

**CUANTIFICACIÓN DE LAS BRECHAS DE RENDIMIENTO DE  
SOJA, TRIGO Y MAÍZ DE ARGENTINA**

**Fernando Aramburu Merlos**

Trabajo de Tesis para ser presentado como requisito parcial para optar al Título de  
***MAGISTER SCIENTIAE en Producción Vegetal***

Área de Ciencias de las Plantas y Recursos Naturales

PROGRAMA DE POSTGRADO EN CIENCIAS AGRARIAS

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE MAR DEL PLATA**

Balcarce, Argentina

Marzo de 2016

**CUANTIFICACIÓN DE LAS BRECHAS DE RENDIMIENTO DE  
SOJA, TRIGO Y MAÍZ DE ARGENTINA**

**Fernando Aramburu Merlos**

**Comité consejero**

.....

Ing. Agr. Juan Pablo Monzon, Dr.

**Director de Tesis**

.....

Ing. Agr. Fernando H. Andrade, MSc., PhD.

**Codirector de Tesis**

.....

Ing. Agr. Patricio Grassini, MSc., PhD.

**Asesor**

**CUANTIFICACIÓN DE LAS BRECHAS DE RENDIMIENTO DE  
SOJA, TRIGO Y MAÍZ DE ARGENTINA**

**Fernando Aramburu Merlos**

**Aprobada por:**

.....  
Ing. Agr. Hernán E. Echeverría, MSc.

.....  
Ing. Agr. Fernando Salvagiotti, PhD.

.....  
Ing. Agr. Gustavo A. Maddonni, MSc., Dr.

## AGRADECIMIENTOS

- A Juan Pablo Monzon, por estar siempre. Tuve la suerte de tener a un director de tesis que siempre estuvo cuando lo necesitaba, y eso no es poca cosa.
- A Fernando Andrade por sus invaluable consejos y su gran sabiduría que va mucho más allá de los cultivos. Fer es un referente y un ejemplo de vida.
- A Patricio Grassini por su constante asesoramiento. Sin importar cuan ocupado haya estado, siempre tuvo tiempo para ocuparse de este proyecto.
- A Jorge Luis Mercau por su gran ayuda para el entendimiento de eso que parece tan abstracto como los modelos de simulación.
- A Miguel Taboada, por su asesoramiento para la determinación de los suelos predominantes.
- A Antonio Hall y Esteban Jobbagy por sus consejos. Gracias a su increíble experiencia y conocimiento, con muy poca intervención, le dieron un salto de calidad al trabajo.
- A Agustin Giorno, Alberto Quiroga, Eduardo Martinez Quiroga, Fernando Ross, Juan Martin Capelle, Lía Olmedo Pico, Martín Sanchez, Octavio Caviglia y Pablo Calviño por su buena predisposición para responder a las encuestas sobre las prácticas de manejo predominantes de cada localidad evaluada.
- A todos los que fueron, son y serán siempre parte del grupo de Ecofisiología de Cultivos: Anibal, Roberto, Lucas, Javier, Lía, Mariana, Nico, el Negro, Lujan, Adriana, Sheila, Diego y Emi, por su amistad y excelente compañía que convierten el “tedio de la rutina en la oficina” en un hogar gigante con un montón de hermanxs (y un tío copado).
- A las chicas de trigo por su amistad incondicional.
- Y muy especialmente a Jime.

## INDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	Demanda futura de alimentos y posibilidades de aumentar la producción ....	1
1.2.	Producción de granos de la Argentina y su relación con el fenómeno ENSO	2
1.3.	Brechas de rendimiento: definición y métodos para su estimación .....	4
2.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	9
2.1.	Atlas Mundial de Brechas de Rendimiento.....	9
2.2.	Fuente de datos de rendimiento real y superficie cosechada.....	9
2.3.	Selección de estaciones meteorológicas de referencia y definición de zonas de influencia.....	10
2.4.	Control de calidad de datos climáticos.....	13
2.5.	Determinación de suelos dominantes .....	14
2.6.	Definición de prácticas de manejo de cultivo .....	17
2.7.	Modelización de sistemas de cultivos .....	19
2.8.	Método de integración a nivel de zonas climáticas y país .....	21
2.9.	Estimación de la producción alcanzable y su variación interanual .....	23
3.	RESULTADOS .....	25
3.1.	Rendimientos reales de soja, trigo y maíz de Argentina.....	25
3.2.	Rendimientos potenciales de soja, trigo y maíz a nivel de localidad y zona climática.....	28
3.3.	Variación espacial y temporal del rendimiento potencial en secano de soja, trigo y maíz en Argentina .....	29
3.4.	Variación espacial de las brechas de rendimiento de soja, trigo y maíz en Argentina.....	31
3.5.	Rendimientos y brechas de soja, trigo y maíz a nivel nacional y su variación interanual. ....	34
3.6.	Efecto del fenómeno ENSO sobre la producción de cultivos alcanzable de la Argentina.....	36
4.	DISCUSIÓN .....	38
5.	CONCLUSIONES.....	43
6.	APÉNDICE .....	44
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	48

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipo de suelos seleccionados para cada estación meteorológica de referencia (EMR) con sus principales características: profundidad (m), textura superficial y sub-superficial y pendiente. Además se indica la contribución relativa, para cada cultivo, de cada tipo de suelo al área cosechada en cada EMR. ....	15
Tabla 2. Prácticas de manejo de cultivo más frecuentes de las zonas de influencia de cada estación meteorológica de referencia (EMR), definidas a partir de encuestas a agrónomos referentes de cada zona. Se detalla, para cada cultivo, el grupo de madurez (GM) o la madurez relativa (MR) de los cultivares más utilizados en cada EMR, así como la densidad de plantas ( $\delta$ , plantas m <sup>2</sup> ) y la fecha de siembra (FS) predominantes de cada zona. ....	18
Tabla 3. Contribución porcentual de cada nivel analizado al área cosechada del nivel superior. Por ejemplo, el cultivo de soja de primera en Barrow contribuye en un 80% al área cosechada de la zona de influencia de esa estación meteorológica de referencia (EMR) para soja. Esta EMR, a su vez, aporta en un 60% al área cosechada de la zona climática I (ZC I), la cual aporta en un 5% al área cosechada de soja de la Argentina.....	23
Tabla 4. Rendimientos reales (RR) promedio (periodo 2005/06 - 2011/12) de la zona de influencia de cada estación meteorológica de referencia (EMR) y zona climática (ZC) con sus respectivos coeficientes de variación interanual (CV) para los cultivos de soja, trigo y maíz. ....	25
Tabla 5. Rendimientos potenciales (RP) promedio de cada estación meteorológica de referencia (EMR) y zona climática (ZC) con sus respectivos coeficientes de variación interanual (CV) para los cultivos de soja, trigo y maíz. Los valores de RP de soja se obtuvieron ponderando cultivos de primera y de segunda.....	28
Tabla 6. Rendimiento potencial y rendimiento potencial en secano de los cultivos de soja de primera y soja de segunda, promedio para cada estación meteorológica de referencia (EMR), ordenados por zona climática (ZC). Además se presentan los coeficientes de variación interanual de las medias (CV,%). ....	29
Tabla 7. Rendimiento potencial en secano (RPS) promedio y coeficientes de variación (CV) interanual para cada estación meteorológica de referencia (EMR) y zona climática (ZC) para los cultivos de soja, trigo y maíz. Los valores de RPS de soja se obtuvieron ponderando cultivos de primera y de segunda.....	30
Tabla 8. Brechas de rendimiento promedio de cada estación meteorológica de referencia (EMR) y zona climática (ZC), expresadas en toneladas por hectárea y como porcentaje del rendimiento potencial en secano, para soja, trigo y maíz. ....	32
Tabla 9. Rendimientos reales (promedio 2005/06 - 2011/12), rendimientos potenciales en secano, brechas de rendimiento, área cosechada (campaña 2011/12) y producción de cultivos alcanzable promedio para soja, trigo y maíz de la Argentina. Además se presenta el coeficiente de variación interanual (CV, %) del rendimiento real, del rendimiento potencial en secano y de la producción de cultivos alcanzable. Las brechas de rendimiento se expresan tanto en términos absolutos como relativos al rendimiento potencial en secano. Para obtener detalles sobre los cálculos ver secciones 2.8 y 2.9. ....	35

Tabla I. Tasa de ganancia de rendimiento real ( $\text{kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) obtenida entre 1990/91 a 2011/12 en la zona de influencia de cada estación meteorológica de referencia (EMR), y zona climática (ZC), para los cultivos soja, trigo y maíz.....	46
Tabla II. Índice de limitación hídrica ( <i>i.e.</i> diferencia entre el rendimiento potencial y el rendimiento potencial en seco) de cada estación meteorológica de referencia (EMR) y zona climática (ZC), expresado en toneladas por hectárea y como porcentaje del rendimiento potencial, para soja, trigo y maíz. Los valores de soja se obtuvieron ponderando cultivos de primera y de segunda.....	47
Tabla III. Rendimiento potencial en seco medio (percentil 50) de cada zona climática, según la fase del fenómeno El Niño – Oscilación del Sur, para soja y maíz. Letras distintas entre fases para un mismo cultivo representan diferencias de rendimiento potencial en seco significativas ( $P < 0,05$ , Kruskal-Wallis' test).....	47

## INDICE DE FIGURAS

- Figura 1. A) rendimiento real (RR) relativizado al RR estimado por regresión lineal para el último año analizado (RR en función del año) de cada combinación de cultivo por localidad (RR relativo), y B) su coeficiente de variación interanual ( $CV_{RR}$ , %), en función del número de años incluido en el cálculo del promedio. Cada punto o dato del Box-plot (A) y cada línea del gráfico lineal (B) corresponde a una combinación de cultivo por localidad..... 10
- Figura 2. (a) Estaciones meteorológicas de referencia seleccionadas (triángulos llenos) con sus correspondientes zonas de influencia (círculos sombreados) y zonas climáticas donde éstas se encuentran (identificadas por números romanos), y distribución del área cosechada (AC) de soja (b), trigo (c), y maíz (d) para el periodo 2006-2012, expresada como % de la superficie total de cada departamento. .... 12
- Figura 3. Radiación solar diaria observada, medida con radiómetros en 6 localidades (Obs,  $MJ\ m^{-2}$ ), en función de: (A) radiación solar diaria obtenida del servicio NASA-POWER (NASA,  $MJ\ m^{-2}$ ), y (B) radiación solar diaria estimada por el INTA y el SMN a partir de mediciones de heliofanía efectiva. La línea gris representa  $y = x$ . Además se presenta la raíz del cuadrado medio del error (RMSE), y sus componentes: error en la estimación de la media (SB), error en la estimación de la magnitud del desvío (SDSD); y el error debido a la falta de correlación (LCS) (Kobayashi y Salam, 2000). ..... 14
- Figura 4. Comparación de rendimientos observados contra rendimientos simulados para soja (A), trigo (B) y maíz (C). La línea continua representa  $y = x$ , y las líneas punteadas  $y = x \pm 20\%$ . Se presenta la raíz del cuadrado medio del error, expresada como porcentaje de la media observada (V), y sus componentes: error en la estimación de la media (SB), error en la estimación de la magnitud del desvío (SDSD), error asociado con la falta de correlación (LCS), expresados como porcentaje del cuadrado medio del error (Kobayashi y Salam, 2000)..... 20
- Figura 5. Rendimientos reales a nivel nacional reportados por el Ministerio de Agricultura ( $RR_{Min.Agri}$ ) para las campañas 2005/06 a 2011/12, en función de los rendimientos reales estimados a partir del método de integración usado en la presente tesis ( $RR_{est}$ , cf. sección 2.8). La línea continua representa  $y = x$ . ..... 26
- Figura 6. Evolución del rendimiento real (RR) a nivel nacional de soja, trigo y maíz en la Argentina durante los últimos 30 años (1985 – 2015) según su fase del fenómeno El Niño – Oscilación del Sur (ENSO). Los recuadros interiores de los gráficos muestran los residuales relativos (%) obtenidos de la regresión lineal entre rendimiento real y año, clasificados según su fase del ENSO. A la derecha de cada gráfico se presentan tablas con los resultados del análisis de regresión lineal (rendimiento en función del año) y del análisis de los residuales relativos. En aquellas variables que se determinaron diferencias significativas entre fases (indicadas con \*), las mismas son indicadas con letras distintas en una misma columna ( $P < 0,05$ )..... 27
- Figura 7. Coeficiente de variación interanual (CV) del rendimiento potencial en seco (RPS) de cada estación meteorológica de referencia, expresado como porcentaje, en función de: (A) RPS ( $t\ ha^{-1}$ ), y (B) índice de limitación hídrica (ILH, *i.e.* diferencia entre el rendimiento potencial y el RPS expresado como porcentaje del rendimiento



- potencial), para soja, trigo y maíz. Se determinaron correlaciones negativas (A) y positivas (B) significativas para los tres cultivos ( $P < 0,05$ )..... 31
- Figura 8. Mapas de rendimientos potenciales en secano (RPS), rendimientos reales (RR) y brechas de rendimiento para (a) soja, (b) trigo y (c) maíz. En cada mapa la escala de colores representa el RPS a nivel de zona climática (ZC). A su vez, para cada estación meteorológica de referencia se indica el RPS (valor dentro del gráfico de tortas), y qué proporción de éste representa el RR (color oscuro) y la brecha de rendimiento (color claro). Todos los valores están expresados en toneladas por hectárea..... 33
- Figura 9. Brechas de rendimiento promedio de cada estación meteorológica de referencia (EMR) en función de la tasa de ganancia en rendimiento real (RR) de los últimos 20 años (1992-2012) de su zona de influencia, para soja, trigo y maíz. La tasa de ganancia de cada EMR se estimó como la pendiente de la regresión entre RR y año. Se determinaron correlaciones negativas significativas para los cultivos de trigo y maíz ( $P < 0,05$ ). Los valores de soja de la zona climática I presentaron un patrón diferente de brechas de rendimiento debido a una severa limitación hídrica, y son indicados con \*..... 34
- Figura 10. Brechas de rendimiento nacionales de cada ciclo agrícola (2005/06 – 2011/12) para soja, trigo y maíz, en función de: (A) año de cosecha, e (B) índice de limitación hídrica (ILH, *i.e.* diferencia entre el rendimiento potencial y el rendimiento potencial en secano expresado como porcentaje del rendimiento potencial). No se determinaron diferencias significativas en las pendientes de las regresiones lineales de brecha de rendimiento en función del ILH, entre cultivos ( $P = 0.46$ ), por lo que se ajustó una única regresión lineal para los tres cultivos..... 35
- Figura 11. Producción alcanzable de soja, trigo y maíz de la Argentina en función de la fase del fenómeno “El Niño – Oscilación del Sur” (ENSO). La producción alcanzable se estimó igual al 80% del rendimiento potencial en secano, considerando el área cosechada con cada cultivo durante la campaña 2011/12. En cada cultivo, letras distintas entre fases representan diferencias significativas ( $P < 0,05$ , Kruskal-Wallis’ test). La producción alcanzable de maíz en años La Niña presentó una varianza significativamente mayor al resto de las fases (Levene’s test,  $P < 0,05$ )..... 37
- Figura I. Datos climáticos mensuales de las estaciones meteorológicas de referencia. Se presentan las medianas y la distancia intercuartil para: temperaturas máximas y mínimas diarias (líneas discontinuas, paneles superiores), radiación solar diaria (línea gris continua, paneles superiores) y precipitaciones mensuales (línea de puntos, paneles inferiores).....44

## ABREVIATURAS Y SIGLAS

<b>Abreviatura</b>	<b>Significado</b>
CV	Coefficiente de variación
DSSAT	Decision Support System for Agrotechnology Transfer
EMR	Estación meteorológica de referencia
ENSO	El Niño – Oscilación del Sur
GAEZ	Zonas Agroecológicas Mundiales (Global Agro-Ecological Zones)
GYGA	Atlas Mundial de Brechas de Rendimiento (Global Yield Gap Atlas)
ILH	Índice de limitación hídrica
INTA	Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria
LCS	Error debido a la falta de correlación
NASA-POWER	Prediction Of Worldwide Energy Resource – National Aeronautics and Space Administration
RMSE	Raíz del cuadrado medio del error
RP	Rendimiento potencial
RPS	Rendimiento potencial en secano
RR	Rendimiento real
SB	Error en la estimación de la media
SDSD	Error en la estimación de la magnitud del desvío
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
V	Raíz del cuadrado medio del error, como % de la media observada
ZC	Zona climática

## RESUMEN

Argentina exporta entre el 70 y 90% de su producción anual de granos gracias a la combinación de climas y suelos favorables para la producción agrícola y una baja densidad poblacional. Este es el primer estudio que cuantifica cuál es el potencial para incrementar la producción nacional de soja, trigo y maíz a través de la reducción de las brechas de rendimiento. Los objetivos de esta tesis son: (i) estimar cuanto más grano puede producirse en Argentina sin expandir el área cultivada, a través de la reducción de las brechas de rendimiento, (ii) evaluar como varía la producción agrícola Argentina y sus brechas de rendimiento a través de las regiones y años, y (iii) analizar cómo estas variaciones interanuales se relacionan con el fenómeno El Niño – Oscilación del Sur (ENSO). La brecha de rendimiento se cuantificó como la diferencia entre el rendimiento potencial en seco (RPS) y el rendimiento real logrado por los productores (RR). Los RPS y los RR de cada cultivo se estimaron primero para localidades específicamente seleccionadas y estas estimaciones luego se integraron a escalas mayores según la distribución del área cosechada con cada cultivo. Se utilizaron modelos de simulación calibrados localmente para hacer las estimaciones de RPS, usando series climáticas de 30 años, y considerando los suelos y las prácticas de manejo dominantes para cada combinación de cultivo por localidad. Las brechas de rendimiento a nivel nacional fueron del 41% del RPS para trigo y maíz, y del 32% para soja. Si los productores redujeran estas brechas llevando los rendimientos a un nivel alcanzable del 80% del RPS, Argentina sería capaz de incrementar su producción anual de soja, trigo y maíz en 7,4, 5,2 y 9,2 Mt, respectivamente, sin incrementar el área cultivada. No obstante, la producción alcanzable de estos cultivos es altamente variable entre años, debido en parte a la influencia del fenómeno ENSO. Por ejemplo, la producción nacional alcanzable de soja es 12 Mt mayor en años El Niño que en años La Niña. Además, las brechas de rendimiento tendieron a ser mayores en años húmedos, lo que sugiere que los productores no pueden aprovechar completamente las ventajas de los años más favorables para la producción de granos. La importante variación regional de las brechas de rendimiento de la Argentina resalta la utilidad de este trabajo como marco para enfocar futuras investigaciones en búsqueda de identificar los factores claves para poder reducir las brechas en aquellas zonas donde los rendimientos se encuentran por debajo de su potencial.

**Palabras clave:** *Rendimiento potencial en seco, fenómeno El Niño – Oscilación del Sur, brecha de rendimiento, producción de cultivos alcanzable.*

## ABSTRACT

Favorable climate and soils for rainfed crop production, together with a relatively low population density, results in 70-90% of Argentina grain production being exported. No assessment to date has tried to estimate the potential for extra grain production for soybean, wheat and maize, which account for 78% of total harvested area, by yield gap closure on existing cropland area and its impact at a global scale. The objectives of this thesis are (i) to estimate how much additional grain could be produced without expanding crop area by closing yield gaps in Argentina, (ii) to investigate how this production and yield gaps varies across regions and years, and (iii) to analyze how these interannual variations are related to El Niño - Southern Oscillation phenomenon (ENSO). Production increase on existing crop area was assessed for soybean, wheat and maize by quantifying the yield gap (Yg), that is, the difference between water-limited yield potential (Yw) and actual yield (Ya). A bottom-up approach was followed to estimate Yw and Yg, in which these parameters were first estimated for specific locations in major crop producing areas and subsequently up-scaled to country level based on spatial distribution of crop area and climate zones. Locally calibrated crop simulation models were used to estimate Yw at each selected location based on long-term weather data and dominant soil types and management practices. For the analyzed period, the national level Yg represented 41% of Yw for both wheat and maize and 32% of the Yw for soybean. If farmers had closed Yg from these levels to 20% of Yw, Argentina could have increased its annual production of soybean, wheat and maize by a respective 7.4, 5.2, and 9.2 Mt, without expanding cropland area. This additional production would have represented an increase of 9%, 4%, and 9% of soybean, wheat, and maize global exports. This potential grain surplus was, however, highly variable because of the ENSO phenomenon: attainable annual soybean production was 12 Mt higher in favorable "El Niño" years compared with unfavorable "La Niña" years. Interestingly, Yg tended to be higher in wet years, suggesting that farmers do not take full advantage of years with favorable conditions for rainfed crop production. Regional variation in Yg was found in Argentina highlighting the usefulness of this work as a framework to target research and, ultimately, reduce gaps in areas where current yields are well below their potential.

**Keywords:** *Water-limited potential yield, El Niño – Southern Oscillation phenomenon, yield gap, attainable crop production.*

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Demanda futura de alimentos y posibilidades de aumentar la producción

La población mundial sigue incrementándose aunque a tasas decrecientes, estimándose que en el año 2100 va a estabilizarse en 10.000 millones de habitantes (Gerland et al., 2014). Junto al incremento *per se* de la población se proyectan mejoras en la cantidad y calidad de la dieta por habitante, con una mayor proporción de demanda de grano para forraje (Alexandratos y Bruinsma, 2012). Según las estimaciones más recientes de la FAO, la producción de cultivos debe ser incrementada en un 60% para el año 2050 para poder suplir la demanda futura de alimentos. En particular, se espera un mayor incremento en la demanda de soja (80%) y maíz (60%) que en la de trigo (40%) y arroz (28%) (Alexandratos y Bruinsma, 2012).

