativo (días)}}{\text{duración la estación de crecimiento EC (días)}} \quad (2)$$

Relación entre el rendimiento potencial y la duración de la estación de crecimiento y de los subperíodos vegetativo y reproductivo

El rendimiento máximo o potencial (Y_{max}) en cada escenario (fecha de siembra x ciclo de madurez) fue estimado para cada localidad y cada campaña agrícola (1971-1972 a 2009-2010) a partir del producto entre la evapotranspiración máxima (ETM) estacional y la eficiencia de uso del agua (EUA) del cultivo de maíz.

Se asumió un valor de EUA de $22 \text{ kg ha}^{-1}\text{mm}^{-1}$ que fue estimado a partir del cociente entre el rendimiento potencial de cultivares actuales,

recientemente evaluados por Bonelli (2014), y la ETM estacional de las campañas agrícolas en las cuales este autor determinó el rendimiento. Se determinó la ETM de cada escenario evaluado en este trabajo a partir del producto de la evapotranspiración de referencia (ET0) estimada por el método de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) y el coeficiente de cultivo (Kc). El coeficiente Kc 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 Kc se estimó siguiendo las recomendaciones de Allen *et al.* (1998). Cabe aclarar que se inició el balance de agua a los 90 días previos de la primera fecha de siembra, con un valor de almacenaje igual al límite máximo de almacenaje (valor altamente probable en toda la región en la cual se recarga completamente el perfil de suelo durante el invierno) y de esa forma fue posible determinar el almacenaje al momento de siembra de cada escenario en cada campaña agrícola. Las variaciones en la evolución del Kc de acuerdo con los escenarios agrícolas han sido discutidas en Panunzio Moscoso *et al.* (2014).

Se evaluó el grado de asociación entre el rendimiento potencial (Y_{max}) con la duración de la estación de crecimiento (EC) y de los subperíodos vegetativo (S-R1) y reproductivo (R1-R6), así como también con las relaciones adimensionales definidas en las ec. 1 y 2, mediante los coeficientes de correlación lineal de Pearson (nivel de significancia al 0,05).

Se realizaron los ajustes por regresión lineal entre el rendimiento potencial (Y_{max}) y las relaciones adimensionales de duración (DRVR y DRVEC) por localidad y ciclo de madurez. Para evaluar el efecto de la duración de la estación de crecimiento (EC) y de la duración de los subperíodos sobre el rendimiento potencial (Y_m) se calcularon dos índices que representan la tasa de productividad potencial del ambiente por cada ciclo de madurez y localidad ponderados, respectivamente, por la duración (expresada en días) de EC y del subperíodo vegetativo:

$$TP_{MaxEC} = \frac{Y_{max}(\text{kgha}^{-1})}{\text{duración de la EC (días)}} \quad (3)$$

$$TP_{MaxV} = \frac{Y_{max}(\text{kgha}^{-1})}{\text{duración del subperíodo vegetativo (días)}} \quad (4)$$

Para comparar la productividad ambiental entre localidades se expresaron las tasas TPM_{MaxEC} y TPM_{MaxV} de cada fecha de siembra con relación al valor máximo obtenido en cada localidad por cada ciclo de madurez.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estación de crecimiento (EC) y duración relativa de los subperíodos vegetativo y reproductivo en los escenarios de manejo simulados

En la Figura 1 se presenta la distribución en el calendario de la estación de crecimiento y de los subperíodos vegetativo (S-R1) y reproductivo (R1-R6) para los diferentes escenarios de fechas de siembra y ciclos de madurez. No se habían detectado (Panunzio *et al.*, 2016 a) 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 ciclos de madurez.

Ahora también puede indicarse que, la duración del subperíodo vegetativo se reduce con relación al subperíodo reproductivo a una tasa constante para cada uno de los ciclos de madurez (Figura 2) al atrasar la fecha de siembra en el intervalo evaluado (día juliano 268 a 319). No se detectan diferencias significativas en la relación entre localidades para cada fecha de siembra y ciclo de madurez. Para cada ciclo de madurez al atrasar la fecha de siembra (entre fines de setiembre y mediados de noviembre, en correspondencia con una porción creciente de la termofase positiva), la relación de duración de los subperíodos vegetativo/reproductivo (en días) se modifica de modo que las fechas más tempranas son más vegetativas y las fechas más tardías más reproductivas.

De modo general, las siembras posteriores al día juliano 300, generan una estación de crecimiento (EC) con una extensión del subperíodo reproductivo que iguala o supera al vegetativo. Este efecto coincide con lo reportado en la literatura (Andrade *et al.*, 1996, Grassini *et al.*, 2009), pero en este trabajo se constata, además, que la relación de duración vegetativo/reproductivo se modifica a una tasa lineal constante en el segmento de fechas de siembra evaluadas para las cuatro localidades de la zona.

Para el ciclo corto de madurez, la proporción vegetativa de la estación de crecimiento (EC) se reduce con el atraso de la fecha de siembra (Figura 3) a una tasa lineal constante en las localidades bajo estudio. Una distribución espacial semejante de los

cambios fenológicos principales de la estación de crecimiento (R1 y R6) puede indicar que existe una variación similar en el patrón térmico dentro de la región durante una porción de la termofase positiva (primavera-verano). Sin embargo, cuando se trata de ciclos de madurez más largos que extienden la estación de crecimiento durante el otoño (Figura 1), los cambios en la proporción vegetativa de la EC son diferentes entre las localidades y no siempre las reducciones ocurren a tasas lineales.

Relación entre el rendimiento potencial y la duración de la estación de crecimiento y de los subperíodos vegetativo y reproductivo en los escenarios de manejo simulados

Para caracterizar las estrategias de manejo más apropiadas en la zona se discuten a continuación las relaciones entre el rendimiento potencial y la duración de la estación de crecimiento (EC) y de subperíodos, que son afectadas por las prácticas de fecha de siembra y ciclo de madurez del cultivo.

Debe destacarse que el rendimiento máximo (Y_{max}) en las fechas más tempranas de un determinado ciclo de madurez puede ser diferente entre localidades (Figura 4). No obstante, el patrón de disminución relativa al atrasar la fecha de siembra es semejante entre localidades para cada ciclo de madurez (Figura 5). Aproximadamente por cada día de atraso de la fecha de siembra en el período de tiempo evaluado, el rendimiento potencial se reduce en un 0,2-0,25%, respecto al rendimiento obtenido en la primera fecha de siembra (día juliano 268).

