

# Agua en el suelo durante el período crítico para la definición de rendimiento de maíz en el centro-sudeste bonaerense

A. I. Irigoyen, M. P. Panunzio Moscoso, M. A. Cambareri, M. E. Holzman, L. Echarte y R. E. Rivas

## RESUMEN

Dada la importancia de la predicción temprana del rendimiento de maíz, se propuso, en este estudio, identificar los patrones de variación del agua en el suelo durante el período crítico para la definición de rendimiento (PC) en la región centro-sudeste de Buenos Aires, a partir de métodos simples de simulación de la fenología del cultivo y el balance de agua en el suelo. Los objetivos fueron: a) caracterizar la posición en el calendario de la ocurrencia del PC para escenarios agrícolas que combinan ciclos de madurez y fechas de siembra y b) evaluar las variaciones del agua del suelo dentro del PC. Se evaluaron seis fechas de siembra y tres cultivares con madurez contrastante en cuatro localidades. Las estaciones de crecimiento (1971-2010) se simularon utilizando grados-días como estimador. Los balances de agua se calcularon siguiendo un modelo de tipo de reservorio (paso diario). El agua en el suelo se analizó a intervalos alrededor de la floración (R1-20d, R1-10d, R1, R1+10d, R1+20d). Un patrón de la variación del agua en el suelo durante el PC (R1-20d y R1-10d > R1 y R1 > R1+10d y R1+20d) se repite en la mayoría de los escenarios agrícolas. La asociación temporal con R1 en la ventana desde R1-10d a R1+10d fue homogénea dentro de la región, a través de las fechas de siembra e independientemente del ciclo de madurez del cultivo. La posición del PC varió dentro de la región; sin embargo, el agua del suelo no fue diferente entre localidades en la mayoría de los escenarios.

**Palabras clave:** balance de agua, fechas de siembra, ciclos de madurez, floración, madurez fisiológica.

A. I. Irigoyen, M. P. Panunzio Moscoso, M. A. Cambareri, M. E. Holzman, L. Echarte and R. E. Rivas, 2020. Soil water during the critical period for yield definition of maize in center-southeastern of Buenos Aires. RADA XI: 17-32

## SUMMARY

Because of the importance of early yield prediction, the purpose of this study was to identify the pattern of variations of soil water during the critical period for yield definition (PC) over the region center-southeastern of Buenos Aires from simple methods of simulation of crop phenology and soil water. The objectives were: a) to characterize the position in the calendar of the occurrence of the PC for agricultural scenarios that combine maturity cycles and planting dates and b) evaluate soil water variations within the PC. Six planting dates and three cultivars with contrasting maturity cycles were evaluated at four locations. The growing seasons (1971-2010) were simulated by using degree-days as estimator. Water balances were computed following a reservoir type model (daily step). Soil water was analyzed at intervals around flowering (R1-20d, R1-10d, R1, R1+10d, R1+20d). A pattern of soil water variation during PC (R1-20d and R1-10d>R1 and R1>R1+10d and R1+20d) was repeated in most agricultural scenarios. The time window from R1-10d to R1+10d showed a homogeneous association with R1 across the planting dates, regarding of maturity cycle of the crop. Position of PC varied within the region; however, soil water was not different among locations in most of scenarios.

**Key words:** water balance, planting date, flowering, physiological maturity.

*A. I. Irigoyen, M. P. Panunzio Moscoso, M. A. Cambareri y L. Echarte: Unidad Integrada Balcarce: Facultad de Ciencias Agrarias UNMdP -INTA . Ruta Nac. 226, km 73,5, Balcarce CC 276 (7620), Argentina. M. E. Holzman y R. E. Rivas: Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNICEN)-Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA). Paraje Arroyo Seco s/n, Campus Universitario, Tandil (7000), Argentina. Correspondencia a: irigoyen.andrea@inta.gob.ar*

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas agrícolas estivales predominantes en el centro-sudeste bonaerense acusan entre los efectos condicionantes más frecuentes los asociados a la variabilidad de la disponibilidad de agua para los cultivos (Della Maggiora *et al.*, 2008, Irigoyen *et al.*, 2011, Panunzio Moscoso *et al.*, 2016 a y b). En virtud de la capacidad de los modelos de desarrollo del cultivo y del uso de agua para representar el medio biofísico condicionante de la producción de granos es factible su implementación para evaluar estrategias de manejo agronómico adecuadas a la variabilidad climática regional y, por otra parte, su aplicación para el desarrollo futuro de modelos de pronóstico de rendimiento.

La evaluación agroclimática del régimen hídrico para el cultivo de maíz (Panunzio Moscoso *et al.*, 2016b) permitió describir un patrón en las deficiencias de agua para la estación de crecimiento entera, que se repite en la mayoría de las localidades de la región, sin diferencias entre las fechas de siembra (desde fines de setiembre

a mediados de noviembre) en cada ciclo de madurez (corto, intermedio y largo). En el análisis probabilístico en la región, solamente entre los ciclos corto y largo se encontraron diferencias significativas en las deficiencias acumuladas durante el período crítico (PC) de definición del rendimiento, aunque no en todas las fechas de siembra y localidades (Panunzio Moscoso *et al.*, 2016b).

El maíz manifiesta una sensibilidad diferencial a la deficiencia hídrica según la etapa fenológica considerada y la etapa más crítica para la definición del rendimiento es alrededor de la floración (Andrade y Sadras, 2002). Aún dentro de este período se distinguen subperíodos en los cuales se definen diferentes componentes del rendimiento, así mientras que antes de la floración se define el número de espigas, después de la floración se define el número de granos por espiga (Otegui y Bonhomme, 1998). Por su parte, las deficiencias que ocurran durante el período de llenado de granos tienen menor efecto sobre el rendimiento y en ese caso, afectan el peso de los granos (Andrade *et al.*, 1996).

Hernández *et al.* (2015) demostraron que el rendimiento en grano del cultivo y la evapotranspiración estacional pueden asociarse positivamente aún bajo regímenes hídricos contrastantes. Durante el transcurso del PC pueden encontrarse situaciones de severo o moderado desecamiento del suelo e incluso condiciones limitantes al inicio pueden revertirse (Poza *et al.*, 2005; Hernández *et al.*, 2015; Cambareri *et al.*, 2018; Irigoyen *et al.*, 2019). En ocasiones se llega al PC en condiciones hídricas que han limitado el desarrollo foliar (Irigoyen *et al.* 2018, 2019) y, de esa forma, se afecta la fuente. Calviño *et al.* (2003) describieron relaciones curvilíneas entre el rendimiento de maíz en Tandil y el agua en el suelo considerando ventanas de tiempo entre 40 y 50 días y centradas en floración, aunque con diferentes ajustes para suelos someros y profundos.

Cuando se evaluaron modelos de estimación anticipada de rendimiento para este cultivo a partir de la información de temperatura e índices de vegetación (8 a 12 semanas previas a cosecha) se encontró una razonable aptitud (Holzman y Rivas, 2016). Según lo sugerido, en ese trabajo, la integración completa del período crítico de definición del rendimiento puede aproximar mejor que la integración sobre períodos inferiores al mes. Cuando se evaluaron modelos basados en índices de estrés hídrico y radiación se demostró que en la zona centro-sudeste para cultivos de verano (*i.e.* maíz), el mes crítico para la definición de rendimiento fue diciembre (Holzman *et al.*, 2018).

Dada la importancia del agua en el suelo en la predicción del rendimiento, es de interés profundizar sobre las ventanas de tiempo adecuadas y si estas condicionan el ambiente hídrico en la región. En particular, es importante evaluar si la lámina de agua en el suelo en un momento dado, como el inicio del PC, resulta información suficiente para estimar lo que ocurre con la lámina de agua durante el PC completo, para cualquier escenario de manejo agrícola (fecha de siembra y ciclo de madurez) y si las variaciones detectadas (en caso de que hubiese) ocurren en forma homogénea en toda la región. A su vez, como parte de la evaluación de estrategias de manejo, interesa saber si cambiar el ciclo del cultivo o la fecha de siembra puede afectar en forma significativa la condición hídrica al momento crítico de definición del rendimiento. En ese sentido, se propone la aplicación de un modelo de predicción fenológica simple basado en temperatura sobre series históricas para identificar la ubicación del PC en el calendario y luego describir el agua en el suelo a intervalos de tiempo durante ese período.

Los objetivos del presente trabajo fueron: a)

caracterizar la ubicación en el calendario de la ocurrencia del período crítico para la definición de rendimiento dentro de la estación de crecimiento de maíz en el centro-sudeste bonaerense para escenarios que combinan ciclos de madurez y fechas de siembra y b) evaluar las variaciones del agua en el suelo dentro del período crítico.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Escenarios agrícolas obtenidos por simulación del desarrollo del cultivo

Los escenarios agrícolas evaluados en cuatro localidades de la zona centro-sudeste de Buenos Aires (Figura 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).