La producción de estos cultivos se puede incrementar mediante aumentos del área cosechada y/o con mayores rendimientos por unidad de superficie (Bruinsma, 2009). La incorporación de nuevas tierras a la agricultura fue el principal motor de aumento de la producción durante la primera mitad del siglo XX (Andrade, 2011). Sin embargo, en los últimos 50 años este proceso se ralentizó y solamente se incorporaron ~100 Mha más a la agricultura, es decir un 7% de la tierra cultivada total (Fischer et al., 2014). Actualmente el área cultivada total a nivel mundial está estabilizada en alrededor de 1.400 Mha, indicando que la tierra que se incorpora a agricultura apenas compensa lo que se pierde por urbanización, forestación o degradación (Bruinsma, 2009). Cabe destacar que desde el 2003 en adelante se ha producido un marcado aumento del área cosechada con cultivos anuales, pero debido a una mayor intensidad en el uso de la tierra (*i.e.* mayor número de cultivos por año) y no a un aumento del área cultivada *per se* (Fischer et al., 2014).

La tierra remanente potencialmente cultivable es escasa, y su conversión a la agricultura traería aparejado graves problemas ambientales y sociales (Lambin et al., 2013). Se estima que para el 2050 el área cosechada con cultivos anuales va a incrementarse en alrededor de 134 Mha (9%), y que la mitad de este incremento se debería a un aumento en la intensidad del uso de la tierra (Alexandratos y Bruinsma, 2012). Por lo tanto, el restante aumento de la producción para suplir la futura demanda de alimentos deberá producirse a través de mayores rendimientos por unidad de superficie.

La productividad de los cultivos por unidad de área se puede incrementar mediante el mejoramiento genético, es decir a través de la obtención de nuevos cultivares de mayor potencialidad y estabilidad, y/o reduciendo las brechas entre el rendimiento logrado por los productores y el que potencialmente podrían alcanzar si se aplicaran las mejores prácticas de manejo (Fischer et al., 2014). Históricamente, el mejoramiento genético de los cultivares y las prácticas agronómicas que mejoran los sistemas de producción co-evolucionaron y ambos aportaron al incremento de los rendimientos en proporciones similares (Fischer y Edmeades, 2010; Slafer y Calderini, 2005; Tollenaar y Lee, 2011). No obstante, existe creciente preocupación porque el incremento de los rendimientos en algunas de las principales regiones productoras de trigo, arroz y maíz se está desacelerando e incluso deteniendo (Cassman, 1999; Fischer et al., 2009; Grassini et al., 2013). Además, se estima que la tasa de ganancia genética en rendimiento no va a ser lo suficientemente alta como para llegar a suplir la futura demanda de alimentos (Cassman et al., 2010; Duvick y Cassman, 1999; Fischer y Edmeades, 2010; Hall y Richards, 2013).

Todo lo anterior remarca la necesidad de achicar las brechas de rendimiento en aquellas zonas donde estas son mayores (Cassman et al., 2003; Fischer y Edmeades, 2010; Foley et al., 2011; Godfray et al., 2010; Lobell et al., 2009).

## **1.2. Producción de granos de la Argentina y su relación con el fenómeno ENSO**

Argentina cumple un rol relevante en el mercado mundial de granos. Es el tercer exportador mundial de soja, el primer exportador de derivados de soja (*i.e.* harina, aceite y biodiesel), el segundo exportador de maíz y el sexto de trigo (incluyendo harina como equivalentes en grano)<sup>1</sup>. Además, cualquier incremento en la producción de granos de Argentina resultaría en un aumento paralelo en exportaciones, ya que se espera que su demanda interna de alimentos se mantenga relativamente estable en el futuro cercano (Alexandratos y Bruinsma, 2012).

El área cultivada de la Argentina al año 2015 es de ca. 32 millones de ha. El principal cultivo es soja, seguido de trigo y maíz, ocupando en su conjunto el 78% del área cultivada total (FAOSTAT, 2015). El país tiene un clima templado favorable para la producción de cultivos en secano, con un rango de precipitaciones que va, a través de las regiones bajo cultivo, de los 600 mm anuales en el sudoeste, hasta los 1400 mm en

---

<sup>1</sup> Promedio 2006-2011. Fuente: FAOSTAT (2015)

el nordeste. La mayor parte del área cultivada de la Argentina se encuentra bajo la influencia del fenómeno El Niño – Oscilación del Sur (ENSO). Las fases “El Niño” conducen a incrementos en las precipitaciones de primavera y verano, y, por lo tanto, a mayores rendimientos de los cultivos de grano grueso (e.g. soja y maíz), mientras que lo opuesto ocurre con las fases “La Niña” (Podestá et al., 1999). Este fenómeno también tiene efectos en otras regiones productoras de granos del mundo, llegando a disminuir la provisión mundial de alimentos durante las fases “La Niña” (Iizumi et al., 2014). En general, los suelos cultivados de la Argentina corresponden al Orden Molisoles, sin impedancias a la exploración radical, con excepción de algunas regiones donde hay presencia de tosca. Se puede encontrar una descripción más detallada del clima, suelo y sistemas de cultivos de la Argentina en Calviño y Monzon (2009), Caviglia y Andrade (2010), Hall et al. (1992) y Satorre (2011).

Los sistemas de cultivo de la Argentina han experimentado importantes cambios durante los últimos 20 años. Los rendimientos han aumentado significativamente (28, 40 y 128 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en soja, trigo y maíz, respectivamente)<sup>2</sup> gracias a la amplia adopción de nuevas tecnologías como la siembra directa, el mayor uso de fertilizantes, y la incorporación de materiales genéticos de alto potencial, genéticamente modificados para resistencia a herbicidas e insectos (Andrade et al., 2015 a; Grassini et al., 2013; Satorre, 2011). Sin embargo, la adopción e impacto de esta tecnología no fue homogénea a través de las distintas regiones de la Argentina, existiendo grandes diferencias en las tasas de ganancia de rendimiento entre regiones y cultivos, con mayores tasas en la región Pampeana central y menores tasas en las zonas extra-pampeanas (Magrin et al., 2005; Verón et al., 2004). En las últimas dos décadas también se expandió la frontera agrícola, tanto hacia áreas de buena aptitud que antes estaban destinadas a ganadería, como hacia el noroeste y nordeste del país, a expensas de la deforestación de bosques naturales, resultando en una creciente preocupación sobre el impacto ambiental de la agricultura (Lambin et al., 2013; Viglizzo et al., 2011 a; Volante et al., 2012). La gran variabilidad en los sistemas productivos y agroecosistemas de la Argentina remarca la necesidad de cuantificar la magnitud de las brechas de rendimiento para determinar cuáles son las áreas actualmente cultivadas con mayor potencial para el incremento de la producción de granos, y cuál sería su posible impacto a nivel nacional. A su vez, este tipo de análisis sirve para cuantificar en qué medida la variabilidad climática relacionada al fenómeno ENSO puede afectar la producción

---

<sup>2</sup> Fuente: Ministerio de Agricultura (2015).

alcanzable de la Argentina, y sentar las bases para futuros estudios sobre adaptación de nuevas prácticas de manejo, intensificación en el uso de la tierra, e impacto del cambio climático.

### 1.3. Brechas de rendimiento: definición y métodos para su estimación

El término brecha de rendimiento es ampliamente usado en la bibliografía, pudiendo adquirir diferentes significados. En general, hace referencia a la diferencia entre dos niveles de rendimiento. Dependiendo de los objetivos del estudio y del método de estimación, existen distintos tipos de rendimiento como referencia:

- Rendimiento real (RR): es el rendimiento promedio logrado por un productor o grupo de productores dentro de una escala espacial determinada (*i.e.* lote, campo, departamento, zona, región, país, etc.).
- Rendimiento alcanzable: rendimiento obtenido por un productor con recursos naturales promedio que adopta las mejores prácticas de manejo y niveles de insumos adecuados para maximizar el beneficio económico, teniendo en cuenta los riesgos asociados con el clima (Fischer et al., 2014). Ya que el riesgo es una parte importante de cualquier producción agrícola y debe ser considerada por los productores al momento de realizar una inversión, el concepto de rendimiento alcanzable debe moderar un nivel óptimo de insumos con una prudente aversión al riesgo.
- Rendimiento potencial (RP): es el rendimiento de un cultivar que crece en un ambiente para el cual está adaptado, sin limitaciones hídricas ni nutricionales, libre de plagas y enfermedades (Evans, 1993). Éste depende de las características del cultivar, del ambiente en el que se desarrolle, y de la interacción del genotipo con el ambiente. Los factores ambientales que influyen sobre el rendimiento potencial son la radiación, la temperatura y la concentración de CO<sub>2</sub>, y es independiente del tipo de suelo. Algunos autores utilizan el término “potencial de rendimiento” para el concepto antes descrito y definen al rendimiento potencial o teórico como el máximo rendimiento que podría alcanzar un cultivo en un ambiente determinado, dependiendo sólo de las limitaciones biofísicas de los procesos fundamentales que hacen a la producción de biomasa (*i.e.* fotosíntesis) y a la partición a estructuras reproductivas (Evans y Fischer, 1999). En la presente tesis no se discriminará entre rendimiento potencial y potencial de rendimiento, y de aquí en más sólo se hará referencia al rendimiento potencial tal como fue definido en un principio (Fischer et al., 2014).



➤ Rendimiento limitado sólo por agua o rendimiento potencial en secano (RPS): rendimiento de un cultivar que crece en un ambiente para el cual está adaptado, sin limitaciones nutricionales, libre de plagas y enfermedades (van Ittersum y Rabbinge, 1997). Es un concepto similar al del rendimiento potencial, pero el rendimiento está limitado por el agua disponible para el cultivo. Por lo tanto, también va a depender del régimen de precipitaciones y de las características del suelo que hacen a la capacidad de almacenaje de agua e infiltración. La diferencia entre el RP y el RPS es un indicador del grado de limitación hídrica a la que se enfrenta el cultivo (Sadras et al., 2015).

Dada la complejidad e incertidumbre asociada a la estimación del rendimiento alcanzable, es recomendable calcular las brechas de rendimiento en función del RPS (cuando se trata de cultivos de secano) o en función del RP (para cultivos bajo riego) y suponer que sólo es factible achicar la brecha de rendimiento hasta un nivel del 20% (Lobell et al., 2009; Sadras et al., 2015; van Ittersum et al., 2013). Esto se debe a que el objetivo de los productores no es el RP o RPS, sino el rendimiento alcanzable, el cual busca maximizar el beneficio económico. Se ha observado que este último es, aproximadamente, un 80% del RP (cultivos con riego) o RPS (cultivos en secano) (Cassman et al., 2010; Fischer et al., 2014; Grassini et al., 2011 a; van Wart et al., 2013 b). Por lo tanto, sólo se consideran brechas de rendimiento 'explotables' aquellas mayores al 20% del RP o RPS (Sadras et al., 2015).

Existen diversos métodos para estimar brechas de rendimiento, y su aplicabilidad depende tanto de la escala de interés (lote – región – país – mundo) como de la información disponible. Otro factor a tener en cuenta es la escala temporal. Si el objetivo es cuantificar las brechas con la tecnología disponible actualmente, la escala de tiempo debe ser lo suficientemente larga como para poder capturar toda la variación climática estacional e interanual posible, y lo suficientemente corta como para cumplir con el supuesto de tecnología constante (van Ittersum et al., 2013). Teniendo en cuenta la escala temporal y espacial de interés, y la información disponible para las estimaciones, Sadras et al. (2015) agruparon los distintos métodos para estimar brechas en cuatro categorías:

- Análisis estadísticos de rendimientos reales: A partir de una base de datos de rendimientos obtenidos en lotes de productores o ensayos (por ej. ensayos comparativos de rendimiento) se realiza un análisis de percentiles (u otro similar) para identificar los mejores rendimientos de una región con condiciones ambientales homogéneas en un año determinado. Este método permite obtener una

estimación de la brecha respecto al rendimiento alcanzable. Para que se cumpla el supuesto de condiciones edáficas, topográficas, y climáticas similares, se debe trabajar a una escala espacial y temporal limitada, y aun así se corre el riesgo de sobreestimar el rendimiento alcanzable, principalmente donde las precipitaciones son erráticas y/o los suelos muy variables. Por otro lado, en aquellas zonas donde no es factible que los productores adopten las mejores prácticas de manejo (ya sea por problemas económicos, estructurales, y/o culturales) el método deja de ser funcional para la estimación del rendimiento alcanzable. Hall et al. (2013) utilizaron exitosamente este método para estimar las brechas de rendimiento de girasol en Argentina.

- Funciones límite: Esta aproximación es una variante de la anterior, ya que se basa en comparaciones entre rendimientos reales, pero en este caso el rendimiento se expresa en función de uno o unos pocos factores ambientales que son determinantes para la definición del rendimiento alcanzable (en general agua, N, o profundidad del suelo). Así como el método anterior, éste no necesariamente capta las mejores prácticas de manejo, y su aplicabilidad espacial es limitada. Pero tiene la ventaja de que permite integrar un mayor número de años ya que expresa el rendimiento en función de un factor ambiental variable. La mayoría de los trabajos que utilizaron esta aproximación se basaron en lo realizado por French y Schultz (1984). Algunos ejemplos recientes son Calviño et al. (2003), Calviño y Sadras (1999), y Grassini et al. (2009 y 2011 b).

- Modelos de simulación de cultivos: Se pueden utilizar modelos de distinto nivel de complejidad para la estimación del RP o RPS. Los más simples utilizan índices climáticos, como ser el cociente fototermal de Fischer, para estimar el RP de una localidad o zona (Abbate et al., 1995; Fischer, 1985; Lázaro y Abbate, 2012). Cuando se busca hacer estimaciones del RPS, o bien cuando se desea captar un mayor número de interacciones, es necesario recurrir a modelos más complejos, preferentemente modelos de base diaria que estén basados en funciones ecofisiológicas robustas y que sean capaces de simular distintas prácticas de manejo (van Ittersum et al., 2013). Estos tipos de modelos requieren ser calibrados con datos de ensayos locales de RP o RPS. Además, como requieren el uso de un gran número de parámetros genéticos, climáticos y del suelo, el error asociado con una mala estimación de los mismos puede ser muy alto (Passioura, 1996). Si bien las estimaciones de RP o RPS son año y sitio-específicas, este método presenta la gran ventaja de poder ser repetido en un gran número de años (tantos como

información climática se disponga), y de esta manera captar toda la variabilidad climática del lugar manteniendo la tecnología constante. Por ejemplo, Kassie et al. (2014) analizando brechas de rendimiento de maíz en la región central de valle del Rift, Etiopía, observaron una gran variabilidad interanual en las estimaciones de RPS debido, principalmente, a variaciones en las precipitaciones entre estaciones de crecimiento. Esto resultó en grandes diferencias en las brechas de rendimiento entre años, ya que los RR presentaron menor variación interanual que el RPS.

- **Sensores remotos:** Dentro de esta categoría se engloban un gran número de trabajos que utilizan aproximaciones que combinan bases de datos de rendimiento real, uso de zonas agroclimáticas homogéneas (GAEZ u otras), imágenes satelitales, datos climáticos y/o modelos de simulación, para realizar estimaciones de RP o RPS a escala regional o mayor (Foley et al., 2011; Licker et al., 2010; Mueller et al., 2012). Si bien estos trabajos son relevantes para comparaciones groseras a escala global, carecen de significancia a escala local, ya que el error introducido por los supuestos necesarios para realizar el análisis muchas veces excede las diferencias entre regiones (van Ittersum et al., 2013).

Van Ittersum et al. (2013) evaluaron los distintos métodos según su capacidad para estimar el RP o el RPS para cultivos bajo riego o en seco, respectivamente, y sus resultantes brechas de rendimiento. Las comparaciones se hicieron a escala de lote de productor en unidades geográficas relativamente pequeñas. Los métodos comparados fueron: simulaciones sitio-específicas de RP o RPS por medio de modelos calibrados y validados localmente, estimaciones del RP o RPS a partir de los percentiles superiores de los datos de RR de productores, y máximos rendimientos alcanzados en ensayos comparativos de rendimiento. Además, se compararon estos resultados con los obtenidos en análisis globales. El uso de modelos de simulación resultó ser el método más confiable para la estimación de brechas de rendimiento en todos los casos gracias a su capacidad de captar las interacciones entre clima, suelo y manejo. A partir de este análisis, los autores realizaron una serie de recomendaciones para la cuantificación de brechas de rendimiento las cuales fueron tenidas en cuenta durante la elaboración de esta tesis.

### **Hipótesis**

En Argentina, para los cultivos de soja, trigo y maíz:

1. La brecha de rendimiento promedio (*i.e.* diferencia entre el RPS y el RR) es mayor al 20% del RPS.

2. Las brechas de rendimiento son mayores en las zonas extra-pampeanas que en la región Pampeana
3. Las brechas de rendimiento son mayores en los años de mayor que en los de menor disponibilidad hídrica.

### **Objetivo General**

Cuantificar a nivel nacional y regional la capacidad de producción de granos y las brechas de rendimiento de los tres principales cultivos de la Argentina (*i.e.* soja, trigo y maíz), teniendo en cuenta los rendimientos potenciales de los materiales genéticos, el área cultivada y las prácticas de manejo actuales, de manera consistente y reproducible.

### **Objetivos Particulares**

- (i) cuantificar el potencial para el aumento en la producción de soja, trigo y maíz en Argentina a través de la reducción de las brechas de rendimiento hasta un nivel alcanzable del 20% el RPS.
- (ii) analizar la variabilidad regional e interanual de los rendimientos potenciales en seco y de las brechas de rendimiento de soja, trigo y maíz.
- (iii) evaluar cómo se relaciona la variación interanual de los rendimientos alcanzables de soja, trigo y maíz con el fenómeno ENSO.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Atlas Mundial de Brechas de Rendimiento

La presente tesis forma parte de un proyecto global coordinado por investigadores de la Universidad de Nebraska, Lincoln (EEUU), y la Universidad de Wageningen (Países Bajos), denominado Atlas Mundial de Brechas de Rendimiento (GYGA por sus siglas en inglés). El objetivo es desarrollar un atlas virtual con estimaciones de rendimiento potenciales y brechas de rendimiento para los principales cultivos extensivos del mundo, haciendo las estimaciones país por país, pero utilizando una metodología consistente entre países, transparente y reproducible, basada en sólido conocimiento agronómico (Grassini et al., 2015; van Bussel et al., 2015; van Ittersum et al., 2013, [www.yieldgap.org](http://www.yieldgap.org)). La metodología para realizar las estimaciones para el Atlas consiste en la selección de un determinado número de localidades, situadas en zonas relevantes para la producción de cada cultivo, para las cuales se estima el RP y el RPS utilizando modelos de simulación de cultivo calibrados localmente. Las simulaciones deben estar basadas en datos locales de clima, suelo y manejo de cultivo. Las brechas de rendimiento son calculadas como la diferencia entre el RP o el RPS (según corresponda) y el RR. A su vez, se estima el grado de limitación hídrica como la diferencia entre el RP y el RPS. Luego las estimaciones se extrapolan a nivel de región y país, según la distribución del área cosechada de cada cultivo, y utilizando como marco zonas agroclimáticas homogéneas previamente definidas por van Wart et al. (2013 c). Las zonas climáticas donde se encuentran las localidades seleccionadas deben cubrir al menos el 70% del área total sembrada con cada cultivo.

### 2.2. Fuente de datos de rendimiento real y superficie cosechada

Se utilizaron los datos oficiales de superficie cosechada y rendimiento por cultivo y a nivel de departamento del Ministerio de Agricultura, reportados hasta el año 2012, a través de su Sistema Integrado de Información Agropecuaria (<http://www.siiia.gov.ar/>). Si bien estos datos son obtenidos a partir de consultas a informantes calificados, evaluaciones previas de la calidad de los datos estadísticos de la Argentina indican un nivel razonable de precisión (Sadras et al., 2014). Esta información se utilizó para seleccionar las localidades de estudio en función del área cosechada, y estimar el RR (cf. sección 2.3). Por lo tanto, primero fue necesario decidir el número de años a utilizar para los cálculos, considerando: (i) la reciente expansión del área cosechada (Viglizzo et al., 2011 a); (ii) el rápido aumento de los rendimientos de los últimos años (Grassini

et al., 2013); (iii) hacer una estimación robusta del RR promedio y su variabilidad, teniendo en cuenta la importante variación interanual en los rendimientos de la Argentina (van Ittersum et al., 2013). Para ello se realizaron promedios secuenciales de RR para cada departamento con un área cosechada mayor al 1% de su superficie, para soja, trigo y maíz, empezando desde el año más reciente, e incorporando sucesivamente un año más al cálculo del promedio. Para poder comparar entre regiones y cultivos, todos los RR promedio obtenidos se relativizaron al RR estimado por regresión lineal para el último año analizado (RR en función del año). De esta manera, se evaluaron los cambios en la dispersión de los RR relativos de cada departamento al incluir un mayor número de años en el promedio, así como la evolución de sus respectivos coeficientes de variación interanual (Figura 1). Por medio de este análisis se concluyó que se necesita, por lo menos, de 7 años de datos de RR para hacer una estimación robusta del RR promedio y su variabilidad interanual. Incluir un mayor número de años conllevaría a un mayor error, principalmente debido a la expansión del área cosechada de los últimos años (Viglizzo et al., 2011 b).