El rendimiento potencial (Y_{max}) se mostró asociado positiva y significativamente con la duración de la estación de crecimiento (EC), con la duración del subperíodo vegetativo (S-R1) y también con la relación DRVR, al tiempo que no se mostró asociado (ns) o estuvo escasamente asociado con la duración del subperíodo reproductivo (R1-R6) (Tabla 3). De modo general, al aumentar la relación DRVR (Figura 6) o la proporción vegetativa al total de EC, DRVEC, aumenta el rendimiento potencial (Figura 7). Cabe destacar que la mayoría de las combinaciones de manejo evaluadas generan estaciones "más vegetativas" (valores mayores a 0,5 en la Figura 6 o valores mayores a 1 en la Figura 7). En Azul y Tandil, todos los escenarios de ciclo y fecha de siembra exhiben valores de rendimiento potencial medio que superan los 12000 kg ha⁻¹, aún con una amplia variación de DRVR. En esas dos localidades, los escenarios más vegetativos (fechas tempranas y ciclos intermedios a largos) pueden superar los 14000kg ha⁻¹. Por su parte,

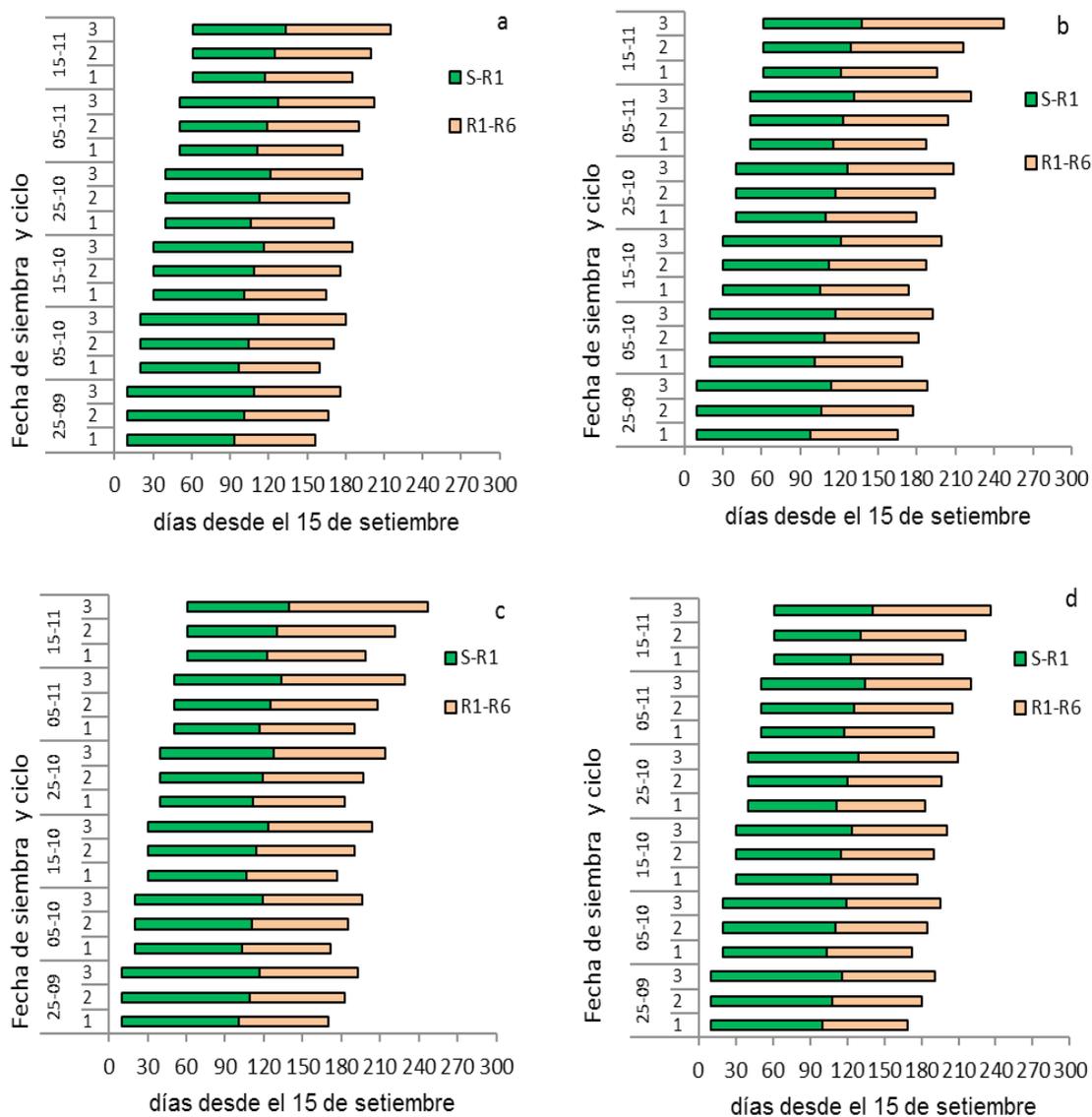


Figura 1. Distribución media (1971-2010) en el calendario de los subperíodos vegetativo (S-R1) y reproductivo (R1-R6) en la estación de crecimiento (EC) del cultivo de maíz en localidades del centro-sudeste bonaerense de acuerdo con escenarios de fecha de siembra y ciclo de madurez. A. Azul. b. Tandil. c. Balcarce. d. Mar del Plata (adaptado de Panunzio Moscoso *et al.*, 2016a).

en Mar del Plata y Balcarce, algunos escenarios de fechas tardías y ciclos cortos, con estaciones de crecimiento “más reproductivas” exhiben rendimientos potenciales medios que no alcanzan los 12000 kg ha⁻¹.

