ClimaCrop: UNA PLATAFORMA PARA LA EVALUACIÓN DE RESTRICCIONES CLIMÁTICAS DURANTE ETAPAS FENOLÓGICAS DEL MAÍZ EN EL NORESTE ARGENTINO

Kettler, B.A.[1,2], Nalli Sonzogni, F.D. [1,2]; Boscarino, S. [1,2]; Namtz, Y. [1]; Maddonni, G.Á. [2,3,4]; Neiff, N. [1,5]

1 Centro de Ecofisiología Vegetal, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Nordeste. Corrientes, Argentina.
2 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.
3 Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Departamento de Producción Vegetal, Cátedra de Cerealicultura, Av. San Martín 4453, Buenos Aires C1417DSE, Argentina
4 Facultad de Agronomía, IFEVA, Universidad de Buenos Aires, CONICET, Buenos Aires, Argentina
5 Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola (AACREA)

ClimaCrop: THE PLATFORM FOR ASSESSING CLIMATIC CONSTRAINTS DURING PHENOLOGICAL STAGES OF MAIZE IN NORTHEASTERN ARGENTINA

Abstract

ClimaCrop is an open access web-based platform developed to analyze the risk of climatic constrains for maize production across different sowing dates and locations in the northeastern region of Argentina. Using historical meteorological data and knowledge of crop phenology, the tool allows users to assess the occurrence of various climate events—characterized by indices—during some phenological stages, such as the critical period for grain number determination and the grain-filling period. Through a simple interface, users can select the location, sowing date, and phenological stage to explore the historical distribution of variables such as cumulative precipitation and reference evapotranspiration, extreme temperatures, warm nights, and frost risk, among others. Additionally, ClimaCrop calculates probabilities and percentiles of each climatic constraint to facilitate climate risk assessment of each scenario (combination of location and sowing date) for better crop management planning.

Palabras clave: plataforma, alta temperatura, precipitaciones, fechas de siembra, frecuencias acumuladas.
Keywords: platform, high temperature, rainfall, sowing dates, cumulative frequencies.

Introducción

La producción actual de maíz en Argentina abarca regiones con diversas restricciones ambientales. En el Noreste Argentino (NEA) la producción de maíz se enfrenta a una elevada frecuencia de golpes de calor y noches cálidas, junto con eventos de déficit hídrico que pueden ocurrir de manera conjunta durante el período crítico o el llenado de granos de maíz (Kettler et al., 2025). Estos estreses pueden reducir el crecimiento y el rendimiento en el cultivo de maíz (Otegui et al., 1995; Cicchino et al., 2010; Rattalino Edreira y Otegui, 2012; Neiff et al., 2016; Boscarino et al., 2026) mediante reducciones en la fotosíntesis (Neiff et al., 2016; Kettler et al., 2022), incrementos en la respiración nocturna (Kettler et al., 2022), y efectos directos sobre rasgos reproductivos (Boscarino et al., manuscrito enviado).

La predicción probabilística de la ocurrencia de estos eventos constituye una herramienta valiosa para productores y asesores técnicos al momento de definir la fecha de siembra. En efecto, esta región cuenta con una ventana potencial de siembra muy amplia, debido principalmente al extendido período libre de heladas (Maddonni, 2012; Kettler et al., 2025) que permite desplazar el periodo crítico o el llenado de granos hacia momentos del año con menor probabilidad de ocurrencia de estos eventos.

Recientemente, Kettler et al. (2025) simularon la fenología del cultivo de maíz para siete fechas de siembra en seis localidades representativas del NEA, cuantificando la frecuencia de ocurrencia de altas temperaturas y déficit hídrico durante el período crítico y el llenado de granos. Si bien esta información constituye una base valiosa para la planificación del cultivo, su difusión en revistas científicas suele limitarse al ámbito académico. El objetivo del trabajo fue desarrollar una plataforma accesible para productores, docentes e investigadores que integra los conocimientos generados por Kettler et al. (2025) y permite simular escenarios climáticos de restricción en diferentes periodos fenológicos del cultivo en función de la fecha de siembra para un conjunto de localidades del NEA.

Metodología

Desarrollo de la plataforma: se desarrolló una aplicación web interactiva denominada ClimaCrop (versión beta) utilizando el lenguaje de programación R mediante el paquete *shiny* (Chang et al., 2025).