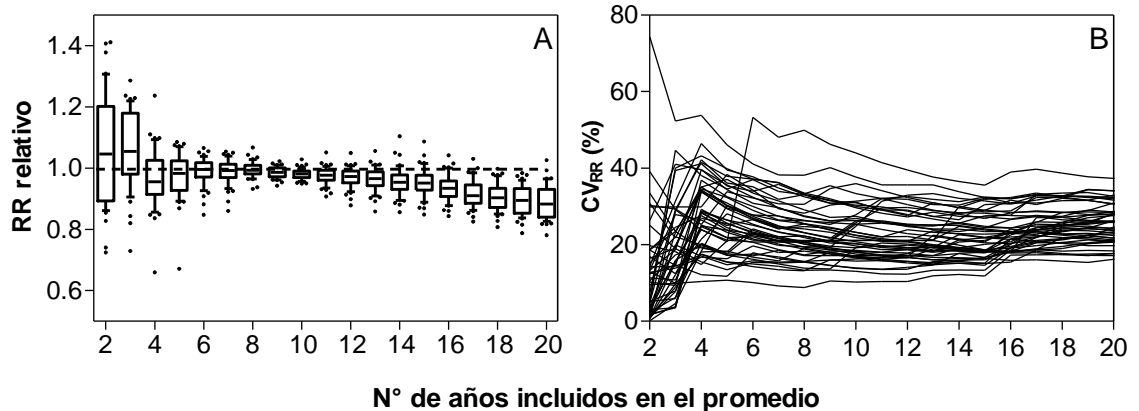


Figura 1. A) rendimiento real (RR) relativizado al RR estimado por regresión lineal para el último año analizado (RR en función del año) de cada combinación de cultivo por localidad (RR relativo), y B) su coeficiente de variación interanual ( $CV_{RR}$ , %), en función del número de años incluido en el cálculo del promedio. Cada punto o dato del Box-plot (A) y cada línea del gráfico lineal (B) corresponde a una combinación de cultivo por localidad.

### 2.3. Selección de estaciones meteorológicas de referencia y definición de zonas de influencia

Se dispuso de los datos climáticos de las estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Siguiendo el protocolo propuesto por van Bussel et al. (2015), se seleccionaron

las estaciones meteorológicas a utilizar, de ahora en más denominadas estaciones meteorológicas de referencia (EMR), basándose en el área cosechada de cada cultivo dentro de una zona de influencia de 100 km de radio alrededor de cada EMR, y enmarcada en la zona climática (ZC) donde dicha estación se encuentra. Se utilizaron las ZC previamente definidas por van Wart et al. (2013 c) para el proyecto GYGA. Cada ZC corresponde a una combinación específica de longitud de estación de crecimiento (en grados día), índice de aridez, y estacionalidad térmica (van Wart et al., 2013 c). Para cada cultivo, las EMR fueron seleccionadas iterativamente empezando por aquellas con mayor cobertura de área cosechada en su zona de influencia hasta alcanzar *ca.* 50% del área cosechada nacional y una cobertura mayor al 70% con las ZC donde estas EMR se encuentran, evitando seleccionar estaciones meteorológicas ubicadas a menos de 140 km de otra ya seleccionada, para salvar grandes superposiciones de zonas de influencia (van Bussel et al., 2015; van Wart et al., 2013 b).

Mediante este proceso se seleccionaron 16 EMR para soja y trigo, y 15 para maíz, lográndose cubrir el 53, 50 y 48% del área cosechada nacional de soja, trigo y maíz, respectivamente, con las zonas de influencia de las EMR, y 81, 70 y 78% con las ZC seleccionadas (Figura 2). Cinco de éstas ZC se encuentran en la región Pampeana (ZC I, II, III, IV y VII), dos en la región del Chaco (ZC V y VI), y una en el Espinal (ZC VIII) (Hall et al., 1992; Viglizzo et al., 2011 b).

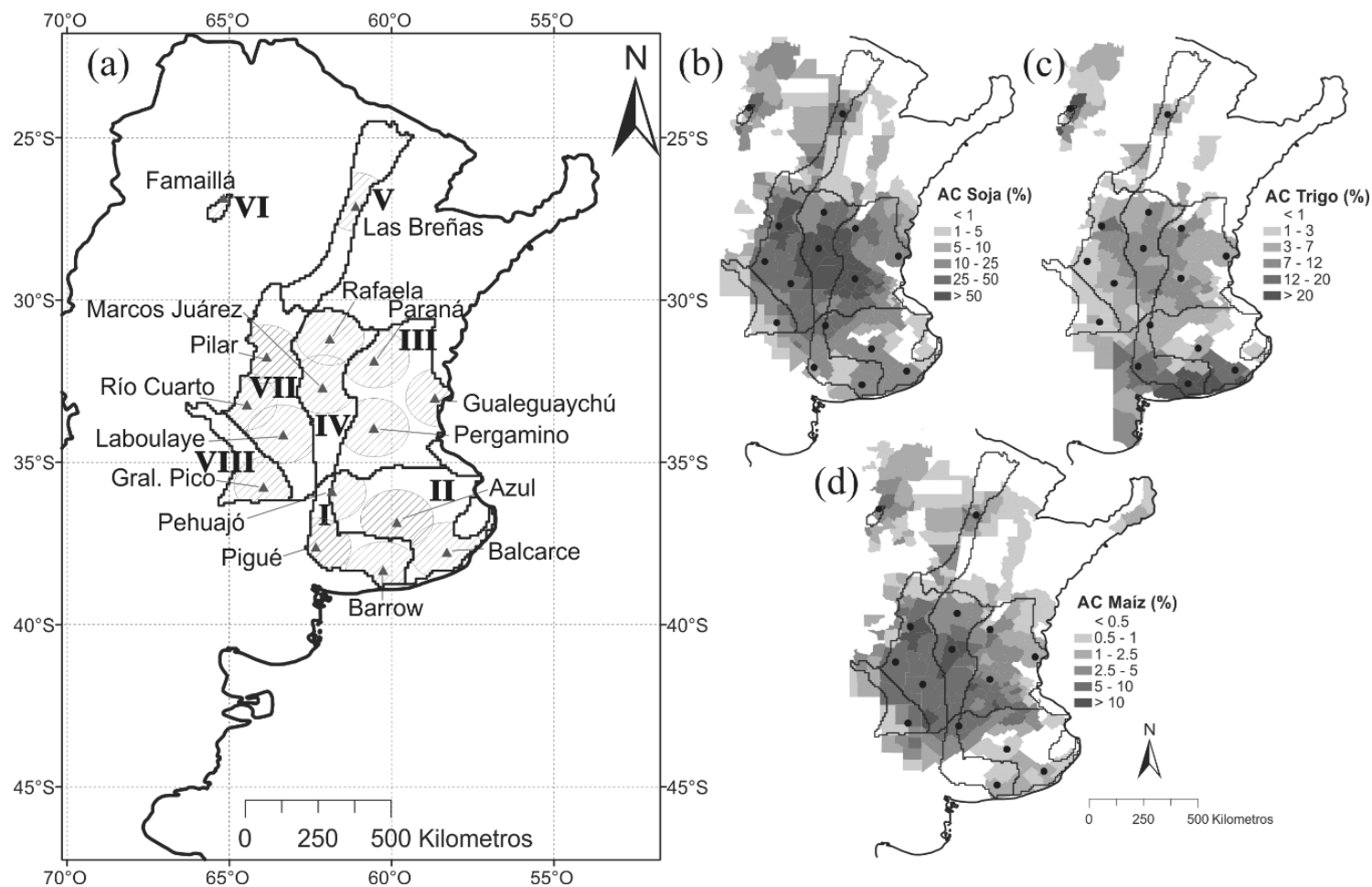


Figura 2. (a) Estaciones meteorológicas de referencia seleccionadas (triángulos llenos) con sus correspondientes zonas de influencia (círculos sombreados) y zonas climáticas donde éstas se encuentran (identificadas por números romanos), y distribución del área cosechada (AC) de soja (b), trigo (c), y maíz (d) para el periodo 2006-2012, expresada como % de la superficie total de cada departamento.



#### 2.4. Control de calidad de datos climáticos

Se realizó un control de calidad de los datos climáticos y relleno de datos faltantes basándose en correlaciones quincenales con los datos de las dos estaciones meteorológicas más cercanas, según lo propuesto por Hubbard et al. (2007). El número de correcciones y datos rellenados de temperatura máxima y mínima fue menor al 3% de los datos totales en todas las EMR.

Se detectó un gran número de datos faltantes de radiación solar diaria en la mayoría de las EMR. Por lo tanto, se consideró utilizar los datos de radiación solar diaria del servicio NASA-POWER (<http://power.larc.nasa.gov/>) como alternativa, ya que evaluaciones recientes de éstos indicaron un buen nivel de concordancia con datos de radiación solar medidos *in situ* en zonas de topografía plana o ligeramente ondulada (van Wart et al., 2013 a; White et al., 2011). Los datos de radiación solar diaria del SMN y del INTA son estimados a partir de mediciones de heliofanía efectiva a través de una regresión lineal (Angstrom, 1924; Prescott, 1940), utilizando los coeficientes calibrados por Grossi Gallegos y Atienza (1991). Los datos de radiación solar de NASA-POWER son estimados por medio de una aproximación similar a la anterior, pero, en lugar de utilizar datos de heliofanía efectiva, utilizan coeficientes de nubosidad medidos a partir de imágenes satelitales. Ambas fuentes de datos de radiación solar diaria (INTA-SMN y NASA-POWER) fueron evaluadas comparándolas con mediciones *in situ* por medio de radiómetros en seis localidades (n=17.083). Los datos del INTA-SMN presentaron un mayor nivel de ajuste con los datos medidos con radiómetro (Figura 3 a). Sin embargo, las diferencias no fueron importantes y se corroboró que NASA-POWER es una fuente de datos de radiación solar diaria viable cuando no se cuentan con datos de mejor calidad (Figura 3 b). Además, los datos de NASA-POWER cubren mejor los valores extremos de radiación que los datos del INTA-SMN (menores a  $2,5 \text{ MJ m}^{-2}$  y mayores a  $32 \text{ MJ m}^{-2}$ ), y de esta manera se consigue utilizar un método uniforme, evitando la subjetividad asociada a la medición de heliofanía.

De la combinación de los datos de temperatura máxima, mínima y precipitaciones de las estaciones meteorológicas del INTA y del SMN, y de los datos de radiación solar diaria de NASA-POWER, se obtuvieron registros climáticos completos para el periodo 1983 – 2012. El número de años con datos climáticos para realizar las simulaciones fue apropiado para obtener estimaciones robustas del RPS promedio de cada localidad y su variación interanual (Grassini et al., 2015). Por su parte, no se detectaron tendencias

en las temperaturas máximas y mínimas ni en las precipitaciones durante el periodo analizado (Fernández-Long et al., 2013).

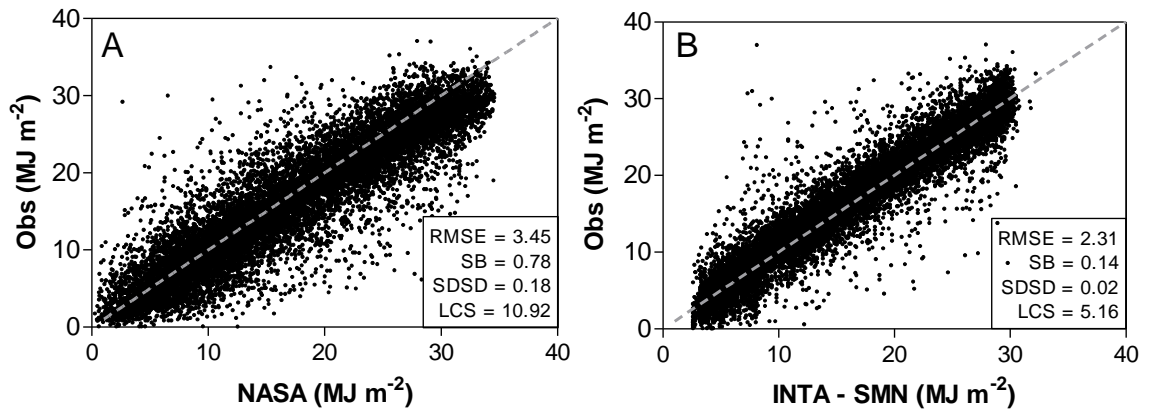


Figura 3. Radiación solar diaria observada, medida con radiómetros en 6 localidades (Obs, MJ m<sup>-2</sup>), en función de: (A) radiación solar diaria obtenida del servicio NASA-POWER (NASA, MJ m<sup>-2</sup>), y (B) radiación solar diaria estimada por el INTA y el SMN a partir de mediciones de heliofanía efectiva. La línea gris representa  $y = x$ . Además se presenta la raíz del cuadrado medio del error (RMSE), y sus componentes: error en la estimación de la media (SB), error en la estimación de la magnitud del desvío (SDSD); y el error debido a la falta de correlación (LCS) (Kobayashi y Salam, 2000).

## 2.5. Determinación de suelos dominantes

Se seleccionaron de 2 a 3 series de suelos por EMR para realizar las simulaciones, basándose en: (i) los mapas de suelos provinciales (1:50.000 a 1:100.000) provistos por el Instituto de Suelos del INTA y (ii) la preferencia de los productores para realizar determinados cultivos en los mejores suelos (cf. sección 2.6). Las propiedades de los suelos requeridas para realizar las simulaciones de cultivo (como por ejemplo límites mínimos y máximos de almacenaje de agua útil, densidad aparente, etc.) se estimaron a partir de las funciones de pedotransferencia provistas por Ritchie y Crum (1988), teniendo en cuenta las revisiones hechas por Gijssman et al. (2003). La profundidad radical máxima se fijó en 1,8 metros en aquellos suelos que no presentan ninguna impedancia a la exploración radical (Dardanelli et al., 1997). La Tabla 1 presenta la lista completa de suelos seleccionados para cada EMR y sus principales características, como así también la contribución relativa, para cada cultivo, de cada tipo de suelo al área cosechada en cada EMR.

Tabla 1. Tipo de suelos seleccionados para cada estación meteorológica de referencia (EMR) con sus principales características: profundidad (m), textura superficial y sub-superficial y pendiente. Además se indica la contribución relativa, para cada cultivo, de cada tipo de suelo al área cosechada en cada EMR.

EMR	Tipo de suelo	Serie	Área (%)		Prof. (m)	Textura		Pendiente (%)
			Maíz	Trigo y Soja		Superficial	Sub-superficial	
<b>Azul</b>	Argiudol típico	Mar del Plata	50	40	1.8	Franco	Franco arcilloso	2
	Argiudol típico	Tandil	50	40	1.3	Franco arcilloso	Arcilloso	2
	Natracuol típico	Rauch	-	20	0.5	Franco arcilloso	Arcilloso	0
<b>Balcarce</b>	Argiudol típico	Mar del Plata	50	35	1.8	Franco	Franco arcilloso	2
	Argiudol típico	Tandil	50	35	1.3	Franco arcilloso	Arcilloso	2
	Paleudol petrocálcico	Azul	-	30	0.8	Franco arcilloso	Arcilloso	2
<b>Barrow</b>	Argiudol típico	Tres Arroyos	50	-	1.8	Franco arcillo arenoso	Arcilloso	0
	Argiudol típico	Laprida	-	50	1.5	Franco	Franco arcilloso	0
	Argiudol típico	Laprida	50	-	1.3	Franco	Franco arcilloso	1
	Paleudol petrocálcico	Azul	-	30	0.8	Franco arcilloso	Arcilloso	1
	Paleudol petrocálcico	Tres Arroyos	-	20	0.6	Franco arcillo arenoso	Arcilloso	1
<b>Famaillá</b>	Haplustol típico	Niogastá	50	50	1.8	Franco	Franco arenoso	0
	Hapludol éntico	Famaillá	35	35	1.8	Franco arenoso	Franco arenoso	0
	Ustifluvent ácuico	El Tobar	15	15	1.8	Franco limoso	Franco arenoso	0
<b>Gral. Pico</b>	Hapludol éntico	Pelegri	50	50	1.8	Franco arenoso	Franco arenoso	0
	Haplustol éntico	Rivadavia	25	25	1.8	Franco arenoso	Franco arenoso	0
	Ustipsament típico	Buena Esperanza	25	25	1.8	Arena francosa	Arena francosa	0
<b>Guale-guaychú</b>	Argiudol ácuico	La Emiliana	50	50	1.8	Franco arcillo limoso	Arcillo limoso	0
	Peludert argiudólico	La Paulina	30	30	1.8	Franco arcillo limoso	Arcillo limoso	3
	Peludert árgico-crómico	El Triángulo	20	20	1.8	Arcillo limoso	Arcillo limoso	5
<b>Laboulaye</b>	Haplustol udorténtico	Leguizamón	80	80	1.8	Franco arenoso	Franco arenoso	0
	Haplustol údico	Laboulaye	20	20	1.8	Franco	Franco arenoso	0

EMR	Tipo de suelo	Serie	Área (%)		Prof. (m)	Textura		Pendiente (%)
			Maíz	Trigo y Soja		Superficial	Sub-superficial	
<b>Las Breñas</b>	Argiustol údico	Paraje	40	30	1.8	Franco	Franco	0
	Ustocrept ústico	Tolosa	60	40	1.8	Franco	Franco arcilloso	0
	Durostol típico	Las Breñas	-	30	0.6	Franco	Franco	0
<b>Marcos Juárez</b>	Argiudol típico	Casilda	40	40	1.8	Franco limoso	Franco arcillo limoso	0
	Argiudol ácuico	Monte Buey	30	30	1.8	Franco limoso	Franco limoso	0
	Haplustol údico	Marcos Juárez	30	30	1.8	Franco limoso	Franco arcillo limoso	0
<b>Paraná</b>	Argiudol ácuico	Tezanos Pinto	50	50	1.8	Franco arcillo limoso	Arcillo limoso	3
	Argiudol ácuico	Tezanos Pinto	25	25	1.2	Franco arcillo limoso	Arcillo limoso	3
	Argiudol típico	Don Andres	25	25	1.8	Franco limoso	Franco arcillo limoso	0
<b>Pehuajó</b>	Hapludol éntico	Bolívar	45	45	1.8	Franco arenoso	Franco arenoso	0
	Hapludol éntico	Piedritas	40	40	1.8	Franco arenoso	Franco arenoso	0
	Hapludol thapto-árgico	Rosas	15	15	1.8	Franco	Franco arcillo limoso	0
<b>Pergamino</b>	Argiudol típico	Rojas	35	35	1.8	Franco	Franco arcilloso	0
	Argiudol vértico	Ramallo	40	40	1.8	Franco arcillo limoso	Arcilloso	0
	Argiudol típico	Arroyo Dulce	25	25	1.8	Franco limoso	Franco arcillo limoso	0
<b>Pigüe</b>	Argiustol típico	Cascada	-	35	0.6	Franco arcillo limoso	Arcilloso	0
	Paleudol petrocálcico	Tres Arroyos	-	35	1.0	Franco	Franco arcilloso	0
	Haplustol típico	Puán	-	30	1.8	Franco	Franco	0
<b>Pilar</b>	Haplustol éntico	Oncativo	75	75	1.8	Franco arcilloso	Franco limoso	0
	Haplustol típico	El Cano	25	25	1.8	Franco arcilloso	Franco limoso	0
<b>Rafaela</b>	Argiudol típico	Rafaela	35	35	1.8	Franco arcilloso	Franco arcillo limoso	0
	Argiudol ácuico	Lehman	50	50	1.8	Franco arcillo limoso	Franco arcillo limoso	0
	Argialbol típico	Castellanos	15	15	1.8	Franco arcillo limoso	Franco arcillo limoso	0
<b>Río Cuarto</b>	Haplustol éntico	Olaeta	45	45	1.8	Franco arenoso	Areno francoso	0
	Haplustol típico	El Cano	15	15	1.8	Franco arcilloso	Franco limoso	0
	Ustorhent típico	Las Playas	40	40	1.8	Franco	Franco	0

## **2.6. Definición de prácticas de manejo de cultivo**

Dado que no existen registros oficiales de prácticas de manejo de cultivos en Argentina, se identificó a un/a agrónomo/a referente de cada zona objetivo, a quien se le realizó una encuesta sobre cuáles son las prácticas de manejo de cultivo más frecuentes dentro de las zonas de influencia de las EMR, y si las mismas difieren de las prácticas de manejo que ella o él considera óptimas. Las encuestas incluían información acerca de secuencias de cultivos, tipo de suelos, fechas de siembra, cultivar o híbrido y su respectiva madurez, densidad de plantas y distancia entre hileras. Las/los encuestadas/os concordaron en que en ningún caso las prácticas de manejo más frecuentes difieren de las óptimas para cada cultivo. La información recolectada a través de las encuestas, que luego fue utilizada como información de entrada para realizar las simulaciones, se encuentra resumida en la Tabla 2. En soja se discriminó entre soja de primera (*i.e.* único cultivo en la estación de crecimiento) y soja de segunda (*i.e.* sembrada después de la cosecha de un cultivo invernal durante la misma estación de crecimiento).

Tabla 2. Prácticas de manejo de cultivo más frecuentes de las zonas de influencia de cada estación meteorológica de referencia (EMR), definidas a partir de encuestas a agrónomos referentes de cada zona. Se detalla, para cada cultivo, el grupo de madurez (GM) o la madurez relativa (MR) de los cultivares más utilizados en cada EMR, así como la densidad de plantas ( $\delta$ , plantas m<sup>-2</sup>) y la fecha de siembra (FS) predominantes de cada zona.

