

Mapeando la brecha de rendimiento en soja para diferentes zonas climáticas y grupos de suelos

Fotos: Ing. Agr. Santiago Rodríguez

Gonzalo Rizzo

Ing. Agr. Docente Grado 1, Departamento de Producción Vegetal, Facultad de Agronomía, Estación Experimental "Dr. Mario A. Cassinoni", Universidad de la República.
gonrizzo@gmail.com

Oswaldo Ernst

Ing. Agr. Profesor titular, Departamento de Producción Vegetal, Facultad de Agronomía, Estación Experimental "Dr. Mario A. Cassinoni", Universidad de la República.
oernst@fagro.edu.uy

1. INTRODUCCIÓN

El aumento de producción de soja en Uruguay fue, principalmente, el resultado de la expansión de la superficie sembrada, ya que el rendimiento medio ha permanecido bajo, (rendimiento medio de 2,1 Mg ha⁻¹ para el período 2001-2016) y sin un cambio cuantificable a través del tiempo ($y = 0,013x + 1,97$; $R^2 = 0,04$) (DIEA 2008, DIEA 2016). Esta expansión de 27.600 a 1.208.000 ha en la zafra 2015/2016 (DIEA 2008, DIEA 2016) se produjo incorporando suelos frágiles, con baja aptitud para la agricultura continua tanto dentro de cada predio de la región agrícola tradicional, como en las nuevas zonas incorporadas a la agricultura. Este propio proceso ha sido manejado como explicación del estancamiento de la productividad por unidad de superficie.

Aportar a un proceso de intensificación sostenible que incluya el cultivo de soja, implica reconocer las diferentes capacidades de uso de los suelos y reducir las brechas de rendimiento. Fischer (2010) define a la brecha de rendimiento como la diferencia entre el rendimiento máximo teórico (rendimiento potencial; Y_p) y el rendimiento alcanzado por los productores (rendimiento actual; Y_a). En regiones donde los cultivos son predominantemente en secano, el referente más adecuado es el rendimiento limitado por agua (Y_w) (Van Ittersum *et al.*, 2013). Las brechas de rendimiento (Y_g , definida como la diferencia entre Y_w y Y_a) proveen una estimación de la capacidad productiva sin explotar de una región y un diagnóstico del estado de sus sistemas de producción (Lobell *et al.*, 2009), aspectos que no se han cuantificado para Uruguay.

Con relación al efecto de la capacidad de uso del suelo, González (2013) identificó cinco grupos definidos por el rendimiento de soja y su variabilidad a partir de registros de chacra de productores de FUCREA. El grupo de rendimientos más altos estuvo integrado por chacras con rendimientos entre 3,1 a 4,7 Mg ha⁻¹, mientras que el de rendimientos bajos lo integraron chacras con rendimiento entre 1,5 a 2,1 Mg ha⁻¹. En los grupos de rendimientos altos y muy altos predominaron grupos de suelos clasificados como de aptitud alta a muy alta, aunque igualmente, se mantuvieron situaciones de bajo rendimiento atribuidos a condiciones climáticas o fallas de manejo. En tanto, los grupos de bajos rendimientos mostraron una fuerte asociación con los suelos de menor aptitud agrícola.

Los objetivos de este trabajo fueron: i- estimar los rendimientos potenciales, los rendimientos potenciales limitados por agua y las brechas de rendimiento para las cinco zonas más relevantes para la producción de soja de Uruguay; ii- evaluar la variabilidad espacial y temporal de las brechas de rendimiento.

2. METODOLOGÍA

Para la construcción de los mapas se siguió el protocolo de trabajo establecido por el proyecto Global Yield Gap Atlas (www.yieldgap.org), lo cual supuso el cumplimiento de las etapas siguientes.

2.1. Área del cultivo y rendimiento actual

Los datos de área del cultivo a nivel de área de enumeración (mínima unidad geográfica definida con fines administrativos, equivalente al condado en EUA) fueron obtenidos a partir del Censo Agrícola 2011 (DIEA, Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca de la República Oriental del Uruguay). El rendimiento promedio para las últimas 6 zafas (2009-2010 a 2014-2015) se obtuvo de las bases de datos de FUCREA (<http://www.fucrea.org/>) y MGAP-DIEA.