En la Figura 7 se presenta la variación media de Y_{max} debida a cambios en la relación DRVEC en cada ciclo por localidad. En toda la región, los cambios de Y_{max} por cambios en DRVEC son menores al considerar ciclos de madurez

más extensos, excepto en Azul. El análisis de la información de las Figuras 6 y 7 puede contribuir al momento de formular estrategias de manejo, mostrando, por un lado, los efectos que se pueden inferir, a partir de las ecuaciones ajustadas, para un mismo ciclo de madurez ante cambios en la fecha de siembra que, a su vez, modifican la duración de los subperíodos. Además, con referencia a la selección de estrategias de manejo basadas en la productividad ambiental de cada

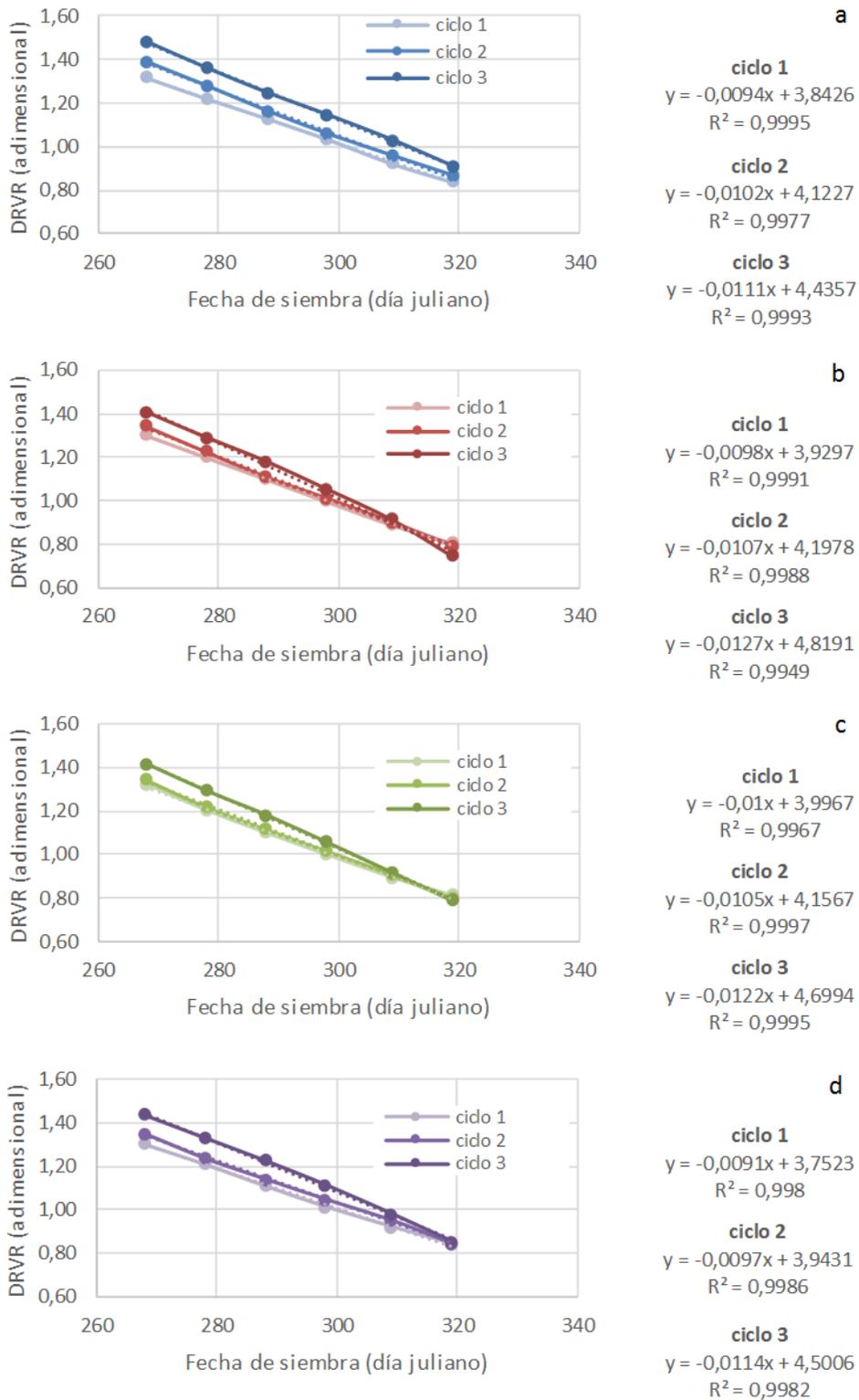
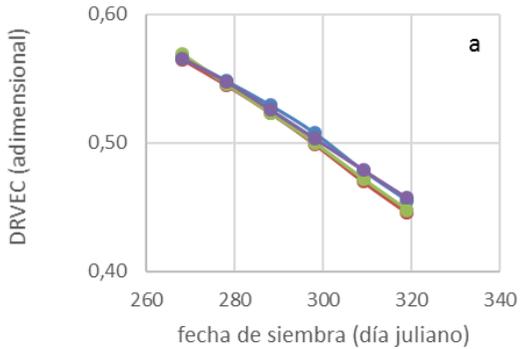
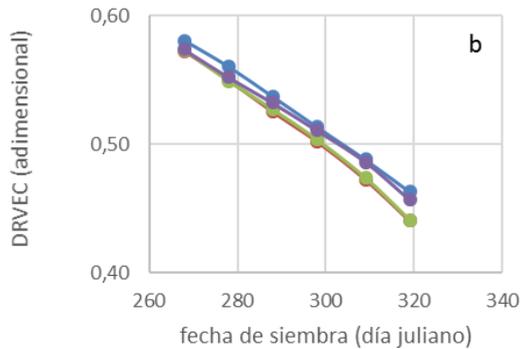


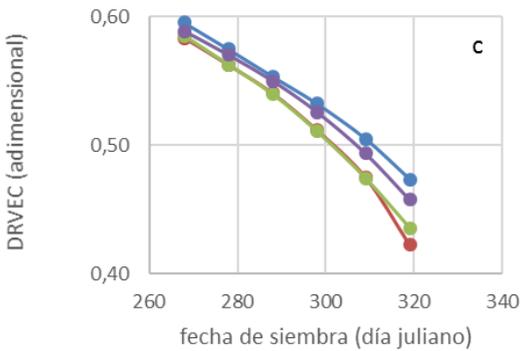
Figura 2. Variación de la duración relativa del subperíodo vegetativo a la duración del subperíodo reproductivo (DRVR) con la fecha de siembra de tres ciclos de madurez del cultivo de maíz en localidades del centro-sudeste bonaerense. a. Azul. b. Tandil. c. Balcarce. d. Mar del Plata. A la derecha se presentan los ajustes por localidad y ciclo de madurez (significativas al 0,05).



