

Visor web del análisis retrospectivo de brechas de rendimiento de maíz en lotes de producción de la Pampa Arenosa

Batlle B¹; Rotili DH^{1,2}

1 América Agroinnova, Sarmiento 121, América, Buenos Aires, Argentina. batllebernardo@gmail.com

2 Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de La Pampa, RN 35 km 334, Santa Rosa, La Pampa, Argentina.

Web-based viewer for the retrospective analysis of maize yield gaps in production fields from the Sandy Pampas

Abstract

Maize production in the Sandy Pampas is characterized by marked spatial and temporal variability resulting from interactions among rainfall, soil water-storage capacity, soil depth, landscape position, and shallow groundwater dynamics. This study presents a web-based viewer for the retrospective analysis of maize yield gaps at field scale. Data from the 2014/15 to 2024/25 growing seasons were organized by farm, field, production environment, season, and sowing date. For each farm, production environments were delineated from multitemporal Sentinel-2 imagery using the Enhanced Vegetation Index (EVI) and k-means clustering and were reviewed using landscape attributes and farmer knowledge. Potential (Y_p) and water-limited potential yield (Y_w) for early- and late-sown maize were simulated with the CERES-Maize model in DSSAT. Daily weather series combined farm rainfall records with maximum and minimum temperature and solar radiation data obtained from NASA POWER. Environment-specific soil samples served as inputs. Field-scale Y_w was calculated by weighting environment-specific simulations according to their proportional area. Yield gaps were estimated from the difference between Y_w and observed yield (Y_a) and expressed in absolute and relative terms. The viewer integrates georeferenced production environments with Y_p , Y_w , Y_a , yield gap, and rainfall data through interactive selectors for farm, field, season, crop, and sowing date. This integration allows to distinguish fields with low Y_a associated with restrictive Y_w from fields with Y_a that remain substantially below the Y_w . The tool provides a consistent framework for setting differentiated yield targets and supporting post-harvest performance assessment, while explicitly distinguishing observed data, simulated values, and model assumptions.

Palabras clave: Rendimiento potencial limitado por agua; simulación de cultivos; ambientes productivos; agricultura digital; toma de decisiones.

Keywords: Water-limited yield potential; crop simulation; production environments; digital agriculture; decision support.

Contexto productivo, marco conceptual y vacío de conocimiento aplicado

El rendimiento del maíz (*Zea mays* L.) en la Pampa Arenosa presenta una marcada variabilidad temporal y espacial, asociada principalmente con cambios en la disponibilidad hídrica. La oferta de agua depende de las precipitaciones y, en amplios sectores de la región, del aporte de las napas freáticas someras (Mercau et al., 2016). Dentro de los establecimientos y lotes, la heterogeneidad edáfica introduce una fuente adicional de variación, ya que la textura, profundidad efectiva, capacidad de almacenamiento y posición en el relieve condicionan el ingreso y retención de agua en el perfil, y la dinámica de la napa (Urricariet et al., 2011). Estas fuentes de variabilidad determinan que el techo productivo del cultivo no sea constante. En sistemas de secano, este techo está representado por el rendimiento potencial limitado por agua (Y_w), definido como el rendimiento de un cultivar adaptado, sin limitaciones nutricionales ni bióticas, bajo la oferta hídrica y las condiciones meteorológicas de cada sitio y campaña (van Ittersum et al., 2013). En consecuencia, el Y_w varía entre campañas, establecimientos y sectores edáficamente contrastantes dentro de una misma campaña y establecimiento. Estimar y sistematizar esta variación resulta necesario para interpretar los resultados productivos.

Debido a que el Y_w no constituye una variable directamente observable, su cuantificación requiere recurrir a métodos de estimación, cuya selección depende de la escala y del objetivo del análisis (van Ittersum et al., 2013). Los modelos de simulación resultan particularmente adecuados para representar la variabilidad entre campañas y la heterogeneidad edáfica dentro de los lotes, ya que integran la información meteorológica, las propiedades del suelo y las características del cultivo. Estos modelos representan los principales procesos que determinan el crecimiento del cultivo y el balance hídrico, y permiten estimar el rendimiento correspondiente a la oferta de agua de cada campaña y sector edáfico (Jones et al., 2003). La confiabilidad de las estimaciones depende de la calidad y representatividad de los datos de entrada y de una adecuada parametrización del cultivo y del suelo (Grassini et al., 2015). Su aplicación retrospectiva permite reconstruir el Y_w para diferentes campañas y sectores del lote. Estas referencias permiten contextualizar los rendimientos obtenidos y constituyen la base para evaluar la distancia entre la producción alcanzada y aquella que habría sido posible bajo las condiciones registradas.