2.2. Datos climáticos y estaciones meteorológicas

Los datos climáticos se obtuvieron del Banco de datos agroclimáticos de Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA; <http://www.inia.uy/gras/Clima/Banco-datos-agroclimatico>) y del Instituto Uruguayo de Meteorología (Inumet; <http://www.meteorologia.com.uy/>). De estas fuentes se tomaron datos de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitaciones. En base a la distribución del área de cultivo de soja y de las zonas agroclimáticas (CZ) definidas para Uruguay (Van Wart *et al.*, 2013), se seleccionó un total de 5 estaciones meteorológicas de referencia (de aquí en adelante llamadas RWS), entorno a las cuales se definió un área 100 km de radio centrado en cada RWS y cortado por las CZ, a las cuales llamamos zonas buffer. Estas zonas buffer lograron cubrir el 71% del total del área de soja cosechada, mientras que las zonas agroclimáticas en las que se ubican las RWS cubrió el 97% del área de soja del país.

Se realizó un control de calidad, llenado y correcciones de los datos climáticos colectados siguiendo el protocolo definido por Van Wart *et al.* (2015). Estas correcciones fueron siempre menores al 3% de los datos, para todas las variables. NASA-POWER (<http://power.larc.nasa.gov/>) fue empleada como fuente de datos de radiación solar incidente para todas las RWS. Se realizó una comparación entre los datos de radiación de NASA-POWER y mediciones de radiación solar incidente para un subconjunto de RWS y años que mostraron un alto

grado de concordancia entre ambas fuentes de datos (RMSE: 2,7 MJ m⁻² d⁻¹; R² = 0.91) (Rizzo, datos sin publicar). Con registros completos para el período 2000-2015 se simuló Yp y Yw. El primer ciclo de cultivos simulado fue 2000-2001 (año de cosecha 2001) y el último fue 2014-2015 (año de cosecha 2015), por lo tanto, se simularon un total de 15 zafas.

2.3. Datos de suelo

La mayor parte de los suelos donde se hace agricultura (tantos como fuera necesario para lograr una cobertura mayor al 90% del área de soja dentro de cada RWS), se identificó en base a la Carta de Grupos de suelos Coneat (<http://www.cebra.com.uy/renare/informacion-geografica/mapas-e-informacion/carta-grupo-suelos-coneat/>) aportada por la División de Recursos Naturales del Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Se siguió un proceso de dos pasos: i) se utilizó la Carta de Suelos Coneat (1:40.000) para calcular el área de los diferentes grupos dentro de cada RWS, y ii) se clasificaron los suelos según el porcentaje de cobertura de la RWS y se seleccionaron los grupos de suelo hasta lograr una cobertura del 90% de cada zona buffer (10 a 16 grupos) con los cuales se realizaron las simulaciones, cuyo resultado fue posteriormente ponderado por el área relativa de cada grupo dentro de la RWS. Los parámetros de suelo necesarios para las simulaciones se obtuvieron de las descripciones de suelos disponibles en el Compendio de Suelos del Uruguay (<http://www.cebra.com.uy/renare/biblioteca-digital/>).

2.4. Sistema de cultivo e información de manejo para las simulaciones

Las prácticas de manejo para cada zona buffer fueron estimadas a partir de los datos reportados por los productores en la base de datos de Fucrea. La información derivada fue: fecha de siembra promedio, nombre del cultivar dominante y su



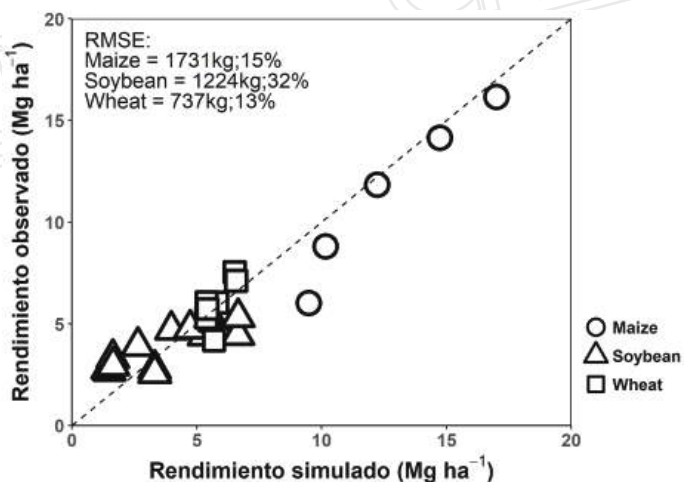


Figura 1: Rendimientos simulados versus rendimientos observados para el cultivo de soja empleando el modelo de simulación CROPGRO-soybean de la plataforma DSSAT v4.6 (Jones *et al.*, 2003).