La plataforma se organizó en dos módulos: *Clima Anual* y *Riesgo Climático*. El primero permite visualizar la evolución diaria de variables meteorológicas (temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación), comparando un año específico con la serie climatológica histórica de la localidad seleccionada. Además de la serie correspondiente al año de interés, se representan la media histórica y el rango de variación registrado durante el período analizado, facilitando la identificación de anomalías térmicas o pluviométricas (e.g. temperaturas máximas Fig. 1).

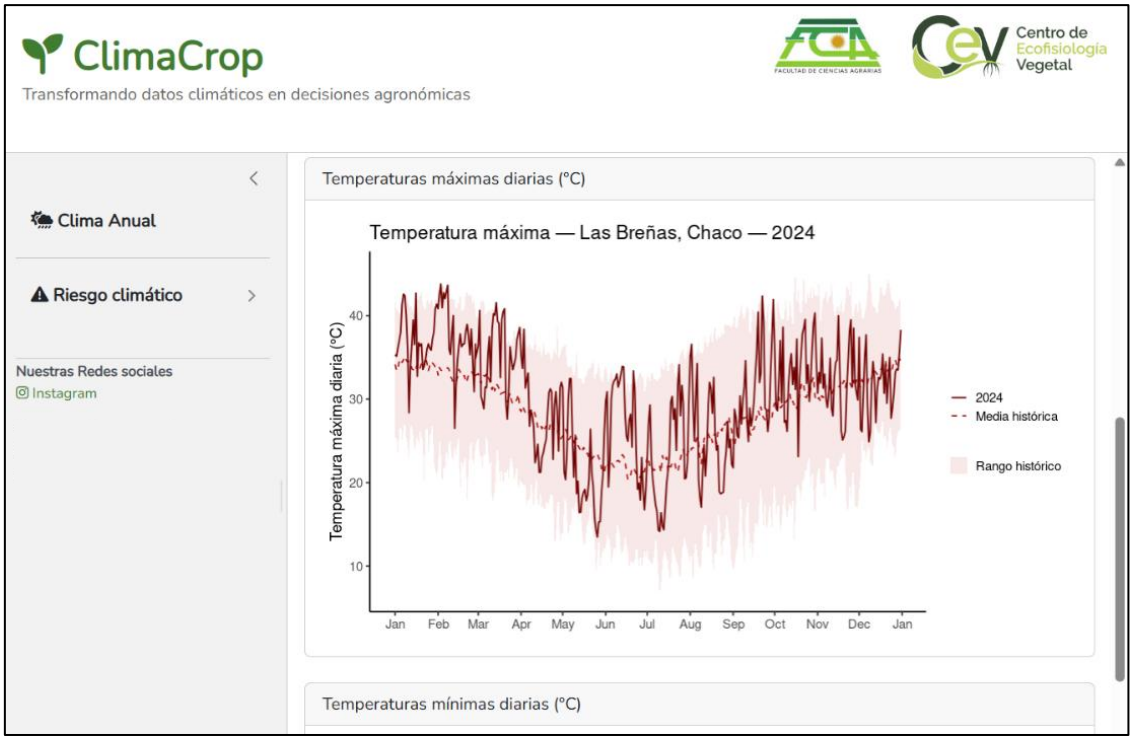

Figura 1. Interfaz del módulo Clima Anual de ClimaCrop. En este ejemplo, el módulo permite visualizar la evolución diaria de la temperatura máxima, comparando un año seleccionado con la climatología histórica de la localidad elegida.

El módulo *Riesgo climático* integra la información climática con la fenología simulada del cultivo para analizar la ocurrencia de restricciones ambientales durante el período crítico y el llenado de granos. A partir de la selección de la localidad, la fecha de siembra y el índice climático de interés (Fig. 2), la plataforma presenta distribuciones de frecuencia acumulada, percentiles históricos, probabilidades de ocurrencia y comparaciones entre fechas de siembra mediante diagramas de caja.

La aplicación fue implementada en la plataforma *shinyapps.io,* permitiendo su acceso desde cualquier dispositivo con conexión a internet sin requerir la instalación de software específico.

Figura 2. Detalles de una sección del panel Riesgo Climático. Este módulo permite seleccionar la localidad, fecha de siembra, período de análisis y el índice climático que se desea evaluar.

