



**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO**

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE DIFERENCIAS DE
RENDIMIENTO ENTRE SORGO Y MAÍZ**

Ing. Agr. Gonzalo Parra

TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE DOCTOR EN CIENCIAS AGRARIAS

DIRECTORA: Dra. Brenda L. Gambin

CO-DIRECTOR: Dr. Lucas Borrás

2022

ANÁLISIS COMPARATIVO DE DIFERENCIAS DE RENDIMIENTO ENTRE SORGO Y MAÍZ

Gonzalo Parra

Ingeniero Agrónomo - Universidad Nacional de Rosario

Esta tesis es presentada como parte de los requisitos para optar al grado académico de Doctor en Ciencias Agrarias, de la Universidad Nacional de Rosario y no ha sido previamente presentada para la obtención de otro título en esta u otra universidad. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Rosario durante el período comprendido entre el 1 de febrero del año 2017 y el 30 de abril del año 2021, bajo la dirección de la Dra. Brenda L. Gambin y el Dr. Lucas Borrás.

Parra, Gonzalo
Doctorando

Gambin, Brenda L
Directora

Borrás, Lucas
Codirector

Defendida: de 2022.

AGRADECIMIENTOS

A Meli, mi gran compañera, por acompañarme y sostenerme durante todo este tiempo.

A mis padres, Mirta y Oscar, y mi hermana Melina por su amor incondicional y el permanente apoyo en mis decisiones.

A Brenda Gambin y Lucas Borrás por confiar en mí para este proyecto, brindarme su apoyo y ser unas verdaderas guías en este camino.

A todos mis compañeros de grupo de investigación por ser ayuda y sostén día a día.

A los alumnos de cultivos extensivos por ser ayuda esencial en el llevado a cabo de mis experimentos a campo.

A José Gerde por su acompañamiento laboral y personal este tiempo.

A la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Rosario por brindarme las instalaciones para desarrollar las actividades necesarias en esta tesis.

A la Agencia Nacional de Promoción Científica Y Tecnológica y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), por el otorgamiento de las Becas Doctorales para producir esta tesis.

Dedicatoria

***“A Greta y Augusto,
por ser todo en mi vida”***

PUBLICACIONES CIENTÍFICAS DERIVADAS DE LA TESIS

- Parra, G., Borrás, L., Gambin, B. L., 2020. "Maize long-term genetic progress explains current dominance over sorghum in Argentina". Eur. J. Agronomy. 119, 126122. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126122>
- Parra, G., Borrás, L., Gambin, B.L., 2022. "Crop attributes explaining current grain yield dominance of maize over sorghum". Field Crops Res. 275, 108346. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108346>

PUBLICACIONES DE EXTENSIÓN DERIVADAS DE LA TESIS

- Parra G, Borrás L, Gambin BL. La mejora genética del maíz explica su dominancia sobre el sorgo en Argentina. Revista técnica de maíz. AAPRESID. 2020. <https://www.aapresid.org.ar/blog/revista-tecnica-de-maiz-2020/>

PRESENTACIONES DERIVADAS DE LA TESIS

- Parra, G., Gambin, B. 2018. "Rendimiento comparado de maíz y sorgo en ambientes contrastantes" 11vo. Congreso Nacional de Maíz. Agosto 21,22,23 y 24, Pergamino, Buenos Aires, Argentina. Presentación de poster.
- Parra, G., Borrás, L., Gambin, B. 2019. "Análisis comparativo de rendimiento entre sorgo y maíz" XXVII Congreso AAPRESID. Agosto 7, 8 y 9, Rosario, Santa Fe, Argentina. Participación: presentación oral.
- Parra, G., Gambin, B. 2021. "Análisis comparativo de rendimiento entre sorgo y maíz" 9na. Jornada de intercambio académico ámbito público-privado. Marzo 18 y 19, 2021. Participación: presentación virtual-oral.
- Parra, G., Borrás, L., Gambin, B. 2021. "Comparación maíz-sorgo: un llamado de atención hacia la mejora del cultivo de sorgo" IV Simposio Nación y II Conferencia Internacional de Sorgo. Agosto 24 y 25, 2021. Virtual. Participación: presentación oral.

INDICE

Abreviaturas y símbolos.....	1
Resumen	3
Abstract	5
Capítulo I: introducción general	7
Importancia de los cultivos de maíz y sorgo en Argentina	7
Mejoramiento de ambos cultivos a nivel mundial y local.....	8
Impacto de la agricultura y perspectivas futuras.....	10
Análisis comparativo de cultivos.....	11
Impacto de la biomasa remanente	12
Objetivos	13
hipótesis	13
Capítulo II: La ganancia genética de maíz explica la actual dominancia sobre el sorgo.....	15
Introducción	15
Materiales y métodos.....	18
Obtención de datos	18
Análisis de datos	21
Resultados.....	24
Discusión.....	31
Conclusiones	36
Capítulo III: Variables ecofisiológicas que explican la actual dominancia del maíz sobre el sorgo.....	37

Introducción	37
Materiales y métodos.....	39
Sitio y manejo agronómico	39
Material vegetal y diseño experimental.....	41
Mediciones fenotípicas	41
Análisis estadístico	43
Resultados.....	44
Discusión	49
Conclusiones	52
Capítulo IV: Diferencias en cantidad y calidad de biomasa remanente entre maíz y sorgo.....	53
Introducción	53
Materiales y métodos.....	55
Sitio y manejo agronómico	55
Material vegetal y diseño experimental.....	55
Acondicionamiento del rastrojo y determinaciones	56
Análisis estadístico	57
Resultados.....	59
Discusión	63
Conclusiones	66
Capítulo V: Discusión general.....	67
Contraste de hipótesis asociadas a los objetivos específicos	69
Implicancias para futuras investigaciones	70

Bibliografía.....	73
Anexo 1: Figuras suplementarias.....	85

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

% año⁻¹: porcentaje por año

°Cd hoja⁻¹: grados días por hoja

C: carbono orgánico

ca.: aproximadamente

CADS: contenido de agua disponible en el suelo

EE: error estándar

ETP: evapotranspiración potencial

EUR: eficiencia del uso de la radiación

g m⁻²: gramos por metro cuadrado

g m⁻² d⁻¹: gramos por metro cuadrado por día

IAF: índice de área foliar

kg ha⁻¹: kilogramos por hectárea

kg ha⁻¹ año⁻¹: kilogramos por hectárea por año

kg m⁻²: kilogramos por metro cuadrado

Kha: kilo hectárea

LSD: "Least significance difference" Diferencia mínima significativa

M: maíz

m² m⁻²: metro cuadrado por metro cuadrado

máx: máximo

MF: madurez fisiológica

Mg ha⁻¹: mega gramo por hectárea

Mha: mega hectárea

min: mínimo

MJ m⁻²: mega joule por metro cuadrado

mm: milímetro

N: nitrógeno

ns: no significativo

P: fosforo

planta m⁻²: plantas por metro cuadrado

PP: precipitaciones

r: Coeficiente de correlación de Pearson

r²: coeficiente de determinación

RFA: radiación fotosintéticamente activa

RFAi: radiación fotosintéticamente activa interceptada

S: sorgo

t ha⁻¹: tonelada por hectárea

TCC: tasa de crecimiento del cultivo

RESUMEN

Los cultivos de maíz y sorgo tienen una amplia difusión en Argentina, pero históricamente el sorgo ha ocupado un puesto muy distinto al actual. Esta tesis busca comparar ambos cultivos usando diferentes aproximaciones: datos públicos de rendimiento a nivel de productor, datos experimentales de rendimiento con ambos cultivos creciendo en simultáneo y bajo un mismo manejo, y datos experimentales comparando la biomasa remanente de ambos cultivos. Estudios previos mostraron que la ganancia genética en rendimiento ha sido muy superior en maíz comparada con sorgo, aumentando su rendimiento potencial y estabilidad frente a condiciones de stress hídrico y de nutrientes. La hipótesis de trabajo es que el rendimiento de maíz es actualmente superior al de sorgo en ambientes de más de 4000 kg ha⁻¹, y que la ventaja del cultivo de sorgo reside principalmente en la cantidad y calidad del rastrojo remanente.

Ambos cultivos evidenciaron rendimientos similares en la década de 1970, pero la evolución del rendimiento a nivel de productor fue muy distinta entre cultivos a partir de esa fecha. El rendimiento de maíz a nivel nacional se incrementó a una tasa promedio de 110 kg ha⁻¹ año⁻¹, mientras que la tasa de incremento del rendimiento de sorgo fue considerablemente menor, promediando 62 kg ha⁻¹ año⁻¹. La diferencia en favor del maíz fue más evidente a partir de mediados de la década de 1990, con la introducción de materiales modificados genéticamente. El incremento del rendimiento en favor del maíz fue acompañado de mayor estabilidad (0,18 y 0,15% año⁻¹ para maíz y sorgo, respectivamente) y mayor superficie sembrada en todas las zonas productivas de Argentina (3,8 Mha en 2016), y va de la mano de una contrastante inversión de tecnología (principalmente mejoramiento genético y biotecnología) entre cultivos. Estos resultados concuerdan con aquellos obtenidos al comparar ambos cultivos en las mismas condiciones ambientales. La diferencia de rendimiento (maíz menos sorgo) osciló entre -0,3 y 4,8 Mg ha⁻¹, y fue significativamente mayor en maíz excepto en uno de los ambientes explorados. La diferencia a favor del cultivo de maíz aumentó a medida que mejoraron las condiciones ambientales, evidenciando el mayor potencial de rendimiento de maíz. El rendimiento de indiferencia por debajo del cual el sorgo superó al maíz fue de solo ~1800 kg ha⁻¹, lo que concuerda con la mayor tolerancia a estrés de los híbridos comerciales actuales de maíz. El sorgo presentó valores de índice de cosecha bajos y poco estables cuando se lo comparó con maíz. Por último, la biomasa remanente fue mayor en sorgo que en maíz (12,8 y 10,1 t ha⁻¹, respectivamente), pero más lábil, resultado que presenta nuevos interrogantes por sus implicancias prácticas. La principal conclusión de esta tesis es que es necesario generar mayor inversión en genética y tecnología en el cultivo

de sorgo, aunque el mismo tiene que ser acompañado con otros mecanismos que motiven su implantación. El mejoramiento debería focalizarse en aumentar la partición reproductiva en el cultivo de sorgo, y la difusión del cultivo debería concentrarse en los ambientes más restrictivos y frágiles ambientalmente, donde todavía es posible una ventaja en rendimiento y donde la biomasa remanente del sorgo respecto al maíz le genera un beneficio adicional.

ABSTRACT

Maize and sorghum crops are widely spread in Argentina, but historically sorghum has occupied a different place than it does today. This thesis seeks to compare both crops using different approaches: public yield data at farmer level, experimental yield data with both crops growing simultaneously and under the same agronomic management, and experimental data comparing the stover of both crops. It is known that the genetic gain in yield has been much higher in maize compared to sorghum, together with an increase in yield potential and stress tolerance. The main tested hypothesis is that corn yield is currently higher than the sorghum one across environments that exceed 4000 kg ha^{-1} , and that the sorghum crop advantage relies mainly in the quantity and quality of the stover biomass left in the field after harvest.

Both crops showed similar yields in the 1970s, but the yield trend at farmer fields was very different between crops after that. Nationwide maize yield increased at an average rate of $110 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, while the sorghum yield increase rate was considerably lower, averaging $62 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$. The yield difference in favor of maize was more evident starting mid-1990s, with the introduction of genetically modified hybrids. The yield increase in favor of maize was accompanied by greater yield stability ($0,18$ y $0,15\% \text{ year}^{-1}$ for maize y sorghum, respectively), and a larger harvested area in all the productive regions of Argentina ($3,8 \text{ Mha}$ during 2016), and agrees with a different technology investment that is evident when comparing crops (mainly in genetics and biotechnology improvements). These results agree with those reported when comparing both crops under the same environmental conditions. The yield difference (maize minus sorghum) ranged from -0.3 to 4.8 Mg ha^{-1} , and was significantly higher in maize except in one of the explored environments. The yield difference in favor of maize when compared to sorghum increased as environmental conditions improve, agreeing with the evident higher maize yield potential. The cut-off yield below which sorghum outperforms maize was only $\sim 1800 \text{ kg ha}^{-1}$, consistent with the higher stress tolerance of current commercial maize hybrids. Finally, the crop residue left in the field after harvest was higher in sorghum than maize ($12,8$ and $10,1 \text{ t ha}^{-1}$, respectively), but more labile, which raises additional questions due to its practical implications. The main conclusion of this thesis is a greater investment in genetics and technology in the cultivation of sorghum is needed, although it must be accompanied by other mechanisms to motivate its implementation. Breeding must focus in increasing the reproductive partition, since sorghum showed significantly lower and more variable harvest index values when compared with maize. Sorghum crop cultivation should focus in the more restrictive and environmentally fragile environments, where a yield

advantage is still possible, and the higher residue can provide a positive sustainable aspect with respect to maize.

Capítulo I

Introducción general

Importancia de los cultivos de maíz y sorgo en Argentina

Maíz (*Zea mays L.*) y sorgo (*Sorghum bicolor L. Moench*) son cereales de verano cultivados alrededor del mundo por sus relevancias como alimentos humanos y animales (FAO, 2021). El maíz es el cereal de mayor producción a nivel global (1148 Mt en 2019), el sorgo está en la quinta posición en el mismo ranking (58 Mt en 2019), después del arroz, trigo y cebada (FAO, 2021).

En los últimos 50 años la superficie destinada a la siembra de maíz tuvo disminuciones e incrementos en Argentina, basados en decisiones técnicas y económicas. La última década mostró un aumento muy marcado alcanzando un promedio de 4,7 millones de hectáreas, explicado por una necesidad de rotación de lotes, desarrollo de nuevas áreas productivas en el norte del país, y un mayor margen económico en comparación a campañas anteriores. El rendimiento a nivel nacional tuvo un incremento constante promediando 2 t ha⁻¹ en 1960 hasta 7 t ha⁻¹ en la década del 2000. Este incremento se debió a la introducción constante de mejoras genéticas en el cultivo y nuevas técnicas productivas (FAOSTAT, 2021).

En el mismo periodo de tiempo, la superficie destinada a la producción de sorgo se mantuvo relativamente constante alrededor del millón de hectáreas. En la década de 1970 tuvo su pico máximo, sobrepasando los dos millones de hectáreas. Aunque el área se mantuvo constante en las últimas ocho campañas, los lotes destinados al cultivo no fueron de la misma calidad a lo largo del tiempo, marcando un fuerte desplazamiento hacia lotes con diferentes limitantes en la zona núcleo y la introducción de lotes a producción de sorgo en zonas naturalmente limitantes para los cultivos extensivos. El rendimiento de sorgo ha mantenido una tendencia creciente, desde 1,5 t ha⁻¹ en 1960 hasta 4,5 t ha⁻¹ en la década del 2000. De manera similar al maíz, esta variación puede ser explicada a la mejora genética y la adopción de nuevas técnicas de manejo (FAOSTAT, 2021).

Particularmente en la campaña previa al inicio de los experimentos de la presente tesis (2016/17) se había evidenciado un incremento en el área cultivada de maíz, alcanzando los 4,8 millones de hectáreas, 37% más en comparación con los 3,5 millones de hectáreas de la campaña 2015/16. Este cambio fue una consecuencia directa a la quita de derechos de exportación al maíz, que generó un aumento en su competitividad contra el cultivo más sembrado de Argentina, la soja. A su vez se generó un incremento en el volumen total

producido (USDA, 2017). Las medidas comerciales que impactaron en la superficie destinada al maíz no tuvieron efecto sobre el área destinada al cultivo de sorgo.

Los ambientes de producción de ambos cultivos en Argentina cubren una amplia área de alrededor de 65 millones de hectáreas desde los 24°S hasta 40°S, e involucra el área de la Llanura Pampeana hasta la Llanura Chaco Pampeana (Álvarez y Lavado, 1998). Los principales órdenes taxonómicos de suelos (Soil Survey Staff, 1994) encontrados en las regiones productivas de estos cultivos son Molisoles en la Llanura Pampeana, Alfisoles en el Chaco, Entisoles y Aridisoles en el oeste de ambas regiones. Los mismos muestran importante variación en profundidad de perfil y contenido de arcillas (Álvarez y Lavado, 1998). La temperatura promedio anual varía de 14°C en el sur a 23°C en el norte y la precipitación fluctúa entre 200 mm en el oeste a 1200 mm en el este. Esta diversidad de clima y suelo determina que los rendimientos varíen según la región desde condiciones cercanas a las potenciales (más de 10 tn ha⁻¹ de sorgo y 11 tn ha⁻¹ de maíz en el centro de la Llanura Pampeana) a zonas de baja producción (menos de 3 tn ha⁻¹ de sorgo y 1.5 tn ha⁻¹ de maíz en el sur oeste de la Llanura Pampeana) por alto niveles de estrés hídrico (Sistema Integrado de Información Agropecuaria; <http://www.siaa.gov.ar/>).

Mejoramiento de ambos cultivos a nivel mundial y local

Los cultivos de maíz y sorgo tienen destinos similares de producción. Ambos se utilizan para alimentación animal y humana, y en una gran variedad de productos considerados industriales. Ambos granos pueden ser consumidos en forma directa, o procesados a través de molienda seca o húmeda. Las características nutricionales para consumo humano del sorgo son incluso superiores al maíz por su alto contenido de vitaminas y minerales (Hulse et al., 1980). En ambos casos el resto de la planta puede ser destinada a la alimentación animal y a la producción de bioenergía (Hahn, 1970; www.fao.org), aunque en los sistemas de producción de Argentina se mantiene en el campo por la importancia que tienen en la sustentabilidad de los sistemas productivos.

Durante el último siglo se han producido los mayores cambios respecto al mejoramiento de cultivos, con los cuales se han alcanzado los valores productivos de hoy en día. Cada una de las especies protagonistas en este proyecto han tenido diferentes tendencias a lo largo de los años. La posibilidad de contar con nuevas herramientas tecnológicas en los procesos de mejora ha brindado un sinfín de avances y logros en la producción vegetal.

El maíz es el cultivo que a nivel mundial ha logrado los mayores progresos en cuanto a rendimiento por mejoramiento genético. El primer gran salto de rendimiento a través de una mejora fue la introducción de híbridos simples en la década de 1930, los cuales se hicieron de uso masivo a los pocos años de salir al mercado (Russell, 1991). A mediados de los '70 se comenzó a trabajar en la mejora de distintos factores fisiológicos determinantes directa e indirectamente del rendimiento como ser el tamaño de la panoja (Meghji et al., 1984; Smith et al., 2004), el enrollado de la hoja frente a un stress (Meghji et al., 1984; Smith et al., 2004), el tiempo de verdor o *stay-green* que genera un aumento en la producción de fotoasimilados en estadios reproductivos (Crosbie, 1982; Meghji et al., 1984; Russell, 1991; Tollenaar et al., 1991; Smith et al., 2004; Valentinuz y Tollenaar, 2004), la producción de fotoasimilados durante el periodo de floración (Tollenaar et al., 1992; Echarte et al., 2000, 2004), además de otros factores. Con la llegada de los híbridos transgénicos a finales del siglo XX se comenzaron a comercializar materiales resistentes a diferentes especies del género lepidóptera (Willians et al., 1997), tales como *Diatraea* (*Diatraea saccharalis*), Cogollero (*Spodoptera frugiperda*) y *Helicoverpa* (*Helicoverpa armígera*). Actualmente existen diversas resistencias o tolerancias a distintas familias de herbicidas. Estos eventos han reducido costos de producción y han posibilitado el desarrollo del cultivo en diferentes ambientes que antes eran inviables.

El mejoramiento del sorgo ha tenido distintas etapas, desde el mejoramiento realizado por los propios productores con la selección de los mejores individuos hasta las técnicas de mapeo genético utilizadas hoy en día. El aumento y la estabilidad del rendimiento es uno de los factores más buscados por estos programas. Dentro de los factores abióticos que afectan el cultivo, la tolerancia a la sequía es una de las características más buscadas en los programas de mejoramiento, además de la respuesta al stress por temperatura y el comportamiento frente a déficits de nutrientes (Rooney, 2004). En cuanto a factores bióticos, los principales avances de selección fueron direccionados a la tolerancia de áfidos (Singh et al., 2004). El progreso en la calidad de granos y de la composición de las partes de las plantas destinadas a forraje ha sido notable, resaltando los logros obtenidos en el porcentaje de taninos de granos y la disminución de lignina en la estructura de la planta.

Al analizar la evolución de la ganancia genética del maíz a nivel nacional se puede apreciar que no es distante de la ganancia que ha mostrado en otros países productores. La selección por rendimiento incrementó la potencialidad del cultivo en forma indirecta a través del mejoramiento de distintos factores fisiológicos tales como el aumento del número de granos, el aumento de la producción de biomasa después del inicio de los estados reproductivos y la mejora en la translocación de foto-asimilados hacia los destinos

reproductivos (Luque et al., 2006). Todas estas características han generado un aumento muy importante en el rendimiento promedio de las últimas décadas y una mayor factibilidad en la producción del cultivo en distintas áreas. La importancia del cultivo a nivel nacional también ha llevado a una mejora permanente del manejo. A nivel nacional el desarrollo de eventos transgénicos ha hecho posible el desarrollo del cultivo en ambientes que antes eran inviables, como las siembras tardías (Gambin et al., 2016).

La ganancia genética del cultivo de sorgo a nivel nacional muestra valores similares a los observados internacionalmente (Gizzi y Gambin, 2016), pero es realmente baja cuando se la compara con otros cultivos, particularmente maíz. Al quedar relegado como un cultivo de menor importancia, se han destinado menos recursos en investigación y desarrollo en el manejo del cultivo, y actualmente existe un evidente desconocimiento sobre prácticas básicas de manejo de sorgo.

Impacto de la agricultura y perspectivas futuras

La seguridad alimentaria es un tema de relevancia actual. Los motivos son varios, entre los que se incluyen las altas tasas de desarrollo económico en los países más poblados del mundo, la alta demanda de energía, granos y productos ganaderos en estos países dado el aumento del poder adquisitivo, la poca superficie potencialmente agrícola, y la reducción del progreso global de los rendimientos de cultivos de grano (Cassman et al., 2003; Foley et al., 2011, Lambin et al. 2013). La proyección durante las próximas décadas indica un aumento de la población humana, por lo que cada hectárea cultivada tendrá que producir mayores rendimientos que los actuales para satisfacer la demanda mundial. Los desafíos para ello varían si se consideran economías desarrolladas, en desarrollo o subdesarrolladas (Chen et al., 2011).

De la mano de la seguridad alimentaria, existe una necesidad creciente de producir de manera sostenible (Chen et al., 2001; Foley et al., 2011). La expansión de la agricultura tiene un fuerte impacto sobre la biodiversidad, reservas de carbono y propiedades del suelo. En China, por ejemplo, el aumento de los rendimientos en cereales fue de un 10% de 1996 a 2005, mientras que el uso de fertilizantes aumentó en un 51%. Más del doble de fertilizante con N o P que se aplica no es recuperado. Este desbalance genera contaminación ambiental, como eutrofización, emisiones de gas invernadero y acidificación del suelo. Estos problemas fueron en aumento en países en desarrollo, y tiene importantes consecuencias a escala global (Díaz y Rosenberg, 2008; Canfield et al., 2010). En la Argentina la agricultura ha impactado en los ecosistemas (Oesterheld, 2008). Entre los problemas más relevantes aparecen la

contaminación por uso de plaguicidas y residuos animales, la degradación del suelo, manifestado en la pérdida de materia orgánica, nutrientes y erosión (Oesterheld, 2008). Un mal manejo del cultivo y la falta de rotaciones son parte de las causas de estos problemas.