3. RESULTADOS

3.1. Variabilidad del rendimiento potencial y rendimiento limitado por agua

grupo de madurez y la densidad de siembra. Esta información fue posteriormente corroborada por expertos a nivel nacional. Las rotaciones de cultivos dominantes y su proporción respecto del total del área de cosecha fueron definidas en base a las secuencias reportadas en los Planes de Uso de Suelos (información aportada por Renare, MGAP).

Las simulaciones fueron realizadas usando el modelo de simulación de soja CROPGRO anclado en DSSAT v 4.6 (Jones *et al.*, 2003). Los coeficientes genéticos fueron previamente derivados y validados por Monzon *et al.* (2007, 2012) y Aramburu *et al.* (2015) basados en datos de experimentos en secano y riego en Argentina. El modelo fue evaluado para las condiciones de Uruguay usando datos de ensayos bien manejados llevados a cabo en La Estanzuela durante 2014-2015 (Figura 1).

Para tomar en cuenta las diferencias de agua de suelo inicial a la siembra a través de los años, se simuló la secuencia entera, asumiendo un 50% de agua disponible para las plantas en el primer año de la serie y un residuo de maíz de 5,0 Mg ha⁻¹, siguiendo el procedimiento de Aramburu *et al.* (2015). Las rotaciones simuladas fueron: cultivo de cobertura-soja de primera-trigo-soja de segunda (2 años), cultivo de cobertura-

soja de primera (1 año), cultivo de cobertura-soja de primera-trigo-maíz-barbecho-soja de primera (3 años), excepto para Treinta y Tres. Las simulaciones fueron inicializadas en diferentes años para tener rendimientos simulados para todos los años del período. Se asumió un crecimiento de los cultivos sin limitaciones por nutrientes y sin incidencias de estrés biótico.

Se simuló cada combinación de rotación de cultivos por tipo de suelos, para cada combinación de cultivo por RWS. Luego fueron ponderadas por su proporción relativa para estimar un Yp y Yw promedio a nivel de zona buffer, para soja de primera y soja de segunda separadamente. La brecha de rendimiento fue calculada como la diferencia de Yw promedio en el largo plazo y la media (2010-2015) del rendimiento actual reportado por los productores.

A nivel nacional Yw fue estimado en 3,5 Mg ha⁻¹ para soja en conjunto, compuesto por 3,6 Mg ha⁻¹ para soja de primera y 3,4 Mg ha⁻¹ para soja de segunda. Las zonas climáticas presentaron un rango de Yw para soja de primera desde 3,2 a 3,8 Mg ha⁻¹. En tanto, para soja de segunda, los resultados variaron en un rango desde 3,3 a 3,7 Mg ha⁻¹, siendo la zona climática que abarca a Mercedes la de mayor Yw, mostrando diferencias significativas en ambos casos (p-valor < 0.01 para soja de primera y soja de segunda).

La RWS de Treinta y Tres fue la de más alto Yw para soja de primera (4,0 Mg ha⁻¹) y la RWS de Mercedes la de mayor Yw para soja de segunda (3,7 Mg ha⁻¹). La RWS de Young presentó los valores de Yw más bajos tanto para primera como para segunda (3,2 Mg ha⁻¹ y 3,3 Mg ha⁻¹ para soja de primera y soja de segunda respectivamente) aunque no hubo diferencias significativas entre RWS (p-valor > 0,86 y p-valor > 0,97, soja de primera y soja de segunda) [Figura 2]. Sin embargo, los rendimientos más bajos de las RWS estuvieron asociados a una mayor variabilidad interanual (Figura 3a). Esta asociación fue explicada por la variabilidad en el aporte de agua (agua en