Una vez estimado el Y_w , es posible calcular la brecha de rendimiento en secano (Y_g) como la diferencia entre esta referencia y el rendimiento observado (Y_a) para una misma unidad espacial y campaña (Lobell et al., 2009). El análisis de este indicador a lo largo de una serie de campañas permite caracterizar la magnitud y persistencia de las Y_g , comparar el desempeño de diferentes unidades productivas e identificar aquellas en las que las diferencias se presentan de manera recurrente. De esta manera, el análisis histórico de las Y_g sintetiza la información productiva en un indicador comparable y aporta una base objetiva para orientar el diagnóstico agronómico y priorizar futuras decisiones de manejo.

Hasta el momento, las estimaciones basadas en modelos de simulación agronómica han sido reducidas a una aproximación de global a regional. En Argentina, las aproximaciones de mínima escala han sido aquellas ubicadas subregionalmente, representando las condiciones promedio en radios de 200 km (Aramburu Merlos et al., 2015). No obstante, las unidades mínimas de toma de decisiones son la empresa a nivel

organizacional y el lote de producción a nivel espacial. Dada la variabilidad espacial y temporal existente en los sistemas productivos, los análisis a nivel subregional tienen limitada utilidad informativa para los niveles operativos en la toma de decisiones. Si bien algunos estudios en el mundo cuantificaron Yg empleando modelos de simulación agronómica a nivel de lote, estos no existen en Argentina (Mourtzinis et al., 2020). Sería deseable realizar una caracterización de Yw e Yg a nivel de lote por condiciones biofísicas para la producción, a partir del uso de modelos de simulación agronómica y relacionando las Yg con la magnitud y la variabilidad de las Yw. Adicionalmente, la estructuración de los resultados de Yw e Ya estimados dentro de una plataforma digital de fácil acceso y utilización por a las empresas agropecuarias con interés en conocer sus Yw e Yg sería deseable y es aún inexistente (Rose et al., 2016).

Materiales y Métodos

El trabajo se realizó con lotes de producción de maíz pertenecientes a establecimientos ubicados en la Pampa Arenosa. Se consideraron las campañas comprendidas entre 2015/16 y 2024/25. La unidad de análisis para la estimación de las brechas fue el par lote–campaña, mientras que las simulaciones se realizaron para cada combinación de lote, ambiente y campaña. La información utilizada comprendió la delimitación y superficie de los ambientes productivos, los perfiles de suelo representativos, las series meteorológicas diarias, los Yw simulados y los Ya.

Los ambientes productivos se delimitaron a partir de series multitemporales de imágenes Sentinel-2 correspondientes a diferentes campañas. Una vez descartadas las escenas con cobertura nubosa sobre las áreas de interés, se calculó el EVI a partir de las bandas del azul, rojo e infrarrojo cercano de cada adquisición válida. Para el análisis se seleccionaron las fechas correspondientes a períodos de elevado desarrollo del dosel y se generaron capas espaciales de EVI. Estas capas se analizaron de manera multitemporal para evaluar la persistencia espacial y la estabilidad temporal de la respuesta vegetativa. El procedimiento permitió identificar sectores que presentaron niveles de EVI consistentemente diferentes entre campañas, interpretados como patrones recurrentes de vigor relativo del cultivo y utilizados como base para la delimitación de los ambientes productivos (Maestrini y Basso, 2018). Posteriormente, se aplicó una clasificación no supervisada mediante k-means sobre la serie multitemporal de EVI, utilizando inicialmente cinco agrupamientos por lote (MacQueen, 1967). Estos agrupamientos se reclasificaron en ambientes de productividad alta, media y baja o limitada. Cuando la información espectral y la posición en el relieve evidenciaron condiciones particulares de drenaje o anegamiento, se diferenciaron ambientes adicionales con riesgo de hidromorfismo. La delimitación se ajustó mediante inspección visual y se contrastó con el conocimiento de los productores y asesores de cada establecimiento. Finalmente, cada ambiente quedó representado por un polígono georreferenciado, para el cual se calculó su superficie y su proporción dentro del lote.