Tanto la expansión de la agricultura como su intensificación contribuyen al cambio climático. La agricultura es la responsable del 30-35% de las emisiones globales de gas de efecto invernadero, principalmente por la deforestación en los trópicos, emisiones de metano por la producción ganadera y de arroz, y las emisiones de óxido nitroso de suelos fertilizados (Foley et al., 2011). En Argentina se prevé un aumento de la temperatura a nivel nacional de 0,5 a 1°C en las próximas dos décadas, siendo este incremento >1°C a fines del siglo XXI (Barros et al., 2014). En las zonas norte y oeste del país, este aumento puede ser de 2 a 2,5°C en el escenario más benigno. Con respecto a las precipitaciones, la proyección es a su aumento en el norte y centro del país, aunque en menores niveles respecto a lo observado en los últimos 50 años. Por otro lado, se espera una reducción de las lluvias en el centro-oeste y la Patagonia (Barros et al., 2004).

Estudios utilizando modelos de simulación de crecimiento de cultivos sugieren que la producción de maíz es más sensible a las lluvias y las temperaturas que otros cereales como el sorgo (Fischer et al., 2005). Por ejemplo, se proyecta una reducción en los rendimientos de maíz del 30% comparado con un 2% para sorgo al 2030 en el sudoeste de África (Lobell et al., 2008). El sorgo es conocido por su resistencia a condiciones adversas, tanto sequías como inundaciones (Dogget, 1988), por lo que se ha sugerido que podría sustituir al maíz para enfrentar el cambio climático en diversas regiones del mundo (Lobell et al., 2008). Para Argentina, existen pocas predicciones del impacto del cambio climático en la producción de los principales cultivos, y las mismas sugieren que la producción mantendrá un balance entre un aumento de la producción en el sur y oeste de la región Pampeana, y una reducción en el centro de esta región y norte del país (Magrin et al., 2014). Otros modelos, sin embargo, han proyectado reducciones en la producción de cereales en Argentina (entre 10 y 30% para el 2080) como consecuencia del cambio climático (Fischer et al., 2005).

Análisis comparativo de cultivos

Bajo el contexto planteado, los estudios de comparativos de cultivos son muy útiles para el productor a la hora de decidir qué cultivo sembrar. Esta comparación es sumamente interesante en maíz y sorgo, por ser ambas gramíneas estivales con destinos similares de producción. En otras regiones del mundo como el sur de África, la generación de experimentos comparativos a campo se ha propuesto para complementar y soportar la gran cantidad de

estudios simulados sobre la adaptación de diferentes cultivos al cambio climático (Rurinda et al., 2014). En Argentina, existen evidencias aisladas comparando procesos fisiológicos (Gambin et al., 2008), pero las evidencias empíricas de rendimiento y manejo comparando maíz y sorgo son las menores. Realizarlas con rigor científico es una necesidad en el contexto del mayor riesgo productivo que se espera en la región central por las perspectivas climáticas futuras (Podestá et al., 2009).

Actualmente ambos cultivos se destinan a ambientes productivamente distintos, y junto con ello es muy distinta la aplicación de tecnología. El sorgo actualmente se destina a lotes de calidad pobre (bajos, bajos salinos, someros), sin tener en cuenta el potencial que el cultivo puede expresar en buenos ambientes ante limitaciones climáticas que generan estrés hídrico (Ferraris et al., 2013). Esto lleva a una permanente subestimación por parte de los productores de los rendimientos alcanzables de sorgo.

No se conoce la diferencia de rendimiento entre cultivos en diferentes ambientes. Es sabido que el maíz supera al sorgo en ambientes sin limitaciones de agua y nitrógeno (N) (Muchow, 1988; Farré y Faci, 2006; Ferraris et al., 2013), y las evidencias sugieren que el sorgo supera al maíz en ambientes limitados por agua (Stone et al., 1996; Ferraris et al., 2013). Trabajos en distintas regiones del mundo indican un límite de entre 200 y 500 mm por debajo del cual el rendimiento de sorgo supera al maíz (Stone et al., 1996; Farré y Faci, 2006). En ambientes limitados por agua en la zona de Pergamino, el sorgo produjo 3000 kg ha⁻¹ más que el maíz (Ferraris et al., 2013). Otro aspecto interesante es que, ante esta situación, el sorgo respondió a la fertilización con N, mientras que no se observó respuesta en el maíz (Ferraris et al., 2013). El sorgo además tiene otras ventajas en términos de mayor compensación por macollaje (Berenguer y Faci, 2001) y menores costos de producción, por lo que es una alternativa interesante en ambientes de riesgo.

Impacto de la biomasa remanente

La biomasa remanente en el lote después de la cosecha es esencial para mantener la fertilidad, los niveles de carbono orgánico (C) del suelo (Huggins et al., 1998; Paustian et al., 1997; Follett, 2001) y las propiedades físicas del suelo (Novelli et al., 2017). Estas propiedades a la vez van mejorando con el tiempo cuando el aporte de biomasa es mayor (Huggins et al., 1998; Novelli et al., 2017). El nivel de variación del C y N en el suelo depende de la relación de estos dos componentes en el rastrojo del cultivo. La incorporación de gramíneas en las rotaciones es hoy un componente fundamental del correcto manejo de los sistemas productivos, y una de las bases de la incorporación del maíz en las rotaciones de varias

regiones productivas. El sorgo y maíz tienen relaciones C:N altas, de 100:1 y 91:1, respectivamente (Cordone et al., 1993). La diferencia de aporte de biomasa al suelo entre estas especies va a estar definida por la cantidad y la calidad de esta.

La cantidad de biomasa producida por cada uno de los cultivos puede ser muy variable según el ambiente bajo el cual se desarrollan los cultivos. En ambientes sin limitaciones el maíz supera al sorgo en producción de biomasa (Farré y Faci, 2006), pero ante limitaciones en la oferta de agua el sorgo supera ampliamente al maíz (Farré y Faci, 2006). Se han encontrado situaciones totalmente ventajosas para el sorgo en este sentido, con producciones de 37% más de biomasa que maíz, siendo 67% la diferencia entre cultivos cuando se evalúa la biomasa acumulada en los tallos (Amaducci et al., 2000). El sorgo en este sentido presentaría ventajas respecto al maíz, y podría justificar la expansión del área sembrada de este cultivo a nivel nacional, particularmente en ambientes de baja materia orgánica o degradados.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Explorar diferencias productivas entre maíz y sorgo en diferentes escalas.

Objetivos específicos

- Analizar las tendencias de rendimientos históricos de ambos cultivos en las regiones productivas de Argentina.
- Explorar diferencias de rendimiento y las variables fisiológicas asociadas entre maíz y sorgo en un amplio rango de situaciones productivas en la región productiva central de Argentina.
- Evaluar cantidad y calidad de biomasa remanente de sorgo respecto al maíz a nivel lote en diferentes situaciones productivas en la región central de Argentina.

HIPOTESIS

El maíz supera al sorgo en la mayoría de los ambientes productivos. La mayor ganancia genética en maíz en comparación con sorgo es la principal causa de la diferencia actual de rendimiento entre cultivos.

Existen atributos específicos del canopeo que explican esta mayor diferencia de rendimiento, como el mayor índice de cosecha de maíz en comparación con sorgo ligado a su mayor tolerancia al estrés.

La biomasa remanente de sorgo es significativamente superior al maíz en diversas condiciones de crecimiento pero sería más lábil por su menor relación C:N.

En el segundo capítulo de la presente tesis se realizaron los análisis necesarios para cumplimentar el objetivo específico 1 a partir de estadísticas públicas y de esta forma conocer la situación a nivel nacional y regional. En el tercer capítulo se enfocó en el objetivo de comparar ambas especies en similares condiciones productivas en distintas localidades del centro de Argentina. Por último, en el cuarto capítulo se buscó conocer las diferencias en el rastrojo remanente después de la cosecha de los granos en los cultivos.

Capítulo II

La ganancia genética de maíz explica la actual dominancia sobre el sorgo

Introducción

Maíz (*Zea mays L.*) y sorgo (*Sorghum bicolor L. Moench*) son cereales de verano cultivados alrededor del mundo por su relevancia como alimentos animales y humanos (FAO, 2021). Hoy en día, la diferencia relativa entre estos dos cereales es evidente en Argentina, donde se producen 52,5 Mt de maíz y 3,4 Mt de sorgo (Bolsa de Cereales, 2021). Argentina es el tercer exportador mundial de ambos cereales (SSMA, 2021; Bolsa de Cereales, 2021).

Aunque el maíz y el sorgo son sembrados en regiones similares, difieren en la respuesta a la disponibilidad hídrica y frente a condiciones de sequía. En condiciones óptimas de crecimiento, el rendimiento de maíz es comúnmente mayor que el de sorgo (Muchow 1989a; Farré y Faci, 2006). Sin embargo, el maíz es particularmente sensible ante estreses hídricos alrededor de la floración (NeSmith y Ritchie, 1992a, b; Otegui et al., 1995). En contraste, el sorgo es comúnmente considerado un cultivo tolerante a la sequía (Dogget, 1988; Camargo y Hubbard, 1999). Dicha resistencia a la sequía es atribuida a su denso y prolífico sistema radical que es capaz de extraer agua de lo profundo del perfil del suelo (Wright y Smith, 1983; Singh y Singh, 1995), a su habilidad de mantener los estomas abiertos cuando el potencial agua de la hoja es bajo a través del ajuste osmótico (Ludlow et al., 1990) y su capacidad de retrasar el desarrollo reproductivo (Wright et al., 1983). El sorgo es ampliamente cultivado en zonas áridas y semiáridas ya que demuestra una buena estabilidad de rendimientos bajo sistemas de producción en secano o con limitaciones hídricas (Muchow, 1989b; Farré y Faci, 2006).

La ganancia de rendimiento explicada por las mejoras genéticas estimadas con experimentos en los que se cultivaron genotipos de diferentes años de liberación en el cinturón maicero de Estados Unidos es de alrededor de 100 kg ha⁻¹ año⁻¹, o 0,8% año⁻¹ del rendimiento del híbrido más reciente (Fischer et al., 2014). Ganancias de rendimiento por mejoras genéticas similares se reportaron en otras regiones productivas, en China (87 kg ha⁻¹ año⁻¹, o 0,8% año⁻¹), Este y Oeste de África (108 y 80 kg ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente, o 1,5% año⁻¹), y en Brasil (ca 100 kg ha⁻¹ año⁻¹, o 0,8% año⁻¹) (Fischer et al., 2014). En Argentina, la ganancia genética en rendimiento varió entre 113 y 170 kg ha⁻¹ año⁻¹ o 0,85 a 1,74% (Luque et al., 2006; Borrás y Vitantonio-Mazzini, 2018). Maíces de reciente liberación tienen mayor potencial de rendimiento y mejor tolerancia frente a estreses abióticos, obteniendo rendimientos

significativamente mayores cuando se los compara con genotipos más antiguos ante situaciones de sequía, bajos niveles de nitrógeno, o alta densidad de siembra (Tollenaar y Lee, 2002; Echarte et al., 2004; Campos et al., 2004; Assefa et al., 2018; Mueller et al., 2019). Las ganancias de rendimiento de maíz bajo condiciones estresantes están asociadas con el incremento del número de granos por unidad de área a través del incremento de granos por espiga y la reducción del periodo entre antesis aparición de estigmas (Campos et al., 2006).

El progreso genético de rendimiento de sorgo difiere del progreso de maíz. Un estudio reciente en Estados Unidos reportó una ganancia genética del rendimiento de $8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, o $0,08\% \text{ año}^{-1}$ del rendimiento del genotipo más reciente, entre 1960 y 2010 (Pfeiffer et al., 2019). En Argentina, la ganancia genética del rendimiento de sorgo fue de $8,7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, o $0,09\% \text{ año}^{-1}$, para el periodo 1984-2014 (Gizzi y Gambin, 2016). Los factores detrás de estas bajas tasas de incremento de rendimiento son similares en ambos países, las cuales incluyen el continuo cambio de los ambientes productivos debido a la competencia con otros cultivos, es decir, el desplazamiento del sorgo hacia áreas marginales, cambios en las variables prioritarias en los programas de mejora, grupos heteróticos poco optimizados, y el bajo nivel de inversión o discontinuación de los programas de mejora de sorgo, cuando se compara con otros cultivos. (Gizzi y Gambin, 2016; Pfeiffer et al., 2019). En conclusión, el mejoramiento ha sido más efectivo en maíz que en sorgo.

Las diferencias en las ganancias genéticas de rendimiento y las tecnologías de manejo entre el maíz y el sorgo podrían influenciar la superficie implantada con cada cultivo. En Argentina, la superficie sembrada de maíz ha sido históricamente mayor que la de sorgo (FAO, 2021), y dicha diferencia entre cultivos se fue incrementando desde finales de la década de los 90's. La introducción de materiales de maíz modificados genéticamente en 1998 (introducción del evento BT; Dirección de Biotecnología, 2019; Flores y Parodi, 2011) permitió la expansión del cultivo a nuevas áreas productivas y la implementación de siembras tardías (Gambin et al. 2016). Como consecuencia de estos cambios se produjo una reducción en la superficie sembrada con sorgo.

En Argentina, el maíz y el sorgo pueden ser cultivados en 65 millones de hectáreas aproximadamente, desde los 24 hasta los 40°S de latitud en diferentes tipos de suelo y bajo distintas condiciones climáticas (Hall et al., 1992; Alvarez y Lavado, 1998). Ambos cultivos son producidos en seco, principalmente, y al menos uno de cada dos años son expuestos a condiciones de estrés hídrico en algún momento del ciclo de cultivo (Carcedo y Gambin, 2019). A nivel de lote, el maíz es sembrado en los suelos más fértiles y profundos, mientras que el sorgo es destinado a los suelos más pobres (suelos con bajos niveles de materia orgánica, suelos someros o salinos). Las tecnologías actuales de manejo también difieren

entre cultivos, en maíz es común el uso de híbridos de punta, fertilizaciones balanceadas y control de plagas y malezas, actividades que no son comunes en sorgo (Brihet y Gayo, 2016; Brihet, 2017). Sin embargo, el sorgo está altamente valorado por los productores por su relativo bajo costo de producción y su mayor tolerancia a la sequía (Doggett, 1988; Muchow, 1989b; Farré y Faci, 2006). De todas maneras, basándonos en las diferencias en las mejoras genéticas de ambos cultivos, las ventajas del sorgo ante situaciones de sequía son cuestionables. Un estudio en Estados Unidos demostró que el sorgo rindió aproximadamente 30% menos que maíz en ambientes de secano y con riego (Mason et al., 2008). Además, se espera que estas diferencias de rendimiento entre ambos cultivos sigan incrementándose debido a las bajas inversiones en los programas de mejora de sorgo (Mason et al., 2008).

En este capítulo se buscó cuantificar las diferencias de rendimiento entre maíz y sorgo analizando datos históricos, y proveer evidencias de las consecuencias que tiene la ganancia genética de rendimiento sobre el progreso y estabilidad del rendimiento entre los cultivos a nivel de lote. Se analizó el rendimiento, la estabilidad de este y la superficie cosechada de maíz y sorgo usando datos públicos del periodo 1970-2016 en Argentina. La estabilidad del rendimiento se estimó usando los residuales relativos de rendimiento (Slafer y Kernich, 1996; Calderini y Slafer, 1998), y se lo consideró como un posible indicador de la adopción de maíz y sorgo.

Materiales y métodos

Obtención de datos

El Ministerio de Agroindustria (Secretaría de Agroindustria, 2019) publica estimaciones anuales de rendimiento, superficie sembrada, superficie cosechada y producción de diferentes cultivos. Dichas estimaciones están basadas en encuestas realizadas por asesores calificados dirigidas a productores, ingenieros agrónomos, cooperativas, acopios y corredores de granos. Recientemente, las estimaciones de superficie sembrada y cosechada son estimadas a través del análisis de imágenes satelitales complementadas con muestreos de lotes. La información es generada y administrada en 36 oficinas regionales dispersas en la región agrícola del país. Las encuestas son realizadas semanalmente y son consolidadas a nivel de departamento, que promedian 4000 km² (Secretaría de Agroindustria, 2019). En el presente capítulo se analizaron la superficie cosechada y el rendimiento de 46 años desde la campaña 1969/1970 (de ahora en adelante denominada 1970) hasta la campaña 2015/2016 (de ahora en adelante denominada 2016).

Se determinaron 14 regiones agroecológicas siguiendo la metodología utilizada por la Bolsa de Cereales de Buenos Aires (Bolsa de Cereales de Buenos Aires, I a XIV; Fig. 1; Tabla 1). Las divisiones regionales siguen los límites administrativos de los departamentos, pero están basadas en la topografía, geografía, condiciones climáticas (temperatura, lluvias, etc.), sistemas productivos y superficie cosechada. Originalmente, la división incluye a la región XV (Corrientes y Misiones), pero en esta región la producción de maíz y sorgo es prácticamente nula, por lo cual no fue incluida en el análisis. Se ha demostrado que la confiabilidad de las bases de datos de superficie cosechada incrementa al aumentar la cantidad de datos a nivel de lotes (Sadras et al., 2014), por lo tanto, se debe trabajar con precaución con los datos de las regiones que cuentan con menor información de ambos cultivos. La información obtenida en las publicaciones del Ministerio de agroindustria fue fusionada con la división regional de la Bolsa de Cereales de Buenos Aires para poder realizar un análisis de cada región con datos históricos a nivel departamental. El número total de observaciones (combinación de departamentos X año) fue de 11506 y 8593 para maíz y sorgo, respectivamente.

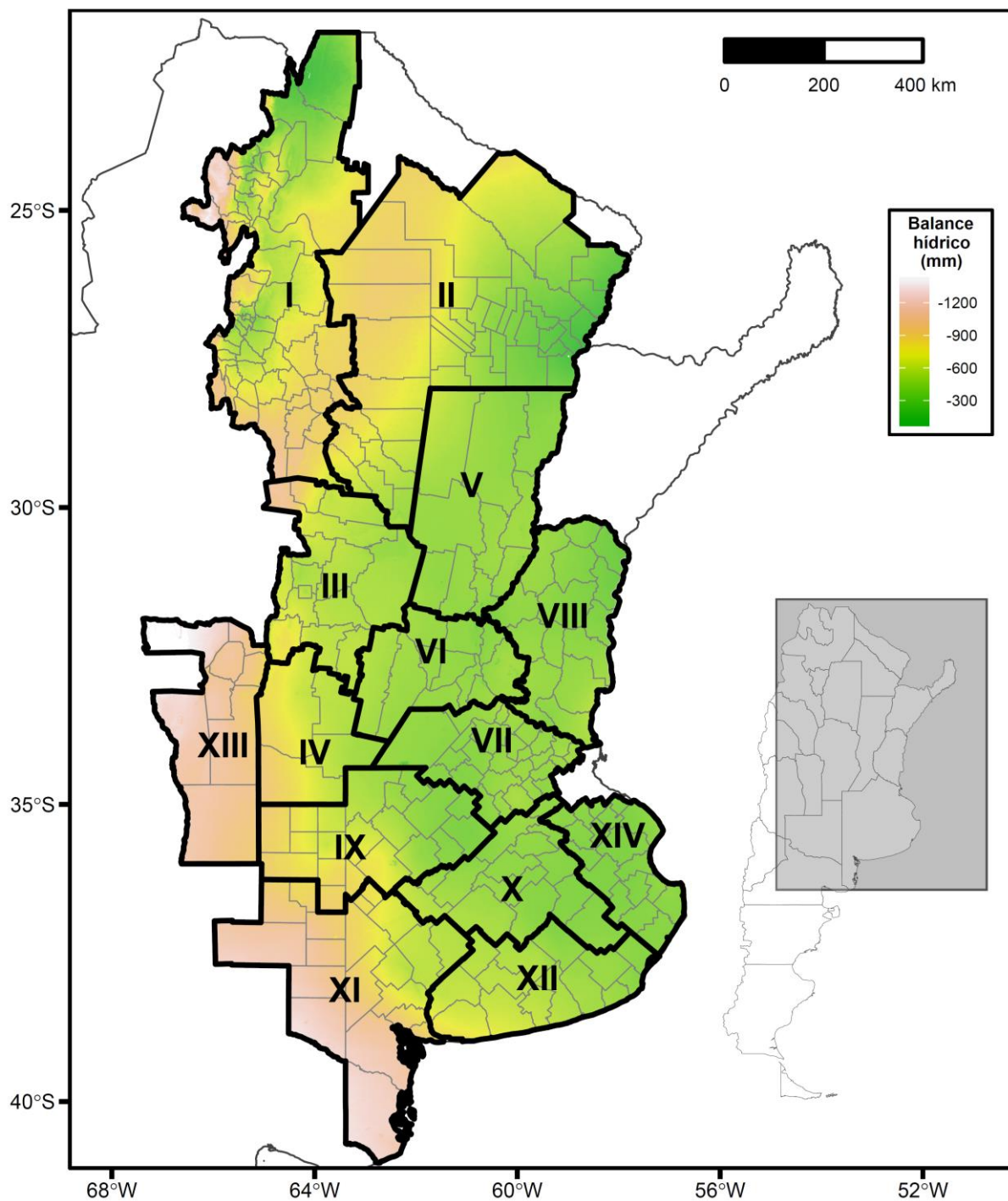


Fig. 1. Balance hídrico (precipitaciones menos evapotranspiración potencial; Fick y Hijmans, 2017; Trabucco y Zomer, 2019) desde septiembre hasta abril para las 14 regiones productivas establecidas por la Bolsa de Cereales de Buenos Aires. Las divisiones de menor tamaño representan los departamentos de cada provincia, la cual es la unidad geográfica utilizada en la base de datos públicos del ministerio de agroindustria de Argentina.

1 **Tabla 1.** Medias de precipitaciones, evapotranspiración potencial (Trabucco y Zomer, 2019), balance hídrico entre septiembre y abril,
 2 tipos de suelos dominantes de cada región (Soil Taxonomy, Soil Survey Staff, 2014) y medias de superficie cosechada de maíz y de
 3 sorgo para todas las regiones analizadas (Bolsa de Cereales, 2018). La información climática se basa en los datos de Worldclim Versión
 4 2 (Fick y Hijmans, 2017). La media de superficie cosechada es el promedio de los últimos 10 años. BA indica Buenos Aires.
 5

Región	Nombre	Precipitaciones (mm)	Evapotranspiración Potencial (mm)	Balance hídrico (mm)	Tipos de suelos dominantes	Media de superficie cosechada	
						Maíz (kha)	Sorgo (kha)
I	Noroeste Argentina	625	1341	-716	Alfisol	265	30
II	Noreste Argentina	859	1384	-525	Alfisol	348	178
III	Centro Norte Córdoba	705	1330	-625	Alfisol (Norte) – Molisol (Sur)	467	95
IV	Sur Córdoba	720	1389	-669	Molisol	549	52
V	Centro Norte Santa Fe	849	1317	-468	Alfisol (Norte) – Molisol (Sur)	126	78
VI	Núcleo norte	816	1282	-466	Molisol	443	49
VII	Núcleo sur	806	1262	-456	Molisol	391	21
VIII	Centro Este Entre Ríos	880	1312	-432	Vertisol (Norte) - Molisol (Sur)	144	100
IX	Norte La Pampa - Oeste BA	730	1356	-626	Molisol (Este) - Entisol (Oeste)	503	40
X	Centro BA	774	1228	-454	Alfisol	172	7
XI	Suroeste BA - Sur La Pampa	526	1428	-902	Molisol	84	48
XII	Sureste BA	629	1169	-540	Molisol	108	2
XIII	San Luis	480	1576	-1096	Entisol	141	20
XIV	Cuenca del Salado	726	1126	-400	Alfisol (Oeste) - Vertisol (Este)	58	3

6

Se obtuvo la información georreferenciada de evapotranspiración potencial mensual (Trabucco y Zomer, 2019) y precipitaciones mensuales de Worldclim versión 2 (Fick y Hijmans, 2017). Los datos de evapotranspiración y de precipitaciones fueron combinados con el polígono departamental para poder estimar el promedio departamental de cada una de las variables (Raster package; Hijmans y van Etten, 2012). Primero se calcularon los acumulados desde septiembre hasta abril (ciclo de los cultivos) para ambas variables, para luego obtener el balance hídrico de cada departamento obtenido a partir de la diferencia entre precipitaciones y evapotranspiración potencial.