EMR	Soja de primera			Soja de segunda			Maíz			Trigo		
	GM	$\delta$	FS	GM	$\delta$	FS	MR <sup>3</sup>	$\delta$	FS	GM	$\delta$	FS
<b>Azul</b>	IV	30	5-Nov	III	35	28 Dic	117	7	20-Oct	Inter-corto	290	1-Jul
<b>Balcarce</b>	III	30	5-Nov	III	35	1 Ene	117	7	20-Oct	Inter-corto	290	1-Jul
<b>Barrow</b>	IV	25	25-Nov	III	30	1 Ene	117	7	20-Oct	Inter-largo	220	1-Jul
<b>Famailá</b>	VIII	26	25 Dic	VIII	26	25 Dic	134	5.5	20 Dic	Inter-corto	180	1-Jun
<b>General Pico</b>	IV	25	5-Nov	IV	30	10 Dic	124	6	20-Sep	Inter-largo	270	20-Jun
<b>Gualeguaychú</b>	VI	30	1-Nov	VI	40	5 Dic	124	7.5	1-Sep	Inter-corto	300	15-Jun
<b>Laboulaye</b>	IV	28	25-Oct	IV	36	5 Dic	124	7	5-Oct	Inter-largo	220	1-Jun
<b>Las Breñas</b>	VIII	22	10 Dic	VIII	30	1 Ene	134	4.5	1 Ene	Inter-largo	180	15-May
<b>Marcos Juárez</b>	IV	28	25-Oct	IV	30	5 Dic	124	7.2	25-Sep	Inter-largo	250	1-Jun
<b>Paraná</b>	VI	30	15-Nov	VI	40	5 Dic	124	7.5	25-Oct	Inter-corto	350	20-Jun
<b>Pehuajó</b>	IV	28	1-Nov	IV	40	15 Dic	124	6.8	1-Oct	Inter-largo	320	5-Jun
<b>Pergamino</b>	III	32	1-Nov	IV	35	10 Dic	124	7	25-Sep	Inter-largo	240	1-Jun
<b>Pigüé</b>	III	20	20-Nov	-	-	-	-	-	-	Inter-largo	200	15-Jun
<b>Pilar</b>	VI	28	25-Nov	VI	33	28-Nov	124	7	10 Dic	Inter-largo	200	10-May
<b>Rafaela</b>	VI	30	15-Nov	IV	40	20 Dic	124	7.5	25-Oct	Inter-corto	350	20-Jun
<b>Río Cuarto</b>	IV	28	25-Oct	IV	36	5 Dic	124	6.5	1 Dic	Inter-largo	220	1-Jun

<sup>3</sup> Se indica la madurez relativa (MR) de los híbridos tal como la reportan las compañías semilleras, basadas en el método Minnesota (Peterson y Hicks, 1973)

## 2.7. Modelización de sistemas de cultivos

Las simulaciones se realizaron con los modelos CERES-Maize, CERES-Wheat y CROPGRO-Soybean de la plataforma DSSAT v 4.5 (Hoogenboom et al., 2010; Jones et al., 2003). Se calibraron coeficientes genéticos para los tres cultivos en base a trabajos previos (Monzon et al., 2007, 2012; Mercau et al., 2007, 2014), y a datos obtenidos de la Red de Alta Tecnología de Trigo de INTA y de trabajos no publicados de maíz del grupo de Ecofisiología de Cultivos de la Unidad Integrada Balcarce. Los tres modelos fueron evaluados en su performance para simular el RP y el RPS comparando los resultados obtenidos a través de las simulaciones contra datos reales de experimentos en secano y bajo riego realizados en condiciones potenciales. Para la calibración y validación de los modelos se exploró un amplio rango de fechas de siembra, localidades (Balcarce, Barrow, Pergamino, Marcos Juárez, Río Cuarto y Manfredi), años (tres o más por cultivo), y disponibilidad hídrica (Figura 4). El nivel de concordancia conseguido se cuantificó a través de la raíz del cuadrado medio del error, expresada como porcentaje de la media observada ( $V$ ), y sus componentes (Kobayashi y Salam, 2000). El nivel de error de las estimaciones de RP y RPS de los tres modelos fue razonablemente bajo, por lo que se consideró que los modelos pueden ser utilizados con confianza para la cuantificación de las brechas de rendimiento de la Argentina.

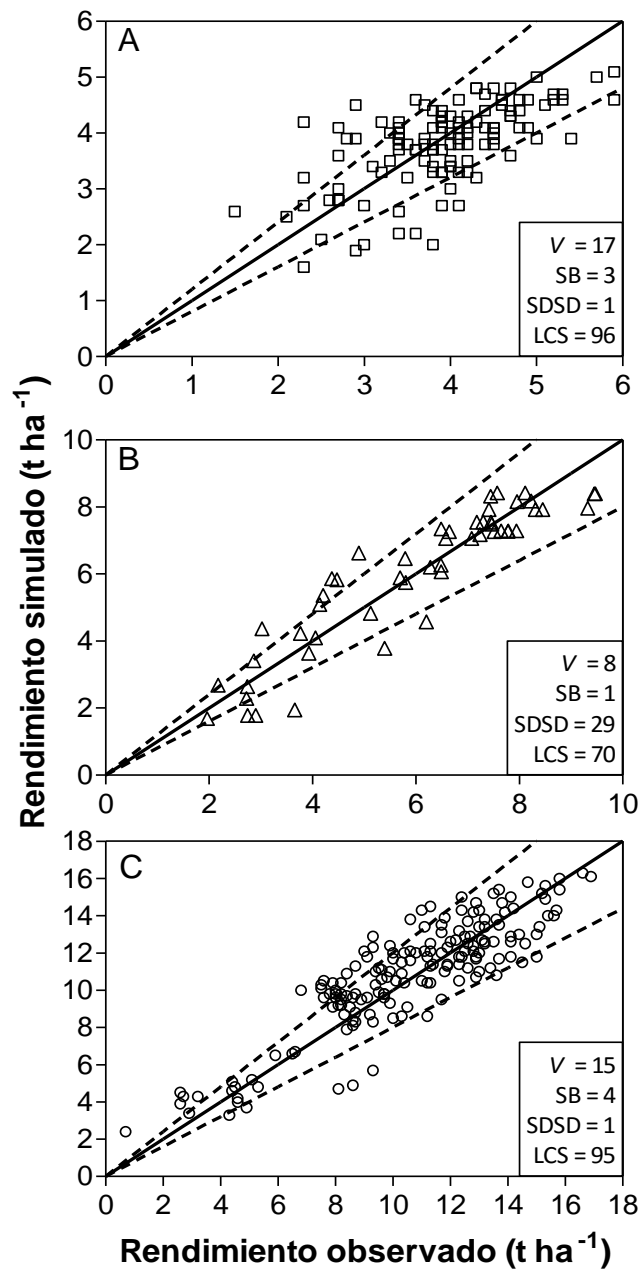


Figura 4. Comparación de rendimientos observados contra rendimientos simulados para soja (A), trigo (B) y maíz (C). La línea continua representa  $y = x$ , y las líneas punteadas  $y = x \pm 20\%$ . Se presenta la raíz del cuadrado medio del error, expresada como porcentaje de la media observada ( $V$ ), y sus componentes: error en la estimación de la media ( $SB$ ), error en la estimación de la magnitud del desvío ( $SDSD$ ), error asociado con la falta de correlación ( $LCS$ ), expresados como porcentaje del cuadrado medio del error (Kobayashi y Salam, 2000).

Se simularon secuencias continuas de cultivos de manera tal que el agua a la siembra de cada ciclo agrícola sea el resultado de la suma del agua remanente en la cosecha



del cultivo anterior más el balance durante el barbecho. Se asumió un 50% de agua útil al inicio del barbecho previo al primer cultivo simulado. En aquellas zonas donde la decisión de siembra de un cultivo depende de la recarga del perfil durante el barbecho, se utilizaron reglas para simular dinámicamente el contenido de agua a la siembra de cada año. En Rafaela y Pilar los productores solamente siembran trigo en aquellos lotes con un agua disponible  $\geq 50\%$ . Por lo tanto, para las simulaciones de trigo de estas localidades se asumió un 50% de agua disponible a la siembra en aquellos años en los que la recarga durante el barbecho no fue suficiente para alcanzar dicho valor.

En general, las secuencias de cultivos simuladas fueron:

- (i) Soja – Soja
- (ii) Soja – Maíz
- (iii) Soja – Trigo/Soja 2°

Con excepción de Pigüé, donde no se incluyó al maíz ni a la soja de segunda (*i.e.* (i) soja – soja, (ii) soja – trigo); y Famaillá, donde no hay diferencias en los manejos de la soja de segunda y primera (*i.e.* (i) soja –soja, (ii) soja – maíz, (iii) trigo/soja – trigo/soja).

Se realizaron simulaciones en condiciones potenciales para estimar el RP de cada combinación cultivo x año x EMR, y con limitaciones hídricas para estimar el RPS de cada combinación cultivo x año x EMR x suelo. Para cada localidad, tipo de suelo y secuencia de cultivo, se realizaron dos corridas de simulaciones arrancando en años consecutivos de forma de obtener estimaciones de rendimiento de cada cultivo todos los años. La concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico se asumió constante e igual a 380 ppm.

## **2.8. Método de integración a nivel de zonas climáticas y país**

Siguiendo el protocolo propuesto por van Bussel et al. (2015), cada combinación de secuencia de cultivo y suelo se ponderó por su contribución relativa al área cosechada total de la zona de influencia de la EMR correspondiente (Tabla 1), para así obtener los RP y RPS promedios a nivel de EMR. Para soja se hicieron estimaciones de RP y RPS de soja de primera y de segunda por separado. Sin embargo, dado que los datos del Ministerio de Agricultura no discriminan entre estos dos sistemas de cultivo, no se pudieron obtener estimaciones de RR y brechas de rendimiento de soja de primera y segunda, sino que se obtuvo una única estimación de brechas de soja a nivel de EMR.

El RR de cada EMR se estimó utilizando los rendimientos reportados para los departamentos ubicados dentro de la zona de influencia de la EMR entre las campañas

2005/06 – 2011/12, según su contribución relativa al área cosechada de dicha zona (cf. sección 2.2). Por su parte, los RP y los RPS se estimaron promediando las estimaciones hechas a través de los modelos de simulación para toda la serie climática (30 años). De esta forma se obtuvieron estimaciones robustas de todas las variables analizadas, y se evitaron errores en las estimación del RR debido al cambio tecnológico y en la estimación del RP y RPS debido al cambio climático (Fernández-Long et al., 2013; Grassini et al., 2015; van Ittersum et al., 2013). Por último, las estimaciones de RP, RPS y RR se escalaron a niveles de ZC y país, basándose en la contribución relativa de cada EMR al área cosechada de cada cultivo (Tabla 3), de acuerdo a lo propuesto por van Bussel et al. (2015). En todos los niveles, las brechas de rendimiento se calcularon como la diferencia entre el RPS y el RR, y se expresaron tanto en términos absolutos como relativos al RPS (Lobell et al., 2009). Además, para determinar el grado de limitación hídrica de cada caso analizado, se estimó un índice de limitación hídrica (ILH) como:

$$ILH (\%) = \frac{RP - RPS}{RP} \times 100$$

Tabla 3. Contribución porcentual de cada nivel analizado al área cosechada del nivel superior. Por ejemplo, el cultivo de soja de primera en Barrow contribuye en un 80% al área cosechada de la zona de influencia de esa estación meteorológica de referencia (EMR) para soja. Esta EMR, a su vez, aporta en un 60% al área cosechada de la zona climática I (ZC I), la cual aporta en un 5% al área cosechada de soja de la Argentina.

ZC	Nivel		Cvo/EMR	EMR/ZC			ZC/Argentina		
	EMR	Cultivo	Soja	Soja	Trigo	Maíz	Soja	Trigo	Maíz
I	Barrow	Primera	80%	60%	68%	100%	5%	21%	3%
		Segunda	20%						
	Pigüé	Primera	100%	40%	32%	0%			
	Azul	Primera	70%	29%	23%	23%			
		Segunda	30%						
II	Balcarce	Primera	60%	27%	63%	18%	9%	18%	11%
		Segunda	40%						
	Pehuajó	Primera	78%	44%	14%	59%			
Segunda		22%							
	Gualectuaychú	Primera	80%	10%	12%	10%			
		Segunda	20%						
III	Paraná	Primera	77%	30%	39%	30%	28%	21%	20%
		Segunda	23%						
	Pergamino	Primera	84%	60%	49%	60%			
		Segunda	16%						
IV	Marcos Juárez	Primera	85%	64%	56%	73%	23%	17%	21%
		Segunda	15%						
	Rafaela	Primera	79%	36%	44%	27%			
Segunda		21%							
V	Las Breñas	Primera	89%	100%	100%	100%	4%	2%	3%
		Segunda	11%						
VI	Famailá	Primera	43%	100%	100%	100%	0.3%	1%	0.3%
		Segunda	57%						
	Laboulaye	Primera	86%	37%	38%	40%			
		Segunda	14%						
VII	Pilar	Primera	84%	40%	48%	32%	27%	17%	34%
		Segunda	16%						
	Río Cuarto	Primera	92%	23%	14%	27%			
		Segunda	8%						
VIII	General Pico	Primera	76%	100%	100%	100%	5%	3%	8%
		Segunda	24%						

## 2.9. Estimación de la producción alcanzable y su variación interanual

Si bien tanto en este trabajo como en la mayoría de los trabajos encontrados en la bibliografía se calculan las brechas de rendimiento en función del RP o del RPS (Fischer et al., 2014; Grassini et al., 2011 a; Kassie et al., 2014; Lobell et al., 2009; Sadras et al., 2015; van Ittersum et al., 2013; van Wart et al., 2013 b), aún en los sistemas de cultivo de los países con mayor adopción tecnológica los RR son significativamente menores a los RP o RPS debido a las variables socioeconómicas que influyen sobre el rendimiento alcanzable. En general, se asume que en sistemas de alto nivel tecnológico las brechas pueden llegar a un mínimo cercano al 20% del RP o RPS, dependiendo de la relación

de precios (insumo/producto) y del nivel de incertidumbre asociado con la producción (Cassman et al., 2010; Fischer et al., 2014; Lobell et al., 2009; Sadras et al., 2015; van Ittersum et al., 2013). Es por esto que la producción de cultivos alcanzable (PCA) de la Argentina se calculó como:

$$PCA = (RPS * 0,8) * \text{Área}$$

Donde Área es el área cosechada nacional del cultivo en cuestión en el ciclo 2011/12, y el factor 0,8 hacer referencia a que solo es factible alcanzar el 80% del RPS. Para poder analizar el efecto del fenómeno ENSO sobre la PCA de la Argentina, cada ciclo agrícola simulado fue categorizado según su fase del ENSO (neutra, El Niño o La Niña), de acuerdo al Índice Oceánico del Niño del Climate Prediction Center del NOAA's National Weather Service (ERSST v.3b, [www.cpc.ncep.noaa.gov](http://www.cpc.ncep.noaa.gov)). Luego se calculó la PCA promedio de la Argentina para cada fase del ENSO por separado. Las diferencias entre fases del ENSO se analizaron por medio de test no paramétricos (Kruskal-Wallis y Levene's test), y las medias se compararon por el método de Dunn.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Rendimientos reales de soja, trigo y maíz de Argentina

Los rendimientos reales de los tres principales cultivos de la Argentina variaron significativamente entre años y regiones durante el periodo 2005/06 – 2011/12 (Tabla 4). Por ejemplo, los RR de soja y maíz fueron mayores en la región centro y centro oeste de la región Pampeana (*i.e.* ZC III y IV), mientras que los de trigo fueron mayores en el sudeste bonaerense (ZC II). Por su parte, la región del Chaco semiárido (ZC V) presentó los menores rendimientos de maíz y trigo, y los segundos menores rendimientos de soja, siendo sólo mayores a los del sudoeste bonaerense (Tabla 4). En general, hubo una asociación negativa entre la magnitud de los RR promedio de las distintas EMR y su coeficiente de variación interanual, es decir que donde los rendimientos fueron menores, además fueron más variables. Dicha correlación fue más importante en soja ( $r = -0,725$ ), que en trigo ( $r = -0,587$ ), y maíz ( $r = -0,409$ ).

Tabla 4. Rendimientos reales (RR) promedio (periodo 2005/06 - 2011/12) de la zona de influencia de cada estación meteorológica de referencia (EMR) y zona climática (ZC) con sus respectivos coeficientes de variación interanual (CV) para los cultivos de soja, trigo y maíz.

Nivel		EMR						Zona Climática					
ZC	EMR	Soja		Trigo		Maíz		Soja		Trigo		Maíz	
		RR t ha <sup>-1</sup>	CV %	RR t ha <sup>-1</sup>	CV %	RR t ha <sup>-1</sup>	CV %	RR t ha <sup>-1</sup>	CV %	RR t ha <sup>-1</sup>	CV %	RR t ha <sup>-1</sup>	CV %
I	Barrow	1,7	30	3,1	31	5,2	29						
	Pigüé	1,9	26	2,0	36	-	-	1,7	25	2,7	31	5,2	29
	Azul	2,0	25	4,1	25	6,3	25						
II	Balcarce	2,0	22	4,2	23	6,0	29	2,3	22	4,1	18	6,9	23
	Pehuajó	2,7	25	3,6	15	7,5	22						
	Gualeguaychú	2,3	19	3,3	20	5,1	45						
III	Paraná	2,7	14	3,4	27	6,4	36	2,9	18	3,7	22	7,2	28
	Pergamino	3,2	21	4,1	21	7,9	24						
IV	Marcos Juárez	3,2	9	3,2	35	8,9	17	3,1	10	3,0	34	8,2	19
	Rafaela	2,8	14	2,6	32	6,5	30						
V	Las Breñas	1,9	38	1,1	76	3,2	26	1,9	38	1,1	76	3,2	26
VI	Famailá	2,7	19	1,1	21	5,6	22	2,7	19	1,1	21	5,6	22
	Laboulaye	2,7	18	2,9	30	7,2	20						
VII	Pilar	2,4	16	2,1	34	6,4	20	2,5	16	2,4	29	6,5	20
	Río Cuarto	2,3	21	1,9	31	5,6	27						
VIII	General Pico	2,1	24	2,2	36	5,5	20	2,1	24	2,2	36	5,5	20

Ponderando los datos de las EMR según su contribución al área cosechada nacional (Tabla 3), se estimaron RR nacionales promedio, para el periodo 2005/066 – 2011/12, de 2,7, 3,0 y 6,8 t ha<sup>-1</sup> para soja, trigo y maíz, respectivamente. Estos valores no difirieron significativamente del rendimiento nacional promedio reportado por el Ministerio de

Agricultura para el mismo periodo (T-test,  $P > 0,45$ ), lo que demuestra la robustez del método utilizado para subir de escala a nivel nacional (Figura 5).

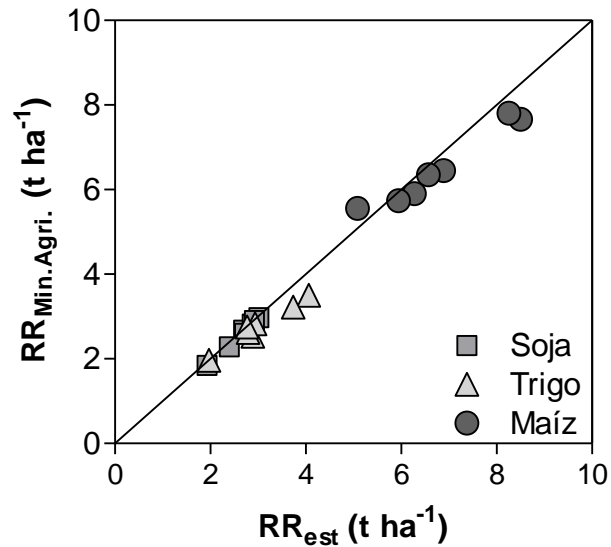


Figura 5. Rendimientos reales a nivel nacional reportados por el Ministerio de Agricultura ( $RR_{\text{Min.Agri}}$ ) para las campañas 2005/06 a 2011/12, en función de los rendimientos reales estimados a partir del método de integración usado en la presente tesis ( $RR_{\text{est}}$ , cf. sección 2.8). La línea continua representa  $y = x$ .

Parte de la variación interanual en los RR de los cultivos de verano (*i.e.* soja y maíz) de los últimos 30 años pudo explicarse por cambios en la fase del fenómeno ENSO ( $P < 0,05$ ), mientras que no hubo relación entre el ENSO y los RR de trigo a nivel nacional (Figura 6). El efecto del fenómeno ENSO sobre los RR de soja fue constante a través del tiempo, mientras que hubo una diferencia cada vez mayor en los RR de maíz entre años según su fase del ENSO, tanto en términos absolutos como relativos (Figura 6).