La caracterización edáfica se obtuvo mediante muestreos dirigidos a los ambientes previamente delimitados. En cada establecimiento, se seleccionaron entre tres y cuatro unidades de referencia representativas de las principales categorías de productividad. En cada unidad se obtuvo una muestra compuesta por al menos diez submuestras distribuidas en un sector homogéneo, evitando bordes y áreas afectadas por caminos,

aguadas o cortinas forestales. El muestreo se realizó en los estratos 0–20, 20–40, 40–60, 60–100, 100–150 y 150–200 cm, o hasta la profundidad efectiva cuando existieron restricciones al crecimiento radical. Se determinaron textura y pH en cada estrato y materia orgánica en el estrato superficial. También se registraron la posición topográfica, la profundidad efectiva, la presencia de horizontes densos o calcáreos, el riesgo de anegamiento y la profundidad de la napa. A partir de esta información se estimaron los límites hídricos y los restantes parámetros requeridos para construir un perfil de suelo compatible con DSSAT. Cada perfil de referencia se asignó a los polígonos pertenecientes a la misma categoría productiva dentro del establecimiento.

Para cada establecimiento y campaña se construyeron series meteorológicas diarias de precipitación, temperatura máxima y mínima y radiación solar. Las precipitaciones provinieron de registros locales aportados por cada establecimiento. Las temperaturas y la radiación se obtuvieron de la base NASA POWER (NASA Langley Research Center POWER Project) utilizando el punto de grilla más cercano a cada establecimiento. Las series fueron sometidas a controles de continuidad temporal, rangos admisibles y ausencia de valores físicamente inconsistentes. Todos los ambientes de un mismo establecimiento recibieron la misma serie meteorológica para cada campaña. El contenido de agua del suelo a la siembra se estimó mediante un balance hídrico previo a la implantación, considerando el agua en el suelo más probable para la fecha de madurez fisiológica típica de un cultivo antecesor de soja como punto de inicio, las precipitaciones y la demanda evaporativa de los meses anteriores y limitando el almacenamiento máximo a la capacidad de campo del perfil. Se incorporó la influencia de la napa freática.

El Yw se estimó retrospectivamente para cada combinación de lote, ambiente y campaña mediante el modelo CERES-Maize integrado en DSSAT (Jones et al., 2003). Las simulaciones combinaron la serie meteorológica correspondiente a cada establecimiento con el perfil de suelo y la condición hídrica inicial asignados a cada ambiente. Se utilizaron los coeficientes genéticos de un cultivar calibrado y evaluados para condiciones productivas de Argentina (Aramburu Merlos et al., 2015). El manejo agronómico correspondió a un itinerario tecnológico de referencia definido para la región, que incluyó la ventana de siembra, la densidad y el espaciamiento entre surcos correspondientes a cada condición productiva. El modelo realizó diariamente el balance hídrico del perfil, considerando precipitación efectiva, infiltración, escurrimiento, drenaje, evaporación y transpiración. Las simulaciones se realizaron sin limitaciones nutricionales ni pérdidas ocasionadas por factores bióticos, por lo que el rendimiento obtenido representó el Yw de cada ambiente y campaña.

Los Ya se obtuvieron de los registros productivos de las empresas para cada lote y campaña. Los Yw simulados para los distintos ambientes se ponderaron según su participación en la superficie total. Para cada lote y campaña, el Yw ponderado se obtuvo mediante la suma de los productos entre el Yw de cada ambiente y la proporción del lote ocupada por ese ambiente. La Yg absoluta de cada lote se calculó como la diferencia entre el Yw ponderado del lote y el Ya en la misma campaña. La Yg relativa se expresó como el porcentaje que representó esa diferencia respecto del Yw ponderado. Este procedimiento permitió obtener, para cada lote, una serie histórica de Yw, Ya y Yg absolutas y relativas.

Con el propósito de organizar y facilitar la consulta de los resultados generados, se desarrolló un visor web que integra la información a escala de establecimiento, lote y campaña. Su estructura vincula la delimitación espacial de los ambientes productivos con las estimaciones de Yw, los Ya y las Yg calculadas. Los polígonos obtenidos y los resultados se incorporaron al visor web mediante identificadores comunes de establecimiento, lote, ambiente y campaña. La interfaz se organizó en un panel cartográfico, que presenta la delimitación de los ambientes y permite seleccionar el lote, y un panel de consulta, que muestra los Yw simulados y los indicadores productivos correspondientes. Los Yw se vincularon con cada ambiente, mientras que el Ya y la Yg se asociaron con la combinación de lote y campaña seleccionada. Mediante diferentes selectores, el usuario puede acceder a cada unidad productiva y consultar sus resultados sin perder la referencia espacial y temporal. Esta organización interactiva evita la consulta separada de mapas, tablas y salidas de simulación, y proporciona una representación sintética del desempeño productivo histórico de cada establecimiento.