Las localidades se ubican sobre una transecta con clima templado húmedo a templado oceánico (Aliaga *et al.*, 2017). En la Tabla 1 se presentan las condiciones climáticas de temperatura y precipitación a escala anual y del semestre estival de las localidades bajo estudio (serie 1971-2010). Los datos meteorológicos empleados en el estudio (1971-2010) fueron proporcionados por la EEA INTA Balcarce y el Instituto de Clima y Agua de INTA Castelar.

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). Para estimar las fechas de ocurrencia de momentos claves como la floración (R1) y R6 se consideraron, en primer

lugar, los requerimientos térmicos indicados para el subperíodo S-R1 a los que se adicionaron los del subperíodo R1-R6 para la estación completa (Tabla 2) y que 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) atendiendo lo sugerido en la literatura (Singh and Singh, 1985; Andrade *et al.* 1996; Calviño *et al.*, 2003). Algunos autores han definido la extensión del PC desde 220°Cd antes a 100°- 200 °Cd después de R1 en función del período efectivo de crecimiento de la espiga (Otegui and Bonhomme, 1998; Maddonni, 2012). A los fines prácticos, en este trabajo, se siguió el criterio de tiempo calendario que queda definido algebraicamente ( $\pm 20$  días) una vez que ha sido determinada la fecha de floración.

**Tabla 1.** Condiciones climáticas de temperatura y precipitación en localidades del centro-sudeste bonaerense (serie 1971-2010).

Localidad	Temperatura (°C)		Precipitación (mm)	
	Anual	Semestre cálido	Anual	Semestre cálido
Azul	14,5	18,6	944,8	607,5
Tandil	13,9	17,9	861,3	544,7
Balcarce	14,0	17,8	937,8	582,4
Mar del Plata	14,2	17,8	919,8	551,2

**Tabla 2.** Requerimiento térmico de los subperíodos siembr-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. Adaptado de Capristo *et al.* (2007).

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

### Balance de agua en el suelo

El balance de agua en el suelo fue calculado a paso diario, siguiendo un modelo calibrado localmente (Della Maggiora *et al.*, 2002). Las variables de entrada del modelo fueron: precipitación (P), evapotranspiración de referencia (ET<sub>0</sub>), coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>), 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 ET<sub>0</sub> por el coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>) 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, Della Maggiora *et al.*, 2002), fue considerada una disminución lineal de la evapotranspiración relativa (ETR/ETM) en función de la fracción de agua disponible.

Los valores diarios de ET<sub>0</sub> fueron calculados para la serie histórica de cada localidad según Allen *et al.* (1998). Cuando no se pudo estimar



**Figura 1.** Ubicación geográfica de las localidades en estudio.

la ET<sub>0</sub> por falta de datos de radiación global se empleó un método empírico basado en la radiación teórica astronómica y el déficit de presión de vapor (Irigoyen *et al.*, 2004b). El coeficiente K<sub>c</sub> en cada estación de crecimiento 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<sub>c</sub> se estimó siguiendo las recomendaciones de Allen *et al.* (1998). Las variaciones en la evolución del K<sub>c</sub> de acuerdo con los escenarios agrícolas han sido discutidas en Panunzio Moscoso *et al.* (2014).

Se consideraron valores de 3,6 y 2,0 mm cm<sup>-1</sup> como límites máximo y mínimo de almacenaje de agua en el suelo, respectivamente y una profundidad de suelo de 1 m como representativos de la región, es decir 160 mm m<sup>-1</sup> de agua disponible. Los valores de límite máximo y mínimo empleados como referencia fueron obtenidos para suelos predominantes en el área bajo estudio, mediante la aplicación de funciones de pedotransferencia ajustadas para suelos del sudeste bonaerense a partir de datos de textura (Travasso y Suero, 1994). Los suelos agrícolas predominantes en la región se repiten en las localidades Azul, Tandil, Balcarce y Mar del Plata (INTA, 2016). En suelos del centro-sudeste bonaerense puede aparecer una capa de tosca que limita el desarrollo de las raíces (Pazos y Mestelán, 2002, Rubio *et al.* 2019). La profundidad (1 m) fue seleccionada a modo de testigo, considerando la variabilidad existente en la región y que, el 90 % del consumo de agua en el cultivo puede concentrarse en los primeros 0,8 m hasta la fase de 10 hojas (V10), progresando a 1 m en R1 en suelos más profundos (Gardioli *et al.*, 1997).

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 con los resultados de los balances de agua seriados calculados previamente con diferentes metodologías (Irigoyen *et al.*, 2004a; Cabria *et al.*, 2006). El período de recarga del suelo es el mismo en la región y se registran, en media, entre 200 y 300 mm de precipitación durante el semestre frío que representan desde 37 a 40% del total anual.

Cabe destacar que los resultados de deficiencias de agua y rendimiento del cultivo bajo las prácticas de manejo y cada localidad han sido discutidos en Panunzio Moscoso *et al.* (2016b) y en este trabajo se focaliza el agua en

diferentes momentos del PC. Se extrajeron de la serie de valores diarios de lámina de agua en el suelo de cada escenario y campaña agrícola los correspondientes a cinco momentos (R1-20d, R1-10d, R1, R1+10d y R1+20d) centrados en la floración (R1) para evaluar la dinámica de agua en el suelo durante el período crítico de definición del rendimiento.

### **Análisis temporal del momento de ocurrencia de eventos fenológicos clave**

Se caracterizaron: a) momento de la ocurrencia de la floración (R1) con respecto a una fecha de referencia arbitraria (31 de diciembre) y b) la duración restante de la estación de crecimiento (hasta R6) a partir del fin del período crítico (R1+20 d) en cada escenario y campaña agrícola. En el caso de a) se adoptó el criterio ( $\pm d$  al 31 de diciembre) para permitir el análisis estadístico entre fechas de R1 ocurriendo entre final de un año calendario (próximos a 365) y principios del siguiente (principalmente hasta día 30). En el caso de b) se entiende que la duración de la estación de crecimiento después del período crítico representa un indicador del grado de exposición que el cultivo puede tener a factores adversos que afecten su rendimiento.

Se realizaron comparaciones para a) y b) 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 representaron las curvas de probabilidad acumulada para la ocurrencia de la floración (R1) según fecha de siembra del cultivo para cada ciclo de madurez y localidad. Las frecuencias de ocurrencia (relativa y acumulada) para construir las curvas fueron calculadas para intervalos de 5 días.

### **Análisis del agua en el suelo durante el período crítico (PC) con relación al agua en la floración**

Dado que el foco de análisis fue la lámina de agua en el suelo en momentos consecutivos (datos no independientes), se aplicó la prueba no paramétrica de suma de rangos de Wilcoxon ( $p < 0,05$ ) que permite testear tratamientos o muestras

no independientes por pares de observaciones. En este caso, se emplearon comparaciones a una cola con momentos previos y posteriores a floración (lámina  $R1 -20d > R1$ ,  $R1 -10d > R1$ ,  $R1 > R1+10d$  y  $R1 > R1+20d$ ).

Además, se evaluó la asociación entre la lámina de agua en el suelo en floración ( $R1$ ) y la lámina en otros momentos del período crítico ( $R1-20d$ ,  $R1-10d$ ,  $R1+10d$  y  $R1+20d$ ) mediante los coeficientes de correlación de Spearman con la finalidad de describir patrones de asociación significativa en la dinámica del agua en el suelo y la detección de ventanas de tiempo para un uso a futuro en modelización. Se representó la distribución de las correlaciones significativas ( $p < 0,05$ ) en cada localidad y ciclo mediante un gráfico radial cuyos vértices fueron las fechas de siembra. Así, los polígonos cerrados indican que los coeficientes de correlación fueron significativos en todas las fechas de siembra, al tiempo que polígonos de mayor área indican mayor asociación para esa ventana a través de las fechas de siembra.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la región centro-sudeste bonaerense hubo diferencias significativas en la ubicación del PC dentro del calendario para los escenarios evaluados. De acuerdo con los valores medianos del momento de ocurrencia de la  $R1$ , en Azul siete de los 18 escenarios alcanzaron este estado clave al 31-dic, mientras que en Tandil, Balcarce y Mar del Plata solamente se alcanzó en tres o cuatro escenarios (Tabla 3). De ese modo, ya se obtiene alguna información respecto al momento de monitoreo del agua en el suelo, por ejemplo, mediados de diciembre puede indicar el inicio del PC para varios escenarios agrícolas en Azul, mientras que en otras localidades son muy pocos los escenarios que tienen ese estado fenológico. Con frecuencia, los modelos de rendimiento que están basados en la observación remota de la condición hídrica emplean indicadores promedio de un período de tiempo más extenso (Holzman *et al.*, 2018). Se podría obtener mejor ajuste si se evalúan ventanas de tiempo más localizadas según manejo agrícola del lugar y del año particular.