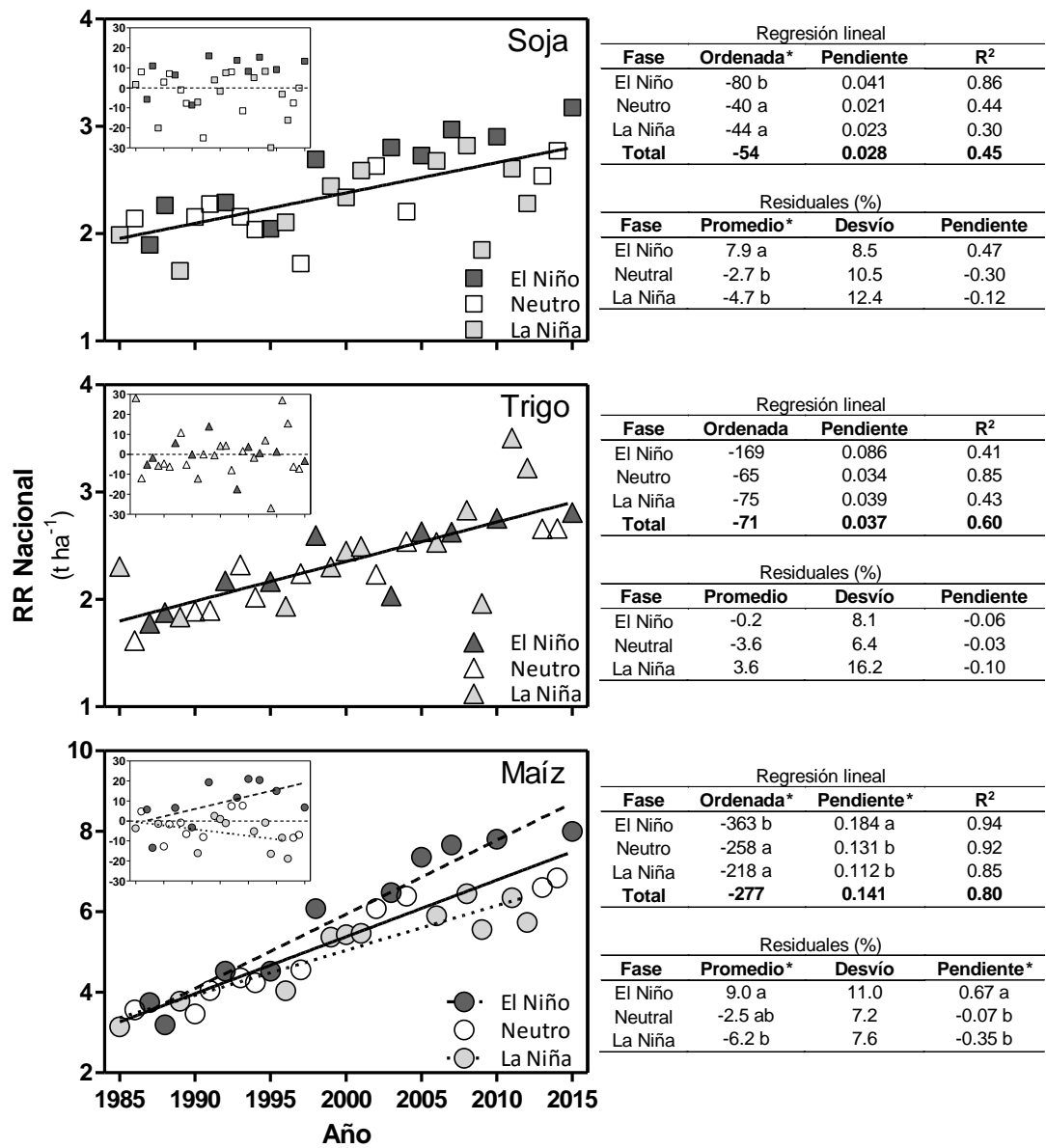


Figura 6. Evolución del rendimiento real (RR) a nivel nacional de soja, trigo y maíz en la Argentina durante los últimos 30 años (1985 – 2015) según su fase del fenómeno El Niño – Oscilación del Sur (ENSO). Los recuadros interiores de los gráficos muestran los residuales relativos (%) obtenidos de la regresión lineal entre rendimiento real y año, clasificados según su fase del ENSO. A la derecha de cada gráfico se presentan tablas con los resultados del análisis de regresión lineal (rendimiento en función del año) y del análisis de los residuales relativos. En aquellas variables que se determinaron diferencias significativas entre fases (indicadas con \*), las mismas son indicadas con letras distintas en una misma columna ( $P < 0,05$ ).

### 3.2. Rendimientos potenciales de soja, trigo y maíz a nivel de localidad y zona climática

El RP promedio del cultivo de soja en Argentina, ponderando cultivos de primera y segunda, varía según la región entre 4,9 y 7,1 t ha<sup>-1</sup>, siendo mayor en el centro del país (ZC III, IV y VII) y disminuyendo tanto hacia el norte como hacia el sur (Tabla 5). Además, la soja de primera presentó un mayor o igual RP que el cultivo de soja de segunda, según la latitud. En latitudes altas, donde la estación de crecimiento es más corta, la diferencia en el RP de los dos sistemas es mayor, mientras que en la región norte es menor, no habiendo diferencias significativas en Famaillá, donde las fechas de siembra de la soja de primera y segunda es la misma (Tabla 6). El RP de trigo también presentó un marcado gradiente latitudinal, con mayores valores en el sur de Bs. As. (ZC I y II), donde llega a las 8,3 t ha<sup>-1</sup>, y menores RP hacia el norte, con un mínimo de 4,8 t ha<sup>-1</sup> en el Chaco (ZC V), debido a un marcado aumento en las temperaturas primaverales, las cuales resultan en un menor cociente fototermal (Fischer, 1985; Magrin et al., 1993). El RP de maíz siguió una distribución espacial similar a la del trigo ( $r = 0,875$ ), con un máximo de 16,4 t ha<sup>-1</sup> en la ZC II, y un mínimo de 10,6 t ha<sup>-1</sup> en la ZC V (Tabla 5).

Tabla 5. Rendimientos potenciales (RP) promedio de cada estación meteorológica de referencia (EMR) y zona climática (ZC) con sus respectivos coeficientes de variación interanual (CV) para los cultivos de soja, trigo y maíz. Los valores de RP de soja se obtuvieron ponderando cultivos de primera y de segunda.

Nivel		EMR						Zona Climática					
ZC	EMR	Soja		Trigo		Maíz		Soja		Trigo		Maíz	
		RP t ha <sup>-1</sup>	CV %	RP t ha <sup>-1</sup>	CV %	RP t ha <sup>-1</sup>	CV %	RP t ha <sup>-1</sup>	CV %	RP t ha <sup>-1</sup>	CV %	RP t ha <sup>-1</sup>	CV %
I	Barrow	5,2	8	8,0	7	15,9	6						
	Pigüé	6,1	8	8,0	7	-	-	5,6	8	8,0	7	15,9	6
	Azul	5,8	6	8,3	9	16,4	7						
II	Balcarce	5,4	9	8,2	9	16,2	6	5,9	6	8,1	9	15,3	7
	Pehuajó	6,3	4	7,7	7	14,6	7						
	Galeguaychú	6,3	6	6,8	10	13,5	11						
III	Paraná	6,0	5	6,8	10	13,5	11	6,4	5	6,9	9	13,6	9
	Pergamino	6,6	5	7,0	9	13,7	8						
IV	Marcos Juárez	6,2	4	6,9	9	13,1	11	6,1	4	7,0	9	13,3	11
	Rafaela	5,9	5	7,1	9	13,8	10						
V	Las Breñas	4,9	6	4,8	14	10,6	16	4,9	6	4,8	14	10,6	16
VI	Famaillá	5,4	5	7,4	8	12,9	11	5,4	5	7,4	8	12,9	11
	Laboulaye	7,1	4	7,0	9	14,1	9						
VII	Pilar	5,9	7	6,8	10	14,1	8	6,7	5	6,9	9	14,2	8
	Río Cuarto	7,3	4	7,1	6	14,3	7						
VIII	General Pico	6,2	4	7,1	8	12,1	6	6,2	4	7,1	8	12,1	6



Los tres cultivos presentaron una baja variabilidad interanual en el RP (Tabla 5), debido a que las variables ambientales que influyen sobre éste (radiación y temperatura) fueron relativamente estables entre años (Apéndice, Figura I).

Tabla 6. Rendimiento potencial y rendimiento potencial en seco de los cultivos de soja de primera y soja de segunda, promedio para cada estación meteorológica de referencia (EMR), ordenados por zona climática (ZC). Además se presentan los coeficientes de variación interanual de las medias (CV,%).

ZC	Nivel EMR	Rendimiento potencial				Rendimiento potencial en seco			
		Primera		Segunda		Primera		Segunda	
		t ha <sup>-1</sup>	CV(%)	t ha <sup>-1</sup>	CV(%)	t ha <sup>-1</sup>	CV(%)	t ha <sup>-1</sup>	CV(%)
I	Barrow	5,5	7	4,0	10	2,3	60	1,6	79
	Azul	6,3	5	4,6	7	3,6	38	3,1	40
II	Balcarce	6,4	6	4,0	12	3,1	48	2,4	58
	Pehuajó	6,5	4	5,4	5	3,9	36	3,2	49
III	Gualeduaychú	6,5	5	5,6	6	3,2	50	2,9	53
	Paraná	6,2	5	5,6	5	4,1	37	3,4	46
	Pergamino	6,8	5	5,4	6	4,3	34	3,2	44
IV	Marcos Juárez	6,3	4	6,0	4	4,2	32	3,7	42
	Rafaela	6,2	5	4,9	6	4,0	41	3,1	40
V	Las Breñas	4,9	6	4,4	7	3,4	38	3,3	33
VI	Famailá	5,4	5	5,4	5	5,3	5	5,1	13
	Laboulaye	7,4	4	5,7	5	4,4	45	3,1	55
VII	Pilar	5,9	7	5,8	7	4,0	34	3,0	52
	Río Cuarto	7,4	4	5,6	6	5,1	36	3,6	43
VIII	General Pico	6,4	4	5,5	5	3,6	39	2,9	51

### 3.3. Variación espacial y temporal del rendimiento potencial en seco de soja, trigo y maíz en Argentina

Los mayores rendimientos potenciales de soja en condiciones de seco, ponderando cultivos de primera y de segunda, se determinaron en el Chaco sub-húmedo (ZC VI), con un promedio de 5,2 t ha<sup>-1</sup> (Tabla 7). Sin embargo, el RPS de la ZC VI pudo haber sido sobreestimado, debido a que la EMR de donde se obtuvieron los datos climáticos para las simulaciones está en el extremo oeste de la región, donde las precipitaciones son mayores y predomina el cultivo de caña de azúcar. Las ZC VII, IV y III, ubicadas en el centro y oeste de la región Pampeana también obtuvieron altos RPS de soja, de alrededor de 4,0 t ha<sup>-1</sup> (Tabla 7). Los menores RPS de soja se determinaron en el sur de Bs. As. (ZC I y II), con un gradiente longitudinal decreciente de este-oeste, debido a una disminución en las precipitaciones estivales, mayor demanda evaporativa, y a una mayor proporción de suelos someros por presencia de tosca (Tabla 1). Respecto

a los dos sistemas de cultivo de soja, el RPS de los cultivos de segunda fue no menos que el 70% del de los de primera. Así como con el RP, estas diferencias fueron mayores hacía el sur, con diferencias de hasta el 30%, y fueron menores en las ZC septentrionales, con diferencias menores al 5% en las ZC V y VI. Además, los cultivos de soja de segunda presentaron mayores variaciones interanuales en el RPS que los cultivos de primera (Tabla 6).

El trigo fue el cultivo que presentó mayor variación espacial en el RPS (Figura 8), siendo éste mayor en el sudeste bonaerense (ZC II), y decreciendo hacía el noroeste debido a una combinación de mayores temperaturas y menores precipitaciones invierno-primaverales, yendo de 7,1 t ha<sup>-1</sup> a 2,1 t ha<sup>-1</sup>. Por su parte, el cultivo de maíz fue el que presentó menor variación espacial en RPS, con rendimientos que van desde 10 t ha<sup>-1</sup> hasta 13,2 t ha<sup>-1</sup>, según la localidad, con excepción de la ZC I, donde apenas llegó a las 8,1 t ha<sup>-1</sup> (Tabla 7).

Tabla 7. Rendimiento potencial en secano (RPS) promedio y coeficientes de variación (CV) interanual para cada estación meteorológica de referencia (EMR) y zona climática (ZC) para los cultivos de soja, trigo y maíz. Los valores de RPS de soja se obtuvieron ponderando cultivos de primera y de segunda.

Nivel		EMR						Zona Climática					
ZC	EMR	Soja		Trigo		Maíz		Soja		Trigo		Maíz	
		RPS t ha <sup>-1</sup>	CV %	RPS t ha <sup>-1</sup>	CV %	RPS t ha <sup>-1</sup>	CV %	RPS t ha <sup>-1</sup>	CV %	RPS t ha <sup>-1</sup>	CV %	RPS t ha <sup>-1</sup>	CV %
I	Barrow	2,2	61	5,3	40	8,1	59	2,2	56	5,2	42	8,1	59
	Pigüé	2,3	50	5,0	45	-	-						
II	Azul	3,5	36	7,1	15	12,4	28	3,4	40	6,9	18	12,0	28
	Balcarce	2,8	50	6,9	20	10,9	44						
III	Pehuajó	3,7	36	6,7	19	12,2	24	4,0	37	5,2	36	11,4	27
	Gauleguaychú	3,2	50	5,2	31	10,4	31						
IV	Paraná	4,0	37	4,9	41	11,4	27	4,0	34	4,9	37	11,6	22
	Pergamino	4,1	34	5,5	33	11,6	27						
V	Marcos Juárez	4,1	31	5,3	35	12,0	14	3,4	37	2,1	64	10,3	19
	Rafaela	3,8	40	4,3	40	10,4	43						
VI	Las Breñas	3,4	37	2,1	64	10,3	19	5,2	8	3,2	49	12,8	10
	Famaillá	5,2	8	3,2	49	12,8	10						
VII	Laboulaye	4,2	46	5,3	36	11,5	31	4,2	39	4,3	36	12,4	22
	Pilar	3,9	35	3,4	34	12,9	18						
VIII	Río Cuarto	4,9	36	4,6	41	13,2	15	3,4	40	6,0	24	10,0	21
	General Pico	3,4	40	6,0	24	10,0	21						

Así como para los RR, se determinaron correlaciones negativas significativas entre la magnitud de los RPS y sus coeficientes de variación interanual para los tres cultivos (Figura 7 a). Esta relación se explica por diferencias en el agua disponible para los cultivos a través de las distintas localidades (Apéndice, Tabla II). Cuanto mayor es la

limitación hídrica promedio (*i.e.* mayor ILH), mayor es la variación interanual del RPS (Figura 7 b).

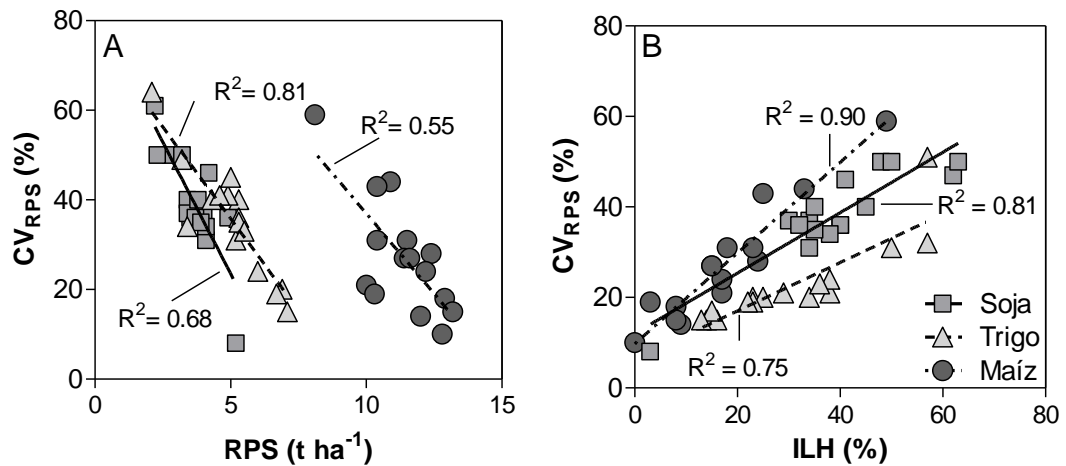


Figura 7. Coeficiente de variación interanual (CV) del rendimiento potencial en seco (RPS) de cada estación meteorológica de referencia, expresado como porcentaje, en función de: (A) RPS (t ha<sup>-1</sup>), y (B) índice de limitación hídrica (ILH, *i.e.* diferencia entre el rendimiento potencial y el RPS expresado como porcentaje del rendimiento potencial), para soja, trigo y maíz. Se determinaron correlaciones negativas (A) y positivas (B) significativas para los tres cultivos ( $P < 0,05$ ).

#### 3.4. Variación espacial de las brechas de rendimiento de soja, trigo y maíz en Argentina

El cultivo de soja presentó consistentemente menores brechas de rendimiento que el de maíz y trigo en todas las ZC (Tabla 8). Asimismo, las brechas de rendimiento de los tres cultivos variaron ampliamente entre localidades, yendo de 22% a 54% del RPS en soja, de 25% a 64% en trigo, y de 26 a 69% en maíz (Tabla 8). En general, las zonas extra-pampeanas presentaron brechas de rendimiento más amplias que la región Pampeana (Figura 8). Las mayores brechas de rendimiento (45 a 69% del RPS) se hallaron en las ZC V y VI, ubicadas en la región del Chaco (Tabla 8). Las zonas climáticas al oeste de la región Pampeana (*i.e.* VII y VIII) también presentaron importantes brechas de rendimiento, del 40% al 60% del RPS. Por su parte, la región Pampeana central (ZC III y IV) presentó brechas de rendimiento más bajas, siendo de alrededor de 25% en soja, y de entre 30% y 40% en trigo y maíz. Las ZC más australes (I y II) tuvieron brechas de rendimiento intermedias para trigo y maíz, de alrededor del 40% del RPS, y, por otro lado, las menores brechas de rendimiento de soja, especialmente en el sudoeste bonaerense (ZC I), donde apenas alcanzan el 22% del RPS (Tabla 8). Cabe destacar que esta última zona tuvo los menores RPS de soja y de

mayor variabilidad, debido a una fuerte limitación hídrica por la combinación de bajas precipitaciones estivales y suelos someros, que resultaron en un ILH de 61% (Apéndice, Tabla II).

Tabla 8. Brechas de rendimiento promedio de cada estación meteorológica de referencia (EMR) y zona climática (ZC), expresadas en toneladas por hectárea y como porcentaje del rendimiento potencial en seco, para soja, trigo y maíz.

Nivel		EMR						Zona Climática					
ZC	EMR	Soja		Trigo		Maíz		Soja		Trigo		Maíz	
		t ha <sup>-1</sup>	%	t ha <sup>-1</sup>	%	t ha <sup>-1</sup>	%	t ha <sup>-1</sup>	%	t ha <sup>-1</sup>	%	t ha <sup>-1</sup>	%
I	Barrow	0,5	22	2,2	42	2,9	36	0,5	22	2,5	48	2,9	36
	Pigüé	0,5	22	3,1	61	-	-						
	Azul	1,4	42	3,1	43	6,1	49						
II	Balcarce	0,8	30	2,7	39	4,9	45	1,1	33	2,8	41	5,1	42
	Pehuajó	1,1	29	3,1	46	4,7	39						
	Gualectuaychú	0,9	29	1,9	36	5,2	51						
III	Paraná	1,3	33	1,5	31	5,0	44	1,0	26	1,5	29	4,3	37
	Pergamino	0,9	22	1,4	25	3,7	32						
	Marcos Juárez	0,9	23	2,1	39	3,1	26						
IV	Rafaela	1,0	27	1,7	39	3,9	38	1,0	24	1,9	39	3,3	29
	V Las Breñas	1,5	43	1,0	49	7,1	69						
VI	Famailá	2,5	49	2,0	64	7,3	57	2,5	49	2,0	64	7,3	57
	Laboulaye	1,6	37	2,4	46	4,3	38						
VII	Pilar	1,5	38	1,3	39	6,5	51	1,8	42	1,9	45	6,0	48
	Río Cuarto	2,7	54	2,7	59	7,7	58						
VIII	General Pico	1,3	38	3,8	63	4,5	45	1,3	38	3,8	63	4,5	45

Para trigo y maíz, se determinó una correlación negativa entre el tamaño de las brechas de rendimiento promedio de las EMR y la tasa de ganancia de rendimiento real de su zona de influencia en los últimos 20 años (esta última estimada como la pendiente de la regresión lineal entre RR y año, Apéndice, Tabla I), indicando que el progreso tecnológico durante las últimas dos décadas no fue homogéneo a través de las distintas regiones productoras de grano de la Argentina (Figura 9). La soja tendió a seguir el mismo patrón, exepctuando la ZC I que presentó un comportamiento diferente (Figura 9).