● Azul ● Tandil
● Balcarce ● Mar del Plata

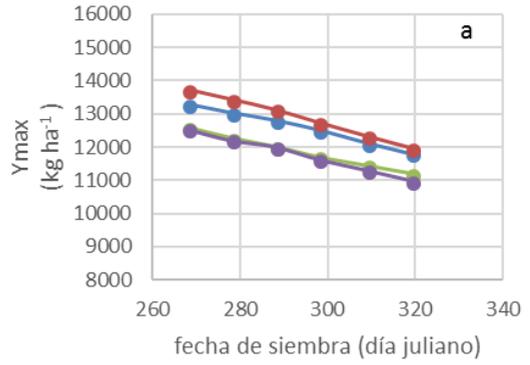


● Azul ● Tandil
● Balcarce ● Mar del Plata

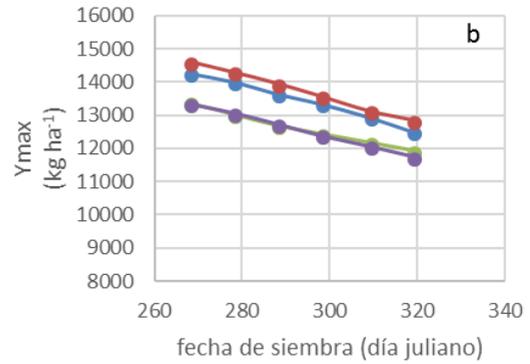


● Azul ● Tandil
● Balcarce ● Mar del Plata

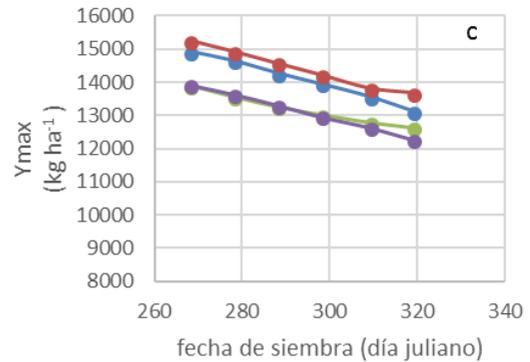
Figura 3. Variación de la duración relativa del subperíodo vegetativo en la estación de crecimiento (DRVEC) del cultivo de maíz con la fecha de siembra en localidades del centro-sudeste bonaerense de acuerdo con el ciclo de madurez. a. Ciclo 1. b. Ciclo 2. c. Ciclo 3.



● Azul ● Tandil
● Balcarce ● Mar del Plata

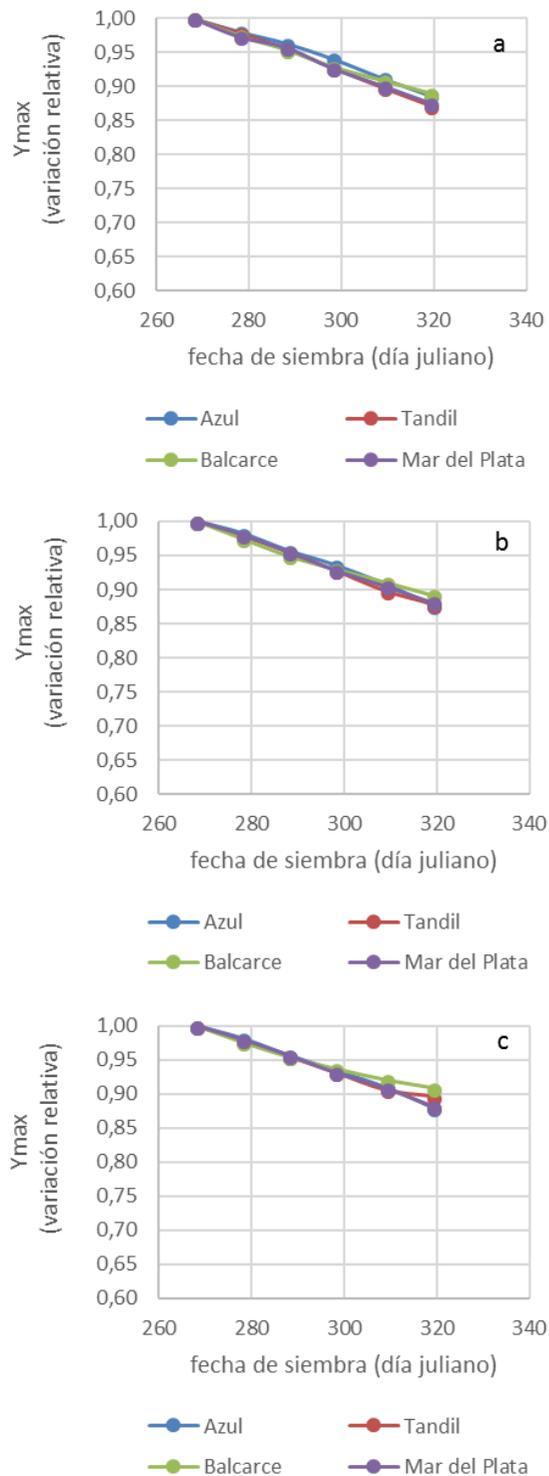


● Azul ● Tandil
● Balcarce ● Mar del Plata



● Azul ● Tandil
● Balcarce ● Mar del Plata

Figura 4. Rendimiento potencial (Y_{max}) de acuerdo con la fecha de siembra de tres ciclos de madurez de maíz en localidades del centro-sudeste bonaerense (serie 1971-2010). a. Ciclo 1. b. Ciclo 2. c. Ciclo 3. (adaptado de Panunzio Moscoso *et al.*, 2016b).



sitio, se sugiere atender la posible diferencia en la productividad ambiental que se genera en las diferentes localidades cuando se decide entre diferentes ciclos de madurez. Así, por ejemplo, en el ambiente medio de Tandil, la decisión del ciclo de madurez a sembrar puede tener mayor impacto en productividad para una determinada fecha de siembra que la decisión en Azul. Se debe mencionar, que dada la naturaleza de la estimación de Ymax (ETM x constante=EUA), los cambios en tasas de Ymax están directamente asociados a cambios en la ETM estacional o en los subperíodos.