En cada una de las localidades, el momento de  $R1$  para cada ciclo de madurez se atrasó en las siembras tardías, pero no se observaron diferencias significativas entre dos fechas de siembra consecutivas. Al comparar los escenarios (fecha de siembra x ciclo de madurez) entre las localidades se detectaron diferencias significativas

siendo anticipada para la mayoría de las fechas de siembra en las localidades de Tandil y Azul.

Con frecuencia el monitoreo de la evolución del cultivo en forma remota se realiza a intervalos periódicos en el calendario, siendo que el manejo agrícola afecta la posición del PC dentro de la estación de crecimiento, es de suma utilidad conocer la distribución probabilística dentro de la región para futuras evaluaciones y también como criterio para modelos de pronóstico anticipado de rendimiento.

En la Figura 2 se puede visualizar la probabilidad de ocurrencia de  $R1$  en cada localidad y escenario para un momento calendario determinado. Se verificó un desplazamiento debido al ciclo de madurez dentro de cada localidad y dentro de cada ciclo debido a la fecha de siembra. A su vez, para cada ciclo, la secuencia entre localidades reflejó la transecta climática, siguiendo el gradiente térmico. Con esta información, es posible reconocer cuando los momentos claves (floración, inicio o fin del PC) han sido alcanzados según el manejo agronómico. El tiempo de la estación de crecimiento que resta hasta  $R6$  al finalizar el período crítico ( $R1+20d$ ) es menor en Azul que en las demás localidades, las cuales no se diferenciaron significativamente entre ellas (Tabla 4). Entre los ciclos, para cada localidad y fecha de siembra no hubo diferencias y puede explicarse porque los requerimientos térmicos desde  $R1$  a  $R6$  no varían significativamente (Tabla 2).

En la transecta Azul-Mar del Plata se discute, por localidad, la variación de la lámina de agua dentro del PC y los patrones de asociación entre los momentos según la correlación entre la lámina de agua en floración ( $R1$ ) y la lámina de agua en los momentos previos y posteriores. Finalmente, se presenta el análisis comparativo de la lámina de agua en el suelo entre localidades.

En Azul, al comparar la variación del agua en el suelo entre los momentos del PC, pudo destacarse que para los ciclos de madurez corto e intermedio (Figura 3a y 3b), la lámina de agua en el suelo en  $R1$  fue significativamente menor ( $p < 0,05$ ) que la lámina de agua previa ( $R1-20d$  y  $R1-10d$ ) y a su vez, mayor ( $p < 0,05$ ) que la lámina de agua posterior ( $R1+10d$  y  $R1+20d$ ), en cada una de las fechas de siembra evaluadas. Por su lado, se verificó la misma relación entre los momentos previos y posteriores a  $R1$  para el ciclo largo (Figura 3c) solamente en las tres primeras fechas de siembra, mientras en  $R1$  no se diferenció de los momentos previos ( $p > 0,05$ ) y tuvo mayor lámina de agua en el suelo que los momentos posteriores ( $R1+10d$  y  $R1+20d$ ) en las tres últimas fechas de siembra.

**Tabla 3.** Valores medianos de la ocurrencia de floración (R1) en el centro-sudeste bonaerense bajo escenarios con seis fechas de siembra y tres ciclos de madurez (serie 1971-2010).

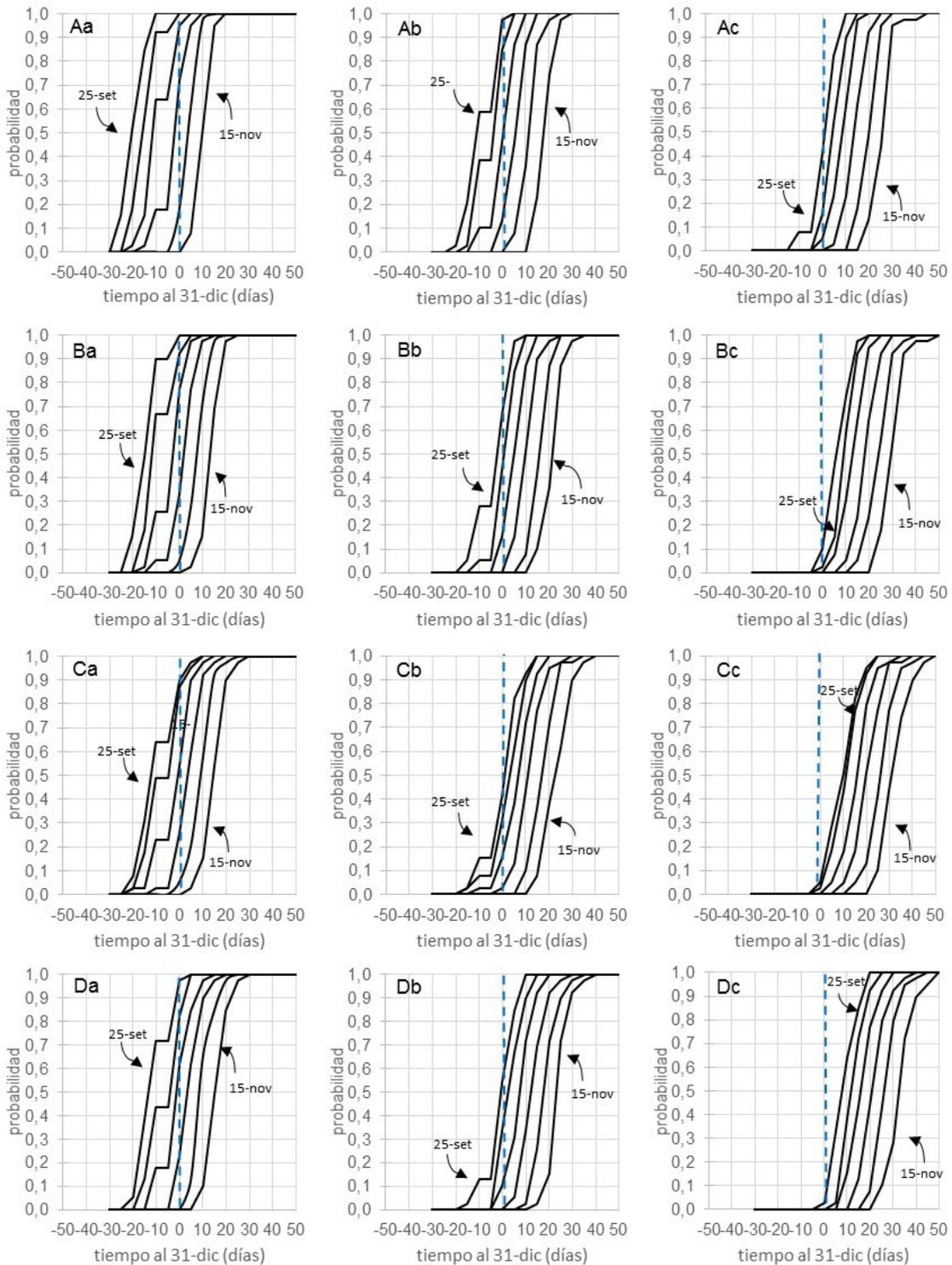
Localidad	Ciclo	Ocurrencia de R1 (días antes o después del 31-dic) Fecha de siembra					
		25-set	05-Oct	15-Oct	25-oct	05-nov	15-nov
Azul	1	-14 a A	-11 ab A	-6 bc A	-1 cd A	4 de A	10 e A
	2	-6 a A	-3 ab A	1 bc A	6 cd A	12 de A	18 e A
	3	-2 a A	5 ab A	9 bc A	14 cd A	20 cd A	26 e A
Tandil	1	-9 a AB	-6 ab AB	-2 bc AB	3 cd AB	8 de AB	14 e AB
	2	-1 a AB	2 ab B	5 bc AB	10 cd AB	16 de AB	22 e B
	3	7 a AB	10 ab AB	14 bc AB	19 cd AB	24 de AB	30 e AB
Balcarce	1	-6 a B	-4 ab B	0 bc B	4 cd B	9 de B	15 e B
	2	2 a B	3 ab B	7 bc B	12 cd B	18 de B	23 e B
	3	10 a B	12 ab B	16 bc B	21 cd B	26 de B	32 e B
Mar del Plata	1	-7 a B	-4 ab B	0 bc B	5 cd B	10 de B	16 e B
	2	1 a B	4 ab B	8 bc B	13 cd B	18 de B	24 e B
	3	9 a B	13 ab B	17 bc B	22 cd B	27 de B	33 e B

Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre las fechas de siembra ( $p < 0,05$ ) para cada localidad y ciclo. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre las localidades ( $p < 0,05$ ) para cada escenario (fecha de siembra x ciclo). La ocurrencia más temprana se indica con a o A, según corresponda. Ciclo1: ciclo corto, Ciclo 2: ciclo intermedio, Ciclo 3: ciclo largo. En sombreado se indican los escenarios con fecha de floración hasta el 31-dic (previa a 31.dic: gris claro; 31-dic: gris oscuro)

**Tabla 4.** Duración del período comprendido entre fin del período crítico (R1+20d) y madurez fisiológica (R6) en localidades del centro-sudeste bonaerense bajo escenarios con seis fechas de siembra y tres ciclos de madurez (serie 1971-2010).