Localidades climatología y fechas de siembra: la plataforma incorpora información correspondiente a seis localidades contrastantes de la región NEA, ubicadas al norte del paralelo 30°S y al este del meridiano 63°O, que abarcan un amplio gradiente ambiental de altitud (61 a 270 m s.n.m.) y precipitación anual (998 a 2023 mm). Las localidades incluidas son: El Colorado (Formosa; 26,3°S, 59,4°O), Las Breñas (Chaco; 27,1°S, 61,1°O), Colonia Benítez (Chaco; 27,4°S, 58,9°O), Cerro Azul (Misiones; 27,6°S, 55,5°O), Reconquista (Santa Fe; 29,2°S, 59,7°O) y Mercedes (Corrientes; 29,2°S, 58°O).

Las series climáticas se obtuvieron del Sistema de Información y Gestión Agrometeorológica (SIGA-INTA, http://siga.inta.gob.ar/#/data), comprendiendo los registros diarios de temperaturas máximas y mínimas (TX y Tx, respectivamente), y precipitaciones correspondientes al periodo 1981-2025. Los datos faltantes fueron completados utilizando información proveniente de NASA POWER. Para cada localidad se incluyeron siete fechas de siembra, distribuidas entre el 10 de agosto y el 10 de febrero, empleando una fecha por mes. Adicionalmente, se estimó la evapotranspiración de referencia (ETo), siguiendo el método de FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998).

Fenología del cultivo: en la plataforma, el usuario tiene la posibilidad de seleccionar el período crítico o el llenado de granos del cultivo para analizar la ocurrencia de las restricciones climáticas. La variabilidad interanual de la fenología para cada combinación localidad × fecha de siembra fue simulada mediante el modelo CERES-MAIZE (Jones et al., 1986), asumiendo un intervalo antesis-silking (R1) muy reducido en los híbridos comerciales actuales. El período crítico se definió como el intervalo comprendido entre −220 y +200 °Cd respecto de la antesis del cultivo, considerando una temperatura base de 8°C (Maddonni, 2012). El período de llenado de granos se estableció desde la finalización del período crítico hasta la madurez fisiológica.

Índices climáticos: se utilizaron los índices climáticos propuestos por Kettler et al. (2025), incluyendo la cantidad de mm de lluvia acumulados durante los 10 días previos a la siembra, la cantidad de días con temperaturas máximas ≥ 35°C (DTX+35) y temperaturas mínimas ≥ 23°C (DTx+23), la sumatoria de grados por encima de dichos umbrales (STX+35 y STx+23, respectivamente), la cantidad de días con riesgo de heladas y su intensidad (expresada como la cantidad de grados acumulados por debajo del umbral utilizado). El evento de helada se contabilizó cuando la temperatura mínima fue menor a 2°C, según lo propuesto por Maddonni et al. (2012). Además, la plataforma incorpora indicadores de precipitación acumulada, evapotranspiración de referencia y balance hídrico climático durante los períodos fenológicos analizados. Los resultados se presentan mediante distribuciones de frecuencia acumulada, diagramas de caja y estadísticas descriptivas que permiten caracterizar la variabilidad climática histórica de cada escenario.

Resultados

La plataforma ClimaCrop en versión “beta” permitió integrar y visualizar de manera interactiva la información climática histórica correspondiente a los distintos escenarios evaluados. La consulta dinámica de los diferentes índices facilita la cuantificación de la frecuencia de ocurrencia de restricciones ambientales y su comparación entre localidades, períodos fenológicos y fechas de siembra, constituyendo una herramienta para apoyar la planificación del cultivo de maíz en el NEA.

Evaluación de índices

Como ejemplo de aplicación, la Figura 3 muestra la frecuencia acumulada de la lluvia durante los 10 días previos a la siembra para una determinada localidad y fecha de siembra. Además, esquematiza en una tabla los valores de la variable para los percentiles principales (0.25, 0.50 y 0.75). El gráfico de frecuencias es interactivo, por lo que el usuario puede desplazar el cursor a lo largo de la línea para conocer los valores de precipitación acumulada en diferentes valores de frecuencia. Como se puede ver, para la localidad seleccionada, la fecha de siembra del 10-sep (considerada como temprana), resultaría muy riesgosa dado que en dos de cada cuatro años (i.e., percentil 50) llovería al menos 2.3 mm durante los 10 días previos a la fecha de siembra.

