

CUANTIFICACIÓN DE LOS IMPACTOS DE SEQUÍA SOBRE EL CULTIVO DE SOJA EN URUGUAY

BOCCO, ALESSIO¹
BONHAURE, DANIEL¹
HIDALGO, CECILIA¹
PODESTÁ, GUILLERMO¹
ROVERE, SANTIAGO¹
TSUNEKI, HORI²
ANTUNEZ, GONZALO³
BAETHGEN, WALTER⁴
CAL, ADRIÁN⁵
CORTELEZZI, ÁNGELA⁶
METHOL, MARÍA⁶
TISCORNIA, GUADALUPE⁵

¹*Sistema de Información sobre Sequías para el Sur de Sudamérica (SISSA)*
(<https://sissa.crc-sas.org>)

²*Bancto Interamericano de Desarrollo (BID)*

³*Sistema Nacional de Información Agropecuaria (SNIA). Uruguay*

⁴*International Research Institute for Climate and Society, Columbia University. Palisades. New York*

⁵*Unidad de Agroclima y Sistemas de Información (GRAS). INIA Las Brujas. Uruguay.*

⁶*Oficina de Programación y Política Agropecuaria (MGAP). Uruguay*

Resumen

Un componente esencial del análisis de riesgo de impactos de sequía es la cuantificación de la respuesta del sistema a la sequía. Caracterizar la asociación entre la intensidad de los eventos secos y su momento de ocurrencia permite comprender la vulnerabilidad del cultivo de soja y desarrollar estrategias de gestión del riesgo de sequía.

El objetivo de este estudio es la cuantificación de los impactos de distintos tipos de sequía sobre el cultivo de soja en La Estanzuela (Uruguay). Dada la escasa cantidad de eventos secos en el registro histórico se desarrolló un generador estocástico de series climáticas sintéticas. Estas series climáticas sintéticas alimentaron el modelo CROPGRO para simular el cultivo de soja. Se realizaron dos tipos de simulaciones paralelas, una regada a plenitud (sin estrés hídrico) y otra sin riego en condiciones de secano (con estrés hídrico). El cociente entre los rendimientos con y sin estrés hídrico permitió estimar la brecha de rendimiento causada por el impacto de la sequía. Además, se calcularon dos indicadores de estrés hídrico para cuantificar su intensidad: evapotranspiración relativa - cociente entre la evapotranspiración real y potencial - y el porcentaje de agua disponible en el suelo. La asociación entre la brecha de rendimiento y los indicadores de estrés se modeló mediante curvas de vulnerabilidad que reflejan la sensibilidad del cultivo a la sequía. Caracterizar dicha sensibilidad permitirá la determinación de umbrales para la emisión de alertas tempranas. La metodología propuesta también permite expandir el espacio de riesgo para el desarrollo de seguros agrícolas.