En la Figura 8 se presenta la productividad ambiental media (1971-2010) determinada como el cociente entre el rendimiento potencial y la duración de la estación completa (TPMaxEC) para los diferentes escenarios de manejo. Es posible

Tabla 3. Coeficientes de correlación de Pearson significativos (al nivel de significancia de 0,05) entre rendimiento potencial (Ymax) del cultivo de maíz (serie 1971-2010) y expresiones asociadas con la duración de la estación de crecimiento (EC) y de los subperíodos vegetativo y reproductivo en el centro-sudeste bonaerense para tres ciclos de madurez del cultivo (n=234, 39 campañas agrícola x seis fechas de siembra).

Correlación	Localidad	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
Ymax vs. duración EC	Azul	0,46	0,45	0,33
	Tandil	0,49	0,34	0,22
	Balcarce	0,59	0,45	0,50
	Mar del Plata	0,49	0,39	0,19
Ymax vs. duración vegetativo (S-R1)	Azul	0,50	0,52	0,51
	Tandil	0,61	0,58	0,54
	Balcarce	0,59	0,57	0,53
	Mar del Plata	0,56	0,53	0,48
Ymax vs. duración reproductivo (R1-R6)	Azul	ns	ns	ns
	Tandil	-0,14	-0,15	ns
	Balcarce	0,17	0,15	0,32
	Mar del Plata	ns	ns	-0,14
Ymax vs. relación DRVR	Azul	0,42	0,42	0,39
	Tandil	0,56	0,49	0,34
	Balcarce	0,41	0,27	ns
	Mar del Plata	0,49	0,43	0,39
Ymax vs. relación DRVEC	Azul	0,42	0,42	0,38
	Tandil	0,55	0,47	0,30
	Balcarce	0,40	0,24	ns
	Mar del Plata	0,49	0,42	0,37

S: siembra, R1: floración, R6: madurez fisiológica
 Relación DRVR: duración relativa del subperíodo vegetativo al subperíodo reproductivo
 Relación DRVEC: duración relativa del subperíodo vegetativo en la estación de crecimiento

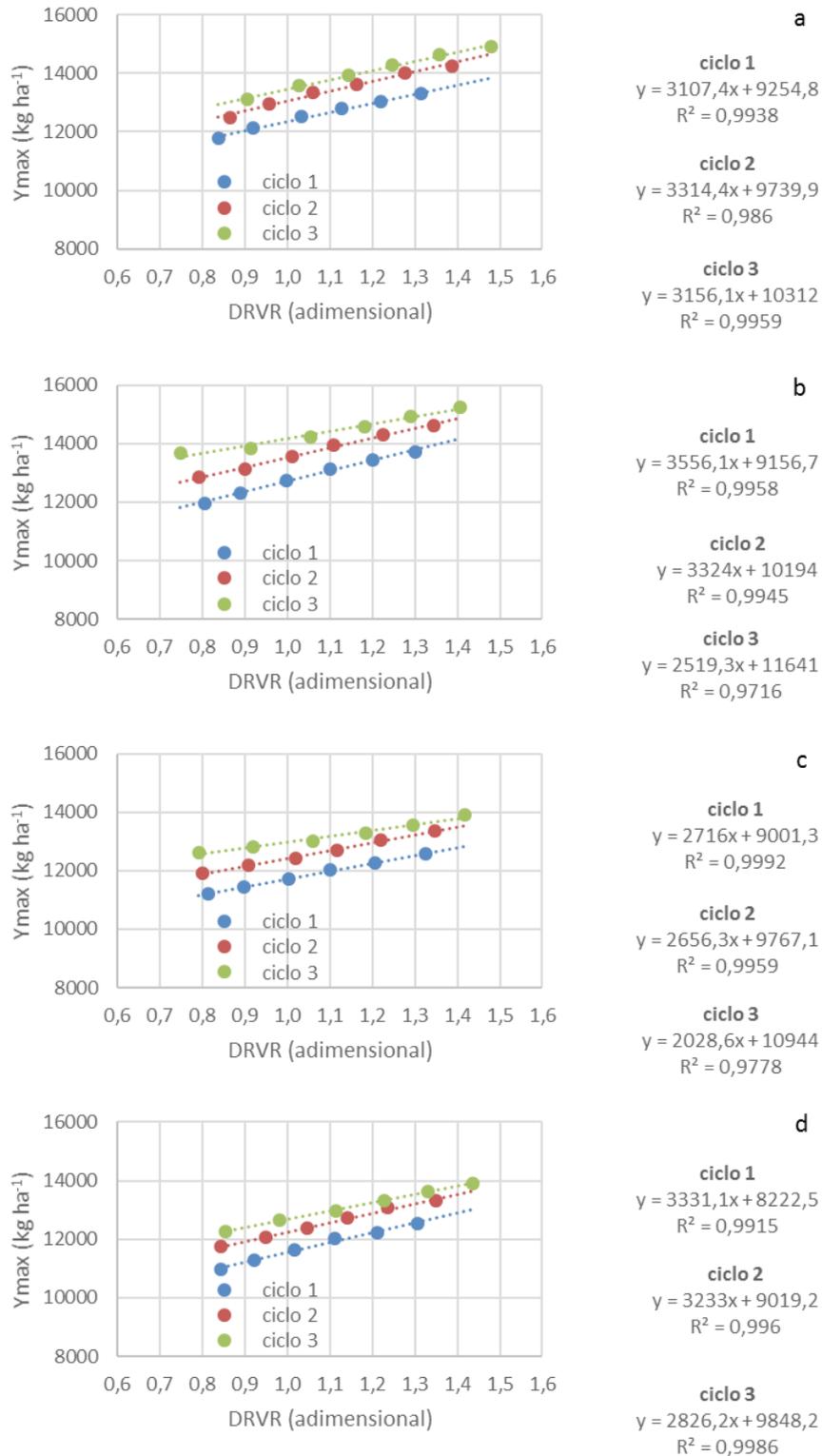


Figura 6. Variación del rendimiento potencial (Y_{max}) con la duración relativa del subperíodo vegetativo al reproductivo (DRVR) de la estación de crecimiento de tres ciclos de madurez del cultivo de maíz en localidades del centro-sudeste bonaerense. a. Azul. b. Tandil. c. Balcarce. d. Mar del Plata. A la derecha se presentan los ajustes por localidad y ciclo de madurez (significativos al 0,05).