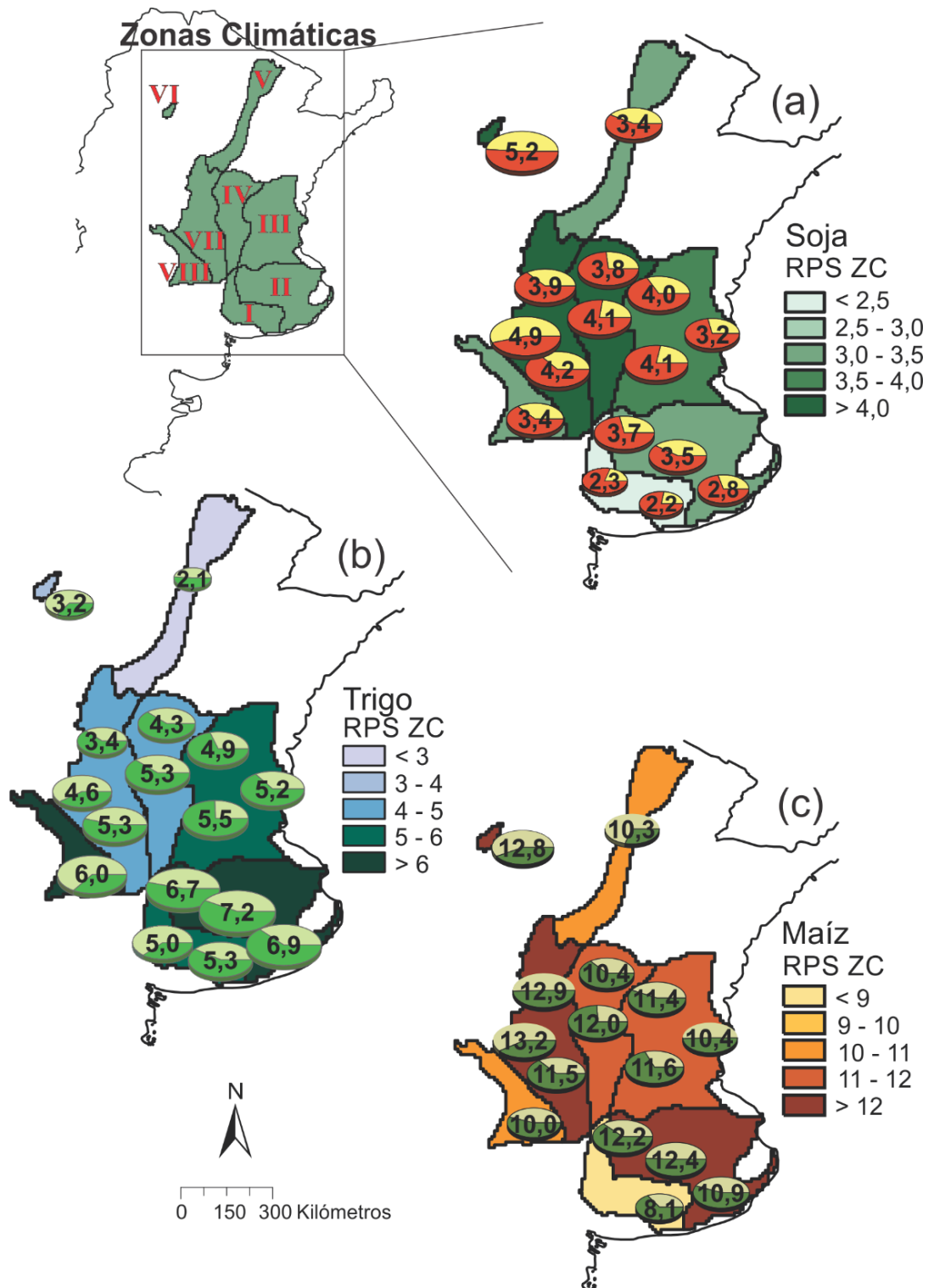


Figura 8. Mapas de rendimientos potenciales en seco (RPS), rendimientos reales (RR) y brechas de rendimiento para (a) soja, (b) trigo y (c) maíz. En cada mapa la escala de colores representa el RPS a nivel de zona climática (ZC). A su vez, para cada estación meteorológica de referencia se indica el RPS (valor dentro del gráfico de tortas), y qué proporción de éste representa el RR (color oscuro) y la brecha de rendimiento (color claro). Todos los valores están expresados en toneladas por hectárea.

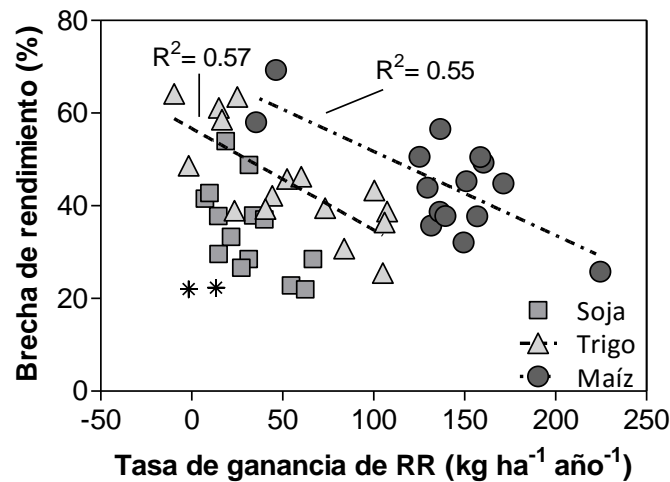


Figura 9. Brechas de rendimiento promedio de cada estación meteorológica de referencia (EMR) en función de la tasa de ganancia en rendimiento real (RR) de los últimos 20 años (1992-2012) de su zona de influencia, para soja, trigo y maíz. La tasa de ganancia de cada EMR se estimó como la pendiente de la regresión entre RR y año. Se determinaron correlaciones negativas significativas para los cultivos de trigo y maíz ( $P < 0,05$ ). Los valores de soja de la zona climática I presentaron un patrón diferente de brechas de rendimiento debido a una severa limitación hídrica, y son indicados con \*.

### 3.5. Rendimientos y brechas de soja, trigo y maíz a nivel nacional y su variación interanual.

A nivel nacional, los RPS promedio de soja, trigo y maíz fueron de 3,9, 5,2 y 11,6 t ha<sup>-1</sup> respectivamente, resultando en brechas de rendimiento de 1,3, 2,1 y 4,8 t ha<sup>-1</sup> (Tabla 9). Expresadas como porcentaje del RPS, las brechas de rendimiento fueron significativamente menores para soja (32%) que para trigo y maíz (41%). Si se achicaran las brechas de rendimiento hasta un nivel del 20% del RPS, la Argentina sería capaz de producir, en promedio, 55 millones de toneladas de soja, 19 Mt de trigo y 34 Mt de maíz, con el área cosechada durante la campaña 2011/12. Esto representa una producción de soja 18% mayor, 40% más de trigo y 35% más de maíz, respecto a lo producido en ese periodo, utilizando la misma área agrícola.

Tabla 9. Rendimientos reales (promedio 2005/06 - 2011/12), rendimientos potenciales en seco, brechas de rendimiento, área cosechada (campaña 2011/12) y producción de cultivos alcanzable promedio para soja, trigo y maíz de la Argentina. Además se presenta el coeficiente de variación interanual (CV, %) del rendimiento real, del rendimiento potencial en seco y de la producción de cultivos alcanzable. Las brechas de rendimiento se expresan tanto en términos absolutos como relativos al rendimiento potencial en seco. Para obtener detalles sobre los cálculos ver secciones 2.8 y 2.9.

Cultivo	Rendimiento Real		Rendimiento Potencial en Seco		Brecha de Rendimiento		Área Cosechada Mha	Producción de Cultivos Alcanzable	
	t ha <sup>-1</sup>	CV(%)	t ha <sup>-1</sup>	CV(%)	t ha <sup>-1</sup>	%		Mt	CV(%)
<b>Soja</b>	2.65	14	3.91	18	1.26	32	17.6	55	18
<b>Trigo</b>	3.02	23	5.16	21	2.14	41	4.5	19	21
<b>Maíz</b>	6.79	18	11.60	14	4.81	41	3.7	34	14

Pese a que los RPS y los RR presentaron coeficientes de variación interanual similares, las brechas de rendimiento variaron significativamente a través de los años (Figura 10 a). Dicha variación se debe, en parte, a variaciones en las condiciones hídricas del año en cuestión. Los RR de los tres cultivos se acercaron a los RPS en años secos (*i.e.* años con un alto ILH), mientras que las brechas de rendimiento fueron significativamente mayores en años húmedos (Figura 10 b). Esta relación lineal negativa entre el tamaño de la brecha de rendimiento y el ILH a nivel nacional, la cual puede suponerse homogénea para los tres cultivos ( $P = 0,46$ ), concuerda con el hecho de que las menores brechas de rendimiento de soja se determinaron para la zona con la mayor limitación hídrica (ZC I, Figura 8).

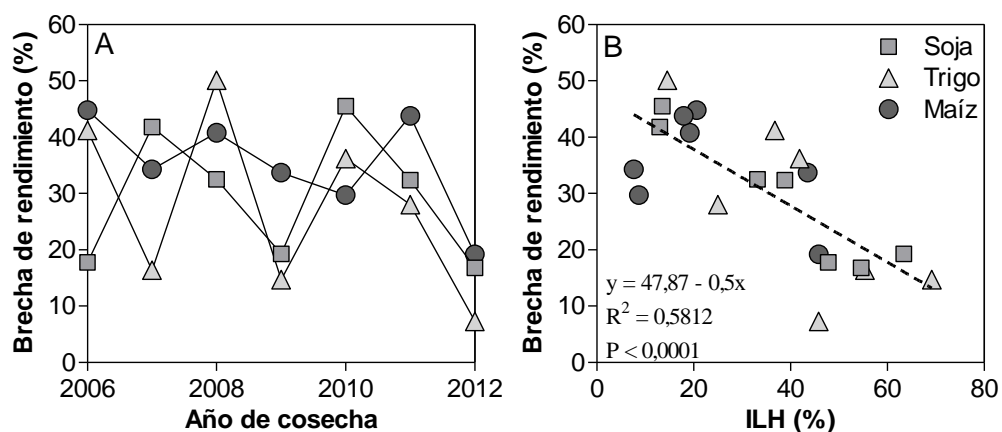


Figura 10. Brechas de rendimiento nacionales de cada ciclo agrícola (2005/06 – 2011/12) para soja, trigo y maíz, en función de: (A) año de cosecha, e (B) índice de limitación hídrica (ILH, *i.e.* diferencia entre el rendimiento potencial y el rendimiento potencial en seco expresado como porcentaje del rendimiento potencial). No se determinaron diferencias significativas en las pendientes de las regresiones lineales de brecha de rendimiento en función del ILH, entre cultivos ( $P = 0.46$ ), por lo que se ajustó una única regresión lineal para los tres cultivos.

### **3.6. Efecto del fenómeno ENSO sobre la producción de cultivos alcanzable de la Argentina**

La producción de cultivos alcanzable a nivel nacional varió significativamente a través de los años debido a la influencia de la variabilidad climática sobre los RPS, que resultó en coeficientes de variación interanuales que van del 14 al 21%. El fenómeno El Niño – Oscilación del Sur explicó una parte de las variaciones interanuales de los cultivos de verano. En las fases La Niña, la producción alcanzable de maíz fue significativamente menor y más variable que durante las fases Neutra o El Niño ( $P < 0,05$ , Figura 11). Asimismo, la producción alcanzable de soja fue mayor en las fases El Niño y menor en las fases La Niña ( $P < 0,05$ , Figura 11), sin haber un efecto significativo sobre la variabilidad interanual dentro de cada fase. Cabe destacar que el fenómeno ENSO no tuvo un efecto generalizado sobre todas las ZC productoras de grano de la Argentina, sino más bien sobre una región limitada pero altamente productiva del país (ZC III y IV para soja, y ZC II y III para maíz, Apéndice, Tabla III), por lo que su efecto se pudo observar claramente sobre los resultados a nivel nacional. Por su parte, el fenómeno ENSO no tuvo un efecto significativo sobre la producción alcanzable de trigo ( $P = 0.72$ ).



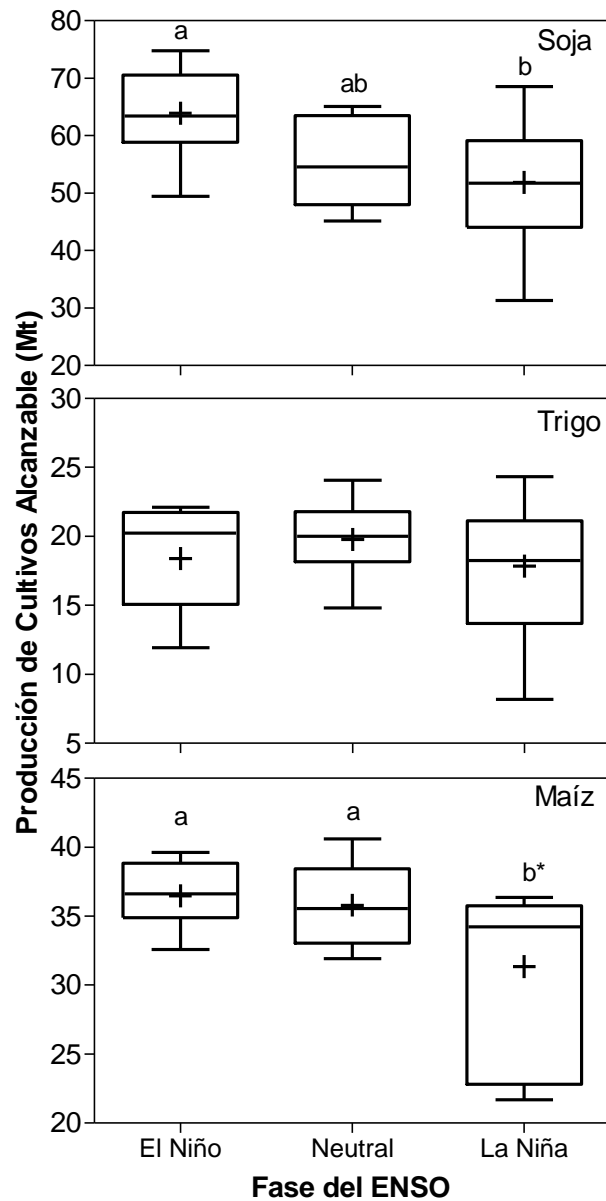


Figura 11. Producción alcanzable de soja, trigo y maíz de la Argentina en función de la fase del fenómeno “El Niño – Oscilación del Sur” (ENSO). La producción alcanzable se estimó igual al 80% del rendimiento potencial en secano, considerando el área cosechada con cada cultivo durante la campaña 2011/12. En cada cultivo, letras distintas entre fases representan diferencias significativas ( $P < 0,05$ , Kruskal-Wallis’ test). La producción alcanzable de maíz en años La Niña presentó una varianza significativamente mayor al resto de las fases (Levene’s test,  $P < 0,05$ ).

#### 4. DISCUSIÓN

Argentina es uno de los mayores exportadores de grano desde comienzos del S.XX, siendo el sector agroindustrial uno de los principales contribuyentes a las exportaciones nacionales (INDEC, 2015). Considerando una demanda estándar de 500 kg de grano por persona por año, que incluye tanto consumo directo como su equivalente por consumo de carne u otros productos alimenticios (Connor et al., 2011), el país produce suficiente grano por año como para alimentar a ca. 200 millones de personas, es decir, a cinco veces su población. No obstante, Argentina presenta brechas de rendimiento significativamente mayores al 20% del RPS en sus tres principales cultivos. En consecuencia, se podrían producir 22 millones de toneladas de grano más sobre la misma tierra cultivada si en vez de haber brechas de rendimiento del 32 y 41% del RPS (según cultivo) se alcanzase el 80% del RPS. Si esta producción extra se exportara, lo que sería bastante probable dada la baja demanda interna, se incrementarían las exportaciones mundiales de soja, trigo y maíz en un 9, 4 y 9%<sup>4</sup>, respectivamente.

La producción argentina de granos, y por lo tanto las exportaciones, varían ampliamente entre años debido a la variabilidad climática interanual y la influencia del fenómeno ENSO (Iizumi et al., 2014; Podestá et al., 1999). De hecho, el impacto de las fases “El Niño” y “La Niña” del fenómeno ENSO sobre los RR de maíz de la Argentina se magnificó en los últimos años (Figura 6), pese al incremento en la proporción de maíz tardío, que se caracteriza por poseer un menor rendimiento potencial que el maíz sembrado temprano, pero mayor estabilidad interanual (Maddonni, 2012; Mercau et al., 2014). Esto puede deberse, en parte, a que los RPS son más sensibles a las variaciones climáticas interanuales que los RR, dado que el único factor limitante de los primeros es el agua disponible para los cultivos, y en la medida que los RR se aproximan a los RPS, estos se vuelven más sensibles a las variaciones hídricas si las prácticas de manejo no se modifican. Por ejemplo, en años “La Niña” existe una alta probabilidad de sequías generalizadas, las cuales pueden reducir la producción alcanzable de maíz de la Argentina en más del 30%. Del mismo modo, la producción alcanzable de soja promedio de la Argentina es 12 Mt menor en fases “La Niña” que en fases “El Niño” (Figura 11), lo cual representa un 15% de las exportaciones mundiales de dicho commodity.

En un contexto global, los cultivos de cereales de Argentina presentaron brechas de rendimiento moderadas. Las brechas de rendimiento de trigo y maíz, estimadas en 41%

---

<sup>4</sup> Promedio 2006-2011. Fuente: FAOSTAT (2015).

del RPS, fueron similares a las reportadas por Hall et al. (2013) para girasol, pero considerablemente mayores a las brechas reportadas para los grandes productores de cereales de alto nivel tecnológico, como es el caso de Alemania (trigo) y Nebraska, EEUU (maíz), los cuales presentaron brechas de alrededor del 20% (Grassini et al., 2011 a; van Wart et al., 2013 b). En el otro extremo, las brechas de rendimiento de la Argentina son mucho menores que las reportadas para los sistemas de producción a pequeña escala del África sub-sahariana, que presentan brechas de hasta 80% del RPS (Tittonell y Giller, 2013; Kassie et al., 2014).

Si consideramos la función de producción vs. dosis de insumos, la cual tiene forma sigmoidea (de Wit, 1992), los sistemas de cultivo del África sub-sahariana se encontrarían en la fase "lag" de bajo nivel de insumos y baja respuesta, mientras que EEUU y el norte de Europa, con sus altos niveles de insumos, estarían llegando al nivel de "plateau" (Tittonell, 2013). Argentina, por su parte, estaría ubicada en la zona de mayor respuesta al incremento de insumos, pero con una amplia variabilidad entre regiones y productores. Esto podría explicar las altas tasas de ganancia de rendimiento que experimentó la Argentina durante las últimas dos décadas (Otegui et al., 2015). De hecho, Argentina es uno de los pocos países con tasas de ganancia de rendimiento lo suficientemente altas como para duplicar sus rendimientos para el año 2050, siempre y cuando dichas tasas se mantengan en los próximos 35 años (Ray et al., 2013). Suponiendo que los valores de RPS se mantienen constantes, si se proyectan las tasas actuales de ganancia de rendimiento se alcanzaría el 80% del RPS en los años 2025, 2026, y 2038 para soja, trigo y maíz, respectivamente.

De cualquier modo, existe evidencia de que los RPS y la intensidad en el uso de la tierra pueden seguir incrementándose en Argentina. Por ejemplo, los productores están incorporando conceptos de manejo por ambiente, pronósticos climáticos a largo plazo (en relación con el ENSO), y mediciones del cultivo durante etapas tempranas del ciclo (como ser agua a la siembra y nutrición nitrogenada), para así hacer un ajuste fino del manejo de los cultivos (Bert et al., 2006; Monzon et al., 2007; Peralta et al., 2013), lo que permitiría tanto aumentar los RPS como reducir brechas, aunque la adopción de esta tecnología aún es baja. Por su parte, en aquellas regiones donde el régimen hídrico lo permite, se puede intensificar el uso de la tierra a través de un mayor uso de dobles cultivos, haciendo una mejor planificación de las rotaciones (Monzon et al., 2014; Andrade et al., 2015 b).

La brecha de rendimiento de soja fue considerablemente menor que la de trigo y maíz (32% *versus* 41% del RPS). Esta diferencia puede explicarse por: (i) una mayor plasticidad vegetativa y reproductiva de la soja (Andrade, 1995); (ii) los cultivos de soja de Argentina obtienen *ca.* el 60% de su N de la fijación biológica de N (Collino et al., 2015), por lo que es menos probable que estén limitados por dicho nutriente (Salvagiotti et al., 2008); y (iii) los umbrales de respuesta a P de la soja son menores que los de trigo y maíz (Hanway y Olson, 1980). De hecho, los sistemas de cultivo de la Argentina suelen estar limitados por nutrientes, ya que los niveles de fertilizantes aplicados siguen estando por debajo de lo requerido por los cultivos (Calviño y Monzon, 2009; Lavado y Taboada, 2009), resultando en balances de nutrientes negativos (García y González Sanjuan, 2010; Liu et al., 2010; MacDonald et al., 2011; Lassaletta et al., 2014). Teniendo en cuenta que las brechas de rendimiento de maíz, trigo y girasol (Hall et al., 2013) fueron notablemente similares y superiores que las de soja, es probable que dichas diferencias estén relacionadas, en su mayor parte, a déficits de nitrógeno.

Argentina posee una amplia diversidad en sus sistemas de cultivos a través de sus regiones, lo que resulta en un amplio rango de RR, RPS y brechas de rendimientos, tanto a escala espacial (Figura 8), como temporal (Figura 10). Esta variabilidad no ha sido debidamente cuantificada en estudios previos de brechas de rendimiento, principalmente porque fueron estudios globales que no cuantificaron debidamente la variación espacial en suelos y manejo de cultivos de Argentina, o bien porque utilizaron datos climáticos promedio en lugar de datos anuales (Neumann et al., 2010; Licker et al., 2010; Foley et al., 2011; Mueller et al., 2012). Por ejemplo, las estimaciones de Neumann et al. (2010) concuerdan aproximadamente con los resultados obtenidos para trigo y maíz a nivel nacional (Tabla 9), pero el método que utilizaron no fue lo suficientemente sensible como para detectar diferencias entre regiones. Por su parte, tanto Licker et al. (2010) como Foley et al. (2011) subestimaron en gran medida los RPS de soja y maíz de la Argentina (estimando RPS de *ca.* 2,5 t ha<sup>-1</sup> y 7,5 t ha<sup>-1</sup> para soja y maíz, respectivamente)

Por lo general, las brechas de rendimiento tienden a ser mayores cuando el riesgo asociado con la producción de cultivos es mayor, es decir, cuando los rendimientos presentan una alta variabilidad interanual (Fischer et al., 2009). Sin embargo, pese a la amplia gama de RR, RPS y coeficientes de variación de las regiones de Argentina, no hubo relaciones consistentes entre las brechas de rendimiento y ninguna de estas variables.