Palabras clave: riesgo, sequía, soja

Introducción

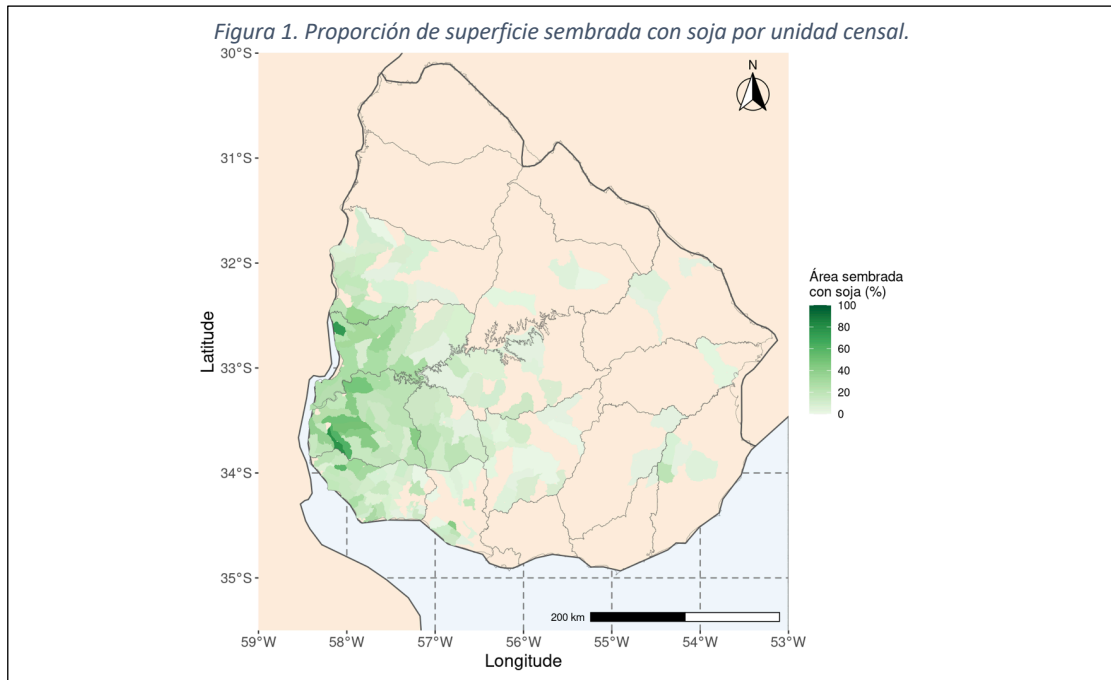
La sequía es uno de las amenazas climáticas más difícil de caracterizar y sólo se evidencia cuando el desbalance en el ciclo hidrológico ya impacta sobre distintos sistemas ecológicos y sociales. Tradicionalmente la sociedad reacciona cuando la crisis de sequía ya está establecida, lo que resulta en respuestas mal coordinadas, costosas y menos efectivas. Un nuevo paradigma propone un enfoque más proactivo de planificación y monitoreo, por ejemplo, incluyendo sistemas de alerta temprana que permitan iniciar acciones tempranas de mitigación de impactos (Cruz et al., 2021). La implementación de sistemas de alerta sobre sequías requiere una definición de las situaciones que disparan acciones de mitigación. Para esto, es necesario caracterizar la asociación entre las condiciones de sequía y el tipo y magnitud de posibles impactos, por ejemplo, sobre el rendimiento de cultivos comerciales.

Una alternativa para estudiar esta asociación es el análisis estadístico de datos históricos de rendimientos y eventos secos. Sin embargo, la cantidad de eventos en los registros históricos generalmente es muy baja lo que dificulta el ajuste de asociaciones estadísticas. Por esta razón, en este trabajo se generan series climáticas sintéticas largas (con propiedades estadísticas similares al clima observado) que se utilizan como entrada a modelos biofísicos de cultivos para simular rendimientos. El uso de series sintéticas y rendimientos simulados aumenta considerablemente el número de eventos secos y el espectro de condiciones ambientales lo que permite caracterizar mejor los riesgos e impactos de la sequía.

El propósito de este estudio es explorar la asociación entre sequías de distintos tipos (breves vs. extendidas, intensas vs. leves) y los rendimientos de soja en el oeste de Uruguay. Los resultados ayudarán al diseño de sistemas de alerta temprana, permitiendo la definición de disparadores de acciones de mitigación, y también el diseño de instrumentos de transferencia de riesgo como seguros agrícolas paramétricos.