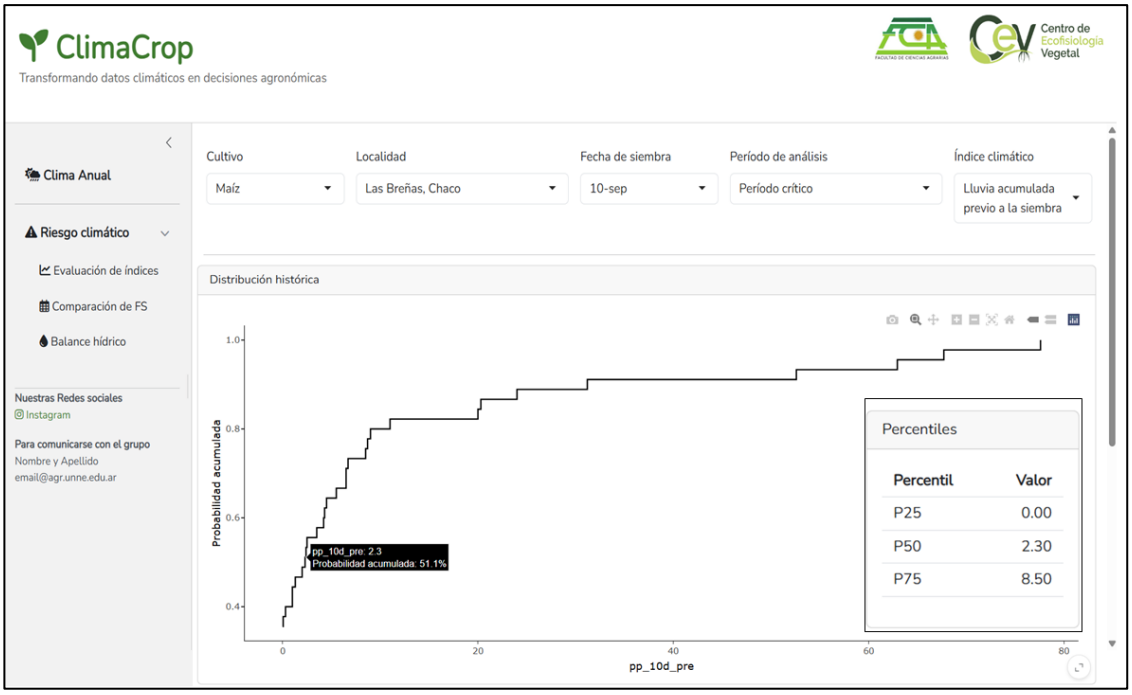

Figura 3. Ejemplo de la salida generada por la sub-sección "Evaluación de índices", dentro del módulo Riesgo Climático de ClimaCrop. La figura muestra la distribución de frecuencia acumulada de la lluvia acumulada durante los 10 días previos a la siembra para la localidad de Las Breñas (Chaco), correspondiente a la fecha de siembra del 10 de septiembre. Como inserto se presentan los principales percentiles de la distribución, los cuales complementan la interpretación probabilística del índice climático.

Comparación entre fechas de siembra

La comparación entre fechas de siembra permite identificar diferencias en la variabilidad histórica de los distintos índices climáticos. Esta información facilita evaluar el compromiso entre distintas fechas de siembra y seleccionar aquellas con menor probabilidad de ocurrencia de eventos adversos.

Como ejemplo de aplicación, la Figura 4 muestra la distribución de la evapotranspiración acumulada durante el período crítico para las siete fechas de siembra disponibles para una determinada localidad. La plataforma resalta la fecha de siembra seleccionada por el usuario, facilitando su comparación con el resto de las alternativas y permitiendo evaluar tanto los valores centrales como la variabilidad interanual del índice. En este caso, se observa una disminución progresiva de la evapotranspiración acumulada hacia las fechas de siembra más tardías, lo que

evidenciaría un ambiente menos demandante en términos hídricos durante el período crítico alrededor de floración.