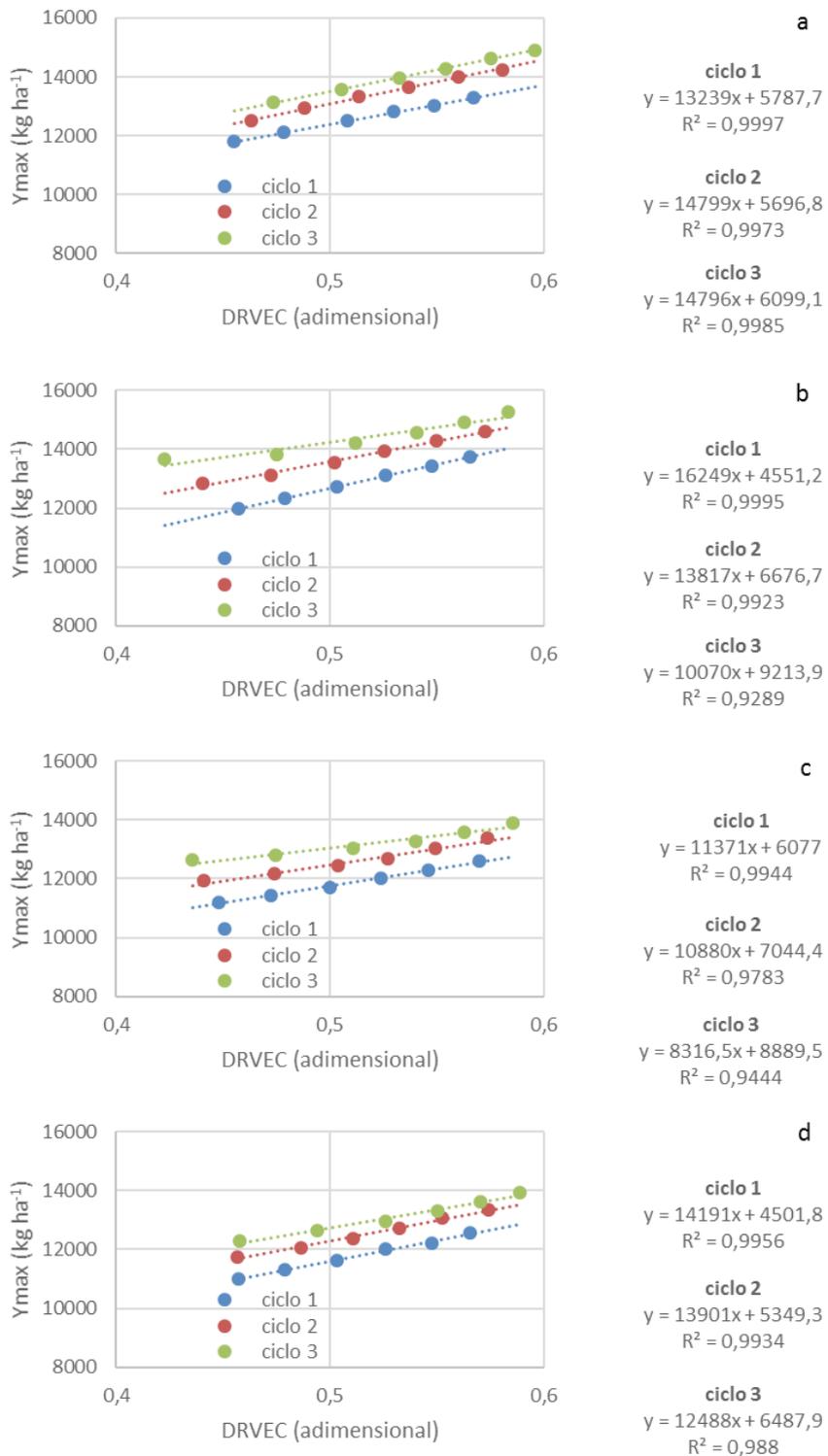
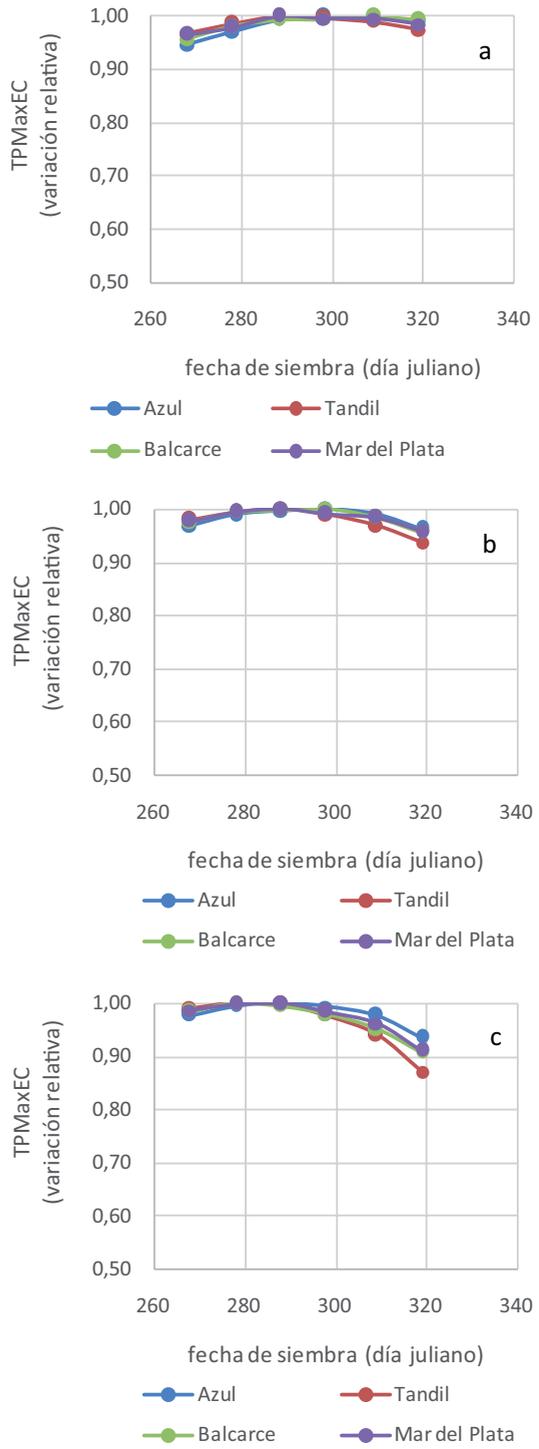
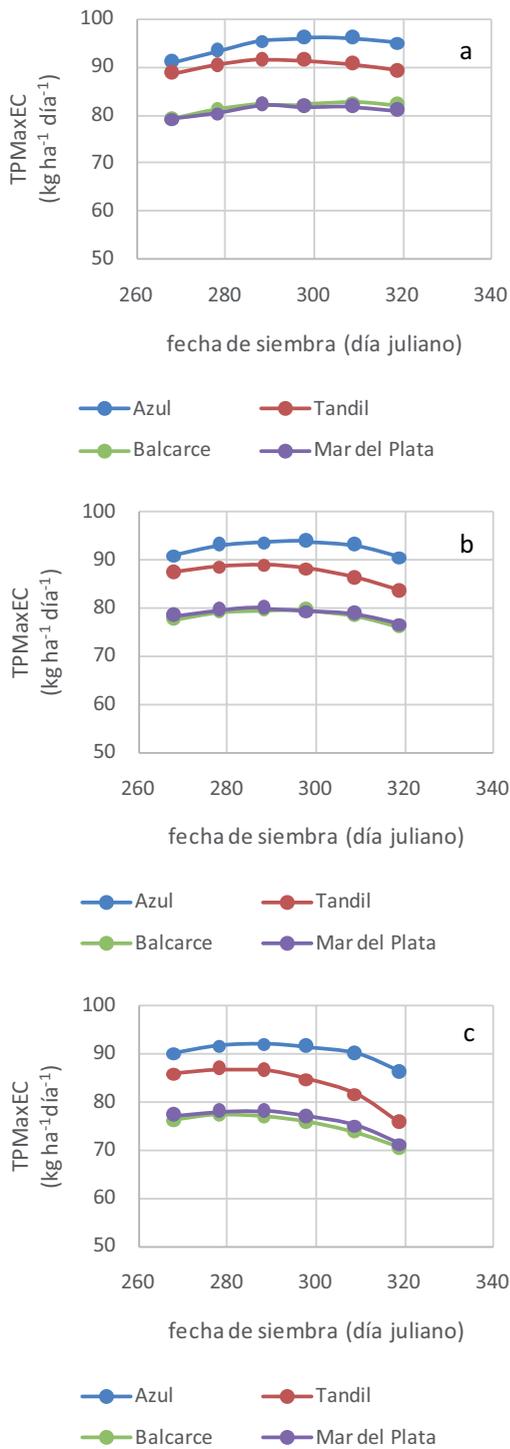


