

IMPACTO DE TEMPERATURAS MÁXIMAS EXTREMAS EN EL CULTIVO DE SOJA: HALLAZGOS SOBRE UMBRALES CRÍTICOS

Juan Guillermo Barberis¹, Mariana Barrucad^{2,3}, Adriana Kantolic¹
barberis@agro.uba.ar

¹Facultad de Agronomía (UBA)

²Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (UBA)

³CONICET

Palabras clave: extremos térmicos, ERA5, MODIS, estrés térmico

INTRODUCCIÓN

Las temperaturas elevadas afectan negativamente varios procesos relacionados con el crecimiento y rendimiento de la soja. Sin embargo, el umbral por encima del cual la temperatura afecta negativamente estos procesos varía según la etapa de desarrollo estudiada o la aproximación experimental utilizada (Nahar et al., 2016). En este trabajo se analiza el impacto que tiene el uso de distintos umbrales térmicos para caracterizar la influencia de las temperaturas extremas del aire y la superficie del suelo sobre el cultivo de soja en la Pampa Húmeda Argentina a partir de distintas fuentes de datos: observaciones de estaciones meteorológicas, reanálisis ERA5 y datos satelitales. Se pretende establecer i) si las tres bases de datos permiten obtener correlaciones congruentes o similares con el rendimiento de soja considerando la ocurrencia de extremos de temperatura en etapas tempranas y tardías de su época crítica y ii) identificar cuál es el umbral térmico más adecuado para describir la relación entre las temperaturas altas en el período crítico de la soja (enero a marzo) y su rendimiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se obtuvieron datos de temperatura del aire y la superficie del suelo del período 2004-2020 en 18 localidades argentinas (Tabla 1), considerando 3 fuentes de información:

- Temperaturas máximas diarias (EST) provistas por el Servicio Meteorológico Nacional
- Temperaturas máximas de la base de datos de reanálisis ERA-5 correspondiente al pixel en el que se encontraba localizada cada estación meteorológica (ERA5)
- Temperaturas de superficie diarias derivadas del satélite MODIS Aqua (SAT) tomadas en un horario cercano al de ocurrencia de la temperatura máxima en zonas compatibles con cultivo de soja en cada una de las localidades estudiadas. Estas zonas fueron previamente seleccionadas a través de un estudio de valores de NDVI (Barberis et al., 2025).

Tabla 1. Listado de localidades incluidas en el estudio

Azul	Gral. Pico	Laboulaye	Paraná	Pigüé	San Pedro
Ceres	Gualeguaychú	Manfredi	Pehuajó	Rio Cuarto	Santa Rosa
Concordia	Junín	Nueve de Julio	Pergamino	Rosario	Tandil

Se agruparon los datos en períodos decádicos mensuales (DM: 30 días comenzando en la primera, segunda o tercera década del mes) durante los meses correspondientes al período crítico de la soja. Para cada localidad, año y DM se calculó un índice (TXu), estimado

como la frecuencia de días con temperaturas máximas (TX) superiores a un umbral de temperatura (u), fijado entre 30 y 36°C a intervalos de 1°C.

Se tomaron datos de rendimiento de soja provistos por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación correspondiente a los departamentos en los que se encuentran ubicadas las estaciones meteorológicas, a los que se les removió la tendencia lineal a fin de filtrar cambios debidos a avances tecnológicos. Se correlacionó los rendimientos de soja con los índices de temperatura correspondiente a cada período DM y localidad. Los resultados fueron sintetizados mediante diagramas de caja (“boxplots”), prestándose especial atención a las medianas, que puede tomarse como un valor de referencia regional. Finalmente, se analizó la relación entre las medianas de los valores de correlación y los distintos umbrales térmicos considerados para las 3 bases de datos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Independientemente del umbral térmico utilizado, la relación entre el rendimiento y el TXu fue negativa y significativa en la mayor parte de los casos en los que se utilizaron temperaturas medidas con SAT (Fig. 1). Estos resultados sugieren que el rendimiento de soja se reduce al aumentar la frecuencia de días con temperaturas máximas elevadas durante su período crítico registradas a nivel del canopeo. La temperatura foliar está directamente asociada con el metabolismo de las plantas y aumenta, también, por el cierre estomático en respuesta al estrés hídrico. Por lo tanto, el Txu estimado con SAT no solo reflejaría el impacto directo del aumento térmico del aire sino también el calentamiento originado por el déficit hídrico.