Área y sistemas estudiados

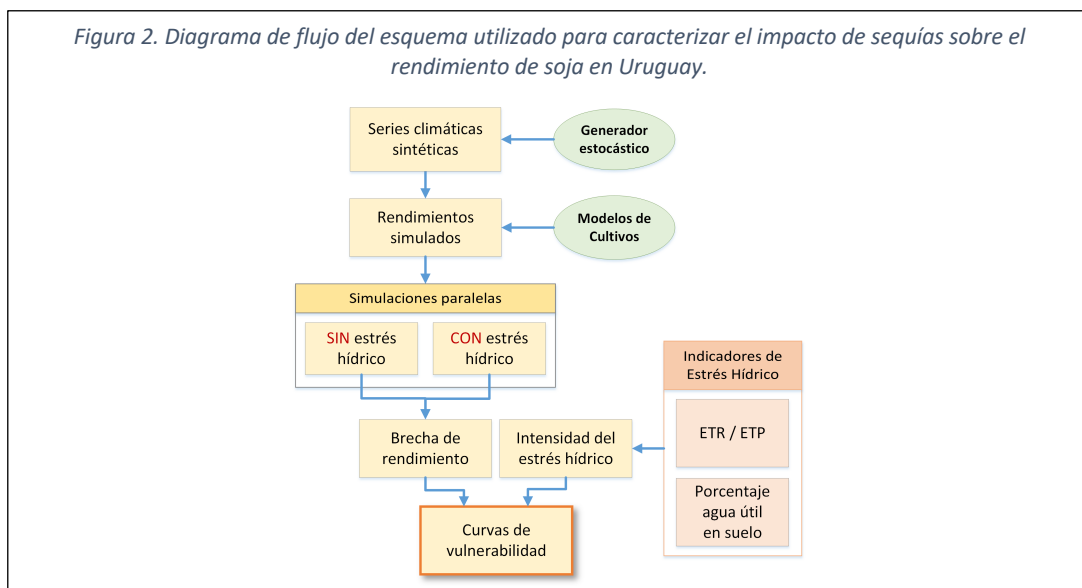
La soja es el principal cultivo de verano en Uruguay abarcando una superficie de 910.000 hectáreas en la campaña 2020/2021. Este cultivo se realiza en condiciones de secano (sin riego), lo que aumenta su vulnerabilidad a la ocurrencia de sequías. Por ejemplo, condiciones de sequía resultaron en bajos rendimientos (promediando 1880 kg ha⁻¹ a nivel nacional) en 2020/21 (DIEA, 2021). La soja se concentra en el litoral occidental donde se encuentran los suelos con mayor aptitud agrícola de Uruguay: cinco departamentos - Soriano, Río Negro, Colonia, Paysandú y Flores – incluyeron el 80% del área total de soja en 2019/2020 (DIEA, 2020). La Figura 1 muestra la proporción de superficie sembrada con soja por unidad censal (DIEA, 2011).



Este estudio se enfocó en rendimientos de soja simulados para la estación experimental La Estanzuela (Depto. Colonia) del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). Esta región tiene un clima templado con temperaturas máxima media de 22 °C (± 6.3) y mínima media de 12 °C (± 5.4) y precipitación anual de 1110 mm. Los suelos predominantes alrededor de La Estanzuela son Argiudoles típicos y vérticos. Los materiales genéticos de soja más utilizados son grupos de madurez largos (GM VI), que abarcan un 55% de la superficie total de este cultivo en Uruguay (URUPOV).

Métodos y resultados preliminares

Los componentes del enfoque utilizado se muestran en la Figura 2.