Figura 7. Variación del rendimiento potencial (Ymax) con la duración relativa del subperíodo vegetativo a la estación de crecimiento (DRVEC) de tres ciclos de madurez del cultivo de maíz en localidades del centro-sudeste bonaerense. a. Azul. b. Tandil. c. Balcarce. d. Mar del Plata. A la derecha se presentan los ajustes por localidad y ciclo de madurez (significativos al 0,05).



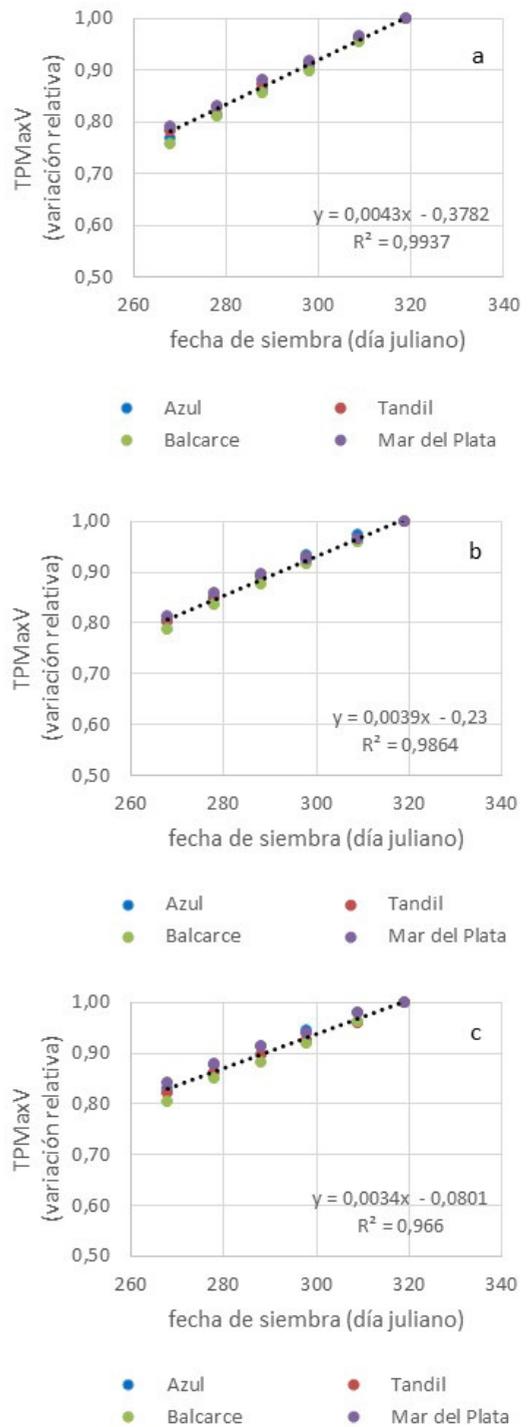
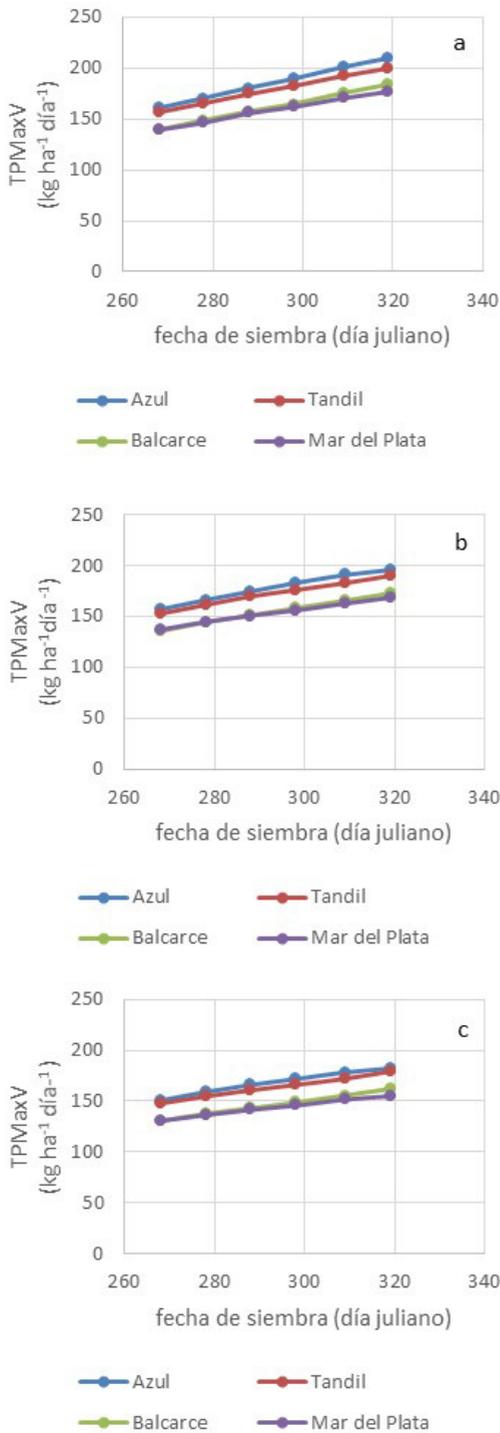