Resultados

Se estimaron los Yp y Yw de maíz temprano y demorado para los ambientes productivos de 85 campos pertenecientes a 63 empresas agropecuarias, distribuidos en el oeste de la provincia de Buenos Aires y el este de La Pampa (Figura 1). Los resultados obtenidos se integraron en un visor web que presenta inicialmente la ubicación de los campos y, una vez seleccionado uno de ellos, permite acceder a sus lotes y a la distribución espacial de sus ambientes productivos. La selección del lote, la campaña y el tipo de potencial permite visualizar los Yp o Yw estimados para cada ambiente, junto con la superficie que estos ocupan dentro del lote (Figura 2). A escala de lote, el visor muestra los potenciales ponderados de maíz temprano y demorado, el rendimiento observado y la Yg respecto del mayor potencial ponderado, expresada en kg ha^{-1} y en porcentaje. Esta organización permite comparar lotes según su composición ambiental, sus potenciales estimados a escala de ambiente y de lote, y la magnitud de las Yg obtenidas en una misma campaña (Figura 3).



50 AÑOS
PENSANDO
EL FUTURO

XIII
CONGRESO
NACIONAL
DE MAÍZ

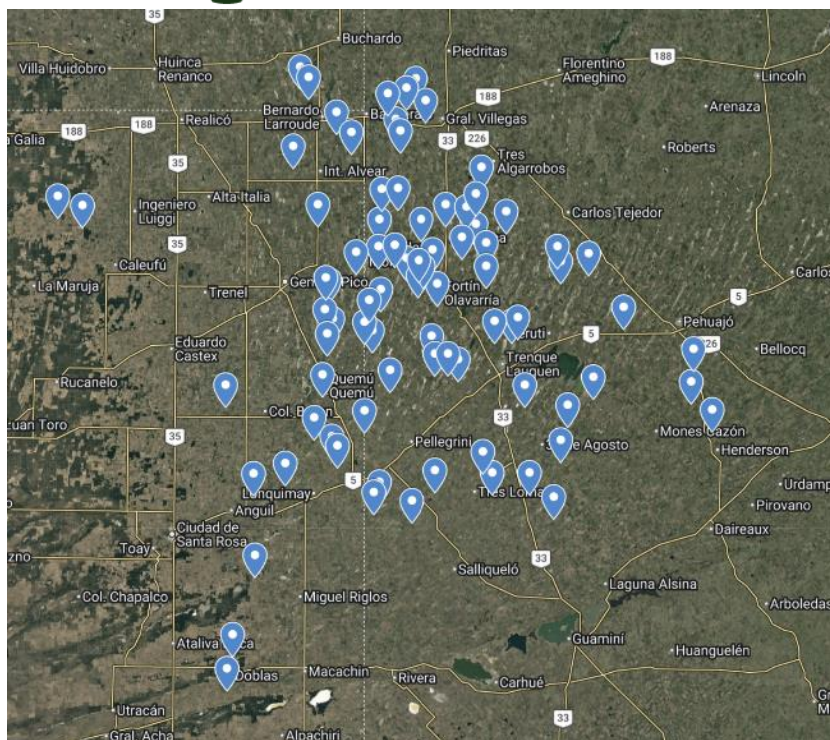


Figura 1. Distribución geográfica de los campos de producción incluidos en el visor, ubicados en el oeste de la provincia de Buenos Aires y el este de La Pampa. Cada marcador representa un campo.