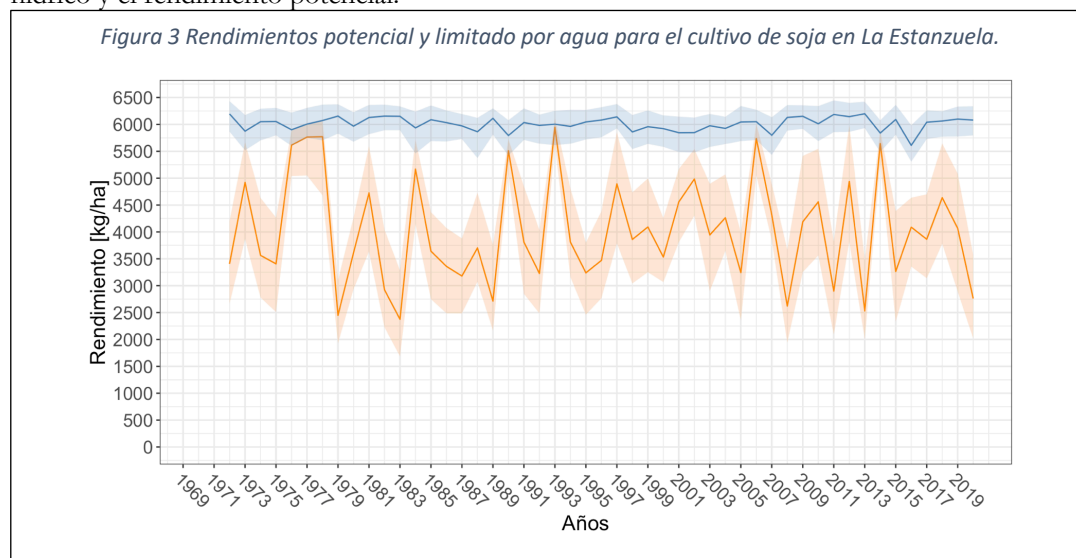


El primer paso involucra el uso de un generador estocástico para simular largas series diarias de temperaturas máxima y mínima y precipitación. El generador está basado en un procedimiento desarrollado por Verdin et al. (2015) e incluye cuatro modelos generalizados aditivos (Wood, 2017) que simulan, respectivamente, (i) la ocurrencia y (ii) montos de precipitación y las temperaturas (iii) máxima y (iv) mínima diarias. La radiación solar diaria se estima con las temperaturas simuladas utilizando el modelo de Bristow et al. (1984).

En este estudio las series sintéticas están condicionadas por totales trimestrales de precipitación acumuladas para capturar la variabilidad de baja frecuencia presente en la región. Estas series condicionadas o *pseudohistóricas* reproducen los periodos secos y húmedos en el registro histórico. Se generaron 100 realizaciones *pseudohistóricas* del período 1971-2020 (es decir, un total de 5000 años sintéticos) para La Estanzuela. Una exhaustiva variedad de diagnósticos visuales y estadísticos confirmó que las series sintéticas tienen propiedades estadísticas similares a los datos históricos.

Las series climáticas sintéticas son entrada para modelos biofísicos de cultivos que simulan rendimientos para cada campaña agrícola sintética (de noviembre de un año sintético a mayo del siguiente año). Utilizamos el modelo CROPGRO (Jones et al., 2003), ampliamente calibrado y validado en la región para la simulación del crecimiento y desarrollo de la soja (Rizzo et al., 2021). Además de rendimientos, CROPGRO simula otras variables derivadas como la evapotranspiración real y potencial, y la cantidad del agua en el suelo. CROPGRO requiere otras entradas como la descripción de los suelos, características fenológicas del cultivo y prácticas de manejo agronómico. El suelo es un Argiudol típico (Molfino et al., 2001). Los coeficientes genéticos de la variedad simulada (grupo de madurez VI) requeridos por CROPGRO fueron calibrados por Walter Baethgen (datos no publicados).