Figura 10. Tasa media de productividad ambiental del subperíodo vegetativo (TPMaxV) de acuerdo con la fecha de siembra en localidades del centro-sudeste bonaerense para tres ciclos de madurez del cultivo de maíz (serie 1971-2010). a. Ciclo 1. b. Ciclo 2. c. Ciclo 3.

Figura 11. Variación relativa de la tasa media de productividad ambiental del subperíodo vegetativo (TPMaxV) con la fecha de siembra en localidades del centro-sudeste bonaerense para tres ciclos de madurez del cultivo de maíz (serie 1971-2010). a. Ciclo 1. b. Ciclo 2. c. Ciclo 3.

identificar diferentes funciones polinómicas de segundo grado para explicar la variación del índice TPM_{MaxEC} en cada localidad de la zona. Tandil y Azul muestran mayor productividad ambiental en la mayoría de las fechas de siembra. A su vez, las relaciones mostradas en la Figura 9 indican que los valores máximos de TPM_{MaxEC} para cada ciclo de madurez se mantienen dentro de un grupo de fechas de siembra, que se corresponden con las más tardías para el ciclo corto y con las más tempranas para el ciclo largo.

En base al análisis de la productividad ambiental dentro de la estación de crecimiento, se puede indicar que a medida que se atrasa la fecha de siembra, se expone al cultivo a condiciones del ambiente más productivas durante el período vegetativo (Figura 10). Este patrón de respuesta es semejante entre localidades para un mismo ciclo de madurez (Figura 11). Por cada día de atraso en la fecha de siembra, aumenta la productividad del período vegetativo (TPM_{MaxV}) entre 0,3 y 0,4 % del Y_{max} asociado a cada ciclo.

A partir de la relación entre rendimiento potencial y duración del período vegetativo, una vez determinada la fecha de floración y si se conoce la fecha de siembra y ciclo del cultivo, es posible inferir las reducciones de rendimiento debidas a la presencia de algún factor que interrumpa el ciclo (i.e. la ocurrencia de heladas tempranas). No obstante, para las determinaciones de rendimiento real del cultivo, se podrán usar relaciones semejantes a las obtenidas en este trabajo, pero generadas en ese caso a partir del rendimiento real probable como función de algún recurso del ambiente como agua o radiación (Panunzio Moscoso *et al.*, 2016b, Bonelli *et al.*, 2016).

Las futuras propuestas de estrategias de manejo agronómico para el cultivo de maíz en la zona deberán focalizarse en buscar el aumento de productividad del subperíodo reproductivo, que está limitada por los destinos en siembras tempranas y por la capacidad fotosintética en las tardías de acuerdo con Bonelli *et al.* (2016).

CONCLUSIONES

Los escenarios evaluados para la serie histórica 1971-2010 permiten distinguir algunas estrategias de manejo agrícola como más apropiadas de acuerdo con la productividad ambiental. A su vez, se propone el uso de índices de productividad ambiental que pueden aplicarse para evaluar los efectos relativos de otras estrategias de manejo agronómico.

Atrasos en la fecha de siembra desde el 25 de setiembre al 15 de noviembre en la zona centro-sudeste de Buenos Aires reducen la relación entre la duración del período vegetativo y la duración del subperíodo reproductivo. La productividad ambiental de la estación de crecimiento se mantiene durante un intervalo de fechas de siembra por compensación de los efectos sobre la duración y la productividad relativa de los subperíodos vegetativo y reproductivo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMDP) que ha provisto la financiación del presente trabajo. Parte de la información presentada fue generada en el marco de una Beca de Entrenamiento otorgada por la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC) a MP Panunzio Moscoso. A. Irigoyen es investigadora de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC). L. Echarte es investigadora del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Conicet).

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.; 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.
- 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.
- Bonelli, L. E., Monzón, J.P., Cerrudo, A. and R.H. Rizzalli, 2016. Maize grain yield components and source-sink relationship as affected by the delay in sowing date.

- Field Crops Res. 198: 215-225.
- 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.; 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.
- Egli, D.B., 2011. Time and the productivity of agronomic crops and cropping systems. *Agronomy J.* 103: 743-750.
- Fernández Long, M.E.; G.V. Muller, A. Beltran-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.
- Grassini, P., Yang, H. and K.G. Cassman, 2009. Limits to maize productivity in Western Corn-Belt: A simulation analysis for fully irrigated and rainfed conditions. *Agricultural Forest Meteorology*. 149: 1254-1265.
- 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. Kemanian, S.H. Kim, J. Kiniry, J.I. Lizaso, C. Nendel, C.R.L. Nielsen, B. Parent, C.O. Stockle, 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. Rodriguez, 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 Surfaces Temperatures. Sivakumar and Hansen (ed.) *Climate Predictions and Agriculture: Advances and Challenges*, Springer. pp 249-527.
- Otegui, M. E., Ruiz, R. and D. Petrucci, D. 1996. Modeling hybrid and sowing date effects on potential grain yield of maize in a humid temperate region. *Field Crops Research* 47: 167-174.
- 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 VII*: 41-56.
- 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: b. deficiencias de agua y rendimiento. *Revista Argentina de Agrometeorología VII*: 57-71.
- 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.
- 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. Castaño, 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.