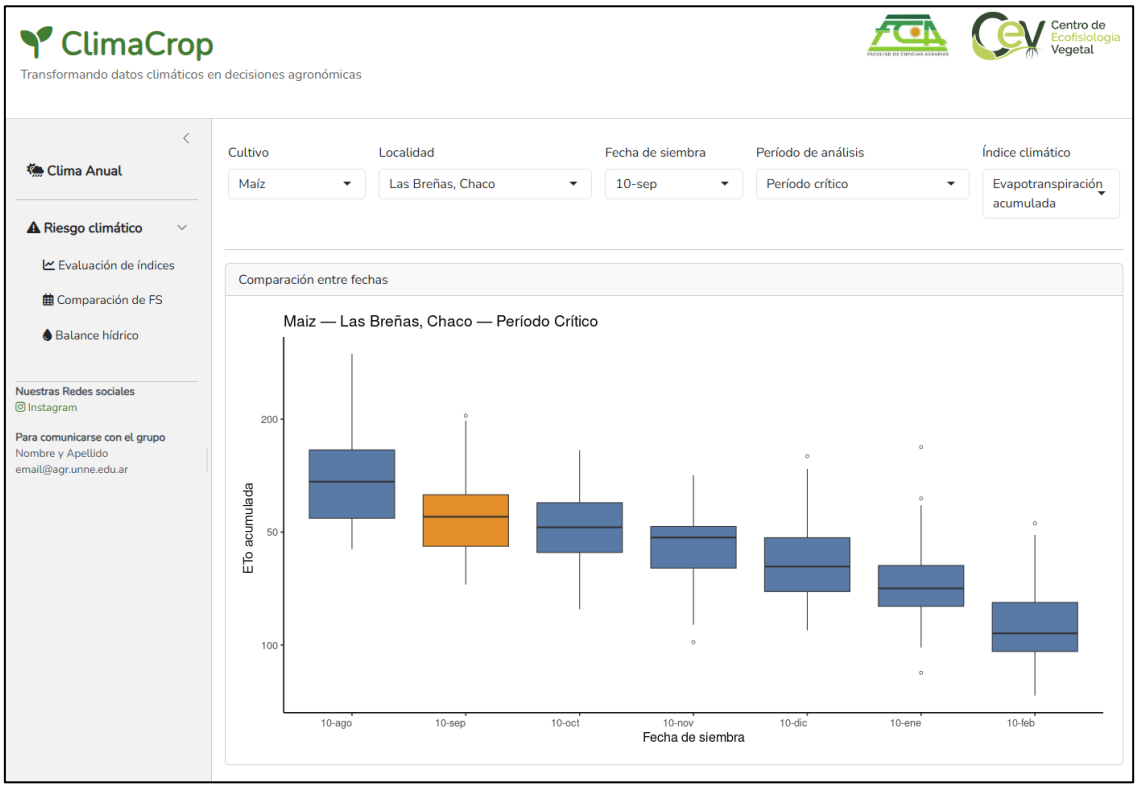

Figura 4. Ejemplo de la salida generada por la sub-sección "Comparación de fechas de siembra" del módulo Riesgo Climático de ClimaCrop. La figura muestra la distribución histórica de la evapotranspiración acumulada (ETo_acum) durante el período crítico para las distintas fechas de siembra en la localidad de Las Breñas (Chaco). La fecha de siembra seleccionada por el usuario se destaca en color naranja, permitiendo co mparar la estimación de evapotranspiración respecto a las del resto de las fechas disponibles.

Balance hídrico

Asimismo, la plataforma integra información de precipitación y evapotranspiración de referencia para estimar el balance hídrico climático durante los períodos fenológicos analizados, permitiendo visualizar tanto el comportamiento promedio como su variabilidad interanual.

Como ejemplo de aplicación, la Figura 5 muestra, por un lado, el promedio histórico de la evapotranspiración y precipitaciones acumuladas durante el periodo crítico para una localidad y fecha de siembra determinada. Por otro lado, permite visualizar la variabilidad del balance hídrico (estimado como la diferencia entre las precipitaciones y la ETo) para las diferentes fechas de siembra, resaltando con otro color la fecha de siembra seleccionada por el usuario. En este caso, se puede observar que a medida que se atrasa la fecha de siembra, el balance hídrico en el periodo crítico tiende a ser menos negativo.

Figura 5. Ejemplo de la salida generada por la sub-sección "Balance hídrico" del módulo Riesgo Climático de ClimaCrop. La figura muestra, por un lado, la evapotranspiración y precipitación promedio para la localidad, fecha de siembra y período fenológico seleccionados por el usuario, y por otro lado la distribución histórica del balance hídrico durante el período crítico para las distintas fechas de siembra en la localidad de Las Breñas (Chaco). La fecha de siembra seleccionada por el usuario se destaca en color naranja, permitiendo comparar su comportamiento respecto del resto de las fechas disponibles.