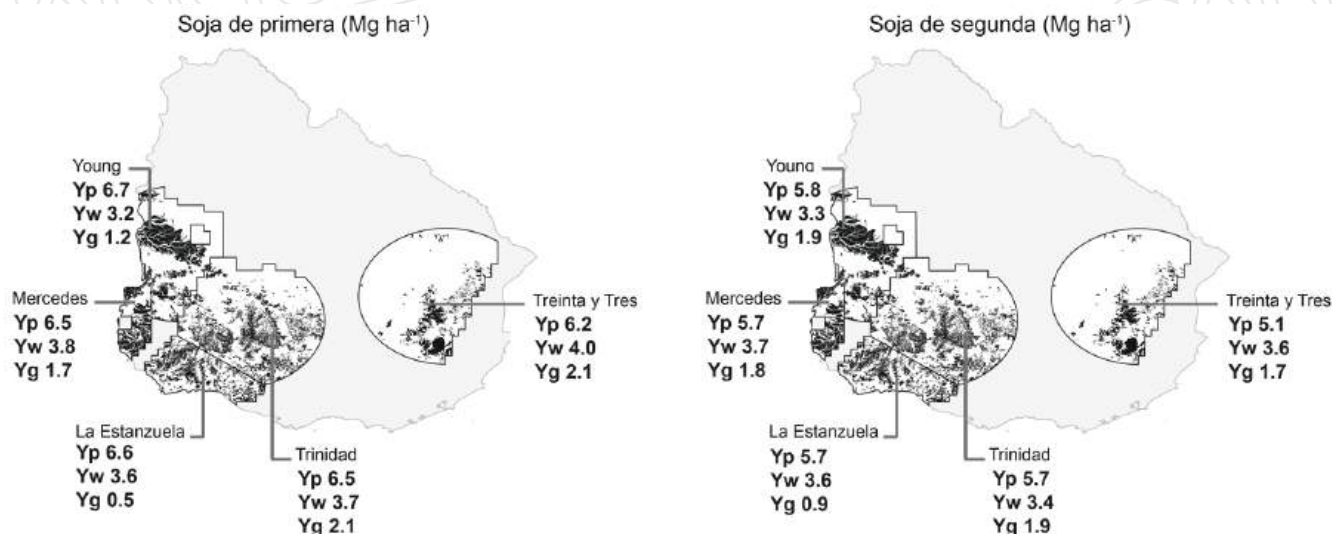


Figura 2: Rendimiento potencial (Yp), rendimiento potencial limitado por agua (Yw) y brecha de rendimiento (Yg), estimados para soja de primera y soja de segunda para las zonas buffers definidas para Uruguay.

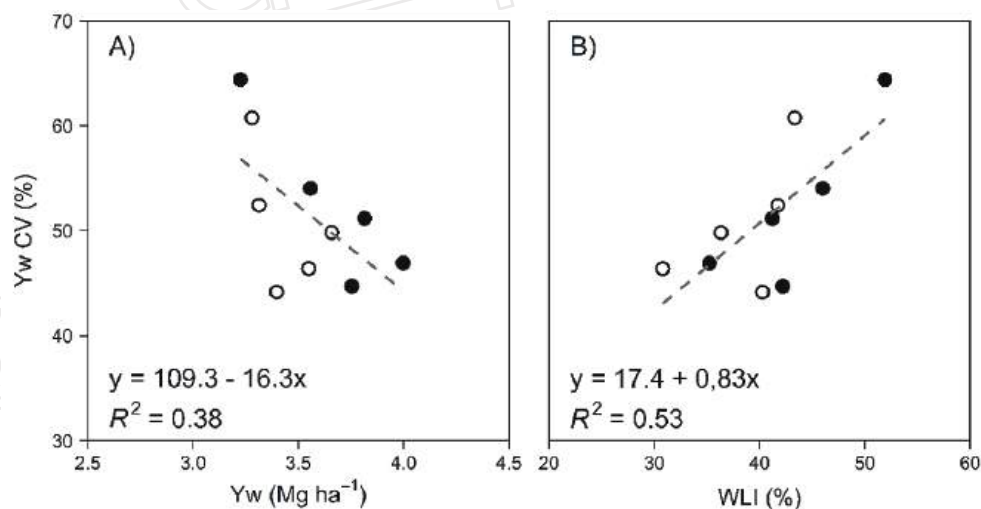


Figura 3: Figura 3: Coeficiente de variación (CV en %) para rendimiento limitado por agua (Yw), calculado para cada estación meteorológica de referencia en función de a) rendimiento limitado por agua (Yw), y b) índice de limitación por agua (WLI, diferencia entre el rendimiento potencial y el rendimiento limitado por agua, expresado como porcentaje del rendimiento potencial).

el suelo a la siembra más las precipitaciones durante el ciclo del cultivo) como lo muestra la asociación positiva entre el coeficiente de variación (CV en %) del Yw y el WLI (índice de limitación por agua, definido como la diferencia entre Yp y Yw, expresado como porcentaje de Yp) (Figura 3b).