Análisis de datos

Los datos de cada cultivo fueron analizados separadamente usando modelos lineales y modelos lineales de efectos mixtos (lme4 package; Bates et al., 2015) en R (R Core Team, 2017, versión 3.4.1). Para poder analizar las tendencias de las variables, los factores *Año*, *Región* y la interacción *Año X Región* fueron considerados efectos fijos, mientras que el factor *Departamento* fue considerado como efecto aleatorio. Esto permitió analizar toda la información, tener en consideración la dependencia de los datos y obtener estimadores de los parámetros confiables (Zuur et al., 2009). Los datos de superficie cosechada y rendimiento fueron modelados siguiendo una función polinomial de segundo orden. Al utilizar este modelo se obtuvieron las mejores características en términos de homogeneidad de varianza y AIC, en comparación con modelos lineales simples.

La tendencia en la superficie cosechada a través de los años fue analizada utilizando el siguiente modelo polinomial de segundo orden (Modelo 1):

$$\gamma_{ij} = \beta_0 + \beta_1 Y_i + \beta_2 Y_i^2 + R_j + \beta_3 (Y_{ij}R_j) + \beta_4 (Y_{ij}^2R_j) + \sigma_{ij} \quad (1)$$

donde γ_{ij} es la superficie cosechada en el año i en la región j , β_0 es el intercepto, β_1 representa el coeficiente lineal y β_2 representa el coeficiente cuadrático, Y_i representa el año i , R_j es el efecto de la región, $(Y_{ij}R_j)$ es la interacción entre año y región, β_3 y β_4 son los coeficientes asociados a la interacción entre año y región, y σ_{ij} es el término del error. Para obtener el valor de superficie cosechada a nivel regional se sumaron los datos de todos los departamentos que conforman cada región. Similarmente, la superficie cosechada nacional fue estimada con la sumatoria de los valores regionales, y luego se ajustó un modelo polinomial de segundo orden. El R^2 de los modelos a nivel regional fueron de 0,88 y 0,76 para maíz y sorgo, respectivamente. A nivel nacional, el R^2 de los modelos fue 0,59 y 0,69 para

maíz y sorgo, respectivamente. Los parámetros de los modelos ajustados de superficie cosechada son detallados en la tabla S1.

La tendencia de rendimiento a través de los años fue analizada usando un modelo polinomial de segundo orden (Modelo 2):

$$\gamma_{ijk} = \beta_0 + \beta_1 Y_i + \beta_2 Y_i^2 + R_j + \beta_3 (Y_{ij}R_j) + \beta_4 (Y_{ij}^2R_j) + D_k + \sigma_{ijk} \quad (2)$$

donde γ_{ijk} es el rendimiento en el año i en la región j y en el departamento k , β_0 es el intercepto, β_1 representa el coeficiente lineal y β_2 representa el coeficiente cuadrático, Y_i representa el año i , R_j es el efecto de la región, $(Y_{ij}R_j)$ es el término de la interacción entre año x región, β_3 y β_4 son los coeficientes asociados a la interacción de año y región, D_k es el efecto aleatorio de departamento, y σ_{ijk} es el término del error. Se asumió que el termino aleatorio tiene una distribución normal, con una media de 0 y varianza constante [$D_k \sim N(0; \sigma_{Dk}^2)$]. El R^2 de los modelos fue de 0,79 y 0,73 para maíz y sorgo, respectivamente. Los parámetros de los modelos ajustados de rendimiento son detallados en la tabla S2.

La estabilidad del rendimiento fue estimada usando los residuales relativos de rendimiento, donde mayores residuales de rendimiento implican menor estabilidad de rendimiento (Slafer y Kernich, 1996; Calderini y Slafer, 1998). Los residuales relativos de rendimiento fueron estimados al dividir el residual de rendimiento de cada departamento por el valor ajustado de rendimiento de una región dada y en un año determinado basado en el modelo 2, lo que nos brinda una estimación de la variabilidad como porcentaje de rendimiento. Los residuales de rendimiento fueron obtenidos al restar el valor de rendimiento observado por el valor de rendimiento ajustado, y luego fueron convertidos en valores relativos para lograr una estimación de la variabilidad de rendimiento asociada con los sitios y los manejos determinados en una temporada. Los valores negativos de residuales relativos de rendimiento fueron multiplicados por -1. La estabilidad de rendimiento desde 1970 a 2016 fue analizada ajustando un modelo lineal (modelo 3):

$$\gamma_{ij} = \beta_0 + \beta_1 Y_i + R_j + \beta_2 (Y_{ij}R_j) + D_k + \sigma_{ij} \quad (3)$$

donde γ_{ijk} es el residual relativo de rendimiento en el año i en la región j , β_0 es el intercepto, β_1 representa el coeficiente lineal, Y_i representa el año i , R_j es el efecto de la región, $(Y_{ij}R_j)$ es el término de interacción año x región, β_2 es el coeficiente asociado con la interacción entre año y región, D_k es el efecto aleatorio de departamento, y σ_{ij} es el factor del error. El termino aleatorio fue asumido con una distribución normal, con una media de 0 y

varianza constante [$Dk \sim N(0; \sigma_{Dk}^2)$]. Los parámetros de los modelos ajustados de los residuales relativos de rendimiento son detallados en la tabla S3.

Resultados

Las precipitaciones medias desde septiembre hasta abril oscilaron entre 480 y 880 mm en las 14 regiones en estudio, mientras que la evapotranspiración potencial varió entre 1126 y 1576 mm (Tabla 1). Con estos datos se pudo estimar que el balance hídrico (precipitaciones menos evapotranspiración potencial) osciló entre -400 y -1097 mm a través de las regiones. El balance hídrico se pudo clasificar en, menos negativo (más que -500 mm) en las regiones centrales y del este del país (regiones V, VI, VII, VIII, X, y XIV), intermedio (desde -500 a -700 mm) en regiones del norte, centro-oeste y del sur (regiones II, III, IV, IX, y XII) y más negativo (menos que -700 mm) en las regiones del oeste (regiones I, XI y XIII) (Tabla 1; Fig. 1). En general, los mejores perfiles de suelo (Molisol; Soil Survey Staff, 2014) son encontrados en regiones centrales, y la calidad de estos va decreciendo hacia regiones del norte, del oeste y del sur (Tabla 1), asociado a una reducción en la profundidad efectiva de los suelos.

La superficie cosechada de ambos cultivos cambio significativamente a través de los años ($p < 0,001$; Fig. 2A). Al inicio del periodo analizado (1970), la superficie cosechada de maíz fue un 52% mayor que la de sorgo (aprox. 3,8 y 2,5 Mha, respectivamente; Tabla 2; Fig. 2A). La superficie de maíz fue decayendo hasta 1991 (aprox. 2,3 Mha), y luego tuvo un incremento constante hasta alcanzar el máximo valor en el último año en estudio (aprox. 4,5 Mha). La superficie cosechada de sorgo fue decayendo durante todo el periodo analizado, estabilizándose alrededor de 0,7 Mha desde 1990 (Fig. 2A). En el último año del análisis, la diferencia de superficie cosechada entre los cultivos fue de alrededor de 3,8 Mha, la superficie cosechada con maíz fue 6 veces mayor a la superficie de sorgo (Tabla 2).

Tendencias similares fueron observadas en ambos cultivos a través de todas las regiones analizadas (Fig. S1). Aunque la superficie cosechada de maíz y sorgo difirieron a través de las regiones ($p < 0,001$), y que la interacción región x año fue significativa para ambos cultivos ($p < 0,001$), se pudo observar que la superficie cosechada de maíz se mantuvo constante o decreció hasta la década de los 90's y luego se incrementó en todas las regiones. En contraste, la superficie cosechada de sorgo decreció hasta los 90's y luego se estabilizó en todas las regiones. En 1970, la superficie cosechada del sorgo fue significativamente mayor que la de maíz en tres regiones (III, V y IX), y la mayoría del maíz cultivado estaba concentrado en las regiones núcleo (VI y VII, Tabla 2). En 2016, la superficie cosechada con sorgo fue menor que la de maíz en todas las regiones analizadas (Tabla 2). El incremento en la superficie cosechada de maíz fue relativamente mayor en regiones con balance hídrico de nivel intermedio (desde -500 a -700 mm; Fig. 3).

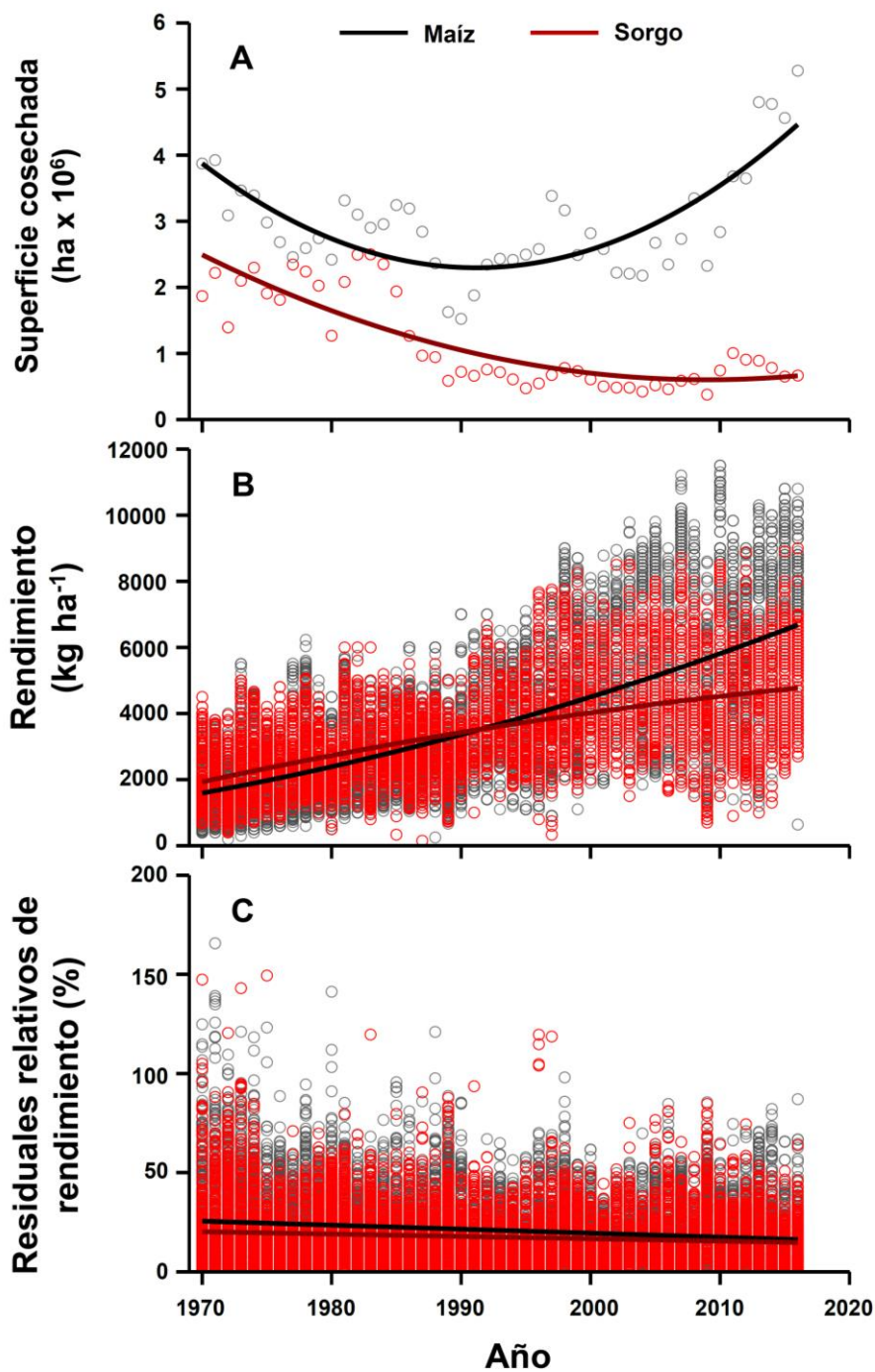


Fig. 2. Superficie cosechada (A), rendimiento (B) y residuales relativos de rendimiento (C) a nivel nacional de maíz (puntos grises, línea negra) y sorgo (puntos rojos, línea roja oscura) desde 1970 a 2016. Las líneas representan a los modelos ajustados, y cada punto representa cada uno de los datos observados. En la Fig. 2A cada punto es la suma de la superficie cosechada de todos los departamentos en cada año. En Figs. 2B y 2C, cada punto representa el dato de cada departamento.

Tabla 2. Superficie cosechada, rendimiento y residuales relativos de rendimiento de maíz y sorgo y la diferencias entre ambos cultivos (Dif: maíz menos sorgo) a nivel nacional y regional durante el primer (1970) y el último (2016) año analizado.

	Superficie cosechada (has x 10 ³)						Rendimiento (kg ha ⁻¹)						Residuales relativos de rendimiento (%)					
	1970			2016			1970			2016			1970			2016		
	Maíz	Sorgo	Dif ^A	Maíz	Sorgo	Dif ^A	Maíz	Sorgo	Dif ^A	Maíz	Sorgo	Dif ^A	Maíz	Sorgo	Dif ^A	Maíz	Sorgo	Dif ^A
Nacional	3874	2493	1381	4463	663	3800	1591	1931	-340	6679	4768	1911	25,5	20,2	5,3	16,3	14,8	1,5
Región																		
I	124	25	99	320	21	299	921	1726	-805	5558	4025	1533	23,7	17,6	6,1	13,6	15,4	-1,8 ^{ns}
II	115	232	-117 ^{ns}	462	164	298	1017	1480	-463	4556	3325	1231	30,4	21,9	8,5	19,8	15,5	4,3
III	129	321	-192	569	75	494	1119	1033	86 ^{ns}	7387	5513	1874	24,5	19,3	5,2	16,7	13,1	3,6
IV	368	412	-44 ^{ns}	626	56	570	1293	1567	-274 ^{ns}	7131	5825	1306	25,0	18,3	6,7	20,5	17,8	2,7 ^{ns}
V	169	337	-168	185	84	101	1300	1649	-349 ^{ns}	6155	4190	1965	23,2	16,6	6,6	16,0	12,3	3,7
VI	781	262	519	548	57	491	2151	2318	-167 ^{ns}	9332	6851	2481	27,5	20,3	7,2	13,3	10,5	2,8 ^{ns}
VII	1103	127	976	407	32	375	3101	3110	-9 ^{ns}	9032	6713	2319	18,5	17,6	0,9 ^{ns}	15,8	14,2	1,6 ^{ns}
VIII	289	172	117	223	113	110	1003	1244	-241 ^{ns}	6847	5103	1744	32,1	22,5	9,6	19,5	12,4	7,1
IX	212	390	-178	534	0	534	1620	2578	-958	7319	5404	1915	28,7	20,0	8,7	16,4	16,2	0,2 ^{ns}
X	158	50	108	175	12	163	2003	2839	-836	7625	4842	2783	22,3	15,7	6,6	12,8	13,3	-0,5 ^{ns}
XI	41	105	-64 ^{ns}	90	47	43 ^{ns}	834	1404	-570	4426	2741	1685	30,0	25,2	4,8	15,9	17,4	-1,5 ^{ns}
XII	1	7	-6 ^{ns}	88	2	86 ^{ns}	1720	1236	484 ^{ns}	6465	2393	4072	27,8	23,0	4,8	16,6	19,0	-2,4 ^{ns}
XIII	249	30	219	191	16	175	1391	838	553 ^{ns}	5565	4775	790	36,9	23,7	13,2	19,1	16,9	2,2 ^{ns}
XIV	108	9	99	65	2	63 ^{ns}	2426	2922	-496 ^{ns}	7750	5731	2019	18,3	17,2	1,1 ^{ns}	15,4	15,0	0,4 ^{ns}

^A Todas las diferencias son significativas a menos que se indique lo contrario (ns: no significativo). Las diferencias significativas son basadas en el intervalo de confianza de 95% de los modelos ajustados para cada variable y cultivo.

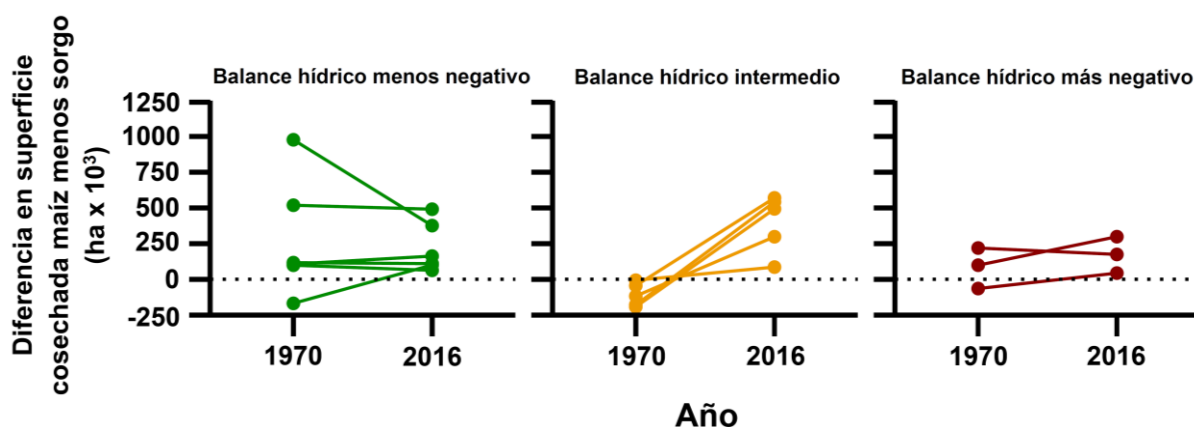


Fig. 3. Diferencia en superficie cosechada entre cultivos, maíz menos sorgo, en 1970 y 2016. Cada punto representa el dato de una región en un determinado año (I a XIV; Tabla 2), y las líneas que conectan ambos años muestran las tendencias entre los extremos del periodo analizado. Los colores representan los diferentes rangos de balances hídricos: menor que -500 mm en verde (menos negativo), entre -500 y -700 mm en naranja (intermedio), y mayor a -700 mm en marrón (más negativo).

Las diferencias en el rendimiento entre los cultivos a través del tiempo fueron significativas ($p < 0,001$; Fig. 2B). En 1970, los rendimientos de los cultivos eran similares, con una pequeña superioridad del sorgo sobre el maíz (1931 ± 69 comparado con 1591 ± 82 kg ha^{-1} , respectivamente; Tabla 2). Sin embargo, el rendimiento de maíz a nivel nacional se incrementó a una tasa promedio de $110 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (o $1,73\% \text{ año}^{-1}$ basado en el rendimiento estimado del último año analizado; $p < 0,001$), mientras que la tasa de incremento del rendimiento de sorgo fue considerablemente menor (promediando $62 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ o $1,26\% \text{ año}^{-1}$; $p < 0,001$; Fig. 2B). Estas diferencias en las tasas de incremento de rendimiento en favor de maíz se fueron incrementando, hasta alcanzar valores de rendimiento similares para ambos en 1991 (ca. 3450 kg ha^{-1}). En 2016, el rendimiento nacional de maíz fue 1910 kg ha^{-1} mayor que el rendimiento de sorgo (o 40% mayor, 6679 ± 83 y $4768 \pm 71 \text{ kg ha}^{-1}$ para maíz y sorgo, respectivamente; Fig. 2B; Tabla 2).

A pesar de que el rendimiento de ambos cultivos varió entre las regiones ($p < 0,001$), y que se identificó interacción región x año para ambos cultivos ($p < 0,001$), se pudo observar tendencias contrastantes de rendimiento de ambos cultivos en todas las regiones (Fig. S2). En 1970, la diferencia de rendimiento en favor del sorgo fue significativamente mayor ($p < 0,05$) en las regiones I, II, VIII, X, y XI, mientras que las diferencias de rendimiento no fueron significativas en el resto de las regiones (Tabla 2). En contraste, en 2016, la diferencia de rendimiento en favor del maíz fue significativa en todas las regiones analizadas (tabla 2). El incremento comparativo en rendimiento fue similar en todas las regiones con excepción de la región XIII donde el incremento fue menor (Fig. 4; Tabla 2). Las diferencias de rendimiento

entre los cultivos en 2016 tendieron a estar positivamente relacionada con el balance de agua ($r=51$; $p=0,06$; $n=14$), indicando una mejor performance del maíz cuando las condiciones ambientales mejoran.

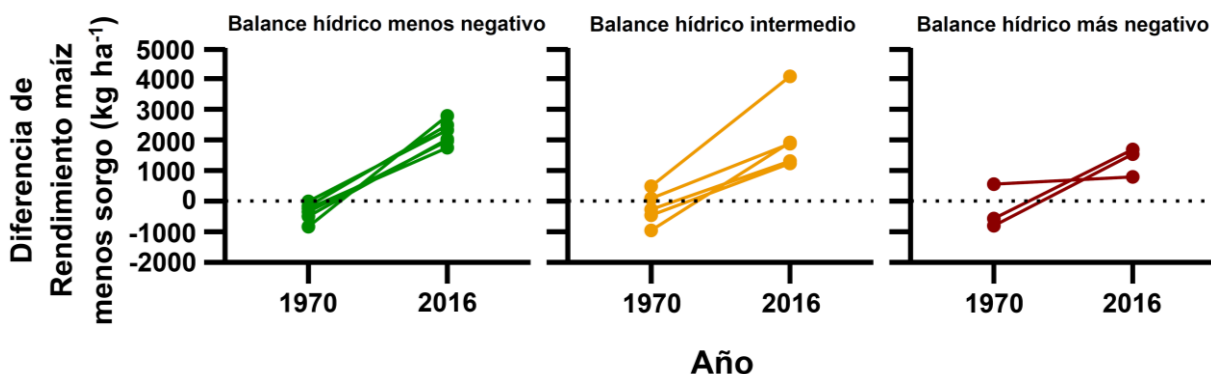


Fig. 4. Diferencia de rendimiento entre cultivos, maíz menos sorgo, en 1970 y 2016. Cada punto representa el dato de una región en un determinado año (I a XIV; Tabla 2), y las líneas que conectan ambos años muestran las tendencias entre los extremos del periodo analizado. Los colores representan los diferentes rangos de balances hídricos: menor que -500 mm en verde (menos negativo), entre -500 y -700 mm en naranja (intermedio), y mayor a -700 mm en marrón (más negativo).