Otros aspectos que pueden servir para entender las diferencias en las brechas de rendimiento de las distintas regiones son la historia agrícola de la región y la tecnología utilizada por los productores, lo cual puede cuantificarse a través de sus tasas de ganancia de rendimiento en los últimos años (Figura 9). De esta manera se pueden distinguir escenarios contrastantes entre las macro-regiones. Por ejemplo, la región del Chaco (*i.e.* ZC V y VI) presentó las mayores brechas de rendimiento, probablemente debido a una historia agrícola más incipiente para estos cultivos y a una menor adopción de tecnología por parte de los productores. En esta zona es necesario, entonces, canalizar los recursos de investigación y extensión en el entendimiento de las causas socio-económicas que provocaron las bajas tasas de ganancia de rendimiento de la región. Por su parte, en la región Pampeana central (*i.e.* ZC III y IV) se obtuvieron las mayores tasas de ganancia de rendimiento del país, por lo que las brechas de rendimiento tendieron a ser menores que en el resto de la Argentina. Como es probable que los productores lleguen a igualar los rendimientos alcanzables en el mediano a corto plazo, los futuros incrementos de los RR deben basarse en incrementos en los RPS, ya sea a través de mejora genética (Andrade et al., 2015 a; Hall y Richards, 2013) o por medio de un mejor diseño de las rotaciones y manejo de los cultivos según el ambiente en pequeña escala (Andrade et al., 2015 b; Nosetto et al., 2009; Peralta et al., 2013).

Las brechas de rendimiento de la Argentina variaron significativamente entre años (Figura 10 a). La variación temporal de las brechas de rendimiento, aspecto que no ha sido analizado en profundidad en estudios previos (Hall et al., 2013; Laborte et al., 2012; van Rees et al., 2014; van Wart et al., 2013 b), puede ayudar a la comprensión de sus causas. El RPS y el RR siguieron la misma tendencia a través de los años, pero el RPS fue más sensible a las variaciones hídricas que el RR, lo cual resultó en mayores brechas de rendimiento en años húmedos, más favorables para la producción agrícola (Figura 10 b). En años secos el agua es el factor más limitante para la producción agrícola, mientras que en años húmedos otros factores pueden volverse más limitantes, como por ejemplo la disponibilidad de nutrientes y/o la incidencia de plagas y enfermedades. Análogamente, las menores brechas de rendimiento se determinaron para soja en el sudoeste de la Región Pampeana (*i.e.* ZC I) donde el agua es el factor más limitante para la producción agrícola, con un ILH de 61% (Apéndice, Tabla II).

El comportamiento contrastante de las brechas de rendimiento en años húmedos y secos (Figura 10 b) puede deberse a la aversión al riesgo de los productores y su impacto sobre el nivel de insumos utilizado (Fischer et al., 2014). Los productores suelen definir las prácticas de manejo y el nivel de insumos a utilizar en base al rendimiento

logrado en años normales a moderadamente secos, lo cual puede tener un costo de oportunidad no deseado en años de alto potencial. La disponibilidad de pronósticos climáticos en base al fenómeno ENSO, junto con otros indicadores al inicio de la campaña agrícola (como ser el contenido de nitrógeno y agua disponible a la siembra) puede ayudar a reducir la incertidumbre asociada a la producción de cultivos, permitiendo que los productores saquen ventaja en años favorables y reduciendo las pérdidas económicas en años secos (Bert et al., 2006).

En síntesis, en esta tesis se ha demostrado que, a pesar de las altas tasas de ganancia de rendimiento de los últimos 20 años, la Argentina presenta brechas de rendimiento superiores al 20% del RPS en sus tres principales cultivos. Además, las brechas presentaron una alta variación espacio-temporal, siendo mayores en las zonas extra-pampeanas que en la región Pampeana. Para trigo y maíz se determinó una correlación negativa entre el tamaño de la brecha de rendimiento y la tasa de ganancia de rendimiento de las distintas regiones, indicando que el cambio tecnológico no fue homogéneo a través de la Argentina, y que en aquellas zonas en donde hubo menor avance en los rendimientos, las brechas son mayores. Por otro lado, las brechas de rendimiento tendieron a ser mayores en años húmedos que en años secos, debido a la aversión a tomar riesgo de los productores, que conduce a prácticas de manejo más conservadoras, no permitiéndoles capturar el plus de rendimiento de años más favorables desde el punto de vista hídrico.

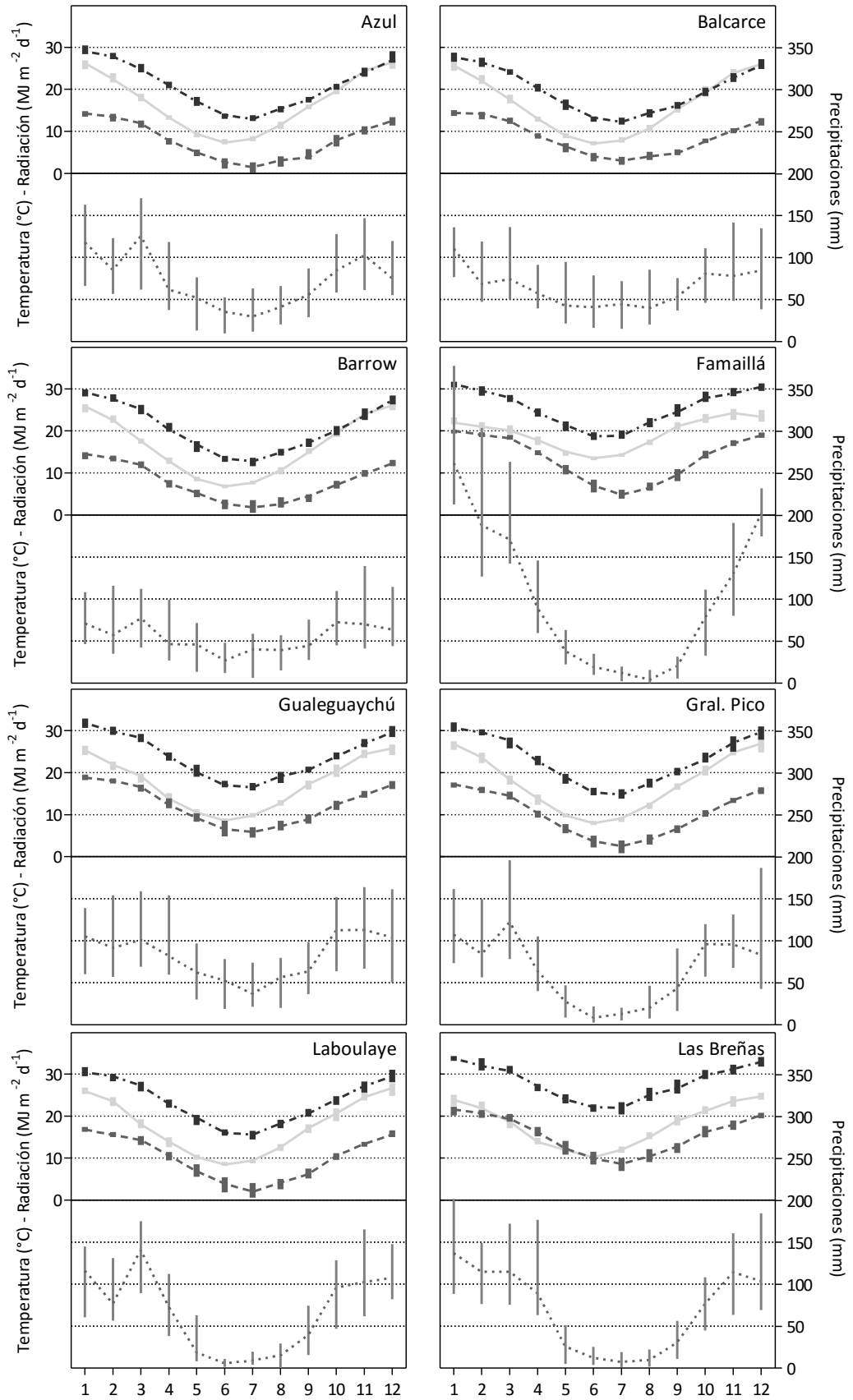
## 5. CONCLUSIONES

La primera hipótesis de este trabajo plantea que las brechas de rendimiento de soja, trigo y maíz en Argentina son mayores al 20% del RPS. Es decir que existe margen para incrementar los rendimientos a través de la reducción de dichas brechas. Esta hipótesis no es rechazada. Las brechas de rendimiento promedio, a nivel nacional, fueron del 32, 41, y 41% del RPS para soja, trigo y maíz, respectivamente. Esto implica que Argentina tiene el potencial para aumentar su producción de soja, trigo y maíz, en un respectivo 7,4 Mt, 5,2 Mt y 9,2 Mt, sin expandir su área cultivada. El potencial incremento de la producción podría tener un alto impacto sobre las exportaciones nacionales, siendo una importante contribución al mercado mundial de dichos commodities, o bien podría incentivar la cadena agro-industrial si se destina al mercado interno para el agregado de valor.

La segunda hipótesis postula que las brechas de rendimiento son mayores en las zonas extra-pampeanas que en la región Pampeana. Esta hipótesis no es rechazada. Los datos reportados por el Ministerio de Agricultura durante los últimos años muestran diferencias importantes en la evolución de los RR entre estas regiones, indicando que el avance tecnológico de la agricultura no fue homogéneo a lo largo del país. Más aún, las mayores brechas de rendimiento se determinaron para las ZC ubicadas en la región del Chaco y al oeste de la región Pampeana, mientras que la región Pampeana central presentó las menores brechas de rendimiento de trigo y maíz, y las segundas menores brechas de soja. Por otro lado, hubo una relación negativa significativa entre el tamaño de las brechas de rendimiento de trigo y maíz y la tasa de ganancia de rendimiento de los últimos 20 años. La amplia variabilidad espacial que presentan las brechas de rendimiento en Argentina resalta la utilidad de este trabajo como marco para enfocar futuras investigaciones en pos de identificar los factores claves para la reducción de las mismas en aquellas zonas donde éstas son mayores.

La tercera hipótesis propone que en Argentina las brechas de rendimiento son mayores en años de mayor disponibilidad hídrica. Esta hipótesis no se rechaza. Al analizar la variación interanual de las brechas de rendimiento a nivel nacional, se determinó que existe una relación negativa, única para los tres cultivos, entre el tamaño de la brecha de rendimiento y el ILH de ese año. Esta relación, que no había sido reportada hasta el momento en la bibliografía para ningún cultivo, demuestra que la aversión a tomar riesgo de los productores resulta en un costo de oportunidad no deseado en años de alto potencial.

6. APÉNDICE





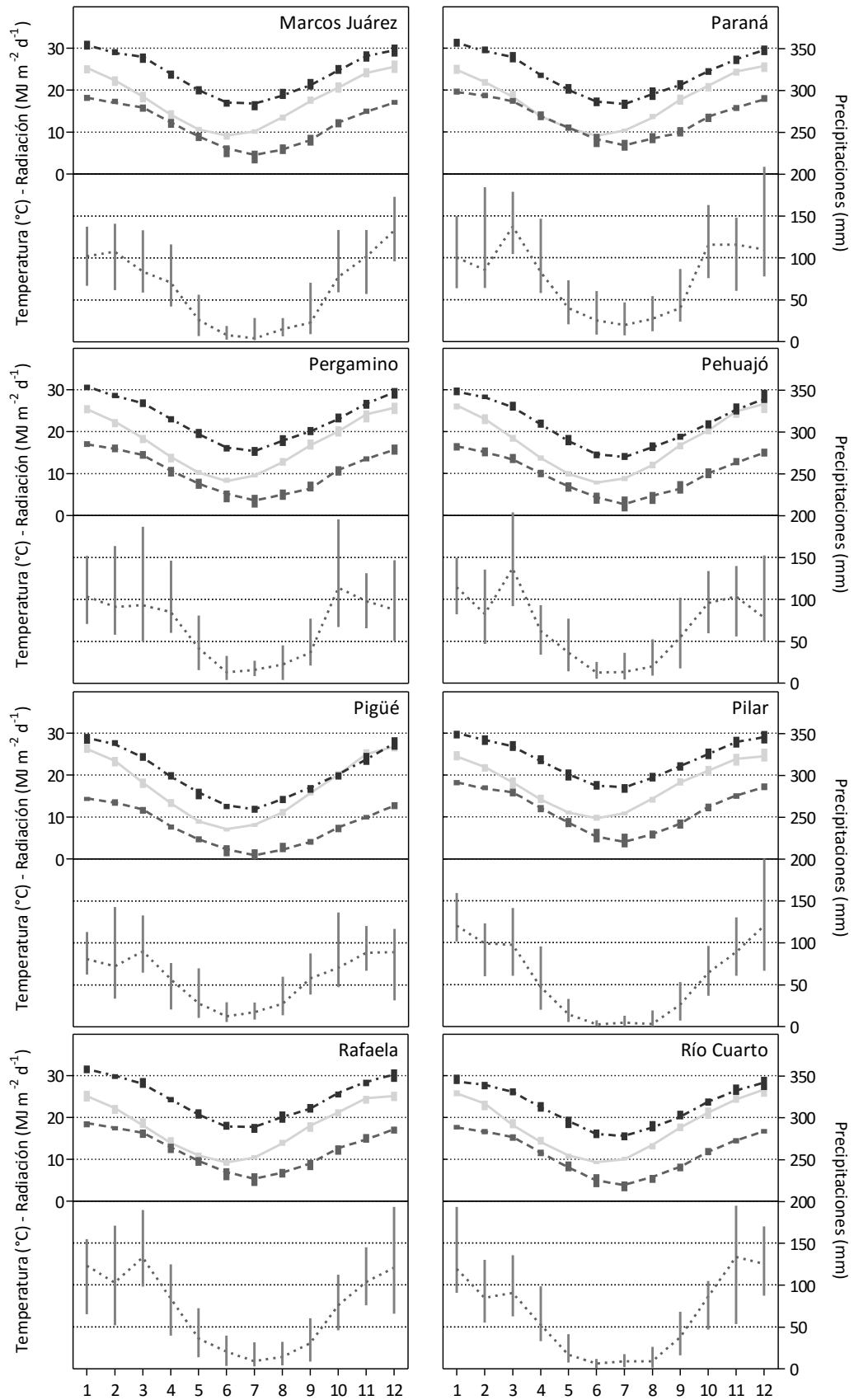


Figura I. Datos climáticos mensuales de las estaciones meteorológicas de referencia. Se presentan las medianas y la distancia intercuartil para: temperaturas máximas y

mínimas diarias (líneas discontinuas, paneles superiores), radiación solar diaria (línea gris continua, paneles superiores) y precipitaciones mensuales (línea de puntos, paneles inferiores).

Tabla I. Tasa de ganancia de rendimiento real ( $\text{kg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ ) obtenida entre 1990/91 y 2011/12 en la zona de influencia de cada estación meteorológica de referencia (EMR), y zona climática (ZC), para los cultivos soja, trigo y maíz.

ZC	Nivel	EMR			Zona Climática		
	EMR	Soja	Trigo	Maíz	Soja	Trigo	Maíz
I	Barrow	13,3	44,3	131,7	7,3	34,9	131,7
	Pigüé	-1,7	15,0	-			
II	Azul	7,3	100,4	160,4	35,5	99,2	148,2
	Balcarce	14,8	107,5	171,3			
	Pehuajó	66,7	60,3	136,4			
III	Guauguaychú	31,4	106,0	125,2	47,1	96,9	141,0
	Paraná	21,6	83,9	129,6			
	Pergamino	62,4	105,1	149,4			
IV	Marcos Juárez	54,6	73,4	224,6	44,7	58,9	201,6
	Rafaela	27,2	40,5	139,4			
V	Las Breñas	9,8	-1,6	46,3	9,8	-1,6	46,3
VI	Famallá	31,5	-9,6	136,7	31,5	-9,6	136,7
	Laboulaye	39,9	52,4	156,9			
VII	Pilar	14,6	23,5	158,7	24,9	33,5	123,1
	Río Cuarto	18,6	16,6	35,4			
VIII	General Pico	33,8	25,1	151,0	33,8	25,1	151,0

Tabla II. Índice de limitación hídrica (*i.e.* diferencia entre el rendimiento potencial y el rendimiento potencial en seco) de cada estación meteorológica de referencia (EMR) y zona climática (ZC), expresado en toneladas por hectárea y como porcentaje del rendimiento potencial, para soja, trigo y maíz. Los valores de soja se obtuvieron ponderando cultivos de primera y de segunda.

Nivel		EMR						Zona Climática					
ZC	EMR	Soja		Trigo		Maíz		Soja		Trigo		Maíz	
		t ha <sup>-1</sup>	%	t ha <sup>-1</sup>	%	t ha <sup>-1</sup>	%	t ha <sup>-1</sup>	%	t ha <sup>-1</sup>	%	t ha <sup>-1</sup>	%
I	Barrow	3,0	58	2,7	34	7,8	49	3,4	61	2,8	35	7,8	49
	Pigüé	3,8	62	3,0	38	-	-						
II	Azul	2,3	40	1,2	14	4,0	24	2,5	42	1,2	15	3,3	22
	Balcarce	2,6	48	1,3	16	5,3	33						
	Pehuajó	2,6	41	1,0	13	2,4	16						
III	Gualeduaychú	3,1	49	1,6	24	3,1	23	2,4	38	1,7	25	2,2	16
	Paraná	2,0	33	1,9	28	2,1	16						
IV	Pergamino	2,5	38	1,5	21	2,1	15	2,1	34	2,1	30	1,7	13
	Marcos Juárez	2,1	34	1,6	23	1,1	08						
V	Rafaela	2,1	36	2,8	39	3,4	25	1,5	31	2,7	56	0,3	03
	Las Breñas	1,5	31	2,7	56	0,3	03						
VI	Famailá	0,2	04	4,2	57	0,1	01	0,2	04	4,2	57	0,1	01
	Laboulaye	2,9	41	1,7	24	2,6	18						
VII	Pilar	2,0	34	3,4	50	1,2	09	2,5	37	2,6	38	1,8	13
	Río Cuarto	2,4	33	2,5	35	1,1	08						
VIII	General Pico	2,8	45	1,1	15	2,1	17	2,8	45	1,1	15	2,1	17

Tabla III. Rendimiento potencial en seco medio (percentil 50) de cada zona climática, según la fase del fenómeno El Niño – Oscilación del Sur, para soja y maíz. Letras distintas entre fases para un mismo cultivo y ZC representan diferencias de rendimiento potencial en seco significativas ( $P < 0,05$ , Kruskal-Wallis' test).

Zona Climática	SOJA			MAÍZ		
	El Niño	Neutral	La Niña	El Niño	Neutral	La Niña
I	2,3	2,5	1,9	5,8	9,9	5,9
II	3,6	3,3	3,0	13,5 a	13,0 a	10,0 b
III	4,6 a	3,7 ab	3,3 b	12,9 a	12,4 a	9,7 b
IV	5,3 a	3,8 ab	3,4 b	12,5	12,0	11,9
V	4,0	3,8	3,5	10,3	9,7	10,9
VI	5,4	5,4	5,2	13,7	13,1	12,3
VII	4,5	3,8	3,6	12,1	13,2	12,7
VIII	3,1	3,6	3,4	11,4	11,0	8,6

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- ABBATE, P.E.; ANDRADE, F.H.; CULOT, J.P. 1995. The effects of radiation and nitrogen on number of grains in wheat. *J. Agric. Sci.* 124(3): 351–360.
- ALEXANDRATOS, N.; BRUINSMA, J. 2012. World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. ESA Working paper Rome, FAO.
- ANDRADE, F.H. 1995. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. *Field Crops Res.* 41(1): 1–12.
- ANDRADE, F.H. 2011. La tecnología y la producción agrícola. El pasado y los actuales desafíos, INTA. EEA Balcarce, Centro Regional Buenos Aires Sur, Balcarce, Bs As, Argentina. 60p.
- ANDRADE, F.H.; SALA, R.; PONTAROLI, A.; LEÓN, A.; CASTRO, S.; 2015 a. Integration of biotechnology, plant breeding and crop physiology. Dealing with complex interactions from a physiological perspective. In: Sadras, V.; Calderini, D. (eds). *Crop Physiology: Applications for Genetic Improvement and Agronomy*. Elsevier Science, New York, EEUU. pp. 487–503.
- ANDRADE, J.F.; POGGIO, S.L.; ERMÁCORA, M.; SATORRE, E.H. 2015 b. Productivity and resource use in intensified cropping systems in the Rolling Pampa, Argentina. *Eur. J. Agron.* 67: 37–51.
- ANGSTROM, A.; 1924. Solar and terrestrial radiation. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 50(210): 121–126.
- 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. *Agric. Syst.* 88(2): 180–204.
- BRUINSMA, J. 2009. The resource outlook to 2050: by how much do land, water, and crop yields need to increase by 2050?. *FAO Expert Meeting on “How to Feed the World in 2050.”* Roma, Italia. Junio 2009. pp. 118–150.
- CALVIÑO, P.A.; SADRAS, V.O. 1999. Interannual variation in soybean yield: interaction among rainfall, soil depth and crop management. *Field Crops Res.* 63(3): 237–246.
- CALVIÑO, P.A.; MONZON, J.P. 2009. Farming systems of Argentina: yield constraints and risk management. In: Sadras, V.O.; Calderini, D.F. (eds). *Crop Physiology. Applications for Genetic Improvement and Agronomy*. Academic Press, Elsevier, Amsterdam, Países Bajos. pp. 55–70.
- CALVIÑO, P.A.; ANDRADE, F.H.; SADRAS, V.O. 2003. Maize yield as affected by water availability, soil depth, and crop management. *Agron. J.* 95(2): 275–281.
- CASSMAN, K.G. 1999. Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 96: 5952–5959.