Localidad	Ciclo	Duración del período comprendido entre fin del período crítico (R1+20d) y madurez fisiológica (días) Fecha de siembra					
		25-set	05-Oct	15-Oct	25-oct	05-nov	15-nov
Azul	1	43 b B	42 b B	42 b B	44 b B	46 ab A	48 a B
	2	45 b B	45 b B	47 b B	49 ab B	51 a B	53 a B
	3	47 d B	48 cd B	50 cd B	51 bc	54 ab B	58 a B
Tandil	1	47 b A	47 b A	48 b A	50 ab A	52 a A	54 a A
	2	52 d A	52 cd A	54 c A	56 bc A	60 ab A	63 a A
	3	54 d A	54 cd A	57 c A	61 bc A	67 ab A	77 a A
Balcarce	1	48 b A	49 b A	49 ab A	50 a A	51 a A	52 a A
	2	52 c A	53 bc A	53 bc A	54 abc A	58 ab A	64 a A
	3	53 c A	54 c A	56 c A	61 bc A	65 ab A	70 a A
Mar del Plata	1	49 b A	49 b A	50 ab A	51 ab A	53 ab A	54 a AB
	2	53 c A	54 bc A	54 bc A	57 bc A	58 ab A	62 a AB
	3	55 c A	55 c A	56 c A	58 bc A	64 ab A	67 a AB

Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre las fechas de siembra ( $p < 0,05$ ) para cada localidad y ciclo. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre las localidades ( $p < 0,05$ ) para cada escenario (fecha de siembra x ciclo). Ciclo1: ciclo corto, Ciclo 2: ciclo intermedio, Ciclo 3: ciclo largo.



**Figura 2.** Curvas de probabilidad acumulada de la ocurrencia de la floración (R1) en cuatro localidades del centro-sudeste bonaerense bajo escenarios con seis fechas de siembra y tres ciclos de madurez (serie 1971-2010). Letras mayúsculas indican localidad: A, Azul; B, Tandil; C, Balcarce; D, Mar del Plata. Letras minúsculas indican ciclo de madurez: a, ciclo corto; b, ciclo intermedio; c, ciclo largo.

En esta localidad, el ciclo de madurez afectó el agua en el suelo dentro del PC en forma diferente según la fecha de siembra. La fecha de siembra 15-oct fue la única sin diferencias entre ciclos ( $p>0,05$ ) en la condición hídrica en los cinco momentos del PC y en las fechas 5-nov y 15-nov se detectaron diferencias solamente en R1-10d ( $p=0,0006$  y  $p=0,0142$ , respectivamente). En contraste, en la fecha temprana tuvo más impacto el ciclo y se verificó que no hubo diferencias entre ciclos solamente en uno de los momentos, R1+20d ( $p=0,3616$ ).

En la evaluación de estrategias de manejo para esta localidad, basadas en las condiciones hídricas durante el PC, se verificaron tres aspectos claves: a) con la elección del ciclo largo en algunas fechas de siembra (25-set, 5-oct y 25-oct) se llegó con menor lámina de agua en el suelo al inicio del PC que con los otros ciclos; b) a R1 pueden llegar sin diferencias significativas todos los ciclos, excepto cuando fueron sembrados en 25-set y 25-oct (en ambas fechas menor lámina con ciclo largo) y c) no se detectaron diferencias entre ciclos al final del PC (R1+20d) cualquiera sea la fecha de siembra.

De modo general, cualquiera sea el ciclo de madurez sembrado en Azul, la lámina de agua en floración R1 se correlacionó mejor con la lámina de agua en los momentos más próximos (R1-10d y R1+10d) que con la lámina al inicio o fin del período crítico (R1-20 d y R1+20d), cuando esos coeficientes se redujeron o incluso se tornaron no significativos (Figura 4).

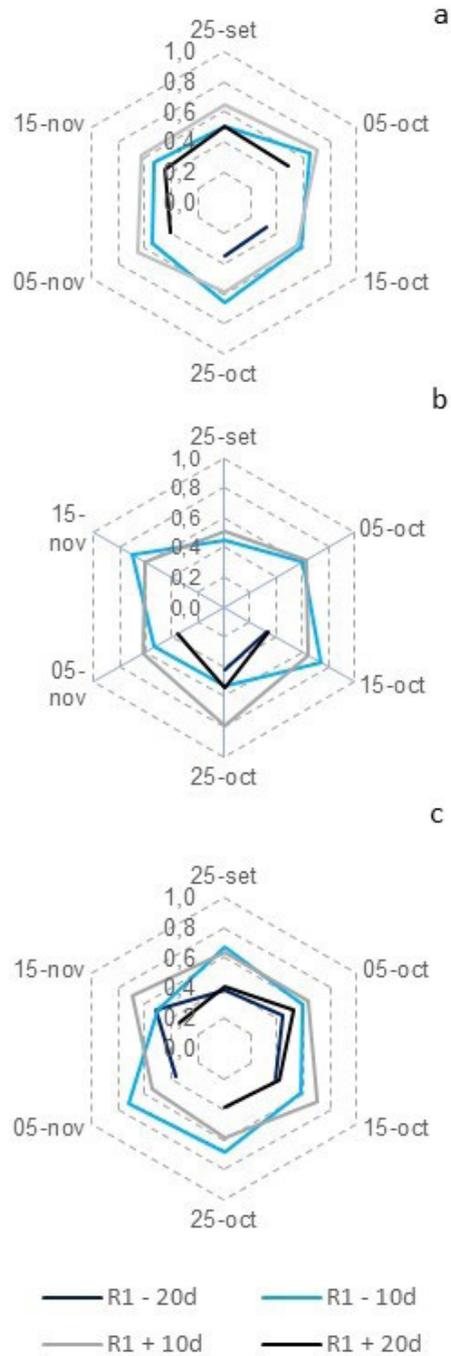
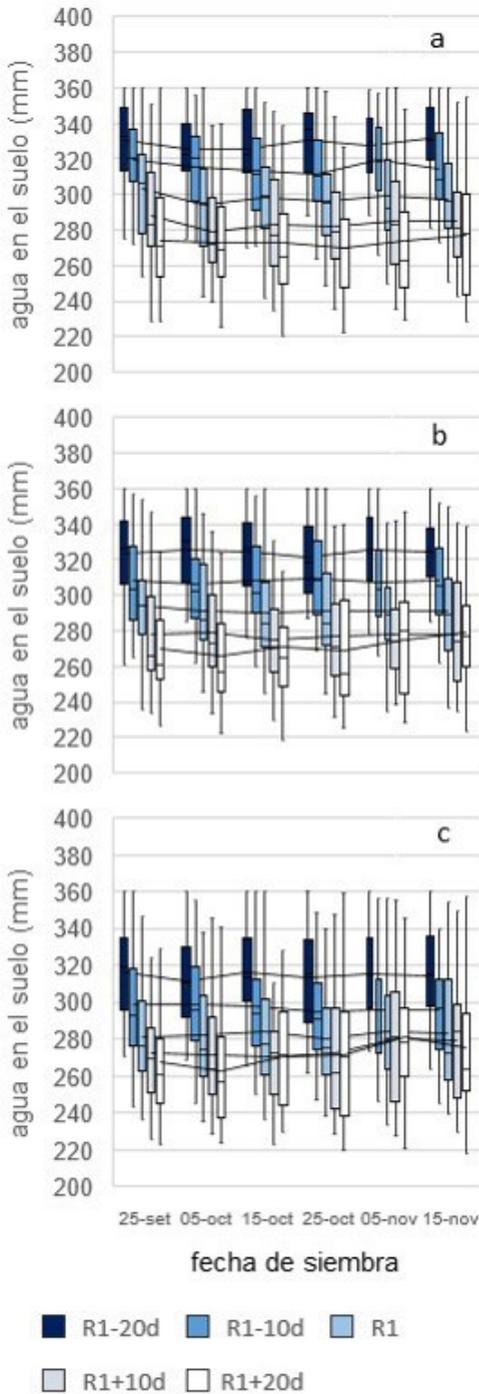
Por su parte, la relación entre la lámina de agua en el suelo en R1 y otros momentos del PC fue diferente para cada ciclo de madurez en Tandil. Así, para ciclo corto la lámina de agua en el suelo en floración (R1) fue significativamente ( $p<0,05$ ) menor que la lámina de agua previa (R1-20d y R1-10d) y a su vez, mayor que la lámina posterior a R1 (R1+10d y R1+20d) en cada una de las fechas de siembra (Figura 5a), excepto para la fecha 15-oct cuando las láminas de agua en R1 y R1+10d no se diferenciaron significativamente ( $p=0,07927$ ). Con el ciclo intermedio (Figura 5b), el patrón temporal de menor lámina en R1 que la lámina previa (R1-20d y R1-10d) se cumplió en cada fecha de siembra, excepto en 15-oct, cuando las láminas de agua en R1 y R1-10d no se diferenciaron significativamente ( $p=0,07927$ ). A su vez, hubo en el suelo mayor lámina en R1 que en los momentos posteriores en cada una de las fechas de siembra, excepto las dos primeras, cuando las láminas en R1 y R1+10d no se diferenciaron significativamente ( $p=0,17619$  y  $p=0,08076$ , para 25-set y 5-oct, respectivamente). Para ciclo largo (Figura 5c), la lámina de agua en el suelo