La estabilidad del rendimiento de ambos cultivos varió con los años ($p<0,001$; Fig. 2 C). En 1970, la estabilidad del rendimiento de maíz fue más baja que en sorgo, esto fue evidenciado por las diferencias en los residuales relativos ($25,5\pm 0,7$ y $20,2\pm 0,6\%$ para maíz y sorgo, respectivamente; Fig. 2C; Tabla 2). La estabilidad del rendimiento se incrementó en ambos cultivos durante el periodo analizado. Los residuales relativos decrecieron a una tasa de $0,18$ y $0,15\%$ año⁻¹ para maíz y sorgo, respectivamente. En 2016, ambos cultivos evidenciaron similares valores de estabilidad de rendimiento, pero el sorgo fue aun significativamente más estable ($16,3\pm 0,7$ y $14,8\pm 0,7\%$ para maíz y sorgo, respectivamente; Tabla 2).

La estabilidad del rendimiento de ambos cultivos cambió a través de las regiones ($p<0,001$), y la interacción entre región y año fue también evidente ($p<0,001$) (Fig. S3). En 1970, los residuales relativos de maíz fueron mayores que los de sorgo en la mayoría de las regiones, a excepción de las regiones VII y XIV donde las diferencias entre los cultivos no fueron significativas (Tabla 2). En 2016, solo algunas regiones (II, III, V, y VIII) mostraron residuales relativos de rendimiento mayores en maíz, mientras que en la mayoría de las regiones no se encontraron diferencias entre los cultivos (Tabla 2). La comparativamente mayor reducción en los residuales relativos de maíz fue más importante en regiones con balance de agua intermedio (desde -500 a -700 mm) o más negativo (menor que -700 mm; Fig. 5).

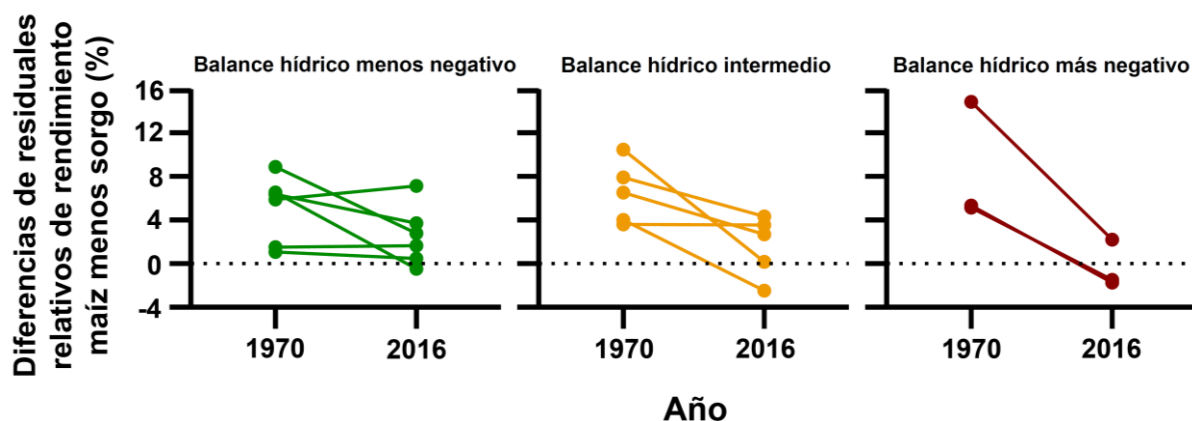


Fig. 5. Diferencia de residuales relativos de rendimiento entre cultivos, maíz menos sorgo, en 1970 y 2016. Cada punto representa el dato de una región en un determinado año (I a XIV; Tabla 2), y las líneas que conectan ambos años muestran las tendencias entre los extremos del periodo analizado. Los colores representan los diferentes rangos de balances hídricos: menor que -500 mm en verde (menos negativo), entre -500 y -700 mm en naranja (intermedio), y mayor a -700 mm en marrón (más negativo).

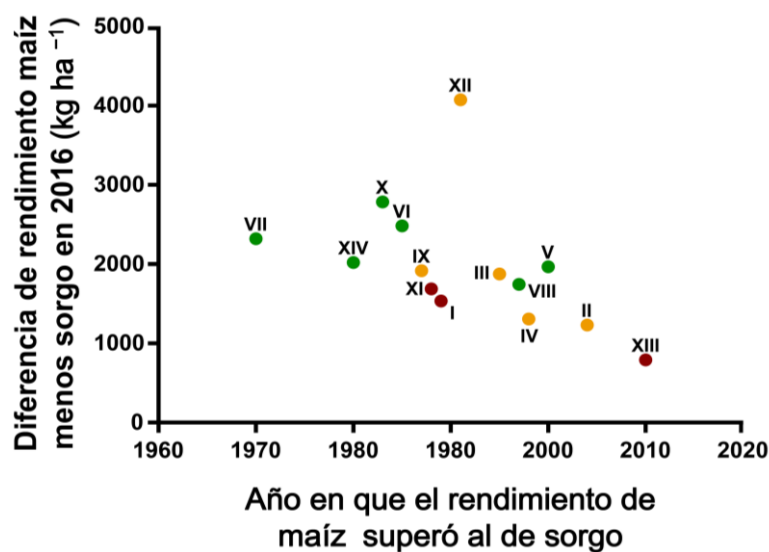


Fig. 6. Diferencias de rendimiento entre cultivos, maíz menos sorgo, en 2016 versus el año en que el rendimiento de maíz superó al de sorgo para cada región (I a XIV). Los colores representan los diferentes rangos de balances hídricos: menor que -500 mm en verde (menos negativo), entre -500 y -700 mm en naranja (intermedio), y mayor a -700 mm en marrón (más negativo).

La figura 6 aporta más información relacionada al año particular (desde 1970 a 2010) en el que el rendimiento de maíz sobrepasó al sorgo en cada una de las regiones. La diferencia de rendimiento entre maíz y sorgo a nivel regional estuvo negativamente

correlacionada con este año ($r=-0,62$; $p<0,05$; Fig. 6), demostrando que las regiones que en el presente tienen mayores diferencias en favor del maíz fueron las que el maíz sobrepasó al sorgo más tempranamente en el tiempo. El maíz superó al sorgo antes en las regiones con balance de agua menos negativo y más recientemente en las regiones con balances de agua intermedios o más negativos (Fig. 6). Las regiones tradicionalmente ganaderas fueron la excepción ya que el sorgo es aún importante en términos de superficie cosechada (regiones V y VIII) (Fig. 6).

Discusión

A nivel global se han realizado análisis de tendencias de rendimiento individualmente de los cultivos más relevantes, como ser arroz, maíz, trigo y soja (Specht et al., 1999; Fischer et al., 2014). Las comparaciones de tendencias entre cultivos son más inusuales, aunque aportan información relevante de los cultivos que compiten por superficie de siembra para explorar futuras decisiones. En este capítulo, se comparó la superficie cosechada, el rendimiento y la estabilidad del rendimiento de maíz y sorgo en Argentina usando información pública de un periodo de 55 años.

Los cambios de rendimiento en el tiempo fueron efecto de distintos factores, como ser mejora genética, mejores prácticas de manejo (ej. incremento en el uso de fertilizantes), cambios de zonas geográficas donde se desarrollan los cultivos, cambios climáticos, decisiones políticas y tendencias en el mercado de granos.

Se hipotetizó que las contrastantes ganancias genéticas de rendimiento de ambos cultivos fue la principal causa de las diferencias en el progreso de los rendimientos, especialmente al tener en cuenta que los actuales genotipos de maíz no solo producen mayor rendimiento en grano, sino que también son más tolerantes a la sequía que los genotipos anteriores (Tollenaar y Lee, 2002; Campos et al., 2004; Mueller et al., 2019). Sorpresivamente, el progreso del rendimiento de maíz a nivel regional analizado tanto en términos absolutos o relativos tuvo tasas similares a las reportadas previamente en reportes de ganancia genética de rendimiento (Tabla 3). Para el sorgo en cambio, la ganancia genética del rendimiento representó una pequeña proporción del progreso del rendimiento a nivel nacional (14% y 7% en términos absolutos y relativos, respectivamente; Tabla 3), lo que sugiere que gran parte de las ganancias de rendimiento a nivel nacional fueron debidas a mejoras en las prácticas agronómicas o su interacción con el genotipo (Gizzi y Gambin, 2016). Actualmente, el rendimiento de maíz sobrepasa al de sorgo en todas las regiones productivas de Argentina. La diferencia en favor del rendimiento de maíz es mayor en regiones con balances hídricos menos negativos, pero se está incrementando en regiones con mayor frecuencia de periodos de escasez hídrica.

A pesar de la reducción de la superficie implantada con maíz desde 1970 hasta 1990 por la introducción de la soja en Argentina, la superficie cosechada de maíz durante el periodo analizado se incrementó en la mayoría de las regiones del país. La excepción fue la región con mayor producción histórica de maíz (región VII), donde parte de la superficie cultivable fue ocupada por soja (Bolsa de Cereales, 2018). Contrariamente, la superficie destinada a la producción de sorgo fue disminuyendo en todas las regiones analizadas. Estas divergencias

en las tendencias de la superficie cosechada fueron explicadas por las diferencias de rendimiento entre los cultivos, las cuales comenzaron a ser evidente a partir de finales de la década de 1990 momento en el cual se aprobaron y comenzó la adopción masiva de nuevos híbridos modificados genéticamente solamente disponibles para maíz desde 1998 (Dirección de Biotecnología, 2019).

En la figura 7 se detalla el número de genotipos comerciales liberados en Argentina para ambos cultivos desde 1983 (momento a partir del cual se tiene registro de ambos cultivos) (INASE, 2019). El número de híbridos de maíz y sorgo liberados por año fue similar a principios del periodo analizado, pero desde 1990 la tasa de liberación de híbridos de maíz fue significativamente mayor que en el caso de sorgo. El número de híbridos de maíz liberados al mercado desde 1983 hasta 2016 fue tres veces mayor que los de sorgo. La diferencia en el número de genotipos registrados entre los cultivos esta positivamente asociada con la diferencia de rendimiento entre los cultivos ($r=0,64$; $p<0,001$; $n=34$; Fig. 7, inserción). A partir de esto se puede inferir que las mejoras genéticas explicaron la mayor productividad de maíz, y también ayuda a describir las diferencias en las inversiones destinadas a los programas de mejora de ambos cultivos en los últimos años. La introducción de modificaciones genéticas en atributos de control de insectos y malezas tuvieron consecuencias en el manejo agronómico de maíz, facilitando la siembra directa, otorgando mayor flexibilidad en la elección de fechas siembra, mejor control de malezas y disminuyendo los costos de producción. Otras prácticas de manejo, como mayores fertilizaciones en maíz, probablemente tuvieron efecto en las diferencias de rendimiento (ReTAA, 2020; Fertilizar Asociación Civil, 2020).

Históricamente, los rendimientos de sorgo fueron más estables que los de maíz. (Fig. 2C), debido a su mejor adaptación al estrés hídrico comparado con otros cereales (Doggett, 1988; Muchow, 1989b; Farré y Faci, 2006). Adicionalmente, los cambios en las prácticas de manejo y el cambio climático son esperable que tengan mayor efecto en maíz que en sorgo (Muchow, 1988; Farré y Faci, 2006; Ferraris et al., 2013). Estos cambios podrían explicar la baja estabilidad del rendimiento de maíz cuando se lo compara con sorgo al comienzo del estudio. La estabilidad del rendimiento de maíz mejoró a una tasa estadísticamente significativa en comparación con la del sorgo. Esto se explica en gran medida por el incremento de la tolerancia al estrés del cultivo de maíz (Tollenaar y Lee, 2002; Campos et al., 2004; Mueller et al., 2019). Las mejoras en el manejo agronómico también están detrás de la actual mejora en la estabilidad del rendimiento del maíz. Los organismos modificados genéticamente, por ejemplo, permitieron la adopción de fechas de siembras tardías durante

Tabla 3. Progreso del rendimiento desde 1970 a 2016 de maíz y sorgo en Argentina basado en los datos públicos de productores y la ganancia genética de rendimiento de ambos cultivos basadas en diferentes estudios publicados. Las tasas de progreso están expresadas en valores absolutos y relativos basados en el último rendimiento del periodo evaluado (Fischer, 2015). Para facilitar la interpretación, el progreso del rendimiento está representado por las tasas.

Cultivo	Progreso de Rendimiento		Ganancia genética		Referencia (Periodo analizado)
	Pendiente (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Ganancia relativa (% año ⁻¹)	Pendiente (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Ganancia relativa (% año ⁻¹)	
Maíz	110	1,73	170	1,74	Luque et al., 2006 (1965-1997)
			113	0,85	Borrás y Vitantonio-Mazzini, 2018 (1965-2016)
Sorgo	62	1,26	9	0,09	Gizzi y Gambin, 2016 (1984-2014)

la última década, obteniendo rendimientos aceptables y estables en un amplio rango de ambientes. (Otegui et al., 1996; Mercau y Otegui, 2014). La estabilidad del rendimiento del sorgo tuvo una pequeña mejora. Probablemente el mejoramiento estuvo detrás de este cambio, a través del incremento del stay-green y del ratio fuente-destino en post anthesis (Gizzi y Gambin, 2016). El aumento en el periodo de verdor de las hojas está asociado a altos rendimientos bajo situaciones de sequía (Rosenow et al., 1983; Borrell et al., 2000). Un mejor manejo de las fechas de siembra de sorgo pudo impactar en la estabilidad del rendimiento.

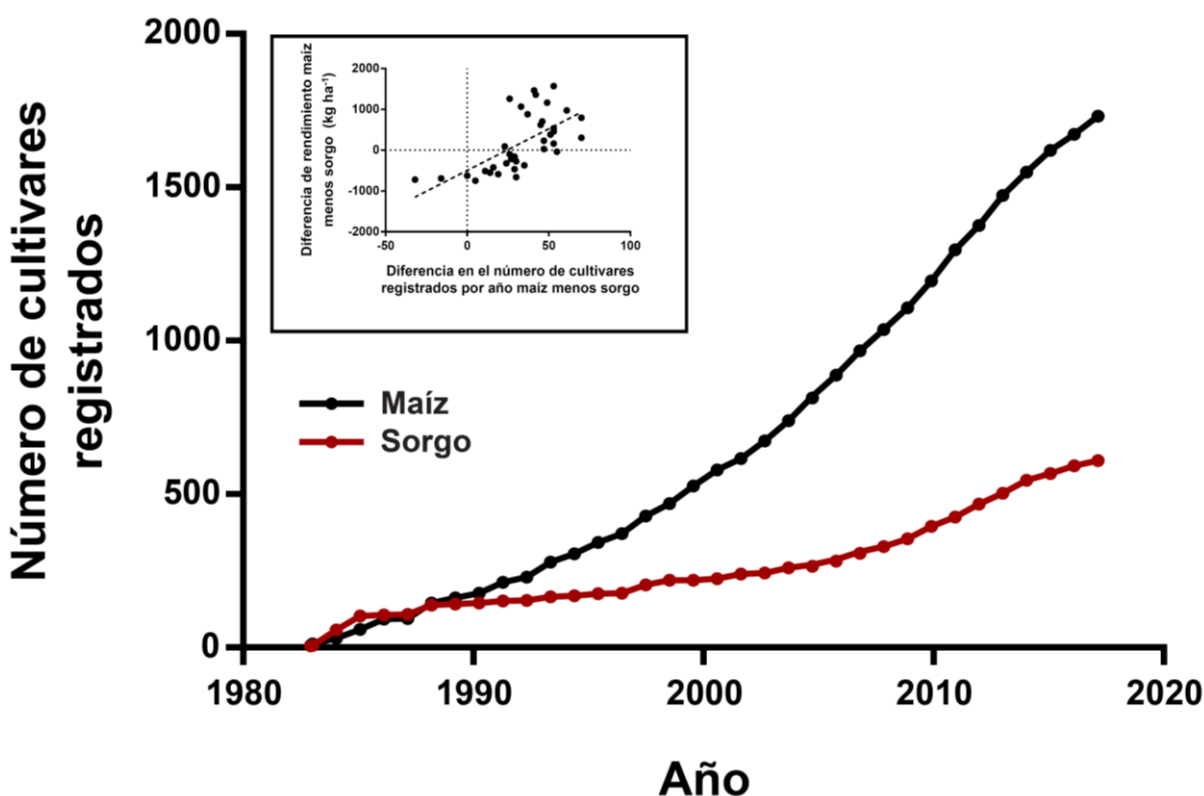


Fig. 7. Número de cultivares registrados de maíz (línea negra) y sorgo (línea roja) a través del tiempo. Información obtenida de INASE (2019). Recuadro muestra la relación entre la diferencia en el número de cultivares registrados, maíz menos sorgo, por año y la diferencia de rendimiento, maíz menos sorgo.

La limitada inversión en los programas de mejora de sorgo, evidenciada por el número de genotipos liberados por año (Fig. 7), limitó la ganancia genética del rendimiento (Gizzi y Gambin, 2016). La ausencia de materiales modificados genéticamente que mejoren la estabilidad del rendimiento a través de un adecuado control de malezas e insectos ha llevado a la situación actual en la que en ninguna región el rendimiento del sorgo supere al de maíz. El concepto tradicional de que el maíz tiene mejores rendimientos que el sorgo en los mejores ambientes, mientras que el sorgo supera al maíz en ambientes marginales es actualmente

puesto en cuestión. Los resultados obtenidos no se condicen con este concepto. Aunque no se comparó a ambos cultivos bajo las mismas condiciones de crecimiento, o en situaciones extremadamente adversas donde el sorgo podría evidenciar beneficios potenciales (Muchow, 1989b; Farré y Faci, 2006), los resultados sugieren que las ventajas comparativas del sorgo se han diluido frente a las mejoras genéticas y de manejo del maíz.

La homogeneidad en la producción de granos para alimentos encontrada en Argentina es acorde a la homogeneidad de los stocks de alimentos a nivel global (Khoury et al. 2014). Las consecuencias de esta homogeneidad son severas, e incluyen la posible inestabilidad de los rendimientos en los cultivos extensivos, la cual se puede incrementar según las predicciones de cambio climático (Lobell et al., 2008; Wheeler y Von Braun, 2013) y generar un fuerte impacto de la actividad agrícola sobre el suelo, la calidad del agua y la biodiversidad (Foley et al., 2005, 2011). En este contexto, la estabilidad del sorgo en términos de rendimiento en granos y de producción de biomasa es relevante (Muchow, 1989b; Farré y Faci, 2006). La mayor biomasa remanente aportada por el sorgo en comparación con el maíz en ambientes menos productivos proporciona una ventaja comparativa para mejorar las propiedades físicas y químicas del suelo (Amaducci et al., 2000). La homogeneidad en el suministro de alimentos tiene además impactos negativos en la salud humana y el potencial beneficio del sorgo en este sentido han sido reportadas recientemente (Cardoso et al., 2017).

Finalmente, las decisiones políticas tienen gran injerencia en la superficie destinada a cada cultivo. Las retenciones a las exportaciones agrícolas tienen un largo historial en Argentina (Rossi, 2015), con periodos específicos en los cuales dichos impuestos fueron removidos para los cereales (durante la década de los 90, por ejemplo). Esto explica parcialmente algunas de las diferencias observadas en la superficie cosechada de ambos cultivos, pero el maíz y el sorgo han recibido similares niveles de carga impositiva a lo largo del tiempo. Es incierto si la remoción de este tipo de impuestos sobre el sorgo podría impactar en el incremento de la superficie sembrada.

Conclusiones

Las tendencias históricas de rendimiento de maíz y de sorgo tuvieron un comportamiento contrastante en los últimos 46 años en Argentina. El maíz tuvo mayores ganancias de rendimiento (aprox. $110 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), mientras que la ganancia de rendimiento del sorgo fue más limitada (aprox. $62 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). Actualmente, el rendimiento del maíz supera al de sorgo en todas las regiones analizadas, mientras que hace 50 años atrás lo opuesto era más común. La estabilidad del rendimiento tuvo mayores mejoras en maíz comparativamente a las de sorgo, y actualmente ambos cultivos tienen una estabilidad del rendimiento similar.

Los resultados de este capítulo demuestran que cuando se comparan ambos cultivos, el maíz fue capaz de adaptarse más efectivamente a la mayoría de los ambientes productivos de la Argentina. La diferencia de rendimiento entre cultivos es menor en las regiones con mayor frecuencia de periodos de sequía, pero las tendencias indican que la diferencia de rendimiento se incrementó en favor del maíz. Es esperable que las diferencias de rendimiento entre sorgo y maíz sigan incrementándose en todos los ambientes productivos, dejando un espacio limitado de expansión en la superficie sembrada de sorgo.

Capítulo III

Variables ecofisiológicas que explican la actual dominancia del maíz sobre el sorgo

Introducción

Cómo se describió en el **capítulo II**, la diferencia en la inversión destinada al mejoramiento entre ambos cultivos en Argentina ha sido marcada, impactando directamente en el área cosechada, el rendimiento y la estabilidad del rendimiento de cada cultivo en los últimos 50 años. Por consiguiente, el concepto clásico de que el rendimiento de maíz supera al de sorgo en ambientes favorables, mientras que el sorgo tiene mejor performance que el maíz en condiciones marginales de crecimiento es actualmente puesto en cuestionamiento. Los estudios que respaldan este concepto están basados en diferencias fenológicas importantes entre los cultivos, en las que usualmente el ciclo corto del sorgo reduce el consumo de agua y mejora su eficiencia de uso en comparación con el maíz (Muchow, 1989b; Singh y Singh, 1995; Farré y Faci, 2006). Esta situación no se da en ambientes templados como los de la región centro de Argentina, donde la duración del ciclo de los cultivos es similar. Estudios recientes en regiones productivas similares han demostrado la superioridad del rendimiento de maíz sobre el sorgo en ambientes irrigados o con producción en seco (Li et al., 2005; Norwood et al., 1997).

Para la confección de informes comparativos de rendimientos entre los cultivos generalmente se utilizan datos a nivel de productor, por lo cual las diferencias no están solo relacionadas a diferencias en los avances genéticos de los cultivos sino también a diferencias de manejo, de ambientes de producción y de todas las posibles interacciones entre los mismos. Aunque en Argentina el maíz y el sorgo son cultivados en la misma región geográfica, el maíz es comúnmente sembrado en suelos más fértiles y profundos, mientras que el sorgo es destinado a suelos más pobres (i.e., suelos con bajos niveles de materia orgánica, suelos someros o salinos). Los paquetes tecnológicos de producción de ambos cultivos también se diferencian, en maíz es común el uso de híbridos de alto potencial de rendimiento, la aplicación de fertilizaciones balanceadas, y un amplio control de malezas, insectos y enfermedades, mientras que en sorgo no es común una alta inversión para su siembra (Brihet y Gayo, 2016; Brihet, 2017). Por lo tanto, actualmente no se cuenta con estudios que comparen simultáneamente ambos cultivos a campo bajo las mismas condiciones de crecimiento. Los estudios comparativos de componentes fisiológicos de rendimiento tienen

limitaciones, pero proveen información importante para el entendimiento de las diferencias entre cultivos relevantes (Andrade, 1995; Gambin y Borrás, 2011).