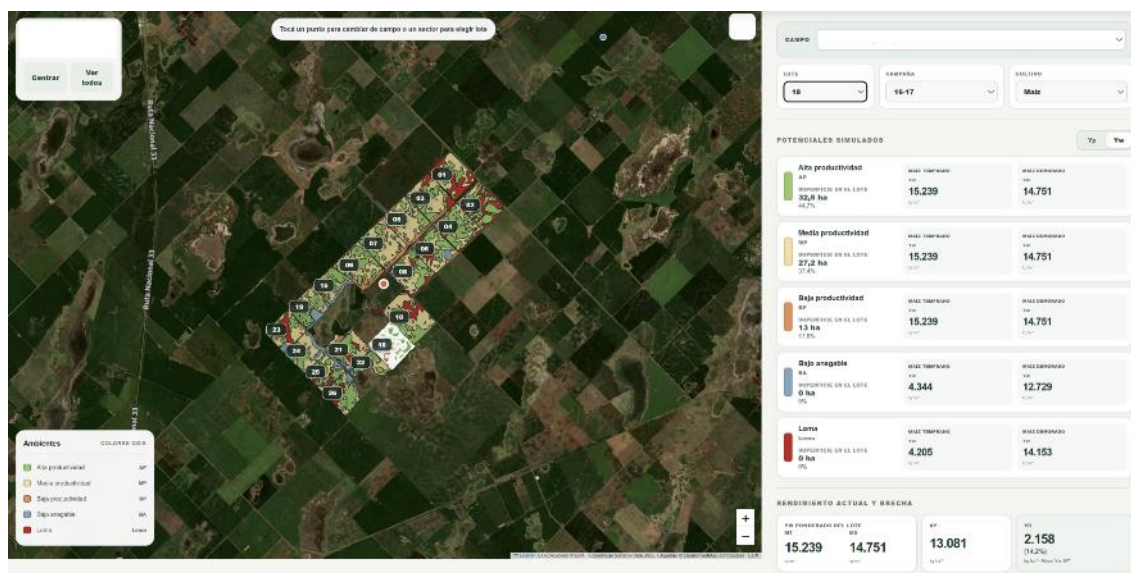


Figura 2. Interfaz del visor web desarrollado para la visualización integrada de las brechas de rendimiento. A la izquierda se presentan la delimitación de los lotes y su clasificación en ambientes de productividad; a la derecha, los rendimientos potenciales simulados (Yp o Yw) para maíz temprano y demorado, el rendimiento actual (Ya) y la brecha de rendimiento (Yg), según el campo, el lote, la campaña y el cultivo seleccionados.

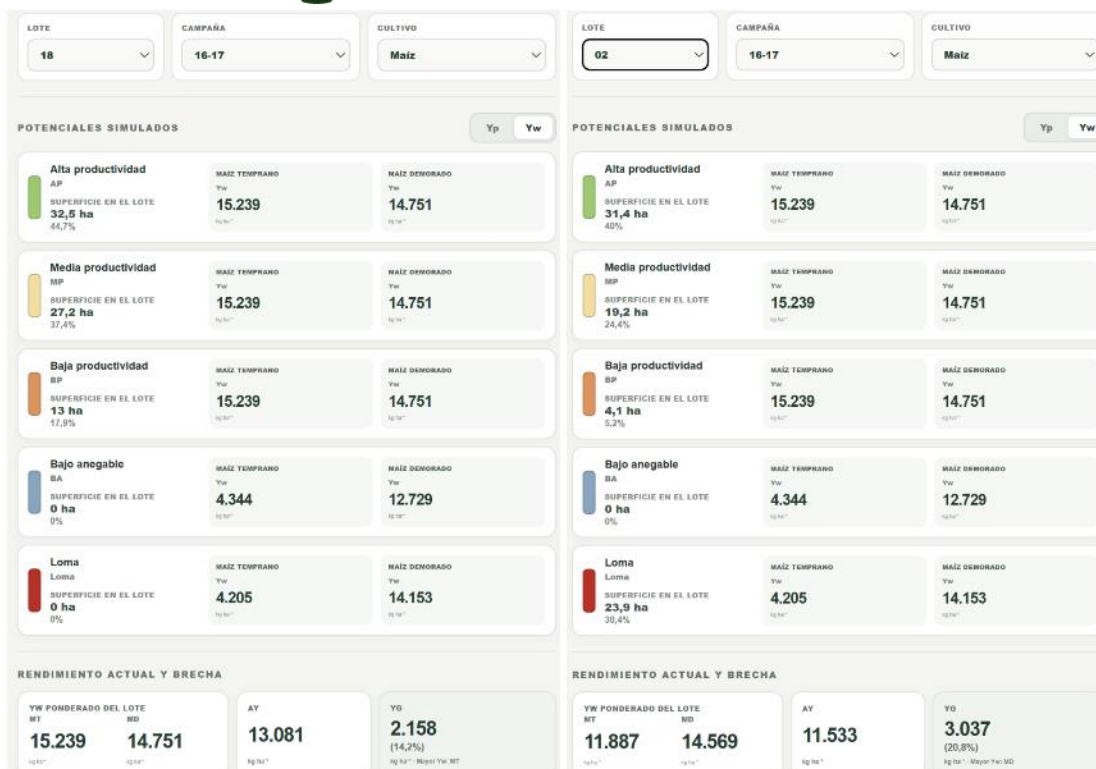


Figura 3. Ejemplo de visualización de los rendimientos potenciales limitados por agua (Yw) y de la brecha de rendimiento (Yg) para dos lotes de un mismo establecimiento durante la campaña 2016/17. El visor presenta los Yw simulados para maíz temprano (MT) y demorado (MD) en cada ambiente, el Yw ponderado según su participación en el lote, el rendimiento actual (AY) y la Yg, calculada respecto del mayor Yw ponderado y expresada en kg ha⁻¹ y porcentaje.