en floración (R1) fue significativamente ( $p<0,05$ ) menor que la lámina de agua previa (R1-20d y R1-10d) y a su vez, mayor que la lámina posterior a R1 (R1+10d y R1+20d), con excepción a este patrón en las dos primeras fechas de siembra evaluadas que mostraron que las láminas de R1 y R1-10d no fueron significativamente diferentes ( $p=0,19489$  y  $p=0,12852$ , para 25-set y 5-oct, respectivamente).

En esta localidad, el cambio de ciclo de madurez para una determinada fecha de siembra produjo menos efecto en la condición hídrica que en Azul. No se modificó al inicio del PC (R1-20d), excepto para las siembras de 25-set ( $p=0,0257$ ) y 15-oct ( $p=0,0457$ ), cuando el ciclo largo llegó con menor lámina de agua en el suelo. Debe indicarse, que justamente si se seleccionan ciclos largos las fechas tempranas serían las indicadas para lograr mayor productividad y evitar otros riesgos climáticos (Panunzio Moscoso *et al.*, 2016). Tampoco hubo diferencias entre ciclos en R1, excepto para la última fecha de siembra ( $p=0,0083$ ) para la cual el ciclo largo resultó con menor lámina. Al final del PC y cualquiera sea la fecha de siembra, la condición hídrica alcanzada para los tres ciclos no fue significativamente diferente ( $p>0,05$ ).

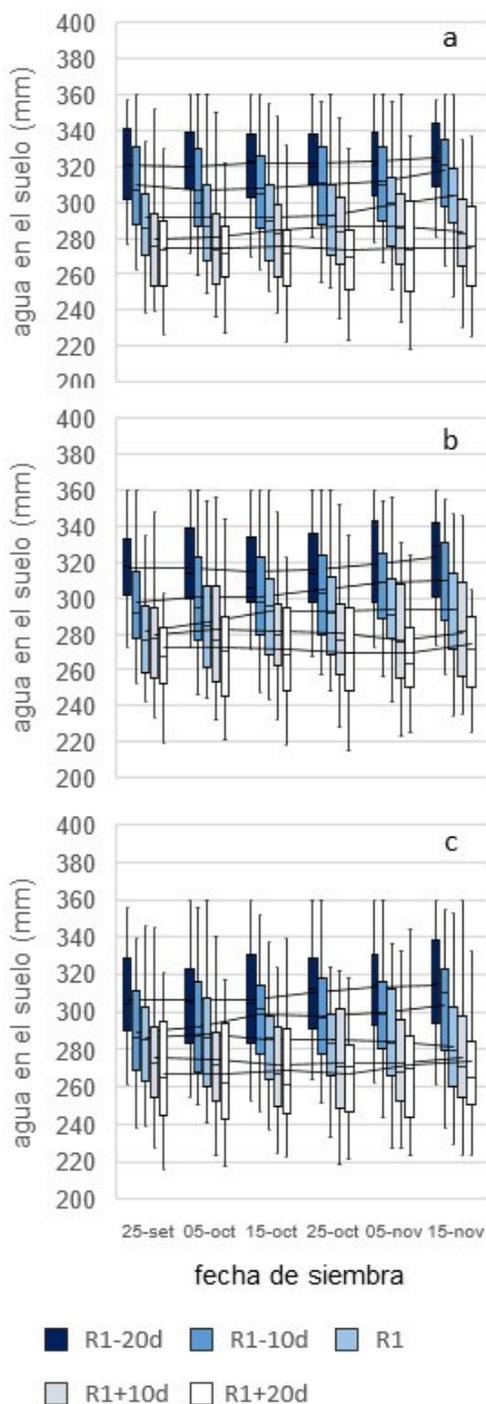
La lámina de agua en floración (R1), en Tandil, se correlacionó mejor a través de todas las fechas de siembra evaluadas con la lámina de agua en los momentos más próximos dentro del PC (R1-10d y R1+10d, con ciclos de cultivo corto e intermedio, respectivamente), que con la lámina al inicio o fin del período crítico (R1-20d y R1+20d), cuando esos coeficientes se redujeron o incluso se tornaron no significativos (Figura 6 a y b). La lámina al final del PC presentó coeficientes significativos para todas las fechas de siembra (polígono cerrado) solamente con ciclo largo (Figura 6 c), aunque estos fueron más bajos que al momento R1+10d.

En Balcarce, al comparar la variación del agua en el suelo entre los momentos del PC, pudo destacarse que para los ciclos de madurez corto e intermedio (Figura 7a y 7b), la lámina de agua en el suelo en R1 fue significativamente menor ( $p<0,05$ ) que la lámina de agua previa (R1-20d y R1-10d) y a su vez, mayor ( $p<0,05$ ) que la lámina de agua posterior (R1+10d y R1+20d), en cada una de las fechas de siembra evaluadas. Por lo tanto, se verificó el mismo patrón temporal que en Azul para los dos ciclos de madurez. Con el ciclo largo (Figura 7c) se encontró la misma relación entre los momentos previos y posteriores a R1, excepto en la primera fecha de siembra (R1=R1+10d,  $p=0,08692$ ) y en las dos últimas fechas de siembra después de floración (R1=R1+10d,  $p=0,33724$  y  $p=0,13786$  para 5-nov y 15-nov, respectivamente y R1=R1+20d,  $p=0,121$  y

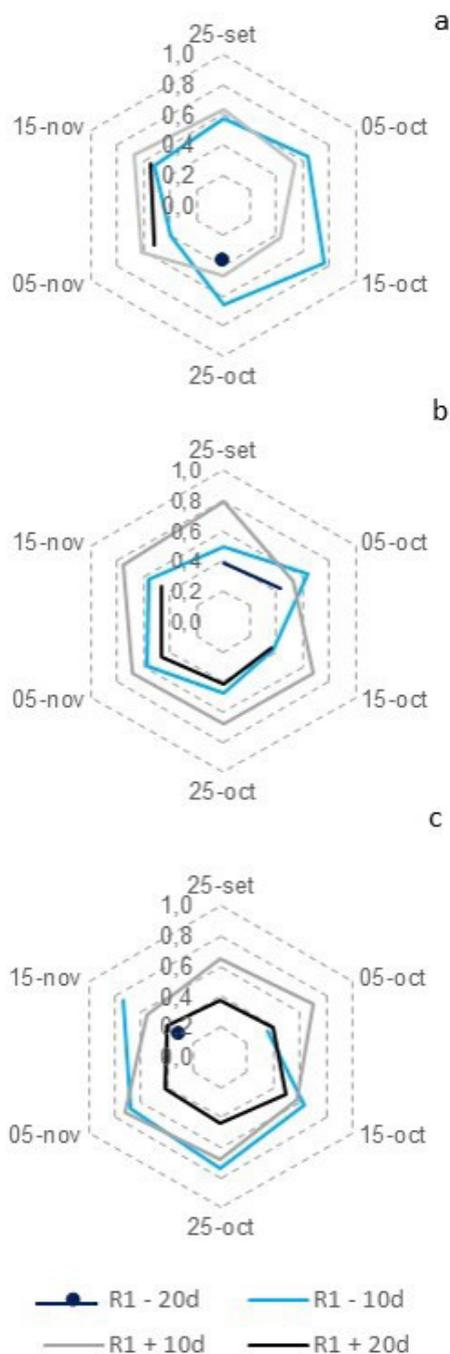


**Figura 3.** Variabilidad interanual de la lámina de agua en el suelo (perfil de 1 m de profundidad) durante el período crítico de maíz según ciclo de madurez y fecha de siembra en Azul (serie 1971-2010). a. ciclo corto. b. ciclo intermedio, c. ciclo largo. R1: floración. Tiempo a floración (R1): -d (días antes de floración), +d (días después de floración).