Los objetivos de este capítulo fueron (i) comparar el rendimiento de maíz y de sorgo en un amplio rango de condiciones de crecimiento, (ii) explorar las variables detrás de las diferencias de rendimiento entre los cultivos, y (iii) comparar las diferencias de rendimiento encontradas entre cultivos en este análisis y los valores obtenidos en estudios previos. Dos genotipos representativos de cada cultivo fueron comparados en 21 diferentes condiciones de crecimiento. Las variables analizadas fueron rendimiento, fenología (días a antesis y a madurez fisiológica), número final de hojas, índice de área foliar y radiación interceptada alrededor de antesis, tasa de crecimiento y partición reproductiva alrededor de antesis, biomasa a madurez fisiológica e índice de cosecha.

Materiales y métodos

Sitio y manejo agronómico

Los experimentos de campo fueron llevados a cabo en diferentes sitios de la región productiva central de Argentina durante dos campañas (2016/2017 y 2017/2018; de ahora en adelante 2016 y 2017, respectivamente). Los experimentos del 2016 (n:2) fueron localizados en Zavalla (Campo Experimental Villarino, Santa Fe, 33°1'S, 60°53'O). Los restantes experimentos fueron sembrados en 2017 (n:9) y ubicados tres en Zavalla, dos en Alejo Ledesma (Córdoba, 33°8'S, 62,7'O), uno en Noetinger (Córdoba, 32°3'S, 62°2'O), uno en Mojones Norte (Entre Ríos, 31°4'S, 59°2'O), y dos en Rafaela (Santa Fe, 31°2'S, 61°5'O) (Tabla 4). Los suelos predominantes fueron franco arenosos (Haplustol entico, Soil Taxonomy, Soil Survey Staff, 2014), franco arcillosos (Argiustol acuico y tipicos, y Argiudol vertico, Soil Taxonomy, Soil Survey Staff, 2014), y arcillosos (Ocracualf, Soil Taxonomy, Soil Survey Staff, 2014).

Los experimentos fueron planteados para poder explorar un amplio rango de fechas de siembra de aplicación común para ambos cultivos. Para incrementar la diversidad de condiciones de crecimiento, los experimentos de Zavalla incluyeron tres tratamientos de fertilización nitrogenada (0, 100 y 200 kg ha⁻¹ de N aplicados) (Tabla 4). Para el resto de los sitios, la cantidad de N aplicado fue definido por los productores basándose en análisis de suelo, rendimientos esperados, y costos. La densidad de plantas fue definida siguiendo recomendaciones locales para cada cultivo. Esta combinación generó 21 diferentes ambientes de crecimiento donde fue posible comparar ambos cultivos (Tabla 4).

Todos los ambientes explorados fueron en seco y se realizó control químico de plagas y malezas cuando fue necesario. En cada experimento, antes de la siembra se tomaron muestras de suelo hasta los 60 cm de profundidad para determinar las propiedades edáficas, el contenido de N-NO₃ de estas muestras fue determinado por espectrofotometría. Se determinó el contenido de agua útil del suelo hasta los dos metros de profundidad en cada experimento, utilizando el método gravimétrico (Black y Power, 1965).

1 **Tabla 4.** Listado de ambientes comparando maíz y sorgo. Año, localidad, fecha de siembra, nitrógeno (N) a la siembra (nitratos del suelo
2 más fertilización a 60 cm de profundidad), contenido de agua disponible en el suelo (CADS) a la siembra, densidad de siembra lograda
3 en maíz (M) y sorgo (S), precipitaciones (PP), evapotranspiración potencial acumulada (ETP) y balance hídrico (precipitaciones menos
4 ETP) para ambos cultivos. Rendimiento y el error estándar (EE) incluyendo las variaciones observadas por los dos híbridos evaluados en
5 cada cultivo.

Ambiente	Año	Localidad	Fecha de siembra	N a la siembra (kg ha ⁻¹)	CADS a la siembra (mm)	Densidad de siembra (planta m ⁻²)		PP (mm)	ETP (mm)	Balance hídrico (mm)	Rendimiento ± EE (Mg ha ⁻¹)	
						M	S				M	S
						I	2016				Zavalla	03-Nov
		Zavalla	03-Nov	191	323	8,0	20	524	783	-259	9,0 ±1,6	8,6 ±1,0
		Zavalla	03-Nov	291	323	8,0	20	524	783	-259	10,2 ±0,8	9,3 ±0,8
II	2016	Zavalla	16-Dec	166	327	8,0	20	647	702	-55	9,0 ±1,6	5,4 ±0,3
		Zavalla	16-Dec	266	327	8,0	20	647	702	-55	11,2 ±1,5	6,4 ±0,3
		Zavalla	16-Dec	366	327	8,0	20	647	702	-55	9,7 ±2,4	6,9 ±0,2
III	2017	Zavalla	05-Oct	133	325	8,0	20	283	790	-507	8,9 ±0,8	7,7 ±0,6
		Zavalla	05-Oct	233	325	8,0	20	283	790	-507	10,5 ±1,8	9,2 ±0,3
		Zavalla	05-Oct	333	325	8,0	20	283	790	-507	11,7 ±1,7	9,9 ±0,8
IV	2017	Zavalla	06-Nov	195	325	8,0	20	246	789	-543	9,8 ±1,8	7,3 ±0,8
		Zavalla	06-Nov	295	325	8,0	20	246	789	-543	10,8 ±1,0	8,7 ±1,0
		Zavalla	06-Nov	395	325	8,0	20	246	789	-543	11,2 ±2,1	8,9 ±0,4
V	2017	Zavalla	27-Dec	195	325	8,0	20	317	639	-323	7,8 ±1,0	6,1 ±0,9
		Zavalla	27-Dec	295	325	8,0	20	317	639	-323	8,9 ±1,4	5,8 ±0,7
		Zavalla	27-Dec	395	325	8,0	20	317	639	-323	9,2 ±2,0	5,9 ±0,4
VI	2017	Alejo Ledesma	09-Oct	120	258	4,0	13	307	815	-509	8,5 ±1,4	7,7 ±0,6
VII	2017	Alejo Ledesma	09-Oct	104	209	4,0	13	307	815	-509	8,9 ±0,5	5,7 ±1,2
VIII	2017	Noetinger	29-Dec	182	312	8,0	12	272	737	-547	2,4 ±1,3	2,4 ±2,6
IX	2017	Mojones Norte	11-Dec	104	481	6,0	18	191	641	-369	2,0 ±0,8	1,4 ±0,9
X	2017	Rafaela	14-Nov	140	338	3,8	11	183	782	-599	1,8 ±0,9	1,8 ±0,3
XI	2017	Rafaela	28-Dec	140	338	3,8	11	85	636	-551	2,7 ±1,1	3,0 ±0,3

Se cuantificó la cantidad de precipitaciones durante los ciclos de los cultivos de cada experimento. Se estimó la evapotranspiración potencial siguiendo la metodología de Trabucco y Zomer (2019) utilizando los datos de Worldclim Version 2 (Fick y Hijmans, 2017). Primero se calcularon los valores acumulados de ambas variables desde la siembra hasta los 120 o 140 días después de la siembra (periodo de desarrollo del cultivo para maíz y sorgo, respectivamente), para luego calcular el balance hídrico de ambos cultivos en cada sitio basado en la diferencia entre precipitaciones y evapotranspiración potencial.

Material vegetal y diseño experimental

En cada ambiente se testearon dos híbridos comerciales representativos de similar madurez para cada cultivo. En Zavalla, los híbridos de maíz fueron DK7210 VT3Pro (Dekalb, Bayer) y AX7822 VT3Pro (Nidera) y los de sorgo fueron DK64T (Dekalb, Bayer) y VDH314 (Advanta Seeds, UPL). En el resto de los sitios se utilizaron los híbridos de maíz DK7210 VT3Pro (Dekalb, Bayer), y KM3916 GL Stack (KWS) y los de sorgo TOB62T (Tobin) y VDH314 (Advanta Seeds, UPL).

En Zavalla, el diseño experimental fue en bloques completamente aleatorizados con 3 repeticiones. Cada repetición fue de 8 surcos de 5,5 m de largo. El tratamiento de nitrógeno fue la parcela principal y el genotipo fue la subparcela. Las parcelas fueron sobreplantadas y raleadas después de la emergencia hasta la densidad objetivo. En el resto de los sitios, el diseño fue en bloques completamente aleatorizados con 2 repeticiones. Cada repetición fue de seis a ocho surcos de 200 a 240 m de largo. La densidad lograda fue cuantificada en los estadios vegetativos. El espaciamiento entre surcos fue de 0,52 m en todos los sitios.

La radiación fotosintéticamente activa incidente diaria (RFA) de las parcelas en Zavalla fue registrada en la estación climatológica de la facultad (menos de 1 km desde los experimentos). Al encontrarse faltante de datos desde el 15-12-2016 hasta el 31-05-2017, se estimó dicha variable utilizando la información diaria de NASA Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER) – Climatology Resource for Agroclimatology (NASA, 2017). Los datos de radiación solar de NASA-POWER utilizados, están bien correlacionados con la radiación solar observada en áreas de topografías planas (Van Wart et al., 2013; White et al., 2011).

Mediciones fenotípicas

En Zavalla, el rendimiento en granos fue determinado mediante la cosecha de las espigas de 2,5 m² en maíz y las panojas de 2 m² para sorgo a madurez fisiológica en dos surcos centrales de cada repetición. Para los sitios restantes, el rendimiento fue medido con

los sensores de rendimiento de las cosechadoras. El rendimiento fue corregido a 14% y 14,5% de humedad para maíz y sorgo respectivamente.

En Zavalla fue posible la medición adicional de variables fenotípicas secundarias. La antesis fue registrada cuando el 50% de las plantas de cada parcela tenía al menos una antera visible. La madurez fisiológica fue definida visualmente cuando 5 de cada 10 plantas consecutivas de cada parcela alcanzaban dicho estadio. En el caso de maíz, este estadio fue determinado cuando la línea de leche alcanzó el 75% (Hunter et al., 1991), y para sorgo cuando se observó la capa negra en los granos de la parte basal de la panoja (van Oosterom y Hammer, 2008). El tiempo térmico fue calculado usando una temperatura base de 8°C y 11°C desde emergencia hasta antesis y con una temperatura base de 0°C y 5,7°C para el periodo de post-antesis de maíz y sorgo respectivamente (Muchow, 1990; Heiniger et al. 1993). La temperatura media diaria del aire fue calculada como el promedio de los datos registrados en cada hora en la estación climatológica de la facultad.

Se contabilizó el número de hojas desde la emergencia hasta la antesis. El área foliar de las hojas totalmente expandidas fue estimada semanalmente en cada parcela midiendo el largo y ancho de cada hoja en 5 plantas consecutivas marcadas para tal fin. Para sorgo, las mediciones de área foliar fueron realizadas en el tallo principal y los macollos. El número de hojas completamente expandidas y senescidas se contabilizó semanalmente. Una hoja fue considerada completamente expandida cuando su lígula era visible sobre la hoja previa, y se consideró senescida cuando menos de la mitad de su lámina permanecía verde. A partir de las dimensiones conocidas de cada hoja y de la cantidad de hojas verdes, fue posible calcular el área foliar total siguiendo el procedimiento de Muchow y Carberry (1990).

Se estimó la radiación fotosintéticamente activa incidente (RFA) desde la siembra hasta la antesis, desde la antesis hasta madurez fisiológica y el porcentaje de RFA interceptada (RFAi) al comienzo y al final del periodo crítico de definición del rendimiento para cada cultivo (Andrade et al., 1999; van Oosterom y Hammer, 2008). Las mediciones de RFAi fueron realizadas en pre-antesis (alrededor de 15 y 20 previos a la antesis en maíz y sorgo, respectivamente) y en post-antesis (15 y 10 días después de la antesis de maíz y sorgo, respectivamente), utilizando un quantum-sensor de un metro lineal (Cavadevices, Argentina). Las mediciones se realizaron al mediodía (entre 11:30-13:30 h), en días claros, con el sensor centrado diagonalmente entre los dos surcos centrales (Gallo et al., 1986). El promedio de tres mediciones hechas inmediatamente debajo de la última hoja verde y una medición sobre el canopeo de cada parcela, fueron utilizadas en la estimación del porcentaje de RFAi.

Durante todo el ciclo de los cultivos se realizaron estimaciones y mediciones de biomasa aérea. Las muestras fueron obtenidas cuando el cultivo estaba en estado vegetativo (V4-V6), en iniciación de panoja, pre-antesis (aproximadamente 15 y 20 días pre-antesis para maíz y sorgo, respectivamente), en antesis, post antesis (15 y 10 días después de antesis

para maíz y sorgo, respectivamente) y en madurez fisiológica. En maíz, las mediciones se realizaron sobre 20 plantas de los surcos centrales de cada parcela. Dichas plantas fueron aleatoriamente etiquetadas desde el estado vegetativo y fueron seleccionadas en dos grupos de 10 plantas en cada surco. Para la estimación de biomasa aérea se utilizaron modelos alométricos no destructivos (Vega et al., 2000) desde los estadios vegetativos hasta la madurez fisiológica de todas las plantas etiquetadas. Al utilizar esta técnica se logra una representación precisa de la biomasa de la planta mientras que las mismas plantas pertenecen en la parcela hasta la cosecha (Vega et al., 2000; Echarte et al., 2004; Gambin et al., 2008; Hernández et al., 2014). Para sorgo, se tomaron muestras de biomasa de 0,5 m² por parcela. Las panojas fueron removidas y pesadas por separado. Las mismas fueron cortadas un centímetro por debajo de la primera ramificación de la panoja (fértil o no). Los macollos fueron tratados como si fueran tallos principales. Las muestras de material verde fueron pesadas después de permanecer al menos una semana en una estufa de ventilación forzada a 65°C.

La tasa de crecimiento del cultivo alrededor de antesis (g m⁻² d⁻¹) fue calculada como la diferencia entre la biomasa en post- y pre-antesis (g m⁻²) dividida por el número de días. La partición reproductiva a la espiga o panoja fue calculada como el ratio entre la tasa de crecimiento reproductivo y la tasa de crecimiento del cultivo alrededor de antesis. Para este cálculo se asumió una biomasa reproductiva en pre-antesis igual a cero. El índice de cosecha se obtuvo del ratio entre el rendimiento en grano y la biomasa total a madurez.

Análisis estadístico

Los datos fueron analizados usando modelos lineales mixtos (paquete lme4, función lmer) (Bates et al., 2014) en R (R Core Team, 2020, 4.0.0 version). Debido a que el interés principal fue comparar los cultivos en diferentes condiciones de crecimiento, el modelo para cada una de las variables consideró a *cultivo*, *ambiente* y la interacción de los mismos como efectos fijos, y *bloque* y *genotipo* como efectos aleatorios.

Se chequearon los supuestos de Gauss y de homocedasticidad (Zuur et al., 2009) de los residuales estandarizados de los modelos con un análisis gráfico y los mismos fueron validos en todos los casos.

Las medias fueron comparadas con el test de diferencias mínimas significativas de Fisher (LSD) con un nivel de probabilidad de 0,05. Para explorar posibles asociaciones entre las variables se utilizó un análisis de correlaciones de Pearson.

Resultados

En los ambientes explorados, los rendimientos de maíz fluctuaron desde 1,8 a 11,7 Mg ha⁻¹ y los de sorgo variaron entre 1,4 a 9,9 Mg ha⁻¹ (Tabla 4), y el rendimiento promedio de sorgo (6,4 Mg ha⁻¹) fue significativamente menor que el de maíz (8,2 Mg ha⁻¹; $p < 0,05$). La diferencia de rendimiento (maíz menos sorgo) osciló entre -0,3 y 4,8 Mg ha⁻¹, y fue significativamente mayor en maíz excepto en uno de los ambientes explorados.

La interacción entre cultivo y ambiente fue significativa ($p < 0,001$) para rendimiento debido a las variaciones en las diferencias relativas de rendimiento entre cultivos. Las diferencias de rendimiento fueron mayores en los ambientes con un balance de agua más positivo ($r: 0,54$; $p < 0,01$) o con mayores niveles de nitrógeno ($r: 0,43$; $p < 0,05$) (Tabla 4). Debido a esto, ambos cultivos tuvieron rendimientos similares en los ambientes de menor potencial, pero el maíz superó ampliamente al sorgo en los mejores ambientes. Solamente en uno de los 21 ambientes explorados el sorgo superó el rendimiento de maíz. Las diferencias de rendimiento a favor de maíz se observaron incluso cuando ambos cultivos ubicaron su periodo más crítico en similares condiciones (ejemplo, fechas de noviembre de sorgo vs de diciembre de maíz), siendo la diferencia a favor de maíz de entre 200 a 2600 kg ha⁻¹ (Tabla 4).

En el promedio de todos los ambientes, el maíz alcanzó la antesis 15 días antes que el sorgo ($p < 0,05$; Tabla 5; Fig. 8). Las diferencias que se encontraron en el tiempo a antesis entre los ambientes fueron significativas ($p < 0,001$; Tabla 5) explicadas fundamentalmente por diferencias en la fecha de siembra, en las cuales las siembras tardías tuvieron ca. 15 días menos a antesis (Tabla 5). Sin embargo, al presentarse significancia en la interacción entre cultivo x ambiente ($p < 0,001$; Tabla 5) se puede inferir variabilidad en la respuesta, el sorgo alcanzó la antesis entre 12 y 18 días después que el maíz (Tabla 5).

La duración del periodo de llenado de granos fue similar en ambos cultivos ($p > 0,05$; Tabla 5; Fig. 8). Entre los ambientes hubo una diferencia promedio de 5 días en la duración de este periodo ($p < 0,001$; Tabla 5), y la interacción cultivo x ambiente demostró que la duración del periodo de llenado de granos de maíz puede ser menor (hasta 13 días) o mayor (hasta 7 días) que en sorgo dependiendo de las condiciones de crecimiento ($p < 0,001$; Tabla 5; Fig. 8). Estas diferencias estuvieron asociadas a variaciones en la temperatura, ya que cuando se calculó la duración del llenado de granos en tiempo térmico solo se encontraron diferencias entre los cultivos ($p < 0,05$; 1246 y 851°Cd para maíz y sorgo, respectivamente). La duración de todo el ciclo del cultivo promedió 123 días para maíz y 137 días para sorgo.

El número final de hojas fue similar entre cultivos ($p < 0,05$), con un promedio de 20 hojas (Tabla 5). Las diferencias a través de los ambientes fueron escasas (2 hojas; $p < 0,001$; Tabla 5; Fig. 8), además no se encontró significancia en la interacción cultivo x ambiente para

esta variable. En cambio, el IAF a antesis fue 65% mayor en promedio en sorgo que en maíz ($p < 0,05$; Tabla 5; Fig. 8). Las diferentes condiciones de crecimiento exploradas resultaron en diferencias significativas de IAF ($p < 0,001$; Tabla 5). Dependiendo del ambiente el IAF de sorgo fue entre 53 y 80% mayor que el de maíz ($p < 0,001$; Tabla 5; Fig. 8).

El sorgo acumuló un 22% más de radiación incidente entre la siembra y la antesis que el maíz ($p < 0,05$; Tabla 5; Fig. 8), debido a su más prolongado periodo vegetativo. Sin embargo, el maíz acumuló ca. 14% más radiación incidente durante el llenado de granos ($p < 0,05$; Tabla 5; Fig. 8). Esto es explicado por el momento del año cuando ocurrió dicho periodo (siempre antes en maíz que en sorgo), ya que no se encontraron diferencias entre cultivos en la duración del llenado de granos. Las diferencias en la radiación incidente acumulada entre los ambientes estuvieron asociadas a la fecha de siembra, las fechas de siembras tardías acumularon menor radiación incidente tanto en estadios vegetativos como reproductivos ($p < 0,001$; Tabla 5).

El porcentaje de radiación interceptada al comienzo del periodo de determinación del número de granos fue ca. 20% mayor en sorgo que en maíz ($p < 0,05$; Tabla 5; Fig. 8). En promedio, el sorgo capturó el 87% de la radiación incidente en este estadio, mientras que el maíz alcanzó un 71% (Tabla 5). La eficiencia de interceptación del sorgo fue menor al 90% solo en 6 de los 21 ambientes, mientras que en el caso de maíz fue menor a ese valor en todos los ambientes (Fig. 8). Una tendencia similar se observó en post-antesis, donde el sorgo siempre interceptó más del 90% y el maíz interceptó menos radiación con más variabilidad (desde 76 a 95%; Tabla 5; Fig. 8).

La tasa de crecimiento alrededor de antesis fue similar para ambos cultivos ($p > 0,05$; Tabla 5). La tasa de crecimiento varió ampliamente con el ambiente ($p < 0,001$; Tabla 5), fluctuando entre 22 y 38 $\text{gr m}^{-2} \text{d}^{-1}$ (promedio de ambos cultivos; Tabla 5; Fig. 8). La partición de biomasa a estructuras reproductivas (espiga o panoja) en el final del periodo de la determinación del número de granos fue mayor en sorgo que en maíz ($p < 0,05$; Tabla 5; Fig. 8). Las diferencias en favor del sorgo variaron entre 5 y 64%. La interacción cultivo x ambiente no fue significativa para esta variable (Tabla 5).

La producción de biomasa total en madurez fisiológica fue similar entre los cultivos, fluctuando entre 1531 y 2242 g m^{-2} para maíz y desde 1571 a 2640 g m^{-2} para sorgo (Tabla 5; Fig. 8). Siembras tempranas favorecieron una mayor producción de biomasa total ($p < 0,001$; Tabla 5). Las variaciones en biomasa debido al ambiente fueron mayores en sorgo (39%) en comparación con maíz (12%), por lo que se entiende la interacción significativa encontrada cultivo x ambiente para esta variable ($p < 0,001$; Tabla 5; Fig. 8).