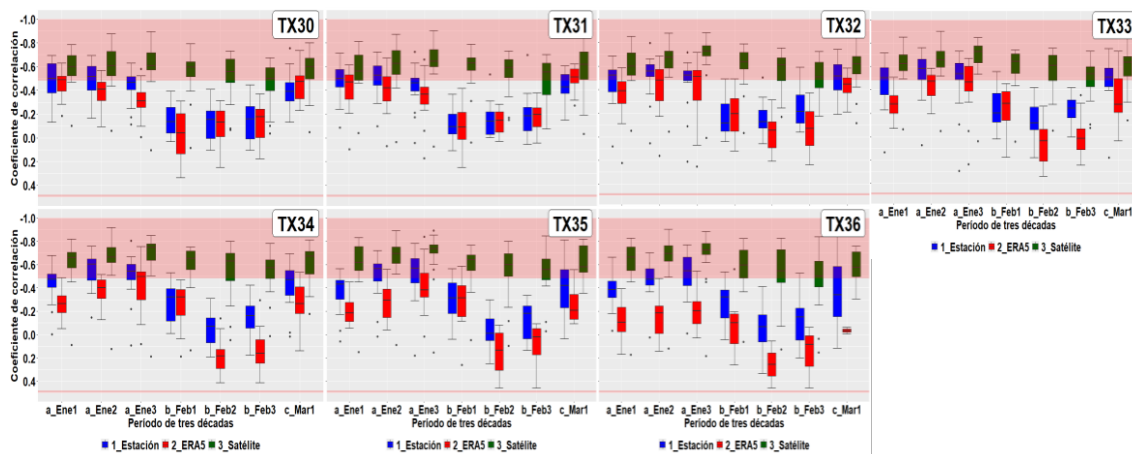


Fig. 1. Box-plots de los coeficientes de correlación entre los rendimientos de soja y la frecuencia de días con temperaturas máximas (TX) superiores a 30 (a), 31 (b), 32 (c), 33 (d), 34 (e), 35 (f) y 36°C (g) según la fuente de los datos de temperatura. Las líneas horizontales de cada caja indican las medianas; el sector coloreado corresponde a los rangos de r que resultaron significativos. El eje Y esta con escala invertida.

Cuando se utilizaron índices calculados con EST, las relaciones con los rendimientos de soja resultaron significativas solamente en los tres periodos DM de enero y el primero de marzo (Fig. 1). Si bien estos resultados pueden sugerir una sensibilidad diferente de las distintas etapas del cultivo a las temperaturas ambientales altas, cabe señalar que en febrero el NDVI del cultivo fue máximo (Barberis et al., 2025). Puede suponerse que, a medida que se incrementa el área foliar del cultivo, se reduce el acoplamiento entre la temperatura del canopeo y la del aire. De hecho, se ha encontrado que en canopeos de soja sometidos a estrés térmico, la temperatura foliar se incrementa en cultivos con déficit

hídrico, pero es inferior a la ambiental en cultivos con buen suministro hídrico debido al enfriamiento producido por la transpiración (Ergo et al. 2021). Las correlaciones entre el rendimiento y los TXu calculados por reanálisis ERA5 fueron similares a las de EST cuando el umbral se fijó en 30 o 31°C en el inicio del período crítico, pero con las temperaturas mayores las relaciones fueron no significativas. Los datos ERA5 parecerían no capturar los efectos de las temperaturas más altas sobre el rendimiento de la soja en la región.

A modo de síntesis regional, en la figura 2 se presentan los valores de mediana de los coeficientes de correlación discriminados por umbral térmico y período DM. El máximo valor encontrado corresponde al período que inicia en la 3ra década de enero con un umbral de 34°C en la superficie del suelo (SAT). Este umbral también maximiza la mediana de correlación en otros períodos considerados (Fig. 2c). No fue posible encontrar un umbral único que maximizara la mediana de la correlación en todos los períodos DM utilizando mediciones de EST (Fig. 2 a) ni ERA 5 (Fig2 b).

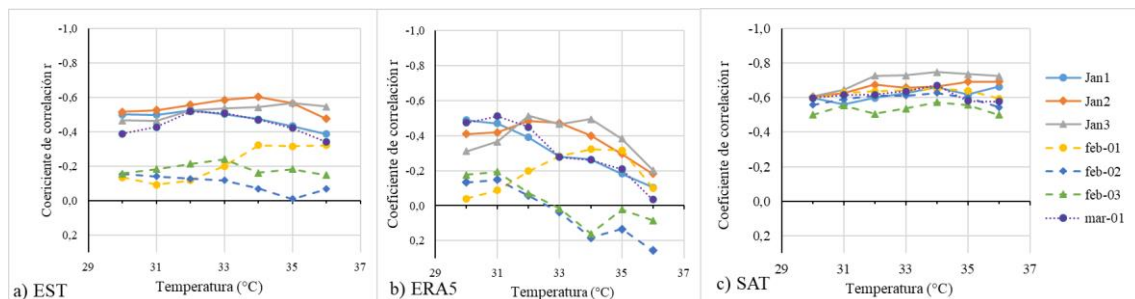


Fig 2. Mediana del coeficiente de correlación entre rendimientos de soja y el TXu, según período DM y umbral térmico (a) datos de estaciones (b) ERA5 (c) datos satelitales. El eje Y esta con escala invertida.

CONCLUSIONES

Los datos de SAT resultaron más adecuados para describir los efectos de las temperaturas máximas extremas sobre el rendimiento de soja que los de EST o ERA5, especialmente cuando éstos ocurren promediando la época crítica del cultivo. Es difícil establecer un único umbral para caracterizar extremos térmicos con impacto en rendimientos de soja en la Pampa Húmeda, pero en función de los resultados aquí presentados, puede considerarse al valor de 34°C (SAT) como un umbral adecuado para esta caracterización.

AGRADECIMIENTOS: subsidios PICT2019-2019-02933, CONICET PIP 0333 (2021-2023) y UBACyT 20020220200111BA

REFERENCIAS

- Barberis, G., Barrucad, M., Kantolic, A.** 2025 Extreme air and surface temperatures in areas compatible and non-compatible with soybean cultivation. *Theoretical and Applied Climatology* 156, 221. <https://doi.org/10.1007/s00704-025-05447-6>
- Ergo, V. V., Veas, R. E., Vega, C. R. C., Lascano, R., Carrera, C. S.** 2021. Leaf photosynthesis and senescence in heated and droughted field-grown soybean with contrasting seed protein concentration. *Plant Physiology and Biochemistry* 166, 437–447
- Nahar, K., Hasanuzzaman, M., Fujita, M.** 2016. Heat stress responses and thermotolerance in soybean. En: Miransari, M. (Ed) *Abiotic and biotic stresses in soybean production*, pp. 261-284. Elsevier.