3.2. Variabilidad de la brecha de rendimiento de soja

La brecha de rendimiento estimada para soja de primera en Uruguay fue de 1,5 Mg ha⁻¹, mientras que la soja de segunda se estimó en 1,7 Mg ha⁻¹, la cual expresada con relación a Yw, significó una brecha relativa del 42% y 50% (para soja de primera y segunda respectivamente). Existió variabilidad dentro del país a través de las RWS (0,5 a 2,2 Mg ha⁻¹ en soja de primera y 0,9 a 1,9 Mg ha⁻¹ en soja de segunda), encontrándose a su vez una correlación positiva entre Yg y Yw

(p-valor < 0,05) en ambos casos. Esto implica que la brecha se amplía a medida que aumenta el Yw entre zonas, lo cual revela una lógica de decisión donde se sobreestima el riesgo a tener bajos rendimientos y por ende, se reduce la inversión de insumos (energía) en los sistemas dejándose sin explotar una porción del potencial. Conocer este comportamiento nos permite identificar regiones donde hay falta de adopción de tecnología o falta de inversión en insumos de producción, donde sería necesario desarrollar políticas que promuevan el cierre de estas brechas de rendimiento.

La brecha de rendimiento fue mayor en los sitios que presentaron menores niveles de limitación hídrica (Figura 4). Este surge como un resultado contundente de nuestro estudio ya que la mayor brecha está en los sitios que presenta los mejores regímenes hídricos, siendo las prácticas de manejo empleadas las que se encuentran limitando los rendimientos actuales a un nivel muy inferior al que podrían alcanzar.

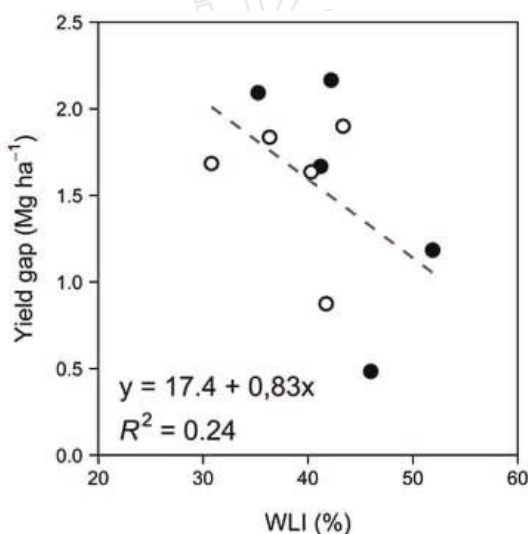



Figura 4: Brecha de rendimiento de soja (Yg) (puntos llenos corresponden a soja de primera y puntos vacíos a soja de segunda) expresada en Mg ha⁻¹, en función del índice de limitación por agua (WLI, diferencia entre el rendimiento potencial y el rendimiento limitado por agua, expresado como porcentaje del rendimiento potencial). Se encontró una correlación significativa entre Yg y WLI (p-valor < 0,05).

4. COMENTARIOS GENERALES

Los grupos de suelo mostraron diferencias significativas en Yw, donde suelos profundos mostraron los mayores valores de Yw. Los suelos pertenecientes a los grupos Coneat 03.51, 10.7 y 11.4 (sólo en soja de segunda), fueron los suelos con los Yw más altos de este estudio. Los suelos del grupo Coneat G10.2 fueron los que mostraron los Yw más bajos dado que son suelos superficiales con baja capacidad de almacenaje de agua, lo que los convierte en los suelos con la menor probabilidad de alcanzar rendimientos similares al Yw estimado a nacional.