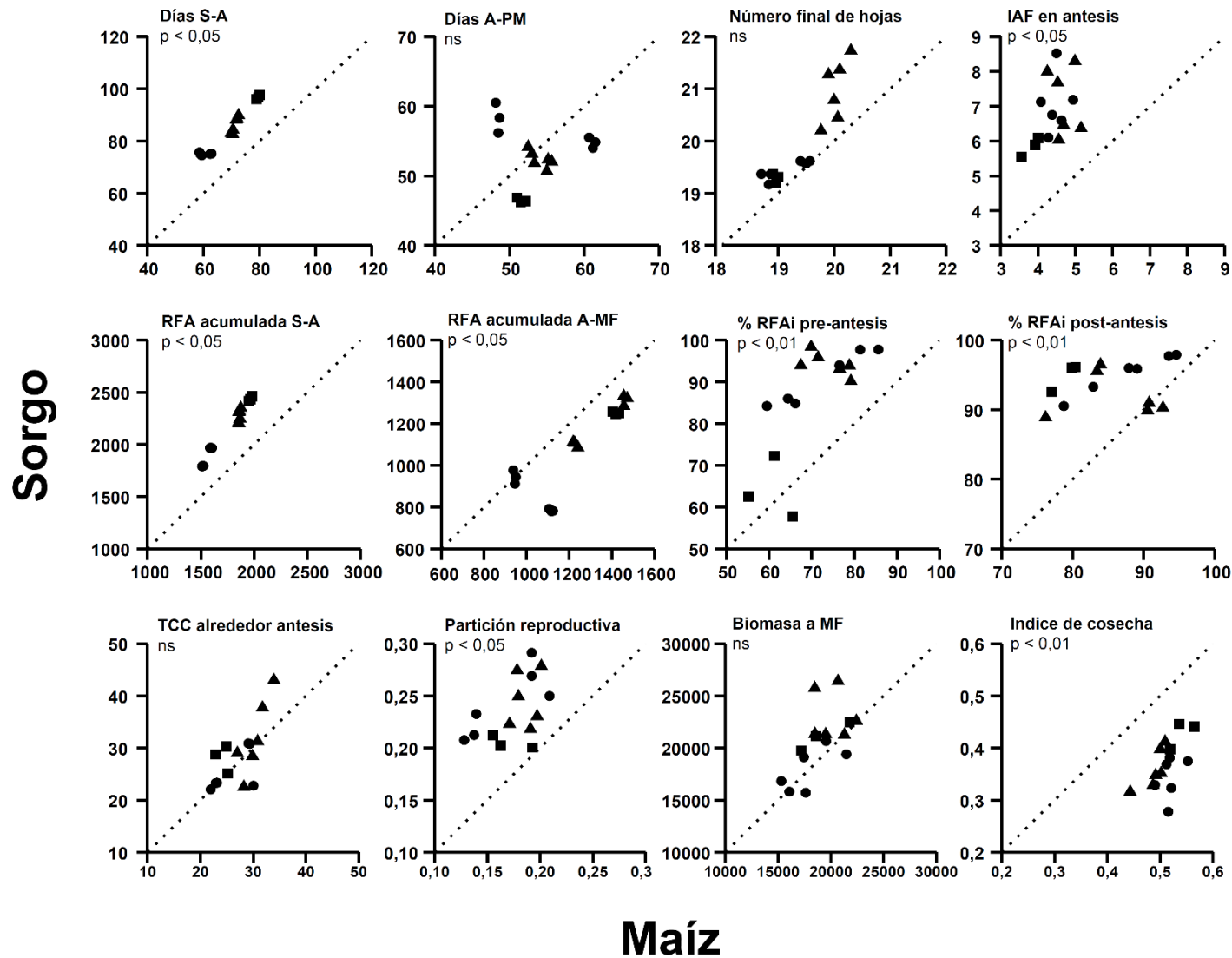


Fig. 8. Días desde siembra hasta antesis (S-A), días desde antesis a madurez fisiológica (A-MF), Número final de hojas, índice de área foliar (IAF) en antesis ($m^2 m^{-2}$), Radiación fotosintéticamente activa incidente acumulada (RFA) desde siembra a antesis (S-A) ($MJ m^{-2}$), Radiación fotosintéticamente activa incidente acumulada (RFA) desde antesis a madurez fisiológica (A-MF) ($MJ m^{-2}$), porcentaje de radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAi) al inicio del periodo crítico (pre-antesis), porcentaje de radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAi) al final del periodo crítico (post-antesis), tasa de crecimiento del cultivo (TCC) alrededor de antesis ($g m^{-2} d^{-1}$), partición reproductiva de biomasa, biomasa a madurez fisiológica (MF) ($Mg ha^{-1}$), e índice de cosecha para sorgo y maíz. Para cada tratamiento, se indica las diferencias significativas entre los cultivos. Cada símbolo representa un ambiente específico, y es el promedio de dos genotipos por cultivo y tres repeticiones. Cuadros, triángulos, y círculos representan las fechas de siembra de octubre, noviembre y diciembre, respectivamente. La línea punteada representa la relación 1:1.

Tabla 5. Días desde siembra a antesis y desde antesis a madurez fisiológica, número final de hojas, índice de área foliar en antesis, radiación fotosintéticamente activa incidente (RFA) acumulada desde siembra a antesis y desde antesis a madurez fisiológica, porcentaje de radiación interceptada al comienzo (pre-antesis) y al final (post-antesis) del periodo de determinación del número de granos, tasa de crecimiento del cultivo (TCC) alrededor de antesis (desde 15 días previos y 15 días posteriores a antesis en maíz, y 20 días previos y 10 días posteriores de la antesis en sorgo), partición reproductiva alrededor de antesis, biomasa total aérea en madurez fisiológica e índice de cosecha para maíz y sorgo. Promedio, mínimo (min.) y máximo (máx.) de 21 condiciones de crecimiento donde se evaluaron ambos cultivos simultáneamente. Significancia de los efectos analizados para cada variable con el porcentaje de varianza (entre paréntesis) explicados por cada una de las variables.

Variable	Unidad	Cultivo	Promedio	Min	Max	Cultivo	Ambiente	Cultivo x Ambiente
Días desde siembra a antesis	Días	Maíz	69	59	80	* (62)	*** (35)	*** (1)
		Sorgo	84	75	98			
Días desde antesis a madurez fisiológica	Días	Maíz	54	48	62	ns (<1)	*** (<1)	*** (97)
		Sorgo	53	46	61			
Número final de hojas	#	Maíz	20	19	20	ns (12)	*** (63)	ns (5)
		Sorgo	20	19	22			
Índice de área foliar a antesis	m ² m ⁻²	Maíz	4,4	3,6	5,1	* (84)	*** (4)	*** (7)
		Sorgo	6,9	5,6	8,5			
RFA acumulada desde siembra a antesis	MJ m ⁻²	Maíz	1760	1512	1981	* (61)	*** (35)	*** (2)
		Sorgo	2149	1790	2463			
RFA acumulada desde antesis a madurez fisiológica	MJ m ⁻²	Maíz	1233	937	1472	* (22)	*** (66)	*** (12)
		Sorgo	1079	780	1332			
Porcentaje de radiación interceptada en pre-antesis	%	Maíz	71	55	86	** (52)	*** (32)	*** (15)
		Sorgo	87	58	98			
Porcentaje de radiación interceptada en post-antesis	%	Maíz	86	76	95	* (51)	*** (8)	*** (23)
		Sorgo	94	89	98			
TCC alrededor de antesis	g m ⁻² d ⁻¹	Maíz	27,4	22	33,9	ns (<0)	*** (81)	ns (4)
		Sorgo	28,6	22	43			
Partición reproductiva	Adimensional	Maíz	0,18	0,13	0,21	** (61)	*** (9)	ns (14)
		Sorgo	0,23	0,2	0,29			
Biomasa total aérea a madurez fisiológica	g m ⁻²	Maíz	1906	1531	2242	ns (8)	*** (51)	*** (30)
		Sorgo	2063	1571	2640			
Índice de cosecha	Adimensional	Maíz	0,51	0,44	0,56	** (88)	*** (7)	*** (5)
		Sorgo	0,37	0,28	0,45			

*, **, *** significativo a p < 0,05, 0,01, y 0,001 respectivamente; ns: no significativo.

Las diferencias entre el índice de cosecha de los cultivos fueron significativas ($p < 0,05$; Tabla 5), siendo mayor en maíz (0,51) que en sorgo (0,37). El índice de cosecha fue afectado por variaciones en el ambiente, así como también fue significativa la interacción cultivo x ambiente para esta variable. El índice de cosecha de maíz fue más estable a través de los ambientes en comparación con el de sorgo (Tabla 5; Fig. 8). El índice de cosecha de sorgo tuvo los niveles más bajos en las fechas de siembra más tardías (Fig. 1). El índice de cosecha varió entre los ambientes entre 20 y 86% en favor del maíz. (Tabla 5).

Las diferencias entre cultivos explican un importante porcentaje de la varianza, alcanzando valores mayores a 50% para la mayoría de las variables analizadas (Tabla 5). Para aquellas variables donde se encontraron diferencias significativas entre los cultivos, el ratio entre la varianza de la interacción cultivo x ambiente y el cultivo fue menor que 0,5 (Tabla 5).

Discusión

Usando comparaciones simultaneas a campo, se pudo demostrar una consistente ventaja del rendimiento de maíz sobre el sorgo en un amplio rango de ambientes templados, con rendimientos entre 1,7 y 10,8 Mg ha⁻¹ (promedio de rendimiento de ambos cultivos). Estos resultados validan el concepto que las mayores ganancias genéticas de rendimiento potencial y tolerancia a estrés en maíz que en sorgo (Tollenaar y Lee, 2002; Campos et al., 2004; Gizzi y Gambin, 2016; Borrás y Vitantonio-Mazini, 2018) son fundamentales para explicar la actual diferencia de rendimiento entre los cultivos. Los resultados también se condicen con la contrastante tendencia de los rendimientos históricos y la dominancia del maíz sobre el sorgo en diferentes ambientes de Argentina mostrados en el **Capítulo II**.

Basado en estos resultados, se pudo estimar el punto de indiferencia de rendimiento de maíz por debajo del cual el sorgo tiene una mejor performance en 1779 kg ha⁻¹ (Fig. 9). Este valor es marcadamente menor a los 5461 kg ha⁻¹ que se pueden estimar utilizando información de estudios de campo previos (Muchow, 1989; Singh y Singh, 1995; Norwood et al. 1997; Farré y Faci, 2006). Consistentemente con esto, Assefa et al. (2014) demostraron que este punto de indiferencia disminuyó desde ca. 8000 kg ha⁻² a ca. 6000 kg ha⁻² desde 1992 a 2012 en la región central de EE. UU. usando datos de campos de productores.

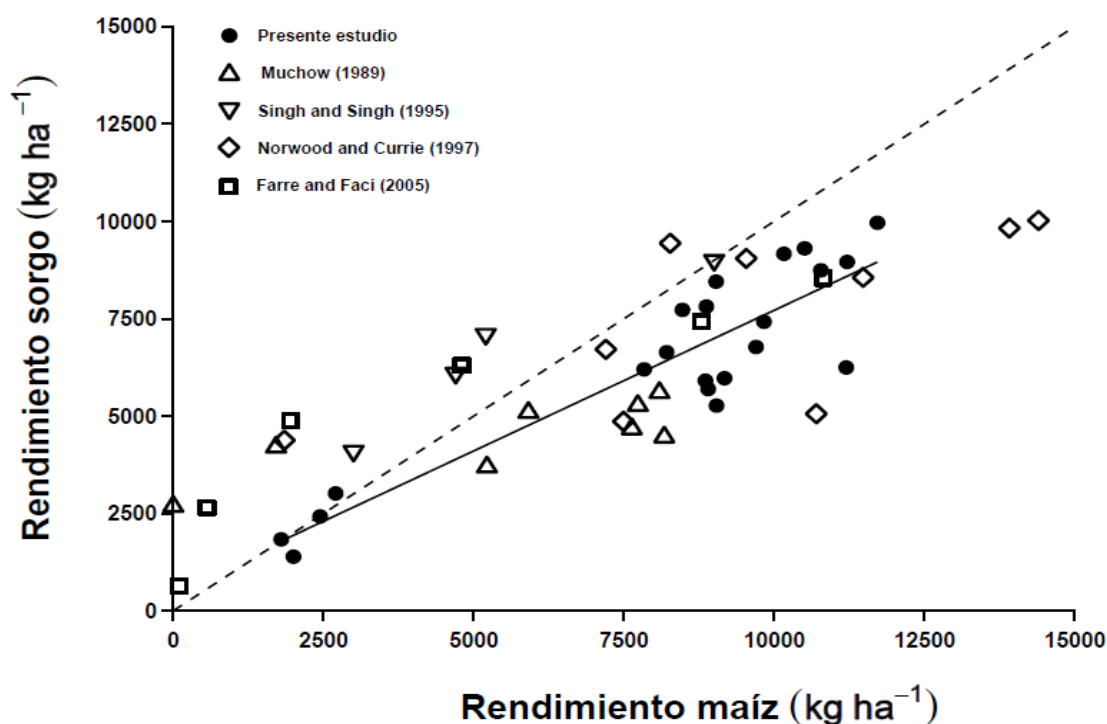


Fig. 9. Rendimiento de sorgo y maíz utilizando información del presente capítulo (círculos cerrados) y de estudios previos en los que se realizaron comparaciones de campo entre los cultivos. La línea sólida representa la correlación de los datos del presente estudio ($Y = 494 + 0.72 * X$; $r^2: 0.82$; $n: 21$). La línea punteada representa la línea 1:1.

Ambos cultivos tuvieron similares producciones de biomasa total a madurez fisiológica. Esto difiere de estudios previos en los cuales el sorgo acumuló menos biomasa, principalmente como consecuencia de un ciclo de cultivo más corto (Muchow, 1989a; 1989b; Farré y Faci, 2006). En la región central Argentina los genotipos comerciales de sorgo tienen un ciclo de cultivo más extenso debido al prolongado periodo vegetativo que presentan, y la acumulación de biomasa hasta el comienzo del periodo de llenado efectivo de granos fue significativamente mayor en sorgo que en maíz ($p < 0.05$). Esto implica diferencias entre los cultivos en la producción total de biomasa durante el llenado efectivo de granos, el cual fue significativamente superior ($p < 0.05$) en maíz que en sorgo. Estos resultados son consistentes con la menor eficiencia del uso de la radiación (EUR) en sorgo con respecto al maíz durante el llenado de granos (Muchow y Davis, 1988; Muchow, 1989a; 1989b).

Las diferencias entre los rendimientos de los cultivos estuvieron explicadas por diferencias en el índice de cosecha. En el rango de ambientes explorados, el índice de cosecha fue mayor y más estable en maíz que en sorgo (Fig. 8). Estos resultados son acordes a los estudios que determinaron que la estabilidad del índice de cosecha es la variable principal detrás de la mejora en la tolerancia a estreses hídricos y abióticos en maíz (Duvick, 1997). En contraste, el índice de cosecha de sorgo es menor y no tuvo mejoras considerables (Gizzi y Gambin, 2016; Miller y Kebede, 1984). Estudios recientes enfocados en la identificación de los mecanismos detrás de la ganancia genética en maíz han demostrado que los nuevos híbridos tienen mejor eficiencia de uso de los recursos (radiación, agua y nitrógeno) en comparación con híbridos antiguos (Mueller et al., 2019; Curin et al., 2020). Los presentes resultados sugieren que no sucede lo mismo en el sorgo, e indican que la ganancia genética de maíz fue significativamente más efectiva para el incremento de rendimiento (**Capítulo II**). El relativo menor índice de cosecha del sorgo con respecto al maíz contrasta con la mayor partición de biomasa reproductiva en el comienzo del periodo de llenado de granos, confirmando la relevancia de las diferencias entre los cultivos en los mecanismos que determinan el rendimiento durante el periodo post-floración (Muchow, 1989a).

Ambos cultivos tuvieron similares tasas de crecimiento del cultivo durante el periodo de determinación del número de granos (Fig. 8), a pesar de la baja interceptación de radiación en maíz con respecto a sorgo en el comienzo y el final de este periodo, por lo que se podría estimar que la tasa de crecimiento pudo haber sido mayor que en las condiciones que se exploraron en este estudio. El sorgo alcanzó los valores más altos radiación interceptada durante este periodo, que resultaron en importantes diferencias de IAF con valores 65% mayores que en maíz (Fig. 8). Marcadas diferencias en IAF entre los cultivos fueron descritas previamente (Muchow, 1988). Sustentado en estos resultados, se puede especular que una reducción en la duración del periodo pre-antesis podría incrementar los rendimientos de sorgo al anticipar el periodo de llenado de granos, particularmente en siembras tardías

donde se dieron las mayores disminuciones del índice de cosecha. Una estrategia similar se utiliza en ambientes con limitaciones hídricas, en los cuales un comparativamente más corto periodo a antesis resulta en un incremento del índice de cosecha y de rendimiento de sorgo en comparación con maíz (Muchow, 1989b; Farré y Faci, 2006). Otros mecanismos, como una limitada transpiración que generan una restricción en el consumo de agua en estadios vegetativos también demostraron resultados efectivos en estas variables (Sinclair et al., 2005).

Seleccionando genotipos de sorgo con periodos de llenado de granos de mayor duración se puede incrementar los rendimientos sin una penalización en la relación con el número de granos (Yang et al., 2010; Gambin y Borrás, 2010). Al igual que Muchow (1988; 1989b), los resultados demuestran que el sorgo tiene un periodo pre-antesis relativamente más prolongado y un periodo de llenado comparativamente más corto que el maíz. Basado en esto, se puede especular que, cambios en la duración relativa de los periodos de pre- y post-antesis podrían incrementar el rendimiento de sorgo. Estudios previos en la región central de Argentina demostraron que materiales con floraciones anticipadas y periodos de llenado de grano más prolongados resultaron en mayores rendimientos a través del incremento del índice de cosecha (Carcedo et al., 2017). Diferencias genotípicas en la duración del llenado de granos en sorgo no tuvieron correlación con la duración del periodo de siembra a antesis (Gambin y Borrás, 2011), sugiriendo un control independiente para ambas variables.

Aunque el sorgo floreció después que el maíz, no se encontraron diferencias en el número final de hojas entre los cultivos. El filocrono estimado a partir de los resultados del presente capítulo fueron similares entre cultivos (48 y 50°Cd hoja⁻¹ para sorgo y maíz, respectivamente), indicando que las diferencias en la temperatura base (menor en maíz que en sorgo; Hammer et al., 1993; Ritchie y NeSmith, 1991) explican la comparativamente más lenta aparición de hojas en sorgo. A pesar de que reducciones en el tiempo a iniciación de panoja y consecuentemente en el número final de hojas podrían anticipar la antesis (Kumar et al., 2009), reducir la temperatura base puede generar una anticipación en la floración en ambientes templados que son usualmente afectados por bajas temperaturas en las primeras etapas de los cultivos. En este sentido, la diversidad genotípica en temperatura base del periodo de pre-antesis de sorgo tiene fuertes implicancias en el mejoramiento (Tirfessa et al., 2020).

Conclusiones

Los resultados demuestran una consistente ventaja del rendimiento del maíz sobre el sorgo en un amplio rango de ambientes templados, que oscilaron entre 1,7 a 10,8 Mg ha⁻¹, confirmando la actual dominancia relativa del maíz sobre el sorgo como consecuencia de las mejoras genéticas.

Las diferencias de rendimiento entre los cultivos no estuvieron relacionadas con la biomasa total aérea en madurez fisiológica, sino que se sustentaron en grandes diferencias de índice de cosecha. El IAF del sorgo fue entre 53 y 80% mayor, necesitó más tiempo para alcanzar la antesis, y tuvo menor acumulación de biomasa en la post floración que maíz. Anticipar la antesis, aumentar la duración del periodo de llenado de granos y mayores índices de cosecha serían variables a mejorar para lograr mejoras del rendimiento de sorgo en este tipo de ambientes.

Capítulo IV

Diferencias en cantidad y calidad de biomasa remanente entre maíz y sorgo

Introducción

La biomasa remanente de los cultivos es una importante fuente de fertilizante orgánico, cada año se producen un total de 3.8 billones de toneladas de rastrojos globalmente (Thangarajan et al., 2013). Esa biomasa remanente es equivalente a la biomasa generada en granos en el caso del maíz y aproximadamente el doble a lo generado en granos en sorgo (Benson y Pearce, 1987). Estos residuos de la producción de granos son la principal fuente de reposición de materia orgánica al suelo, forman parte del ciclo de los nutrientes, mantienen las calidades físicas del suelo y reducen su erosión. En general, el modelo productivo adoptado en Argentina utiliza siembra directa dejando la mayor parte de los rastrojos sobre la superficie del suelo.

El aporte de rastrojo al suelo de un cultivo de maíz o sorgo depende en gran medida del largo de ciclo y del índice de cosecha. Estudios previos comparando maíz y sorgo en otras regiones productivas del mundo con genotipos de sorgo más cortos que los utilizados en Argentina sugieren un menor aporte de biomasa en el sorgo a pesar de su menor índice de cosecha (Muchow, 1989a; 1989b; Farré y Faci, 2006). Actualmente no hay información local del aporte de biomasa por ambos cultivos. Los resultados del **Capítulo III** indican marcadas diferencias entre cultivos en su índice de cosecha, siendo comparativamente menores las diferencias en la biomasa total a madurez. En base a estos resultados, se hipotetiza que el cultivo de sorgo aporta mayor cantidad de rastrojo comparado con maíz.

La descomposición de la biomasa remanente está en gran parte influenciada por sus características. La tasa de descomposición está relacionada principalmente con la concentración inicial de nitrógeno, la fracción de carbono lábil, la relación C/N, además de otras características fisicoquímicas que influyen en la misma (Melillo et al., 1982; Collins et al., 1990; Somda et al., 1991). Asimismo, factores ambientales como las lluvias, la temperatura del suelo, pH, y el nivel nutricional afectan la descomposición de los rastrojos (Liu et al., 2014; Kamble y Bååth, 2016). La tasa de descomposición de residuos en lotes en seco está más influenciada por la humedad del suelo que por su temperatura (Nhantumbo et al., 2009). Estudios previos de evaluación de rastrojo de maíz utilizaron con éxito la metodología de bolsas de malla, incluyendo tallo y hojas en proporciones relativas a la participación de las mismas en la planta (Gregorich y Ellert, 1994; Zaborsky, 1995). El periodo de análisis en el cual se retiró las bolsas del lote dependió de las condiciones ambientales, principalmente temperatura, presentes en cada caso de estudio.

El objetivo principal del presente capítulo es comparar la cantidad y calidad de la biomasa remanente de sorgo y maíz en diferentes situaciones productivas comunes en la zona. La calidad de la biomasa fue evaluada a través del porcentaje de nitrógeno y carbohidratos solubles luego de diferentes intervalos de tiempo transcurridos en el lote.

Materiales y métodos

Sitio y manejo agronómico

Los lotes en estudio se ubicaron en Zavalla (Campo Experimental Villarino, Santa Fe, 33°1'S, 60°53'O) durante dos campañas (2017/2018 y 2019/2020 de ahora en adelante 2017 y 2019, respectivamente) (Tabla 1). Los ambientes de la campaña 2017 se corresponden con los ambientes III, IV y V descritos en el **Capítulo III**.

El estudio fue planteado para poder explorar un amplio rango de fechas de siembra y diferentes regímenes hídricos de aplicación común para ambos cultivos. Para incrementar la diversidad de condiciones de crecimiento, los ambientes incluyeron tres tratamientos de fertilización nitrogenada (0, 100 y 200 kg ha⁻¹ de N aplicados) y tres tratamientos de fecha de siembra (5 de octubre, 6 de noviembre y 27 de diciembre) en la campaña 2017 y tres tratamientos de disponibilidad hídrica (Shelter, seco y potencial) en la campaña 2019 (Tabla 1). Esta combinación generó 12 diferentes ambientes de crecimiento donde fue posible comparar los rastrojos de ambos cultivos que fueron sembrados de manera simultánea. La densidad de plantas fue definida siguiendo recomendaciones locales para cada cultivo.

En todos los ambientes se realizó control químico de plagas y malezas cuando fue necesario. En cada ambiente se tomaron muestras de suelo hasta los 60 cm de profundidad antes de la siembra para determinar las propiedades edáficas. El contenido de N-NO₃ de estas muestras fue determinado por espectrofotometría. Se determinó el contenido de agua útil del suelo hasta los dos metros de profundidad en cada experimento al momento de la siembra, utilizando el método gravimétrico (Black y Power, 1965). Se registraron los milímetros caídos por precipitaciones durante los ciclos de los cultivos y durante el periodo en el que el rastrojo estuvo en el campo en base a la central meteorológica situada a ca. 500 m de los lotes.

Material vegetal y diseño experimental

El material vegetal utilizado para los experimentos realizados en 2017 corresponde a dos híbridos comerciales representativos de similar madurez para cada cultivo. Los híbridos de maíz fueron DK7210 VT3Pro (Dekalb, Bayer) y AX7822 VT3Pro (Nidera) y los de sorgo fueron DK64T (Dekalb, Bayer) y VDH314 (Advanta Seeds, UPL). Para los experimentos realizados en 2019 se utilizaron los híbridos de maíz DK7210 VT3Pro (Dekalb, Bayer), y SYN 848 Viptera 3 (Syngenta) y los de sorgo ADV1350G (Advanta Seeds, UPL) y VDH314 (Advanta Seeds, UPL).