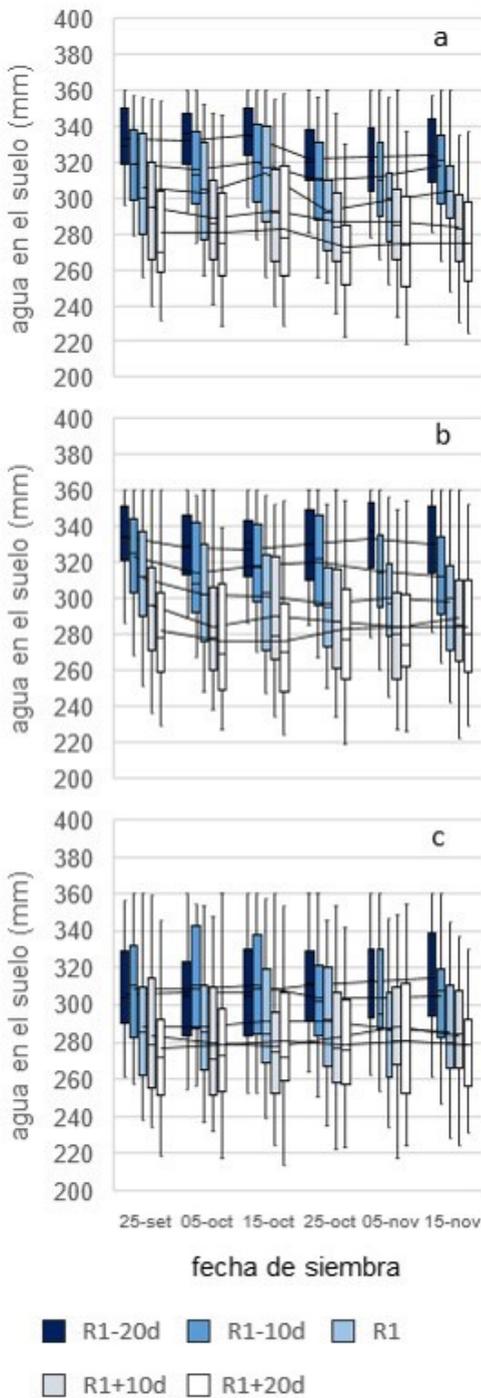
**Figura 4.** Coeficientes de correlación de Spearman significativos ( $p < 0,05$ ) entre la lámina de agua en el suelo en floración (R1) y la lámina de agua en cuatro momentos durante el período crítico de maíz en Azul (serie 1971-2010). a. ciclo corto. b. ciclo intermedio, c. ciclo largo. R1: floración. Tiempo a floración (R1): -d (días antes de floración), +d (días después de floración). Polígonos cerrados indican coeficientes significativos en todas las fechas de siembra.



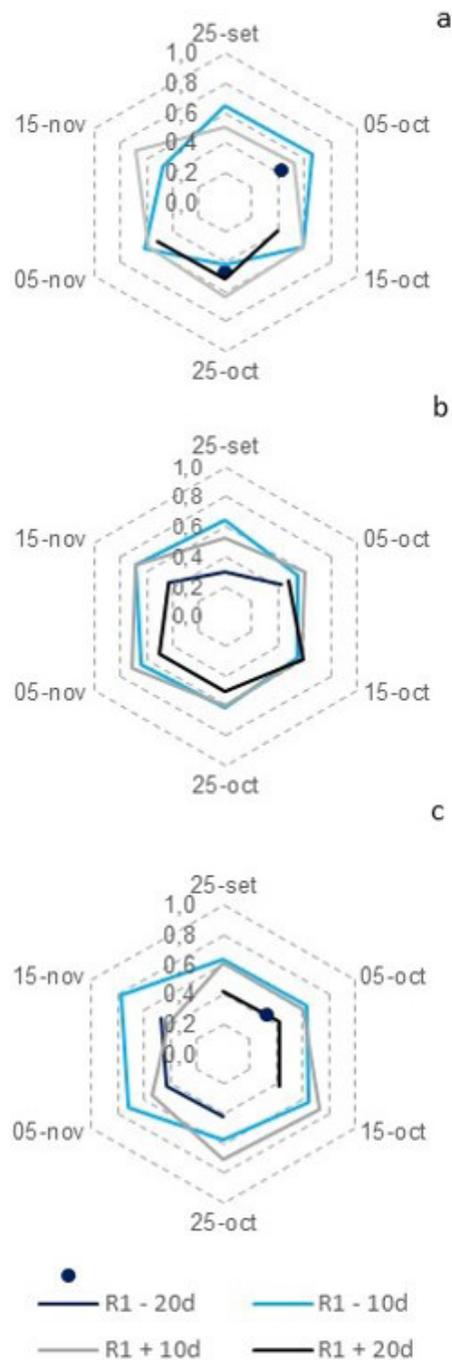
**Figura 5.** Variabilidad interanual de la lámina de agua en el suelo (perfil de 1 m de profundidad) durante el período crítico de maíz según ciclo de madurez y fecha de siembra en Tandil (serie 1971-2010). a. ciclo corto. b. ciclo intermedio. c. ciclo largo. R1: floración. Tiempo a floración (R1): -d (días antes de floración), +d (días después de floración).



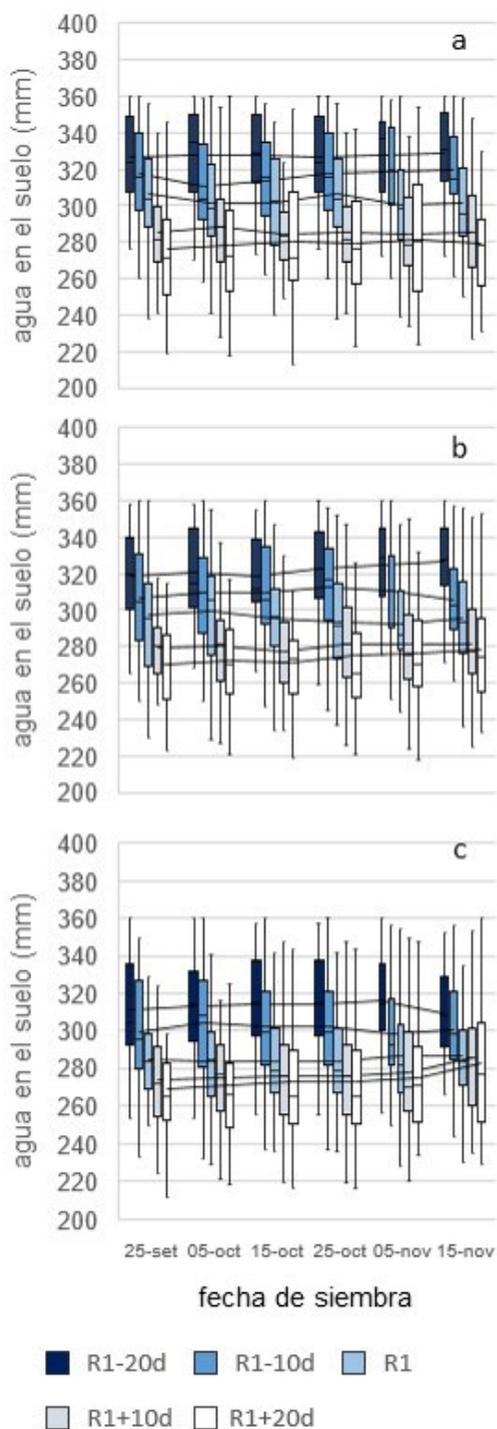
**Figura 6.** Coeficientes de correlación de Spearman significativos ( $p < 0,05$ ) entre la lámina de agua en el suelo en floración (R1) y la lámina de agua en cuatro momentos durante el período crítico de maíz en Tandil (serie 1971-2010). a. ciclo corto. b. ciclo intermedio. c. ciclo largo. R1: floración. Tiempo a floración (R1): -d (días antes de floración), +d (días después de floración). Polígonos cerrados indican coeficientes significativos en todas las fechas de siembra y puntos indican una única fecha o fechas no consecutivas con coeficientes significativos.