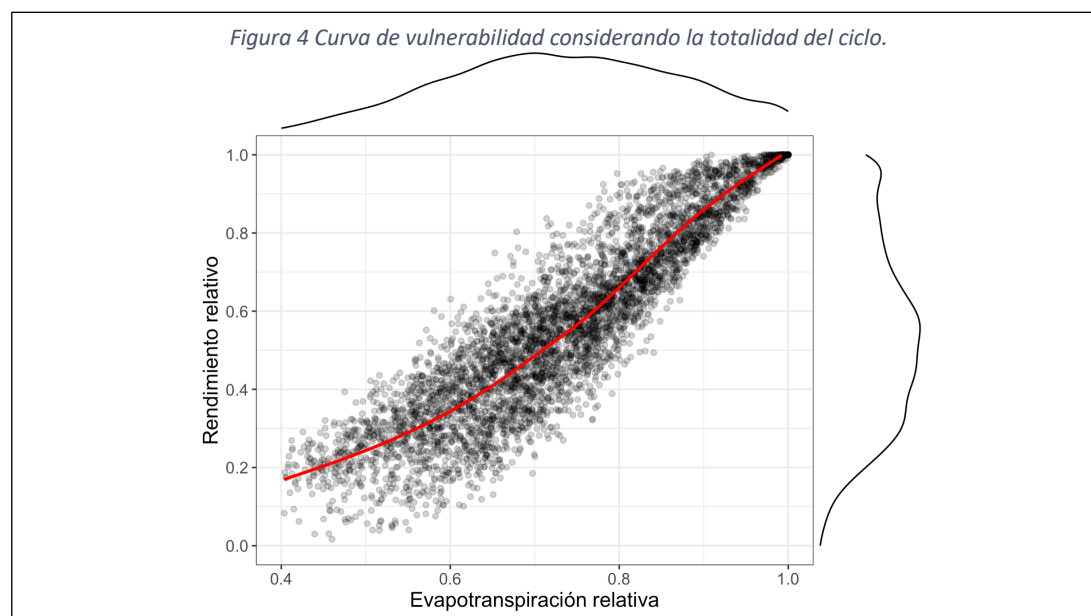
Para cuantificar el impacto de la sequía se realizaron dos simulaciones paralelas (Figura 2). En una primera simulación se evitó el estrés hídrico mediante un riego simulado; el rendimiento resultante se aproxima al rendimiento potencial de la variedad utilizada (Van Ittersum et al., 2013). En una segunda simulación no se utilizó riego, reproduciendo los rendimientos alcanzados con posible estrés hídrico en condiciones de secano. La Figura 3 muestra el espectro de rendimientos potenciales (área azul) y rendimientos limitados por estrés hídrico (área naranja) para las 100 realizaciones simuladas. Las líneas indican las medianas de los rendimientos para cada tipo de simulación. Los rendimientos cuando no hay estrés hídrico muy estables y altos. En cambio, la presencia de estrés resulta en rendimientos más variables que, en algunos casos, pueden acercarse a los rendimientos potenciales mientras que en otros casos pueden ser bastante más bajos (por ejemplo, si la precipitación ha sido baja). Para cada campaña sintética se calcula la brecha de rendimiento como el cociente entre el rendimiento con estrés hídrico y el rendimiento potencial.



Para cuantificar el estrés hídrico durante cada campaña sintética utilizamos dos indicadores: i) la evapotranspiración relativa - el cociente entre la evapotranspiración real (ETR) y potencial (ETP); y ii) el porcentaje de agua útil disponible en la capa del suelo explorada por las raíces del cultivo. Seleccionamos estos indicadores ya que existen diagnósticos similares que son generados regularmente para el Uruguay, como el balance hídrico decádico de INIA, o el Índice de Estrés Evaporativo (Evaporative Drought Index, ESI) que produce NASA (Anderson et al., 2016).

A continuación se construyen curvas de vulnerabilidad (Wu et al., 2021) que reflejan la sensibilidad del cultivo a diferentes intensidades de estrés. Por ejemplo, la Figura 4 muestra la asociación entre la brecha de rendimiento (eje y) y el estrés hídrico caracterizado mediante la evapotranspiración relativa acumulada durante todo el ciclo del cultivo. Cada punto corresponde a una campaña sintética. Se ajusta una tendencia mediante la técnica de loess (Cleveland et al., 1988).