El diseño experimental utilizado en 2017 fue en bloques completamente aleatorizados con 3 repeticiones. Cada repetición tuvo un tamaño de 8 surcos de 5,5 m de largo con un espaciamiento de 0,52 m. Los tratamientos de nitrógeno fueron la parcela principal y el genotipo fue la subparcela. Las parcelas sembradas en 2019 fueron planteadas en bloques completamente aleatorizados con 4 repeticiones. Cada repetición fue de 4 surcos de 6 m de largo con 0,35 m de espaciamiento. En estos ambientes, el tratamiento de disponibilidad hídrica (potencial, seco, shelter) fue la parcela principal y el genotipo fue la subparcela. Todas las parcelas se sembraron con mayor densidad y fueron raleadas después de la emergencia hasta la densidad objetivo.

El balance hídrico de los ambientes estudiados se calculó de forma similar a lo descrito en el **Capítulo III**. Se cuantificó la cantidad de precipitaciones y se estimó la evapotranspiración potencial durante los ciclos de los cultivos de cada ambiente. Primero se calcularon los valores acumulados de ambas variables desde la siembra hasta los 120 o 140 días después de la siembra (periodo de desarrollo del cultivo para maíz y sorgo, respectivamente), para luego calcular el balance hídrico de ambos cultivos en cada ambiente basado en la diferencia entre precipitaciones y evapotranspiración potencial.

Acondicionamiento del rastrojo y determinaciones

El rastrojo remanente de la cosecha de ambas especies (definido como las partes aéreas de las plantas excepto los granos) y correspondiente a una superficie de 1 m² fue recolectado a madurez fisiológica. Dichas partes vegetales fueron separadas en hojas y tallos, los cuales se cortaron en trozos de 10 cm de largo. Posteriormente las muestras fueron secadas por 15 días a 60°C en una estufa de ventilación forzada.

Para el análisis de descomposición del rastrojo a campo se siguió el procedimiento descrito por Burgess et al. (2002). Se utilizaron bolsas de malla plásticas de 20 x 30 cm y 2 mm de apertura. Dentro de cada bolsa se colocaron 60 gr de material vegetal siguiendo una proporción similar a la planta, por lo cual se pesaron 15 gr de hojas y 45 gr de tallos. Se prepararon 5 bolsas de rastrojos por parcela para poder retirar las mismas después de transcurridos distintos periodos de tiempo.

Las bolsas de malla con el material vegetal fueron colocadas sobre la superficie del suelo en las parcelas originales 15 días después de la madurez fisiológica. Las bolsas fueron recolectadas del lote a los 5, 15, 30, 45 y 90 días después de colocadas. El rastrojo remanente de cada parcela en cada momento fue estimado a partir del porcentaje de disminución de peso de la bolsa con material vegetal relativizado al total del rastrojo aéreo de cada parcela. Luego de pesadas, las muestras fueron molidas atravesando una malla de 1 mm para realizar las determinaciones de nitrógeno y de carbohidratos solubles. En el caso del nitrógeno se

siguió el protocolo de Kjeldahl (Mckenzie y Wallace, 1953) que consiste en la digestión, destilación y titulación de las muestras. Para la estimación de carbohidratos solubles se utilizó el método de determinación por colorimetría descrito por Dubois et al. (1956), en el cual se compara la absorbancia de las muestras procesadas con una curva de calibración de sacarosa.

Análisis estadístico

Los datos fueron analizados usando modelos lineales mixtos (paquete nlme, Pinheiro et al., 2020) en R (R Core Team, 2020, versión 4.0.0). Debido a que el interés del capítulo se centra en las diferencias entre cultivos (maíz y sorgo), los modelos consideraron a la especie, el tiempo y la interacción especie x tiempo como efectos fijos, mientras que los ambientes, el bloque anidado en ambiente y los genotipos anidados en los bloques fueron considerados efectos aleatorios. Adicionalmente, a modo exploratorio se ajustaron similares modelos para las tres variables respuestas en estudio con el factor ambiente dentro de los efectos fijos. Los modelos fueron ajustados sin autocorrelación debido a que no se detectó correlación relevante entre los datos (semivariograma~1). Se chequearon los supuestos de Gauss y de homocedasticidad (Zuur et al., 2009) de los residuales estandarizados de los modelos con un análisis gráfico y se corrigió de ser necesario. La comparación de medias entre tratamientos se realizó mediante el paquete predictmeans (Luo et al., 2021) en R.

Tabla 6. Listado de ambientes de comparación entre maíz y sorgo realizados en Zavalla (Campo Experimental Villarino, Santa Fe, 33°1'S, 60°53'O). Año de siembra, manejo, fecha de siembra, N disponible y contenido de agua disponible en el suelo (CADS) a la siembra, densidad de siembra lograda para maíz (M) y sorgo (S), precipitaciones (PP), evapotranspiración potencial (ETP) y balance hídrico (precipitaciones menos evapotranspiración potencial) promedio para ambos cultivos. Rendimiento y error estándar de los dos híbridos evaluados para cada cultivo.

Ambiente	Año	Manejo	Fecha de siembra	N disponible (kg ha ⁻¹)	CADS a la siembra (mm)	Densidad de siembra (plantas m ⁻²)		PP (mm)	ETP (mm)	Balance hídrico (mm)	Rendimiento ± EE (Mg ha ⁻¹)	
						M	S				M	S
						I	2017				Secano	05-Oct
II	2017	Secano	05-Oct	233	325	8.0	20	283	790	-507	10.5 ±1.8	9.2 ±0.3
III	2017	Secano	05-Oct	333	325	8.0	20	283	790	-507	11.7 ±1.7	9.9 ±0.8
IV	2017	Secano	06-Nov	195	325	8.0	20	246	789	-543	9.8 ±1.8	7.3 ±0.8
V	2017	Secano	06-Nov	295	325	8.0	20	246	789	-543	10.8 ±1.0	8.7 ±1.0
VI	2017	Secano	06-Nov	395	325	8.0	20	246	789	-543	11.2 ±2.1	8.9 ±0.4
VII	2017	Secano	27-Dec	195	325	8.0	20	317	639	-323	7.8 ±1.0	6.1 ±0.9
VIII	2017	Secano	27-Dec	295	325	8.0	20	317	639	-323	8.9 ±1.4	5.8 ±0.7
IX	2017	Secano	27-Dec	395	325	8.0	20	317	639	-323	9.2 ±2.0	5.9 ±0.4
X	2019	Shelter	08-Nov/20-Nov	180	214	7.5	14	289	862	-573	6.5 ± 0.8	3.4 ±1.6
XI	2019	Secano	08-Nov/20-Nov	180	258	7.5	14	417	862	-445	9.8 ± 1.4	4.6 ± 1.1
XII	2019	Riego	08-Nov/20-Nov	180	297	7.5	14	702	862	-160	10.6 ± 0.7	6.7 ± 2.7

Resultados

La cantidad de rastrojo promedio generado por el sorgo fue significativamente mayor ($p < 0,05$) al aportado por el maíz ($12,8$ y $10,1$ $t\ ha^{-1}$ para sorgo y maíz, respectivamente) (día 0 en Fig. 10; Tabla 7). Al inicio del experimento, el promedio de rastrojo fue de $11,5$ $t\ ha^{-1}$ el cual disminuyó progresivamente hasta $8,5$ $t\ ha^{-1}$ a los 90 días. Sin embargo, se observaron diferencias entre maíz y sorgo resultando en una interacción especie x tiempo significativa ($p < 0,05$; Fig. 10; Tabla 7). Después de 5 días en el lote, la cantidad de rastrojo promedio fue de $11,8$ $t\ ha^{-1}$ para el sorgo y de $9,8$ $t\ ha^{-1}$ para el maíz, siendo esta diferencia de $2,2$ $t\ ha^{-1}$ estadísticamente significativa. A los 15 días de colocado el material en el campo el sorgo continuó superando al maíz (11 y $9,7$ $t\ ha^{-1}$, respectivamente). Después de 30 días ya no se observaron diferencias significativas entre los cultivos ($9,9$ $t\ ha^{-1}$ para el sorgo y $9,1$ $t\ ha^{-1}$ para el maíz). Esta similitud estadística entre las especies se mantuvo hasta la última observación. La cantidad de rastrojo continuó disminuyendo a $9,1$ $t\ ha^{-1}$ (45 días) y $8,7$ $t\ ha^{-1}$ (90 días) para sorgo y a $8,8$ $t\ ha^{-1}$ (45 días) y $8,3$ $t\ ha^{-1}$ (90 días) para maíz. Asimismo, se detectaron diferencias entre ambientes en la cantidad de rastrojo generado (Fig. S4; $p < 0,05$), la cual fluctuó entre 10 y $14,1$ $t\ ha^{-1}$. Las diferencias en la cantidad de rastrojo generado entre sorgo y maíz variaron desde $-3,5$ $t\ ha^{-1}$ (ambiente XII, único experimento desarrollado bajo riego) hasta $6,4$ $t\ ha^{-1}$ (siembra tardía, bajo N).

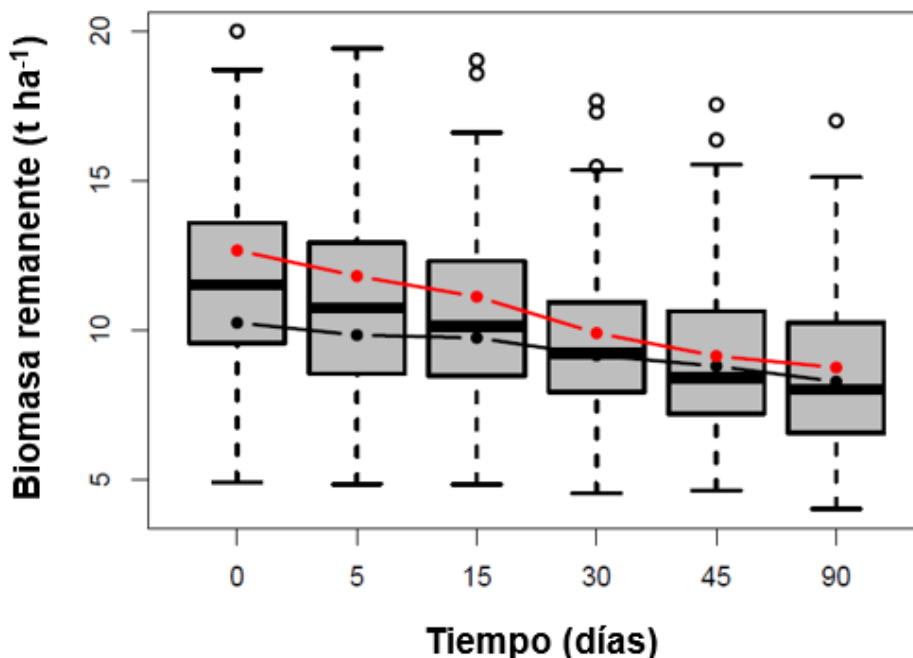


Fig. 10. Evolución de la biomasa remanente ($tn\ ha^{-1}$) de maíz (negro) y sorgo (rojo) durante los 90 días de permanencia del rastrojo en el campo. Cada punto es la media de dos híbridos. Los boxplots incluyen los datos de ambas especies.

Tabla 7. Biomasa remanente ($tn\ ha^{-1}$), nitrógeno (%) y carbohidratos solubles (%) para ambas especies, en diferentes días transcurridos en el lote y la interacción entre ambos efectos. Significancia del efecto Especie, días y su interacción en las distintas variables analizadas.

Especie	Tiempo (días)	Biomasa remanente ($tn\ ha^{-1}$)	Nitrógeno (%)	Carbohidratos Soluble (%)
Maíz		9,1	0,48	5,32
Sorgo		10,6	0,59	6,72
Promedio	0	11,5	-	-
	5	10,8	0,50	12,09
	15	10,4	0,51	9,21
	30	9,5	0,54	4,17
	45	9,0	0,54	2,93
	90	8,5	0,59	1,71
Maíz	0	10,2	-	-
	5	9,8	0,46	9,71
	15	9,7	0,46	7,67
	30	9,1	0,48	4,61
	45	8,8	0,48	3,17
	90	8,3	0,53	1,47
Sorgo	0	12,7	-	-
	5	11,8	0,54	14,47
	15	11,1	0,57	10,75
	30	9,9	0,59	3,73
	45	9,1	0,60	2,69
	90	8,7	0,64	1,94
Especie (E)		**	***	ns
Días (D)		***	***	***
E X D		***	ns	***

*, **, *** significativo a $p < 0,05$, $0,01$, y $0,001$ respectivamente; ns: no significativo.

El porcentaje de nitrógeno promedio en la primera observación fue de 0,59 y 0,48 para sorgo y maíz, respectivamente, generando diferencias significativas entre las especies (Fig. 11; Tabla 7). Con el transcurrir del tiempo en el lote, el rastrojo de los cultivos tuvo un incremento paulatino de su concentración de nitrógeno alcanzando en promedio un 18% más de nitrógeno a los 90 días. Las diferencias en favor del sorgo (mayor concentración) se mantuvieron en torno al 20% en todos los periodos analizados, por lo que no se detectó interacción especie x tiempo significativa. Las diferencias en el porcentaje de nitrógeno entre ambientes fueron significativas ($p < 0,05$) principalmente influenciadas por el nivel de fertilización nitrogenada y/o por el potencial productivo (Fig. S5). También se detectó interacción especie x ambiente debido a las diferencias en el porcentaje de nitrógeno de los rastrojos de los cultivos en determinados ambientes. En siembras tardías o ambientes más restrictivos (shelter) se evidenció una mayor removilización de nitrógeno a los granos en maíz, mientras que en sorgo se observaron valores similares a otras fechas de siembra (Fig. S5).

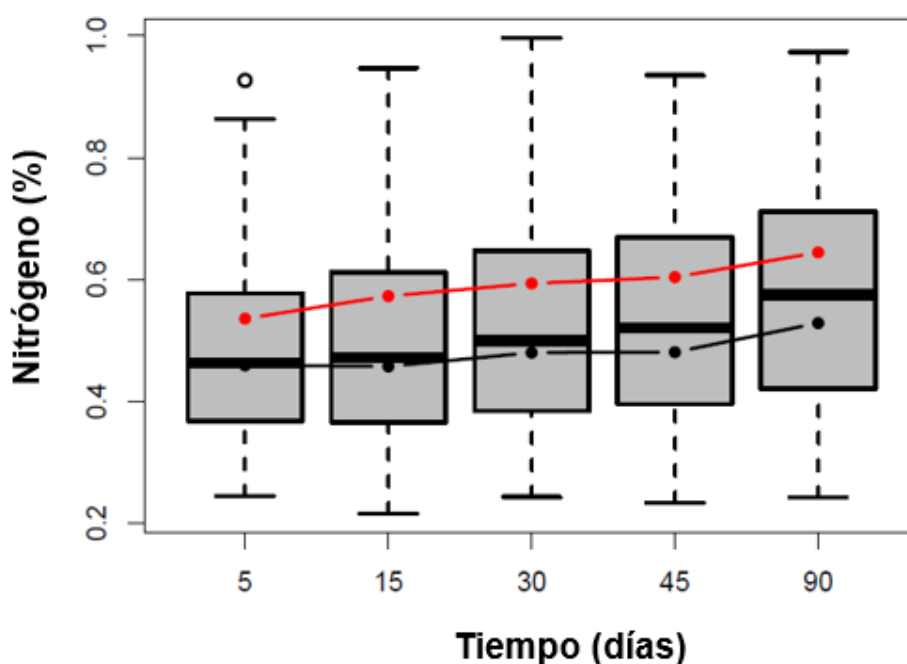


Fig. 11. Evolución del nitrógeno (%) de maíz (negro) y sorgo (rojo) durante los 90 días de permanencia del rastrojo en el campo. Cada punto es la media de dos híbridos. Los boxplots incluyen los datos de ambas especies.

Aunque no se detectaron diferencias significativas entre cultivos, la media de porcentaje de carbohidratos fue significativamente mayor en sorgo respecto a maíz a los 5 días (14,5 y 9,7 % para sorgo y maíz respectivamente; Fig. 12, Tabla 7) y disminuyó marcadamente durante los primeros 30 días en ambos cultivos. Las diferencias entre cultivos se mantuvieron, siendo significativas a los 15 días de colocadas las muestras en el lote, donde se cuantificó 10,7 y 7,7 % para sorgo y maíz respectivamente. A partir de los 30 días, los valores se estabilizaron en torno a 2-3% de carbohidratos solubles en ambos cultivos. Los ambientes con menores porcentajes de carbohidratos solubles en general fueron aquellos asociados a fechas de siembra tardías (Fig. S6). En general el sorgo evidenció mayor cantidad de carbohidratos solubles que el maíz en la mayoría de los ambientes (Fig. 12; Fig. S6).

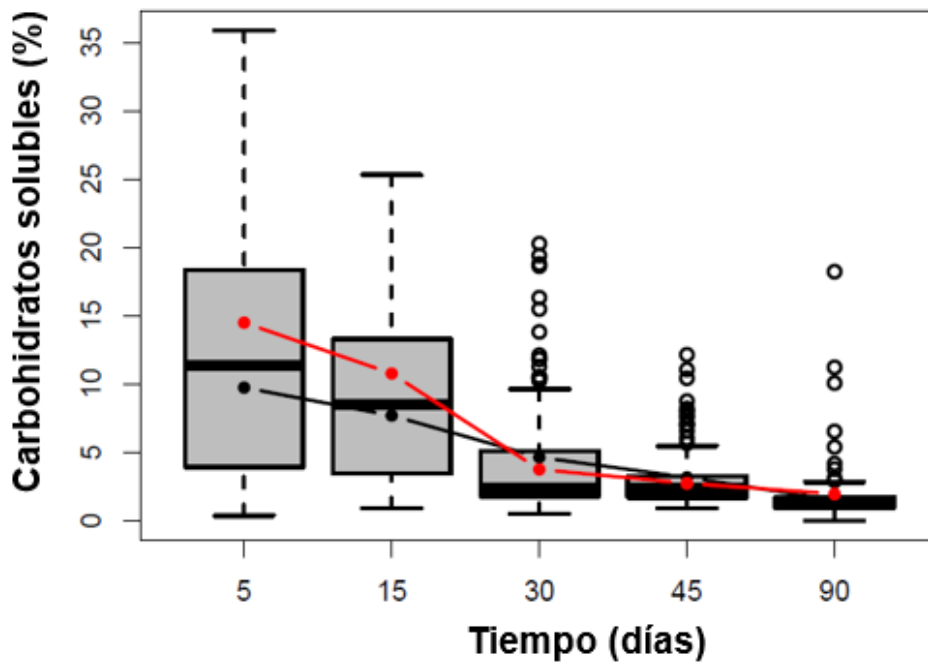


Fig. 12. Evolución de los carbohidratos solubles (%) de maíz (negro) y sorgo (rojo) durante los 90 días de permanencia del rastrojo en el campo. Cada punto es la media de dos híbridos. Los boxplots incluyen los datos de ambas especies.

Discusión

Los resultados del **Capítulo III** mostraron que los cultivos de maíz y sorgo alcanzaron la madurez fisiológica con similares cantidades de biomasa total, siendo marcadas las diferencias en el índice de cosecha. Esto resultó en una diferente cantidad de rastrojo remanente a la cosecha del cultivo, siendo en sorgo superior al maíz. Sin embargo, la tasa de descomposición del rastrojo tendió a ser mayor en sorgo. Después de transcurridos aproximadamente tres meses en el campo, la biomasa remanente de ambos cultivos fue la misma y solo superior en sorgo en fechas de siembra tardías. La biomasa remanente representó un 70 y 80% de la cantidad inicial para sorgo y maíz, respectivamente. Estos resultados difieren a los reportados por Lynch et al. (2016), los cuales identificaron similares tasas de descomposición entre cultivos y una disminución de alrededor de un 40% en la biomasa remanente en el mismo periodo de tiempo. Si bien la diferente tasa de descomposición entre trabajos puede estar ligado a cuestiones ambientales, las diferencias entre especies evidencian una diferente calidad del rastrojo entre maíz y sorgo.

El sorgo presentó mayores porcentajes de carbohidratos solubles en el rastrojo comparado con maíz a cosecha, lo que concuerda con una mayor área foliar verde en comparación con maíz (**Capítulo 3**). Si bien no se registró el área foliar verde a madurez, es esperable que el sorgo presente mayores valores relativo al maíz. Esto también concuerda con la característica stay-green de genotipos comerciales actuales de sorgo (Borrell et al., 2000). Asimismo, el sorgo presentó mayor porcentaje de nitrógeno a cosecha en el rastrojo, lo que también se asociaría con una mayor descomposición. Sin embargo, este mayor porcentaje de nitrógeno fue observado en ciertos ambientes (fechas tardías y en el ambiente con limitación hídrica), lo que sugiere que no es el atributo más importante en explicar la diferente tasa de descomposición entre cultivos. Las implicancias de estos resultados son importantes, ya que indica que la mayor cantidad de rastrojo que se espera deje un cultivo de sorgo en situaciones productivas comunes no es estable en el tiempo. La única excepción fueron los ambientes de fechas tardías, donde la diferencia de rastrojo entre cultivos fue significativamente a favor del sorgo asociado a la caída en partición reproductiva en estas fechas de siembra (**Capítulo 3**).

El rastrojo de maíz es más estable en el tiempo, por lo que la cantidad de rastrojo queda determinada principalmente por el manejo del cultivo. Por ejemplo, las fechas de siembra tardías implican menor cantidad de rastrojo a madurez debido a una menor biomasa total acumulada (**Capítulo 3**). Es evidente además una mayor remobilización de asimilados que se traducen en menores valores de carbohidratos solubles en el rastrojo a cosecha. Esto sugiere que las fechas tardías de maíz generan poco rastrojo y mayormente estructural. Teniendo en cuenta que casi el 60% del maíz en Argentina es actualmente tardío, los

resultados de esta tesis sugieren una menor cantidad de carbono aportado al suelo en los sistemas con alta participación de maíz tardío.

En ambos cultivos, la descomposición del rastrojo fue mayormente dependiente de las condiciones ambientales (principalmente temperatura) durante el lapso que el rastrojo estuvo en el campo. Los porcentajes de descomposición de rastrojo fluctuaron entre 3,7 y 36,8% para maíz y 11,2 y 41,9% en el caso del sorgo. Los menores porcentajes se observaron en los ambientes de fecha de siembra tardía, por lo que se puede inferir que dos factores fueron determinantes. Por un lado, la menor cantidad de carbohidratos solubles asociada a una mayor removilización de carbohidratos en fechas tardías (Cirilo y Andrade, 1996) y, por otro lado, la exposición a menores temperaturas durante el periodo de descomposición. Entre los ambientes en los que se exploraron diferentes condiciones de disponibilidad hídrica fue remarcable la diferencia a nivel productivo en la biomasa total a favor del maíz (Fig. S4), destacando la mayor potencialidad del cultivo (Muchow, 1989a; **Capítulos II y III**). Esta situación generó diferencias en la cantidad de rastrojo durante todo el análisis de descomposición. El nivel de carbohidratos solubles a cosecha en esta condición en maíz fue bajo (Fig. S6), lo que también se asociaría con una menor descomposición.