Perspectivas de desarrollo del visor web

Las decisiones de manejo del maíz se adoptan antes de conocer la disponibilidad de recursos que tendrá el cultivo, especialmente la oferta hídrica durante su ciclo. Esta incertidumbre ha impulsado el uso de pronósticos climáticos y modelos de balance hídrico para anticipar posibles escenarios productivos (Bert et al., 2006). Actualmente, el visor permite consultar los Yw estimados para campañas anteriores. Como ampliación futura, permitirá incorporar variables meteorológicas de cada campaña, como las precipitaciones y la fase del ENSO, y asociarlas con variables específicas de cada ambiente, como el agua útil a la siembra y la profundidad de la napa. La vinculación de estos registros con los Yw podría utilizarse para identificar campañas análogas o desarrollar modelos que relacionen las condiciones hídricas iniciales y los indicadores climáticos con los Yw históricos. De esta manera, al comienzo de una nueva campaña sería posible contrastar las condiciones medidas con los antecedentes disponibles, estimar un rango probable de Yw para cada ambiente y aportar una referencia para ajustar el manejo dentro del establecimiento. Se podría incorporar la información asociada a otros cultivos.

Apoyo financiero

Este proyecto contó con el apoyo específico de Bayer, junto con el apoyo general de todos los sponsors permanentes de América Agroinnova.

Referencias

- Bert, F. E., Satorre, E. H., Toranzo, F. R., & Podestá, G. P. (2006). Climatic information and decision-making in maize crop production systems of the Argentinean Pampas. *Agricultural Systems*, 88(2–3), 180–204.
- Grassini, P., van Bussel, L. G. J., Van Wart, J., Wolf, J., Claessens, L., Yang, H., Boogaard, H., de Groot, H. L. E., van Ittersum, M. K., & Cassman, K. G. (2015). How good is good enough? Data requirements for reliable crop yield simulations and yield-gap analysis. *Field Crops Research*, 177, 49–63.
- Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijsman, A. J., & Ritchie, J. T. (2003). The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18(3–4), 235–265.
- Lobell, D. B., Cassman, K. G., & Field, C. B. (2009). Crop yield gaps: Their importance, magnitudes, and causes. *Annual Review of Environment and Resources*, 34, 179–204.
- Maestrini, B., & Basso, B. (2018). Predicting spatial patterns of within-field crop yield variability. *Field Crops Research*, 219, 106–112.
- Mercau, J. L., Nasetto, M. D., Bert, F., Giménez, R., & Jobbágy, E. G. (2016). Shallow groundwater dynamics in the Pampas: Climate, landscape and crop choice effects. *Agricultural Water Management*, 163, 159–168.
- Mourtzinis, S., Rattalino Edreira, J. I., Grassini, P., Roth, A. C., Mullen, R. W., Specht, J. E., Ciampitti, I. A., Licht, M. A., Kandel, H., Kyveryga, P., Lindsey, L. E., Mueller, D. S., Nafziger, E. D., Naeve, S., Stanley, J., Staton, M., & Conley, S. P. (2020). Assessing approaches for stratifying producer fields based on biophysical attributes. *Field Crops Research*, 245, 107659.
- National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center. (n.d.). *Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER): Data Access Viewer (DAV) (Services v2.4.5; Data v10)* [Data set]. Retrieved December 27, 2025, from <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Urricariet, S., Niborski, M. & Kvolek, C. M. (2011). Atributos del suelo y paisaje asociados a la variabilidad de rendimientos de maíz en la pampa arenosa. *Ciencia del Suelo*, 29, 49–59.
- van Ittersum, M. K., Cassman, K. G., Grassini, P., Wolf, J., Titttonell, P., & Hochman, Z. (2013). Yield gap analysis with local to global relevance—A review. *Field Crops Research*, 143, 4–17.