La Figura 4 revela una clara asociación entre la intensidad del estrés hídrico y la caída en el rendimiento real con respecto al potencial. Por ejemplo, valores de evapotranspiración relativa próximos a 1 indican poco o nulo estrés hídrico. En estos casos la brecha de rendimiento es pequeña - los rendimientos obtenidos son muy cercanos al potencial. Al revés, valores bajos de evapotranspiración relativa sugieren considerable estrés hídrico; aquí, los rendimientos obtenidos son muy bajos y la brecha de rendimiento es mucho mayor. Otro aspecto que ilustra la figura es la mayor cobertura del espacio de riesgo de sequía. El uso de series sintéticas multiplica la cantidad de rendimientos simulados (5000) permitiendo así abarcar un mayor número de combinaciones de condiciones de estrés y los rendimientos resultantes.



Con las curvas de vulnerabilidad es posible estimar el valor del indicador de estrés hídrico asociado al rendimiento de indiferencia (por debajo de cual no se cubren los costos). De esta forma, es posible estimar cuán frecuentemente ocurren condiciones de estrés que originan pérdidas económicas. Por ejemplo, asumimos un rendimiento de indiferencia de 2000 kg ha⁻¹. El rendimiento relativo correspondiente a este valor es 0.33 y surge de dividir el rendimiento de indiferencia por la media del rendimiento potencial simulado (6000 kg ha⁻¹). Este umbral de pérdidas económicas se supera, en promedio, en 8 de cada 10 años. El mismo tipo de análisis puede realizarse con el otro indicador de estrés hídrico - el porcentaje de agua útil en la zona explorada por raíces. Ambos indicadores pueden ser calculados para el ciclo completo del cultivo o por etapas fenológicas puntuales que representen períodos críticos para la determinación del rendimiento.

Referencias bibliográficas

- Anderson, M. C., Zolin, C. A., Sentelhas, P. C., Hain, C. R., Semmens, K., Tugrul Yilmaz, M., Gao, F., Otkin, J. A., y Tetrault, R. (2016). The Evaporative Stress Index as an indicator of agricultural drought in Brazil: An assessment based on crop yield impacts. *Remote Sensing of Environment*, 174, 82-99.
- Bristow, K. L., y Campbell, G. S. (1984). On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 31(2), 159-166.
- Cleveland, W. S., y Devlin, S. J. (1988). Locally weighted regression: an approach to regression analysis by local fitting. *Journal of the American Statistical Association*, 83(403), 596-610.
- Cruz, G., Gravina, V., Baethgen, W. E., y Taddei, R. (2021). A typology of climate information users for adaptation to agricultural droughts in Uruguay. *Climate Services*, 22, 100214.
- DIEA. (2011). Censo general agropecuario. In: DIEA - MGAP.
- DIEA. (2020). Encuesta Agrícola “Invierno 2020”. In: DIEA - MGAP.
- DIEA. (2021). Encuesta Agrícola “Invierno 2021”. In: DIEA - MGAP.
- Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijsman, A. J., y Ritchie, J. T. (2003). The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18(3-4), 235-265.
- Molfino, J., y Califra, A. (2001). Agua disponible de las tierras del Uruguay. *Segunda aproximación. División Suelos y Aguas. Dirección General de Recursos Naturales Renovables Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca*.
- Rizzo, G., Monzon, J. P., y Ernst, O. (2021). Cropping system-imposed yield gap: Proof of concept on soybean cropping systems in Uruguay. *Field Crops Research*, 260, 107944.
- Van Ittersum, M. K., Cassman, K. G., Grassini, P., Wolf, J., Titttonell, P., y Hochman, Z. (2013). Yield gap analysis with local to global relevance—a review. *Field Crops Research*, 143, 4-17.
- Verdin, A., Rajagopalan, B., Kleiber, W., y Katz, R. W. (2015). Coupled stochastic weather generation using spatial and generalized linear models. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 29(2), 347-356. doi:10.1007/s00477-014-0911-6
- Wood, S. N. (2017). *Generalized additive models: an introduction with R*: Chapman and Hall/CRC.
- Wu, Y., Guo, H., Zhang, A., y Wang, J. a. (2021). Establishment and characteristics analysis of a crop–drought vulnerability curve: a case study of European winter wheat. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(4), 1209-1228.