Uruguay presenta una brecha de rendimiento relativa al Yw a nivel país del 42% y 50% para soja de primera y soja de segunda. Esto implica que aún en condiciones de sequo es posible aumentar los rendimientos actuales en magnitudes considerables. Estas estimaciones no toman en cuenta la presencia de agentes reductores del rendimiento por lo que deben ser interpretadas como el techo máximo a alcanzar. En condiciones reales de cultivos, los factores mencionados tienen un impacto negativo en el nivel de rendimiento en función del grado de control que el agricultor es capaz de ejercer sobre ellos.

Estimar lo rendimientos de los cultivos a nivel país, supuso escalar los resultados desde los grupos de suelos hacia niveles superiores. Si bien el protocolo que seguimos está claramente validado y resulta consistente a través de amplias regiones del mundo, el hecho de establecer un valor fijo de la proporción soja de primera y soja de segunda para las

diferentes RWS enmascara la realidad socioeconómica de la actividad agrícola, donde las proporciones que se siembran como soja de primera y soja de segunda pueden variar año a año. Nuestro trabajo tomó proporciones del área de cultivo de soja ocupada por soja de segunda que fue desde 5 a 35% para las diferentes RWS. 

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aramburu Merlos F.; Monzon, J.P.; Mercu, J.L.; Taboada, M.A.; Andrade, F.H.; Hall, A.J.; Jobbagy, E.; Cassman, K.G.; Grassini, P. 2015. *Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps*. Field Crops Research, 184: 145-154.

CORSI, W.C. 1982. Regionalización agroclimática de Uruguay para cultivos. Centro de Investigaciones Agrícolas Alberto Boerger. Miscelánea CIAAB. no. 40. 28 p.

DIEA-MGAP. 2008. Anuario estadístico agropecuario. [en línea]. Consultado 1 de agosto de 2017. Disponible en: <http://www2.mgap.gub.uy/portal/page.aspx?2.diea.diea-anuario-2008,O,es,0>

DIEA-MGAP. 2016. Anuario estadístico agropecuario. [en línea]. Consultado 1 de agosto de 2017. Disponible en: <http://www.mgap.gub.uy/unidad-ejecutora/oficina-de-programacion-y-politicas-agropecuarias/publicaciones/anuarios-diea/anuario2016>

Fischer K.S.; Edmeades G.O. 2010. *Breeding and cereal yield progress*. Crop Science, 50: 85-98.

Gonzalez J. 2013. Análisis de las variables ambientales y de manejo vinculadas a las variaciones de rendimiento en grano en cultivos agrícolas de secano, a partir de datos de chacras de agricultores CREA. [Tesis para la obtención del título de Ingeniero Agrónomo]. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. Uruguay. 386 p.

Jones J.W.; Hoogenboom G.; Porter C.H.; Boote K.J.; Batchelor W.D.; Hunt L.A.; Wilkens P.W.; Singh U.; Gijssman A.J.; Ritchie J.T. 2003. *The DSSAT cropping system model*. European Journal of Agronomy, 18: 235-265.

Monzon J.P.; Sadras V.O.; Abbate P.A.; Caviglia O.P. 2007. *Modelling management strategies for wheat-soybean double crops in the south-eastern Pampas*. Field Crops Research, 101: 44-52.

Monzon J.P.; Sadras V.O.; Andrade F.H. 2012. *Modelled yield and water use efficiency of maize in response to crop management and Southern Oscillation Index in a soil-climate transect in Argentina*. Field Crops Research, 130: 8-18.

Lobell D.B. 2013. *The use of satellite data for crop yield gap analysis*. Field Crops Research, 143: 56-64.

Van Ittersum M.K.; Cassman K.G.; Grassini P.; Wolf J.; Tittone P.; Hochman Z. 2013. *Yield gap analysis with local to global relevance: A review*. Field Crops Research, 143: 4-17.

Van Wart J.; Van Bussel L.G.J.; Wolf J.; Licker R.; Grassini P.; Nelson A.; Boogaard H.; Gerber J.; Mueller N.; Claessens L.; Van Ittersum M.K.; Cassman K.G. 2013. *Use of agro-climatic zones to upscale simulated crop yield potential*. Field Crops Research, 143: 44-55.

Van Wart J.; Grassini P.; Yang H.; Claessens L.; Jarvis A.; Cassman K.G. 2015. *Creating long-term weather data from thin air for crop simulation modeling*. Agricultural and Forest Meteorology, 209-210: 49-58.



Cultivo de soja a inicios de la fase reproductiva (foto gentileza: Ing. Agr. Santiago Rodríguez).