Comentarios finales

ClimaCrop constituye una herramienta de transferencia tecnológica que busca transformar información climática y fenológica compleja en conocimiento accesible para productores, asesores e investigadores, facilitando su utilización en la planificación del cultivo.

El presente trabajo tiene como propósito presentar la plataforma *ClimaCrop* y promover su utilización como herramienta de apoyo para la planificación del cultivo de maíz en el NEA. Asimismo, se busca generar espacios de intercambio con investigadores, asesores y productores que contribuyan, mediante sus aportes y experiencias, al perfeccionamiento de las funcionalidades actualmente disponibles.

ClimaCrop fue concebida como una plataforma dinámica y de actualización continua. En la medida en que se disponga de nueva información científica, se

incorporarán nuevos índices, funcionalidades y módulos que amplíen su utilidad para la toma de decisiones agronómicas. En esta primera etapa, la plataforma se encuentra orientada al cultivo de maíz. Sin embargo, se prevé incorporar en el corto plazo el cultivo de soja, incluyendo herramientas específicas para la evaluación de distintos grupos de madurez y de los riesgos climáticos asociados a cada escenario productivo. Adicionalmente, se pretende incorporar la posibilidad de elegir diferentes genotipos de maíz según su origen genético (templados, tropicales, y cruzas) dado que presentan diferencias en la duración del periodo emergencia-floración, y resultan una estrategia importante al momento de diagramar la campaña.

Link de acceso a la plataforma

https://cevfcaunne.shinyapps.io/climacrop/

Apoyo financiero

No consigna.

Referencias bibliográficas

Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D., y Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *Fao, rome*, *300*(9), D05109.

Boscarino, S.; Echarte, L.; Kettler, B.A.; Nalli Sonzogni, F.D.; y Neiff, N. 2026. Grain yield response to combined heat stress and low water availability in temperate and temperate× tropical maize hybrids. Field Crops Research, 345, 110573.

Chang, W.; Cheng, J.; Allaire, J.; Sievert, C.; Schloerke, B.; Aden-Buie, G.; Xie, Y.; Allen, J.; McPherson, J.; Dipert, A.; Borges, B. 2025. _shiny: Web Application Framework for R_. R package version 1.12.1, <https://CRAN.R-project.org/package=shiny>.

Cicchino M.; Rattalino Edreira J.; Uribelarrea M.; Otegui M.E. 2010. Heat stress in field-grown maize: Response of physiological determinants of grain yield. Crop Science 50, 1438-1448.

Jones, C.A.; Kiniry J.R.; Dyke P.T. 1986. CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development. Jones, C.A.; Kiniry J.R. (eds.). Texas A&M University Press, College Station, U.S.A.

Kettler B.A.; Carrera C.S.; Nalli Sonzogni F.D.; Trachsel S.; Andrade F.H.; Neiff N. 2022. High night temperature during maize post-flowering increases night respiration and reduces photosynthesis, growth and kernel number. Journal of Agronomy and Crop Science 208, 335-347.

Kettler, B.A.; Nalli Sonzogni, F.D.; Neiff, N.; Boscarino, S.; y Maddonni, G.Á. 2025. Climatic constraints for rainfed maize production in the Northeastern subtropical region of Argentina. Theoretical and Applied Climatology, 156(6), 313.

Maddonni G.A. 2012. Analysis of the climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina—a probabilistic approach. Theoretical and Applied Climatology 107, 325-345.

Neiff N.; Trachsel S.; Valentinuz O.R.; Balbi C.N.; Andrade F.H. 2016. High temperatures around flowering in maize: effects on photosynthesis and grain yield in three genotypes. Crop Science 56, 2702-2712.

Otegui, M.E.; Andrade, F.H.; y Suero, E.E. 1995. Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. Field Crops Research, 40(2), 87-94.

Rattalino Edreira J.I.; Otegui M.E. 2012. Heat stress in temperate and tropical maize hybrids: Differences in crop growth, biomass partitioning and reserves use. Field Crops Research 130, 87-98.

SIGA-INTA. Sistema de información y gestión agrometeorológica del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Disponible en: http://siga.inta.gob.ar/#/data