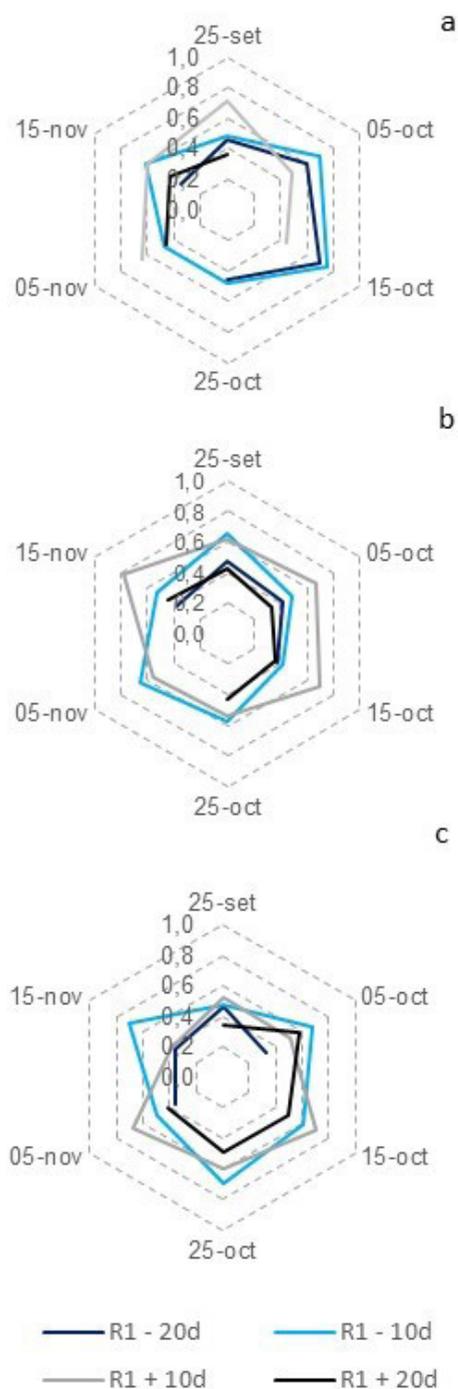
**Figura 7.** Variabilidad interanual de la lámina de agua en el suelo (perfil de 1 m de profundidad) durante el período crítico de maíz según ciclo de madurez y fecha de siembra en Balcarce (serie 1971-2010). a. ciclo corto. b. intermedio, c. ciclo largo. R1: floración. Tiempo a floración (R1) -d (días antes de floración), +d (días después de floración).



**Figura 8.** Coeficientes de correlación de Spearman significativos ( $p < 0,05$ ) entre la lámina de agua en el suelo en floración (R1) y la lámina de agua en cuatro momentos durante el período crítico de maíz en Balcarce (serie 1971-2010). a. ciclo corto. b. ciclo intermedio, c. ciclo largo. R1: floración. Tiempo a floración (R1): -d (días antes de floración), +d (días después de floración). Polígonos cerrados indican coeficientes significativos en todas las fechas de siembra y puntos indican una única fecha o fechas no consecutivas con coeficientes significativos.



**Figura 9.** Variabilidad interanual de la lámina de agua en el suelo (perfil de 1 m de profundidad) durante el período crítico de maíz según ciclo de madurez y fecha de siembra en Mar del Plata (serie 1971-2010). a. ciclo corto. b. intermedio, c. ciclo largo. R1: floración. Tiempo a floración (R1): -d (días antes de floración), +d (días después de floración).



**Figura 10.** Coeficientes de correlación de Spearman significativos ( $p < 0,05$ ) entre la lámina de agua en el suelo en floración (R1) y la lámina de agua en cuatro momentos durante el período crítico de maíz en Mar del Plata (serie 1971-2010). a. ciclo corto. b. ciclo intermedio, c. ciclo largo. R1: floración. Tiempo a floración (R1): -d (días antes de floración), +d (días después de floración). Polígonos cerrados indican coeficientes significativos en todas las fechas de siembra.

$p=0,11123$  para 5-nov y 15-nov, respectivamente). El ciclo de madurez no modificó el agua en el suelo al inicio del PC para los escenarios con fechas de siembra desde 05-oct a 05-nov ( $p>0,05$ ), mientras que, para las dos fechas extremas del conjunto evaluado, 25-set ( $p=0,0758$ ) y 15-nov ( $p=0,0015$ ), el ciclo largo llegó a R1-20d con menor lámina de agua en el suelo. Ya en floración, se verificaron diferencias significativas entre ciclos en todas las fechas (ciclo largo con menor agua en el suelo), excepto en 05-oct ( $p=0,0758$ ). No se detectaron diferencias significativas entre ciclos después de la floración (R1+10d y R1+20d) cualquiera sea la fecha de siembra. En esta localidad también se detectó un patrón de mayor asociación de la lámina de agua en el suelo a floración con los momentos más próximos dentro del PC (R1-10d y R1+10d) (Figura 8).

En Mar del Plata, un patrón temporal con menor lámina de agua en R1 que las láminas previas (R1-20d y R1-10d) y mayor que las láminas posteriores (R1+10d y R1+20d) se verificó para cada ciclo de madurez en cada fecha de siembra (Figura 9), excepto para el ciclo largo en la fecha de 15-nov (R1=R1+10d y R1=R1+20d,  $p>0,05$ ). El agua en el suelo al inicio del PC (R1-20d) no se diferenció por efecto del ciclo de madurez desde 05-oct a 05-nov (al igual que en Balcarce), mientras que para las fechas extremas 25-set ( $p=0,0390$ ) y 15-nov ( $p=0,0005$ ) se verificó menor agua en el suelo con siembra de ciclo largo. A floración se observaron diferencias significativas entre ciclos, excepto en las fechas de 5-nov ( $p=0,0598$ ) y 15-nov ( $p=0,0620$ ). No se detectaron diferencias entre los ciclos al final del PC (R1+20d), excepto en la fecha de siembra temprana ( $p=0,5814$ ), en la cual el ciclo corto mostró mejor condición hídrica. También en esta localidad, la lámina de agua en floración (R1) se correlacionó mejor a través de todas las fechas de siembra con la lámina de agua en los momentos más próximos dentro del PC que con la lámina al inicio o fin del período crítico, cuando esos coeficientes se redujeron o incluso se tornaron no significativos (Figura 10).

Si bien la ubicación del período crítico en el calendario varió dentro de la región en estudio por la fecha de ocurrencia de R1 (Tabla 3, Figura 2), la lámina de agua en el suelo no difirió entre localidades en los cinco momentos del PC para la mayoría de los escenarios de fecha de siembra y ciclo de madurez (21 en 30 combinaciones por ciclo= cinco momentos del PC x seis fechas de siembra). Se verificó que hubo diferencias en la lámina de agua en el suelo entre localidades para el ciclo corto en R1-10d con la fecha 25-oct ( $p=0,00447$ ) y luego en R1 con las fechas 15-

oct ( $p=0,0212$ ) y 25-oct ( $p=0,0088$ ), en todos los casos Balcarce fue la localidad con una lámina de agua mayor en el suelo dentro de la región y no hubo diferencias entre las restantes localidades. El ciclo intermedio mostró diferencias significativas ( $p<0,05$ ) entre localidades en la siembra de 25-set en cuatro de los momentos evaluados (solamente no hubo diferencias en R1+20d,  $p=0,2623$ ) y en la siembra de 15-oct en R1-20d ( $p=0,0383$ ), con menor lámina de agua en el suelo en Tandil. Por su parte, con el ciclo largo solamente hubo diferencias entre localidades en R1-10d con siembra del 25-set ( $p=0,047$ ), con menor lámina de agua en el suelo en Tandil.

A nivel regional, la fracción de agua disponible (lámina de agua en el suelo/ agua disponible en el perfil), cuando se expresó como promedio de todos los ciclos, fechas de siembra y localidades alcanzó 0,76, 0,59 y 0,47, para R1-20d, R1 y R1+20d, respectivamente. Cabe destacar que en el análisis probabilístico solamente entre los ciclos 1 (corto) y 3 (largo) se habían encontrado diferencias significativas en las deficiencias acumuladas durante el PC, aunque no en todas las fechas de siembra y localidades y, conforme las disminuciones de rendimiento debidas a la falta de agua en toda la estación de crecimiento (EC) se habían recomendado las siembras de ciclo intermedios y largos (Panunzio Moscoso *et al.*, 2016b) bajo condiciones de secano.