- CASSMAN, K.G.; DOBERMANN, A.; WALTERS, D.T.; YANG, H. 2003. Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 28: 315–358.
- CASSMAN, K.G.; GRASSINI, P.; VAN WART, J. 2010. Crop yield potential, yield trends, and global food security in a changing climate. In: Hillel, D.; Rosenzweig, C. (eds.) *Handbook of Climate Change and Agroecosystems: Impacts, Adaptation and Mitigation*. Imperial College Press, Londres, Reino Unido. pp. 37–51.
- CAVIGLIA, O.P.; ANDRADE, F.H. 2010. Sustainable intensification of agriculture in the Argentinean pampas: Capture and use efficiency of environmental resources. *Am. J. Plant Sci. Biotechnol.* 3(1): 1–8.
- COLLINO, D.J.; SALVAGIOTTI, F.; PERTICARI, A.; PICCINETTI, C.; OVANDO, G.; URQUIAGA, S.; RACCA, R.W. 2015. Biological nitrogen fixation in soybean in Argentina: relationships with crop, soil, and meteorological factors. *Plant Soil.* 392: 239–252.
- CONNOR, D.J.; LOOMIS, R.S.; CASSMAN, K.G. 2011. *Crop Ecology: Productivity and Management in Agricultural Systems*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido. 556 p.
- DARDANELLI, J.L.; BACHMEIER, O.A.; SERENO, R.; GIL, R. 1997. Rooting depth and soil water extraction patterns of different crops in a silty loam Haplustoll. *Field Crops Res.* 54(1): 29–38.
- DE WIT, C.T. 1992. Resource use efficiency in agriculture. *Agric. Syst.* 40(1–3): 125–151.
- DUVICK, D.N.; CASSMAN, K.G. 1999. Post–green revolution trends in yield potential of temperate maize in the North-Central United States. *Crop Sci.* 39(6): 1622–1630.
- EVANS, L.T. 1993. *Crop evolution, adaptation and yield*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido. 500p.
- EVANS, L.T.; FISCHER, R.A. 1999. Yield potential: its definition, measurement, and significance. *Crop Sci.* 39(6): 1544–1551.
- FAOSTAT. 2015. *Statistics of the Food and Agriculture Organization of the United Nations*. [online] <<http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/home/E>>. [consulta mayo 2015].
- FERNÁNDEZ-LONG, M.E.; MÜLLER, G.V.; BELTRÁN-PRZEKURAT, A.; SCARPATI, O.E. 2013. Long-term and recent changes in temperature-based agroclimatic indices in Argentina. *Int. J. Climatol.* 33(7): 1673–1686.
- FISCHER, R.A. 1985. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *J. Agric. Sci.* 105(2): 447–461.
- FISCHER, R.A.; BYERLEE, D.; EDMEADES, G.O. 2009. Can technology deliver on the yield challenge to 2050. *FAO Expert Meeting on “How to Feed the World in 2050.”* Roma, Italia. Junio 2009. pp. 389–462.
- FISCHER, R.A.; EDMEADES, G.O. 2010. Breeding and cereal yield progress. *Crop Sci.* 50(S1): 85–98.

- FISCHER, T.; BYERLEE, D.; EDMEADES, G.O. 2014. Crop yields and global food security: will yield increase continue to feed the world?, ACIAR Monograph. Australian Centre for International Agricultural Research, Cranberra, Australia. 634p.
- FOLEY, J.A.; RAMANKUTTY, N.; BRAUMAN, K.A.; CASSIDY, E.S.; GERBER, J.S.; JOHNSTON, M.; MUELLER, N.D.; O'CONNELL, C.; RAY, D.K.; WEST, P.C.; BALZER, C.; BENNETT, E.M.; CARPENTER, S.R.; HILL, J.; MONFREDA, C.; POLASKY, S.; ROCKSTRÖM, J.; SHEEHAN, J.; SIEBERT, S.; TILMAN, D.; ZAKS, D.P.M. 2011. Solutions for a cultivated planet. *Nature* 478(7369): 337–342.
- FRENCH, R.J.; SCHULTZ, J.E. 1984. Water use efficiency of wheat in a Mediterranean-type environment. II. Some limitations to efficiency. *Crop Pasture Sci.* 35(6): 765–775.
- GARCÍA F.; GONZÁLEZ SANJUAN, M. F. 2010. Balances de nutrientes en Argentina ¿Cómo estamos? ¿Cómo mejoramos?. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur.*48:1–5
- GERLAND, P.; RAFTERY, A.E.; ŠEVČÍKOVÁ, H.; LI, N.; GU, D.; SPOORENBERG, T.; ALKEMA, L.; FOSDICK, B.K.; CHUNN, J.; LALIC, N.; BAY, G.; BUETTNER, T.; HEILIG, G.K.; WILMOTH, J. 2014. World population stabilization unlikely this century. *Science* 346(6206): 234–237.
- GIJSMAN, A.J.; JAGTAP, S.S.; JONES, J.W. 2003. Wading through a swamp of complete confusion: how to choose a method for estimating soil water retention parameters for crop models. *Eur. J. Agron.* 18(1): 77–106.
- GODFRAY, H.C.J.; BEDDINGTON, J.R.; CRUTE, I.R.; HADDAD, L.; LAWRENCE, D.; MUIR, J.F.; PRETTY, J.; ROBINSON, S.; THOMAS, S.M.; TOULMIN, C. 2010. Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People. *Science* 327(5967): 812–818.
- GRASSINI, P.; HALL, A.J.; MERCAU, J.L. 2009. Benchmarking sunflower water productivity in semiarid environments. *Field Crops Res.* 110(3): 251–262.
- GRASSINI, P.; THORBURN, J.; BURR, C.; CASSMAN, K.G. 2011 a. High-yield irrigated maize in the Western US Corn Belt: I. On-farm yield, yield potential, and impact of agronomic practices. *Field Crops Res.* 120: 142–150.
- GRASSINI, P.; YANG, H.; IRMAK, S.; THORBURN, J.; BURR, C.; CASSMAN, K.G. 2011 b. High-yield irrigated maize in the Western US Corn Belt: II. Irrigation management and crop water productivity. *Field Crops Res.* 120: 133–141.
- GRASSINI, P.; ESKRIDGE, K.M.; CASSMAN, K.G. 2013. Distinguishing between yield advances and yield plateaus in historical crop production trends. *Nat. Commun.* 4(2918): 1–11.
- GRASSINI, P.; VAN BUSSEL, L.G.; VAN WART, J.; WOLF, J.; CLAESSENS, L.; YANG, H.; BOOGAARD, H.; DE GROOT, H.; 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 Res.* 177: 49–63.

- GROSSI GALLEGOS, H.; ATIENZA, G. 1991. Determinación de los coeficientes de ajuste de la ecuación de regresión entre las horas de insolación y la radiación global para diferentes zonas de Argentina y distintas épocas del año. *Actas 5° Reunión Nac. Agrometeorol, Vaquerías, Córdoba, Argentina*. pp. 57–62.
- HALL, A.J.; REBELLA, C.M.; GHERSA, C.M.; CULOT, J.P. 1992. Field-crop systems of the Pampas. In: *Field Crop Ecosystems of the World*. Elsevier, Exeter, Reino Unido. pp. 413–450.
- HALL, A.J.; FEOLI, C.; INGARAMO, J.; BALZARINI, M. 2013. Gaps between farmer and attainable yields across rainfed sunflower growing regions of Argentina. *Field Crops Res., Crop Yield Gap Analysis – Rationale, Methods and Applications 143*: 119–129.
- HALL, A.J.; RICHARDS, R.A. 2013. Prognosis for genetic improvement of yield potential and water-limited yield of major grain crops. *Field Crops Res.* 143: 18–33.
- HANWAY, J.J.; OLSON, R.A. 1980. Phosphate nutrition of corn, sorghum, soybeans, and small grains. In: Khasawneh, F.; Smaple, E.; Kamprath, E. (eds). *The Role of Phosphorus in Agriculture*. ASA, CSSA, SSSA, Madison, Wisconsin, EEUU. pp. 681–692.
- HOOGENBOOM, G.; JONES, J.W.; WILKENS, P.W.; PORTER, C.H.; BOOTE, K.J.; HUNT, L.A.; SINGH, U.; LIZASO, J.L.; WHITE, J.W.; URYASEV, O.; ROYCE, F.S.; OGOSHI, R.; GIJSMAN, A.J.; TSUJI, G.Y. 2010. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) [CD-ROM]. Version 4.5.: Univ. of Hawaii. Honolulu. Programa computacional.
- HUBBARD, K.G.; GUTTMAN, N.B.; YOU, J.; CHEN, Z. 2007. An improved QC process for temperature in the daily cooperative weather observations. *J. Atmospheric Ocean. Technol.* 24(2): 206–213.
- IIZUMI, T.; LUO, J.-J.; CHALLINOR, A.J.; SAKURAI, G.; YOKOZAWA, M.; SAKUMA, H.; BROWN, M.E.; YAMAGATA, T. 2014. Impacts of El Niño Southern Oscillation on the global yields of major crops. *Nat. Commun.* 5(3712): 1–12.
- INDEC 2015. Instituto Nacional de Estadística y Censos. República Argentina. [online] <<http://www.indec.gov.ar>>. [consulta mayo 2015].
- 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. *Eur. J. Agron.* 18: 235–265.
- KASSIE, B.T.; VAN ITTERSUM, M.K.; HENGSDIJK, H.; ASSENG, S.; WOLF, J.; RÖTTER, R.P. 2014. Climate-induced yield variability and yield gaps of maize (*Zea mays* L.) in the Central Rift Valley of Ethiopia. *Field Crops Res.* 160: 41–53.
- KOBAYASHI, K.; SALAM, M.U. 2000. Comparing simulated and measured values using mean squared deviation and its components. *Agron. J.* 92: 345–352.
- LABORTE, A.G.; DE BIE, K. (C. A.J.M.); SMALING, E.M.A.; MOYA, P.F.; BOLING, A.A.; VAN ITTERSUM, M.K. 2012. Rice yields and yield gaps in Southeast Asia: Past trends and future outlook. *Eur. J. Agron.* 36: 9–20.

- LAMBIN, E.F.; GIBBS, H.K.; FERREIRA, L.; GRAU, R.; MAYAUX, P.; MEYFROIDT, P.; MORTON, D.C.; RUDEL, T.K.; GASPARRI, I.; MUNGER, J. 2013. Estimating the world's potentially available cropland using a bottom-up approach. *Glob. Environ. Change* 23: 892–901.
- LASSALETTA, L.; BILLEN, G.; GRIZZETTI, B.; ANGLADE, J.; GARNIER, J. 2014. 50 year trends in nitrogen use efficiency of world cropping systems: the relationship between yield and nitrogen input to cropland. *Environ. Res. Lett.* 9(10): 105011–105019.
- LAVADO, R.S.; TABOADA, M.A. 2009. The Argentinean Pampas: A key region with a negative nutrient balance and soil degradation needs better nutrient management and conservation programs to sustain its future viability as a world agrosresource. *J. Soil Water Conserv.* 64(5): 150–153.
- LÁZARO, L.; ABBATE, P.E. 2012. Cultivar effects on relationship between grain number and photothermal quotient or spike dry weight in wheat. *J. Agric. Sci.* 150: 442–459.
- LICKER, R.; JOHNSTON, M.; FOLEY, J.A.; BARFORD, C.; KUCHARIK, C.J.; MONFREDA, C.; RAMANKUTTY, N. 2010. Mind the gap: how do climate and agricultural management explain the “yield gap” of croplands around the world? *Glob. Ecol. Biogeogr.* 19: 769–782.
- LIU, J.; YOU, L.; AMINI, M.; OBERSTEINER, M.; HERRERO, M.; ZEHNDER, A.J.B.; YANG, H. 2010. A high-resolution assessment on global nitrogen flows in cropland. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 107(17): 8035–8040.
- LOBELL, D.B.; CASSMAN, K.G.; FIELD, C.B. 2009. Crop yield gaps: their importance, magnitudes, and causes. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 34: 179–204.
- MACDONALD, G.K.; BENNETT, E.M.; POTTER, P.A.; RAMANKUTTY, N. 2011. Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 108: 3086–3091.
- MADDONNI, G.A. 2012. Analysis of the climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina—a probabilistic approach. *Theor. Appl. Climatol.* 107: 325–345.
- MAGRIN, G.O.; HALL, A.J.; BALDY, C.H.; GRONDONA, M.O. 1993. Spatial and interannual variations in the photothermal quotient: implications for the potential kernel number of wheat crops in Argentina. *Agric. For. Meteorol.* 67: 29–41.
- MAGRIN, G.O.; TRAVASSO, M.I.; RODRÍGUEZ, G.R. 2005. Changes in Climate and Crop Production During the 20th Century in Argentina. *Clim. Change* 72: 229–249.
- MERCAU, J.L.; DARDANELLI, J.L.; COLLINO, D.J.; ANDRIANI, J.M.; IRIGOYEN, A.; SATORRE, E.H. 2007. Predicting on-farm soybean yields in the pampas using CROPGRO-soybean. *Field Crops Res.* 100: 200–209.
- MERCAU, J.L.; OTEGUI, M.E.; 2014. A Modeling Approach to Explore Water Management Strategies for Late-Sown Maize and Double-Cropped Wheat–Maize in the Rainfed Pampas Region of Argentina. In: Ahuja, L.R.; MA, L.;



- Lascano, R.J. (eds). *Advances in Agricultural Systems Modeling*. ASA, CSSA, SSSA, Madison, Wisconsin, EEUU. pp.351–374.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA 2015. Sistema Integrado de Información Agropecuaria. [online] <<http://www.siiia.gov.ar/index.php>>. [consulta mayo 2015].
- 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 Res.* 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 Res.* 130: 8–18.
- MONZON, J.P.; MERCAU, J.L.; ANDRADE, J.F.; CAVIGLIA, O.P.; CERRUDO, A.G.; CIRILO, A.G.; VEGA, C.R.C.; ANDRADE, F.H.; CALVIÑO, P.A. 2014. Maize–soybean intensification alternatives for the Pampas. *Field Crops Res.* 162: 48–59.
- MUELLER, N.D.; GERBER, J.S.; JOHNSTON, M.; RAY, D.K.; RAMANKUTTY, N.; FOLEY, J.A. 2012. Closing yield gaps through nutrient and water management. *Nature* 490: 254–257.
- NASA-POWER 2015. Prediction of World Wide Energy Resource - National Aeronautics and Space Administration. [online] <<http://power.larc.nasa.gov/>>. [consulta mayo 2015].
- NEUMANN, K.; VERBURG, P.H.; STEHFEST, E.; MÜLLER, C. 2010. The yield gap of global grain production: A spatial analysis. *Agric. Syst.* 103: 316–326.
- NOSETTO, M.D.; JOBBÁGY, E.G.; JACKSON, R.B.; SZNAIDER, G.A. 2009. Reciprocal influence of crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas. *Field Crops Res.* 113: 138–148.
- OTEGUI, M.E.; BORRÁS, L.; MADDONNI, G.A. Crop phenotyping for physiological breeding in grain crops: A case study for maize. In: Sadras, V.; Calderini, D. (eds). *Crop Physiology: Applications for Genetic Improvement and Agronomy*. Elsevier Science, New York, EEUU. pp. 375–396.
- PASSIOURA, J.B. 1996. Simulation models: science, snake oil, education, or engineering? *Agron. J.* 88: 690–694.
- PERALTA, N.R.; COSTA, J.L.; BALZARINI, M.; ANGELINI, H. 2013. Delineation of management zones with measurements of soil apparent electrical conductivity in the southeastern pampas. *Can. J. Soil Sci.* 93: 205–218.
- PETERSON, R.H.; HICKS, D.R. 1973. Minnesota relative maturity rating of corn hybrids. Agriculture Extension Service, University of Minnesota, St. Paul, MN, USA. Agronomy Fact Sheet N° 27.
- PODESTÁ, G.P.; MESSINA, C.D.; GRONDONA, M.O.; MAGRIN, G.O. 1999. Associations between grain crop yields in central-eastern Argentina and El Niño–Southern Oscillation. *J. Appl. Meteorol.* 38: 1488–1498.

- PRESCOTT, J.A. 1940. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. *Trans. R. Soc. S. Aust.* 64: 114–118.
- RAY, D.K.; MUELLER, N.D.; WEST, P.C.; FOLEY, J.A. 2013. Yield Trends Are Insufficient to Double Global Crop Production by 2050. *PLoS ONE* 8(6): e66428.
- RITCHIE, J.T.; CRUM, J. 1988. Converting soil survey characterization data into IBSNAT crop model input. In: Bouma, J.; Bregt, A.K. (eds.) *Land Qualities in Space and Time. Proceedings of a Symposium Organized by the International Society of Soil Science (ISSS)*. Pudoc, Wageningen, Países Bajos. pp. 155–167.
- SADRAS, V.O.; GRASSINI, P.; COSTA, R.; COHAN, L.; HALL, A.J. 2014. How reliable are crop production data? Case studies in USA and Argentina. *Food Secur.* 6: 447–459.
- SADRAS, V.O.; CASSMAN, K.G.; GRASSINI, P.; HALL, A.J.; BASTIAANSEN, W.G.M.; LABORTE, A.G.; MILNE, A.E.; SILESHI, G.; STEDUTO, P. 2015. Yield gap analysis of rainfed and irrigated crops: Methods and case studies. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Roma, Italia. *FAO Water Reports No. 41*.
- SALVAGIOTTI, F.; CASSMAN, K.G.; SPECHT, J.E.; WALTERS, D.T.; WEISS, A.; DOBERMANN, A. 2008. Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review. *Field Crops Res.* 108: 1–13.
- SATORRE, E.H. 2011. Recent changes in pampean agriculture: Possible new avenues in coping with global change challenges. In: Araus, J.L.; Slafer, G.A. (eds) *Crop Stress Management and Global Climate Change*. CAB climate change series, CAB International, Oxford, Reino Unido. pp. 47–57.
- SLAFER, G.A.; CALDERINI, D.F. 2005. Importance of breeding for further improving durum wheat yield. In: Royo, C.; Nachit, M.N.; Di Fonzo, N.; Araus, J.L.; Pfeiffer, W.H.; Slafer, G.A. (eds). *Durum wheat breeding: current approaches and future strategies*. The Haworth Press, Inc. New York, EEUU. pp. 87–95.
- TITTONELL, P. 2013. Farming Systems Ecology: towards ecological intensification of world agriculture. Inaugural lecture upon taking up the position of Chair in Farming Systems Ecology at Wageningen University on 16 May 2013. Wageningen University, Wageningen, Países Bajos. 40p.
- TITTONELL, P.; GILLER, K.E. 2013. When yield gaps are poverty traps: The paradigm of ecological intensification in African smallholder agriculture. *Field Crops Res.* 143: 76–90.
- TOLLENAAR, M.; LEE, E.A. 2011. Strategies for Enhancing Grain Yield in Maize. *Plant Breed. Rev.* 34: 37–82.
- VAN BUSSEL, L.G.; GRASSINI, P.; VAN WART, J.; WOLF, J.; CLAESSENS, L.; YANG, H.; BOOGAARD, H.; DE GROOT, H.; SAITO, K.; CASSMAN, K.G.; VAN ITTERSUM, K.M. 2015. From field to atlas: Upscaling of location-specific yield gap estimates. *Field Crops Res.* 177: 98–108.
- VAN ITTERSUM, M.K.; RABBINGE, R. 1997. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Res.* 52: 197–208.

- VAN ITTERSUM, M.K.; CASSMAN, K.G.; GRASSINI, P.; WOLF, J.; TITTONELL, P.; HOCHMAN, Z. 2013. Yield gap analysis with local to global relevance—A review. *Field Crops Res.* 143: 4–17.
- VAN REES, H.; MCCLELLAND, T.; HOCHMAN, Z.; CARBERRY, P.; HUNT, J.; HUTH, N.; HOLZWORTH, D. 2014. Leading farmers in South East Australia have closed the exploitable wheat yield gap: Prospects for further improvement. *Field Crops Res.* 164: 1–11.
- VAN WART, J.; GRASSINI, P.; CASSMAN, K.G. 2013 a. Impact of derived global weather data on simulated crop yields. *Glob. Change Biol.* 19: 3822–3834.
- VAN WART, J.; KERSEBAUM, K.C.; PENG, S.; MILNER, M.; CASSMAN, K.G. 2013 b. Estimating crop yield potential at regional to national scales. *Field Crops Res.* 143: 34–43.
- VAN WART, J.; VAN BUSSEL, L.G.; WOLF, J.; LICKER, R.; GRASSINI, P.; NELSON, A.; BOOGAARD, H.; GERBER, J.; MUELLER, N.D.; CLAESSENS, L. 2013 c. Use of agro-climatic zones to upscale simulated crop yield potential. *Field Crops Res.* 143: 44–55.
- VERÓN, S.R.; PARUELO, J.M.; SLAFER, G.A. 2004. Interannual variability of wheat yield in the Argentine Pampas during the 20th century. *Agric. Ecosyst. Environ.* 103: 177–190.
- VIGLIZZO, E.F.; FRANK, F.C.; CARRENO, L.V.; JOBBAGY, E.G.; PEREYRA, H.; CLATT, J.; PINCEN, D.; RICARD, M.F. 2011 a. Ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina. *Glob. Change Biol.* 17: 959–973.
- VIGLIZZO, E.F.; RICARD, M.F.; JOBBÁGY, E.G.; FRANK, F.C.; CARREÑO, L.V. 2011 b. Assessing the cross-scale impact of 50 years of agricultural transformation in Argentina. *Field Crops Res.* 124: 186–194.
- VOLANTE, J.N.; ALCARAZ-SEGURA, D.; MOSCIARO, M.J.; VIGLIZZO, E.F.; PARUELO, J.M. 2012. Ecosystem functional changes associated with land clearing in NW Argentina. *Agric. Ecosyst. Environ.* 154: 12–22.
- WHITE, J.W.; HOOGENBOOM, G.; WILKENS, P.W.; STACKHOUSE, P.W.; HOEL, J.M. 2011. Evaluation of satellite-based, modeled-derived daily solar radiation data for the continental United States. *Agron. J.* 103: 1242–1251.