La evaluación de modelos para estimar tempranamente el rendimiento del cultivo en la región proponía una ventana de 30 días de extensión promediando las condiciones del cultivo para el mes de diciembre (Holzman *et al.*, 2018). De acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo, se sugiere que esa ventana como indicadora del período crítico puede resultar anticipada respecto al momento de ocurrencia del PC que se ha caracterizado para varias de las combinaciones de manejo agronómico (Tabla 3), que son frecuentes en la región. De esa manera, se entiende que es plausible la evaluación del modelo atendiendo que la fecha de siembra y ciclo de madurez pueden reubicar esa ventana de tiempo.

## CONCLUSIONES

En la región centro-sudeste de Buenos Aires fue posible describir un patrón de la variación del agua en el suelo durante el período crítico del cultivo de maíz que se repite en la mayoría de los escenarios agrícolas y que permite indicar que la lámina de agua en el suelo observada (o estimada por algún otro método) al inicio del PC es mayor

que la lámina de agua en la floración y que al final del período crítico.

A nivel regional, las prácticas de manejo pueden generar una condición hídrica diferente según la localidad. Así se distinguió Tandil, localidad con menor efecto del ciclo de madurez que el resto de las localidades, ya que el cambio de ciclo para una determinada fecha de siembra produjo efecto solamente en cuatro de las 30 combinaciones (5 momentos dentro del período crítico x 6 fechas de siembra). En las localidades de Azul, Balcarce y Mar del Plata, con mayores diferencias entre los ciclos (entre 10 y 12 de las 30 combinaciones) se detectó una tendencia a alcanzar menor lámina de agua en el suelo con la elección de ciclo largo.

Por su interés para la modelización, puede destacarse que la ventana de tiempo desde 10 días antes a 10 días después de floración presentó un patrón homogéneo dentro de la región en la asociación temporal, dado que los coeficientes de correlación entre la lámina de agua en floración ( $R_1$ ) y la lámina de agua en los momentos previos y posteriores se mantienen a través de las fechas de siembra evaluadas, independientemente del ciclo de madurez del cultivo.

La identificación del inicio y fin del período crítico (PC) a partir del análisis probabilístico sobre un rango amplio de manejo agronómico contribuye al desarrollo y evaluación de modelos de pronóstico de rendimiento a escala regional basados en índices con ventanas de tiempo variables.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMdP) que ha provisto la financiación del presente trabajo en el marco del proyecto "Pronóstico anticipado de rendimiento de maíz con modelos basados en redes neuronales artificiales e índices obtenidos por satélites (UNMdP-AGR558/18). A. Irigoyen y R. Rivas son investigadores de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC). M. Holzman y L. Echarte son investigadores del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Conicet).

## BIBLIOGRAFÍA

Aliaga, V.S.; F. Ferrelli and M.C. Piccolo, 2017. Regionalization of climate over the Argentine Pampas. *Int. J. Climatol.* DOI: 10.1002/joc.5079.

Allen, R.G.; L.S. Pereira, D. Raes and M. Smith, 1998.

Crop evapotranspiration- Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper N°56, Roma. 300pp.

- Andrade, F.; Cirilo, A.; Uhart, S.; M.E. Otegui. 1996. Ecofisiología del cultivo de maíz. Dekalb Press. 292 p.
- Andrade, F.H., and V.O. Sadras. 2002. Efectos de la sequía sobre el crecimiento y rendimiento de los cultivos. p. 175–210. In F.H. Andrade and V.O. Sadras (ed.) Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. 2° edición, Balcarce, Argentina.
- Cabria, F.N.; Lhomme, F.; A.I. Irigoyen, 2006. Determinación del régimen de humedad en suelos del partido de Balcarce a partir del balance de agua diario seriado. Actas de XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Editadas en CD: 5 p. Salta-Jujuy (Argentina).
- Calviño, P.A.; F.H. Andrade and V.O. Sadras, 2003. Maize yield as affected by water availability, soil depth and crop management. *Agronomy Journal* 95:275–28.
- Cambareri, M.A.; A.I. Irigoyen, L. Echarte y E. Fereres, 2018. Evapotranspiración y eficiencia en el uso del agua de maíz sobre cultivo de cobertura en el sudeste bonaerense. I. Condiciones de secano. Actas de XVII Reunión Argentina de Agrometeorología. Villa de Merlo (Argentina).
- 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.; A.I. Irigoyen, J.M. Gardiol, 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* II (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. Congreso Brasileiro de Agrometeorología, Brasil. pp. 315–316.
- Della Maggiora, A.I.; L.C. Malena, L. Echarte y A.I. Irigoyen, 2008. Deficiencia hídrica de un cultivo de maíz ciclo intermedio en el sudeste bonaerense. En: Actas de XII Reunión Argentina de Agrometeorología. Editadas en CD: 2 p. San Salvador de Jujuy (Argentina).
- Echarte L. and M. Tollenaar, 2006. Kernel set in maize hybrids and their inbred lines exposed to stress. *Crop Sci* 46: 870-878.
- Gardiol, J.M.; A.I. Irigoyen, A.I. Della Maggiora y V. Silva. 1997. Patrón de extracción de agua de cultivos de maíz y soja en Balcarce. *Revista de la Facultad de Agronomía UBA*. Tomo 17 N° 1:137-142.
- Hernández, M.; L. Echarte, A. Della Maggiora, M. Cambareri, P. Barbieri and D. Cerrudo, 2015. Maize

- water use efficiency and evapotranspiration response to N supply under contrasting soil water availability. *Field Crops Research* 178: 8–15.
- Holzman, M.E. and R.E. Rivas, 2016. Early maize yield forecasting from remotely sensed temperature/vegetation index measurements. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Rem. Sens.* 9: 507–519.
- Holzman, M.E.; F. Carmona, R.E. Rivas and R. Niclós, 2018. Early assessment of crop yield from remotely sensed water stress and solar radiation data. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 145: 297–308.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), 2016. Cartas de Suelo de la República Argentina-Provincia de Buenos Aires. <http://anterior.inta.gov.ar/suelos/cartas/> (consultada el 10/03/2016).
- Irigoyen, A.I.; A.I. Della Maggiora y F.N. Cabria, 2004a. 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. Della Maggiora y J.M. Gardiol. 2004b. Estimación de la evapotranspiración de referencia a partir de un modelo sencillo basado en en déficit de presión de vapor para la localidad 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. Planning the growing season for maize based on climatic variability: I. Soil water balance. En: *Anais do V Congresso Brasileiro de Meteorologia*. Editadas en CD: 5 p. Piracicaba (Brasil).
- Irigoyen, A.I.; M.A. Cambareri, L. Echarte, M.I. Bayala y R.E. Rivas, 2018. Efectos de la cobertura de la superficie, agua y nitrógeno sobre atributos del canopeo de maíz en panojamiento. *Revista Argentina de Agrometeorología IX*: 75-84.
- Irigoyen, A.I.; M. A. Cambareri, L. Echarte y R. E. Rivas, 2019. Evolución del área foliar en canopeos de maíz creciendo sobre cultivo de cobertura y sobre barbecho limpio bajo condiciones contrastantes de agua en el suelo. *Revista Argentina de Agrometeorología X*: 25-34.
- 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.
- Otegui M.E. and R. Bonhomme, 1998. Grain yield components in maize: I. Ear growth and kernel set. *Field Crops Research* 56: 247–256.
- 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 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, 2016a. 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, 2016b. 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.
- Pazos, M. and S. Mestelán, 2002. Variability of depth to tosca in Udolls and soil classification, Buenos Aires Province, Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:1256–1264.
- Poza, F.; A.I. Irigoyen, A. Della Maggiora y O. Caviglia. 2005. Variación de agua en el suelo bajo un cultivo de maíz de ciclo intermedio a corto en condiciones de riego y secano en Balcarce (Arg.). *Anais de XIV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia*. Editado en CD: 2 p. Campinas (Brasil).
- Ritchie, J.T. and D.S. NeSmith, 1991. Temperature and crop development. *Modeling Plant and Soil Systems*. *Agronomy Monog.* 31: 5–29.
- Rubio, G.; F.X. Pereyra and M.A. Taboada, 2019. Soils of the Pampean Region. In: G. Rubio, R. Lavado and X. Pereira. (Eds.), *The Soils of Argentina, World Soils Book Series*, Springer, Madison, USA, pp. 81–100.
- Singh, B.R. and D.P. Singh, 1995. Agronomic and physiological responses of sorghum, maize, and pearl millet to irrigation. *Field Crops Research* 42 (2-3): 57–67.
- Travasso, M.I. y E.E. Suero, 1994. Estimación de la capacidad de almacenaje de agua en suelos del sudeste bonaerense. *Boletín técnico N°125*. CERBAS INTA Balcarce. Balcarce, Argentina. 9 p.