El porcentaje de nitrógeno del material remanente tuvo incrementos similares entre las especies, alcanzando ca. 20% más de concentración nitrogenada al finalizar el análisis (16.1 y 20.8% para maíz y sorgo, respectivamente). Estos incrementos son acordes a los descritos por Berg y McClaugherty (2008) en los cuales se analizó la descomposición de distintas especies vegetales, entre ellas el maíz. Sus resultados mostraron que la concentración de nitrógeno se incrementa en las primeras etapas de descomposición hasta estabilizarse luego de un periodo de tiempo mayor al estudiado en este capítulo. Los resultados, sin embargo, no se condicen con aquellos obtenidos por Lynch et al. (2016) y Tian et al. (1992) que mostraron una disminución en la concentración de nitrógeno en ambas especies a lo largo del tiempo. El porcentaje de nitrógeno tiene influencia directa en la tasa de descomposición de carbohidratos estructurales. A mayor concentración de nitrógeno, es esperable una ralentización en la descomposición de dichos carbohidratos por lo que promoverá humus más estable (Berg y McClaugherty, 2008). El nitrógeno impacta en la degradación de la lignina de dos formas, biológica y químicamente. Biológicamente, a medida que es mayor la concentración de nitrógeno, mayor es la represión en la formación de enzimas ligninolíticas. En cuanto a los procesos químicos, el inicio de la descomposición de la lignina conlleva la incorporación de nitrógeno y generan estructuras de difícil degradación (Berg y McClaugherty, 2008).

El nivel inicial y la tasa de incremento de la concentración de nitrógeno fue variable según las condiciones de crecimiento o las condiciones ambientales a las que fueron expuestos los rastrojos. Al igual que lo observado con la cantidad de rastrojo, los ambientes

de fecha de siembra tardía mostraron menor concentración de nitrógeno inicial y menor incremento del porcentaje de nitrógeno. La fertilización nitrogenada mejoraría la calidad del rastrojo, ya que aumenta la concentración de nitrógeno en el rastrojo en ambos cultivos.

Los carbohidratos solubles son los que muestran mayor tasa de descomposición en las primeras etapas de descomposición de los rastrojos, lo que es acorde con estudios previos (Lynch et al., 2016; Berg y McClaugherty, 2008). Los carbohidratos solubles son los de más fácil disponibilidad para los microorganismos del suelo. En general, el sorgo tuvo rastrojos con mayor concentración de carbohidratos que rápidamente fueron degradados, alcanzando valores similares a los del maíz con concentraciones mínimas.

Conclusiones

El rastrojo que dejaron los cultivos de maíz y sorgo variaron en cantidad y calidad. El sorgo generó más rastrojo que el maíz, aunque el mismo es de mayor descomposición probablemente asociado a una mayor concentración de carbohidratos solubles y a una mayor concentración de nitrógeno. Debido a esto, las diferencias en cantidad a favor del sorgo observadas a cosecha pueden desaparecer luego de dos o tres meses.

Las variables de manejo como la fecha de siembra y la fertilización afectan significativamente la cantidad y calidad del rastrojo a cosecha, mientras que la fecha de siembra afecta la velocidad de descomposición del mismo.

Capítulo V

Discusión general

El principal objetivo de la presente tesis fue comparar los cultivos de sorgo y maíz a través de distintas aproximaciones (datos públicos y experimentos a campo) y analizar dos variables finales: rendimiento en grano y la biomasa remanente. En este capítulo de discusión general se resumen los principales resultados y la conexión entre los distintos capítulos, así como las implicancias de los mismos en términos productivos. Finalmente, se discutirán futuras líneas de investigación.

El **Capítulo II** deja en evidencia usando datos públicos de las consecuencias de la menor inversión en genética y manejo en sorgo en comparación con maíz a lo largo de los últimos 50 años. Esta diferente inversión se tradujo en una reducción consistente de la superficie de sorgo en conjunto con un desplazamiento del mismo hacia regiones menos productivas. Por el contrario, el cultivo de maíz fue aumentando en superficie y rendimiento, lo que es acorde con las mejoras genéticas y de manejo del cultivo. El mejoramiento genético en maíz ha logrado híbridos tolerantes a ambientes más restrictivos (Tollenaar y Lee, 2002; Campos et al., 2004; Mueller et al., 2019), ocupando ambientes y momentos del año que antiguamente no eran recomendados para este cultivo. La fertilización nitrogenada ha sido mayormente difundida en el cultivo de maíz, generando ventajas productivas en comparación con el sorgo (ReTAA, 2020; Fertilizar Asociación Civil, 2020). En sorgo en cambio, la ganancia genética para rendimiento en grano y la inversión en tecnología y manejo ha sido más reducida y también se observa en los rendimientos a nivel productor. A diferencia de maíz, actualmente estos muestran cierto estancamiento, lo que representa un llamado de atención hacia promover una mayor inversión en el cultivo de sorgo. Este aspecto resulta importante hacia el desarrollo de sistemas sustentables y que promuevan la diversidad de cultivos (Khoury et al. 2014).

Los resultados observados en el **Capítulo II** demuestran que el rendimiento de maíz sobrepasa al de sorgo en todas las regiones productivas del país. El sorgo dejó de ser la opción más válida en comparación con el maíz en los ambientes con mayores restricciones ambientales. Las diferencias en rendimiento observadas entre cultivos tienen cierto sesgo debido a la elección de lotes de mayor potencial para maíz y de menor potencial para sorgo, por lo que resultaba interesante estudiar simultáneamente ambos cultivos (**Capítulo III**).

Los resultados de experimentos donde ambos cultivos crecieron en forma simultánea y bajo un mismo manejo (a excepción de la densidad de siembra) mostraron una ventaja del maíz sobre el sorgo bajo diferentes condiciones productivas (rendimientos entre 1,7 y 10,8

Mg ha⁻¹). Las diferencias observadas a campo están sustentadas fundamentalmente por las marcadas diferencias en la ganancia genética y la creciente tolerancia a estrés en maíz (Tollenaar y Lee, 2002; Campos et al., 2004; Gizzi y Gambin, 2016; Borrás y Vitantonio-Mazini, 2018). Estos resultados concuerdan con los observados en el **Capítulo II**. A partir de datos de diferentes trabajos publicados a los que se le sumaron datos de esta tesis se pudo determinar que el maíz supera al sorgo con rendimientos inferiores a los descritos en trabajos previos de distintas épocas y regiones productivas del mundo (Muchow, 1989; Singh y Singh, 1995; Norwood et al., 1997; Farré y Faci, 2006, Assefa et al., 2014). Si bien es necesario explorar otras regiones y ambientes más restrictivos, este resultado explica en parte la reducción de superficie de sorgo. Otros aspectos, como la falta de mejora en tecnología o manejo, dificultades en su comercialización y decisiones políticas del momento, se suman en explicar esta tendencia.

Al analizar distintas variables ecofisiológicas de los cultivos fue posible establecer cuáles son las principales determinantes de las diferencias de rendimiento observadas. Ambos cultivos acumularon similar biomasa total aérea a madurez, pero se hallaron diferencias en la acumulación de biomasa durante el llenado de granos, lo que es acorde con diferencias en la eficiencia del uso de la radiación entre cultivos observada previamente (Muchow y Davis, 1988; Muchow, 1989a; 1989b). La variable que mostró mayor diferencia entre cultivos y explicó las diferencias en el rendimiento fue el índice de cosecha. El mejoramiento en maíz ha logrado aumentar (Duvick, 1997; Duvick et al. 2004b) o lograr estabilidad de este atributo en distintos ambientes productivos (Crosbie, 1982; Meghji et al., 1984; Russell, 1985), mientras que en sorgo el índice de cosecha no ha aumentado con el mejoramiento genético (Gizzi y Gambin, 2013; Miller y Kebede, 1984). Dado que el tiempo a antesis en sorgo es significativamente más largo que maíz, se podría hipotetizar que anticipar el tiempo a floración en sorgo aumentaría su índice de cosecha. De esta manera se ubicaría el periodo crítico y el periodo de llenado en mejores condiciones de crecimiento. Los altos valores de índice de área foliar obtenidos en sorgo soportan la idea de que anticipar el tiempo a floración no afectaría alcanzar niveles críticos de área foliar alrededor de floración (**Capítulo III**). Estudios previos describen la identificación de QTLs relacionados a la partición reproductiva del cultivo (Spagnoli et al., 2016), por lo que el incremento de esta variable en sorgo debería ser una de las principales prioridades de los programas de mejora por rendimiento.

El contraste entre cultivos no solo se observó en el rendimiento final sino también en la cantidad de rastrojo remanente a madurez, consecuencia de las diferencias en el índice de cosecha (**Capítulo III**). Se observó una mayor cantidad de material vegetal remanente por parte del sorgo, pero dicho rastrojo se descompuso a mayor velocidad que en maíz (**Capítulo IV**). Esto demostró que la calidad del rastrojo difiere entre cultivos, siendo el porcentaje de

carbohidratos solubles la principal variable medida en explicar la diferente velocidad de descomposición. Uno de los aspectos positivos del cultivo de sorgo y lo que ha favorecido su difusión a pesar de los menores rendimientos es la cantidad de rastrojo que aporta al suelo (Carrasco et al. 2011). Los resultados de esta tesis demuestran que esta ventaja del sorgo puede no ser tal si ese rastrojo se pierde rápidamente. Los mayores porcentajes de nitrógeno observados en el rastrojo de sorgo sugieren que genera un humus más estable (Berg y McClaugherty, 2008) pero esta hipótesis requiere nuevos estudios. El ambiente y manejo jugó un rol importante modificando significativamente la cantidad y calidad del rastrojo a madurez. Siembras tardías de maíz reducen de manera importante la cantidad de rastrojo en el suelo, lo que tiene importantes implicancias para la sustentabilidad de los sistemas.

La calidad del material remanente puede ser evaluada a partir de diferentes características (Burgess et al. 2001; Johnson et al. 2007; Tian y Brussaard 1992). En este caso se evaluó el contenido de nitrógeno y carbohidratos solubles por ser dos variables que explican en gran medida las diferencias en velocidad de descomposición (Johnson et al. 2007). El porcentaje de nitrógeno alcanzó incrementos del 20%, similares a los descritos en trabajos previos (Berg y McClaugherty, 2008). Según este mismo trabajo, el incremento en el porcentaje de nitrógeno en el rastrojo puede llevar a una menor tasa de descomposición de lignina. La elección de la fecha de siembra y la fertilización nitrogenada de los cultivos tienen efecto directo sobre el porcentaje de dicho nutriente en los residuos remanentes. Los carbohidratos solubles son fuente de energía de rápida disponibilidad para los microorganismos del suelo, los cuales pueden acelerar el proceso de descomposición. Este efecto tiene mayor efecto en sorgo en los primeros días postcosecha, ya que se observan diferencias en la cantidad en favor del mismo con respecto al maíz. Las diferencias entre ambiente y manejo tienen marcado efecto sobre la cantidad de dichas partículas remanentes en el rastrojo.

Sustentado por estos resultados y en trabajos previos, se puede concluir que el sorgo aporta mayor cantidad de rastrojo, con mayor cantidad de carbohidratos solubles, de mayor concentración de nitrógeno y más rápida descomposición que maíz. A mayor concentración de nitrógeno, es esperable una ralentización en la descomposición de carbohidratos estructurales por lo que promoverá la formación de estructuras más estables en el suelo.

Contraste de hipótesis asociada a los objetivos específicos

Durante el desarrollo de esta tesis se han presentado y analizado evidencias según los objetivos planteados, permitiendo responder a las hipótesis originales. A continuación, se resaltan los resultados del contraste de cada hipótesis formulada en el **Capítulo I** de la presente tesis.

El primer **objetivo** de la presente tesis fue “analizar las tendencias de rendimientos históricos de ambos cultivos” donde la **hipótesis** asociada indicaba que “el maíz supera al sorgo en la mayoría de los ambientes productivos. La mayor ganancia genética en maíz en comparación con sorgo es la principal causa de la diferencia actual de rendimiento entre cultivos”. Los resultados obtenidos en el **Capítulo II** presentan evidencias suficientes para **no rechazar** la hipótesis planteada.

El segundo **objetivo** fue “explorar diferencias de rendimiento entre maíz y sorgo en un rango de situaciones productivas en la región productiva central de Argentina” y la **hipótesis** asociada indicaba que “existen atributos específicos del canopeo que explican esta mayor diferencia de rendimiento, como el mayor índice de cosecha de maíz en comparación con sorgo ligado a su mayor tolerancia al estrés”. Los resultados del **Capítulo III** presentan evidencias suficientes para **no rechazar** la hipótesis planteada.

El último **objetivo** de la tesis fue “evaluar cantidad y calidad de biomasa remanente de sorgo respecto al maíz” y su respectiva **hipótesis** fue que “la biomasa remanente de sorgo es significativamente superior al maíz en diversas condiciones de crecimiento pero sería más lábil por su menor relación C:N”. Los resultados demostrados en el **Capítulo III** presentan evidencias suficientes para **no rechazar** la hipótesis planteada.

Implicancias para futuras investigaciones

A partir de la realización de la tesis se han podido identificar algunos aspectos que no han sido totalmente elucidados, y que se vislumbran como nuevos interrogantes de interés práctico y académico para estudiar en el futuro. Algunos de estos se detallan a continuación:

- *Uso de modelos de simulación para identificar los ambientes y el manejo que maximiza el rendimiento y biomasa remanente en cada cultivo.*

Los modelos de simulación son herramientas de gran utilidad para simular el desarrollo y crecimiento de diversos cultivos (Passioura, 1996). Entre sus principales usos, se destaca la posibilidad de explorar combinaciones de genotipo x ambiente x manejo que son difíciles de llevar a cabo mediante experimentación *in situ* por sus altos costos y tiempos requeridos (Hammer y Jordan, 2007). En este sentido, las brechas de rendimiento entre cultivos pueden ser exploradas mediante modelos de simulación, con el objetivo de definir el ambiente y manejo que implica una ventaja en los rendimientos de sorgo respecto a maíz. Existen modelos de simulación de software libre (e.g., APSIM) con una fuerte base ecofisiológica funcional y ampliamente difundido tanto en sorgo como en maíz (Hammer et al., 2010) que podrían utilizarse en este sentido.

De la misma manera se podría explorar el impacto sobre la biomasa remanente, que se podría complementar con simulaciones que exploren el impacto de la inclusión de estos cultivos sobre el rastrojo en diferentes tipos de rotaciones.

- *Determinación de las principales variables detrás de las diferencias observadas entre cultivos a partir de información climática y edáfica.*

Hoy en día hay disponibles distintas fuentes de información climatológica y edáfica a nivel global. A partir de esta información grillada se podría caracterizar ambientalmente cualquier punto georreferenciado o región de interés. Uniendo los sets de datos de productividad, como los utilizados en la presente tesis, y la información ambiental se podrían identificar las variables que más se asocian con las diferencias en los rendimientos de diferentes cultivos.

Actualmente la información obtenida a través de imágenes satelitales son fuente de información ambiental de plataformas como NASAPOWER, Open Land Map o ISRIC entre otras. Esta información es cada vez más precisa y confiable para la caracterización ambiental agronómica por lo que día a día serán cada vez más útiles en los sistemas productivos. La información productiva obtenida a través de entrevistas, encuestas y últimamente de imágenes satelitales por los distintos entes públicos está más disponible y su confiabilidad va en aumento. La conjunción de toda esta información genera un sinfín de posibles usos y análisis (Hajjarpoor et al. 2021; Hernández et al. 2021; Smidt et al. 2016)

- *Identificación de atributos potenciales de mejora del cultivo de sorgo.*

Los modelos de simulación descriptos previamente son una herramienta útil para explorar el impacto de cambios en atributos fenotípicos de interés (Boote et al., 1990). En este caso, se podría explorar por ejemplo el impacto de cambios de la duración del tiempo a antesis en sorgo, ya sea a través de cambios en el tiempo a iniciación de panoja (Kumar et al., 2009) o en la temperatura base (Tirfessa et al., 2020).

Explorar experimentalmente una diversidad de genotipos de sorgo de diferente ciclo también permitiría conocer el impacto del tiempo a antesis sobre el rendimiento. Comparado con los ciclos intermedios-largos usados en la presente tesis, estudios previos sugieren que los ciclos intermedios y cortos logran mayor rendimiento en diversidad de ambientes y fechas de siembra (Carcedo et al., 2021).

- *Impacto de variables de manejo sobre la cantidad y calidad de la biomasa remanente y su descomposición.*

Los resultados del **Capítulo IV** podrían ampliarse a otros sitios y diversidad de manejo a fin de explorar el impacto de diferentes variables sobre la cantidad y calidad de la biomasa remanente. Se podrían incorporar otros indicadores de calidad como el porcentaje de lignina cuya variación entre cultivos o genotipos no se ha determinado en esta tesis.

- *Análisis de márgenes económicos de ambos cultivos a nivel regional.*

Esta tesis no exploró un análisis económico de ambos cultivos, que tiene gran impacto a la hora de la toma de decisiones por parte del productor. Es posible que la diferente rentabilidad explique las causas del desplazamiento y reducción del área sembrada de sorgo, pero también podría ayudar a determinar bajo qué tipo de manejo o ambientes es posible obtener mayor rentabilidad en el cultivo de sorgo.

Bibliografía

- Alvarez, R., Lavado, R. S., 1998. Climate, organic matter and clay content relationships in the Pampa and Chaco soils, Argentina. *Geoderma* 83, 127-141.
- Amaducci, S., Amaducci, M.T., Benati, R., Venturi, G., 2000. Crop yield and quality parameters of four annual fibre crops (hemp, kenaf, maize and sorghum) in the North of Italy. *Ind. Crop Prod.* 11, 179-186.
- Andrade, F. H., 1995. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. *Field Crops Res.* 41, 1-12.
- Andrade, F. H., Vega, C., Uhart, S., Cirilo, A., Cantarero, M., Valentinuz, O., 1999. Kernel number determination in maize. *Crop Sci.* 39, 453-459.
- Assefa, Y., Carter, P., Hinds, M., Bhalla, G., Schon, R., Jeschke, M., Paszkiewicz, S., Smith, S., Ciampitti, I. A., 2018. Analysis of long-term study indicates both agronomic optimal plant density and increase maize yield per plant contributed to yield gain. *Sci. Rep.* 8, 1-11.
- Assefa, Y., Roozeboom, K., Thompson, C., Schlegel, A., Stone, L., Lingenfelter, J. E., 2014. Corn and grain sorghum comparison. Elsevier, Oxford.
- Barros, V.R., Boninsegna, J.A., Camilloni, I.A., Chidiak, M., Magrín, G.O., Rusticucci, M., 2014. Climate change in Argentina: trends, projections, impacts and adaptation. *WIREs Climate Change* 6, 151-169.
- Bates, D., Maechler, M., Bolker, B., Walker, S., 2015. Fitting linear mixed-effects models using lme4. *J. Stat. Softw.* 67, 1-48. <https://CRAN.R-project.org/package=lme4>
- Benson, G. O., Pearce, R. B., 1987. Corn perspective and culture. Pages 1–29 in S. A. Watson and P. E. Ramstad, eds. *Corn: Chemistry and technology*. American Association of Cereal Chemists, Inc., St. Paul, MN.
- Berenguer, M.J., Faci, J.M., 2001. Sorghum (*Sorghum Bicolor* L. Moench) yield compensation processes under different plant densities and variable water supply. *Eur. J. Agronomy.* 15, 43-55.
- Berg, B., McClaugherty, C., 2008. Plant litter decomposition, humus formation, carbon sequestration. Springer, Berlin, Germany.
- Black, A. L., Power, J. F., 1965. Effect of chemical and mechanical fallow methods on moisture storage, wheat yields, and soil erodibility 1. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 29, 465-468.
- Bolsa de Cereales, 2021. Panorama agrícola semanal. <http://www.bolsadecereales.org> (consultado en julio 18, 2019).
- Borrás, L., Vitantonio-Mazzini, L. N., 2018. Maize reproductive development and kernel set under limited plant growth environments. *J. Exp. Bot.* 69, 3235-3243.
- Borrell, A. K., Hammer, G. L., Henzell, R. G., 2000. Does maintaining green leaf area in

- sorghum improve yield under drought? II. Dry matter production and yield. *Crop Sci.* 40, 1037-1048.
- Brihet, J., 2017. Lanzamiento campaña gruesa 2017-2018. Departamento de Investigación y Prospectiva. Bolsa de Cereales. http://www.bolsadecereales.com/imagenes/retaa/2017-04/Lanzamiento_Gruesa_Bloque_ReTAA_27_09_17.pdf
- Brihet, J., Gayo, S., 2016. Análisis regional y adaptación de tecnologías. Departamento de Investigación y Prospectiva. Bolsa de Cereales. http://www.bolsadecereales.com/imagenes/retaa/2016-08/2016/Simposio_Sorgo_AIANBA_ReTAA_BC_24_08_16.pdf
- Burgess, M.S.; Mehuys, G.R.; Madramootoo C.A. 2001. Decomposition of grain-corn residues (*Zea mays* L.): A litterbag study under three tillage systems. *Can. J. Soil Sci.* 82, 127-138.
- Calderini, D. F., Slafer, G. A., 1998. Changes in yield and yield stability in wheat during the 20th century. *Field Crops Res.* 57, 335-347.
- Camargo, M. B. P., Hubbard, K. G., 1999. Drought sensitivity indices for sorghum crop. *J. Prod. Agric.* 12, 312–316.
- Campos, H., Cooper, M., Edmeades, G. O., Löffler, C., Schussler, J. R., Ibañez, M., 2006. Changes in drought tolerance in maize associated with fifty years of breeding for yield in the U.S. corn belt. *Maydica* 51, 369-381.
- Campos, H., Cooper, M., Habben, J. E., Edmeades, G. O., Schussler, J. R., 2004. Improving drought tolerance in maize: A view from industry. *Field Crops Res.* 90, 19-34.
- Canfield, D.E., Glazer, A. N., Falkowski, P. G., 2010. The evolution and future of earth's nitrogen cycle. *Science* 330, 192–196.
- Carcedo, A. J. P., Cejas, E., Gambin, B. L., 2021. Adapting sorghum sowing date and genotype maturity to seasonal rainfall variation in a temperate region. in *Silico plants*. 3, 1-12.
- Carcedo, A. J. P., Gambin, B. L., 2019. Sorghum drought and heat stress patterns across the Argentinean temperate central region. *Field Crops Res.* 241, 107552.
- Carcedo, A. J. P., Pardo, P. A., Gambin, B. L., 2017. Secondary traits explaining sorghum genotype by environment interactions for grain yield. *Crop Pasture Sci.* 68, 599-608.
- Cardoso, L. M., Silva Pinheiro, S., Stampini Duarte Martino, H., Pinheiro-Sant'Ana, H. M., 2017. Sorghum (*Sorghum bicolor* L.): Nutrients, bioactive compounds, and potential impact on human health. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 57, 372-390.
- Carrasco, N., Zamora, M., Melin, A. 2011. Manual de sorgo. Ediciones INTA. Buenos Aires, Argentina.

- Cassman, K.G., Dobermann, A., Walters, D. T., Yang Haishum., 2003. Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. *Annual Review of Environment and Resources* 28, 315-358.
- Chen, X. P., Cui, Z. L., Vitousek, P. M., Cassman, K. G., Matson, P. A., Bai, J. S., Meng, Q. F., Hou, P., Yue, S. C., Römheld, V., Zhang, F. S., 2011. Integrated soil-crop system management for food security. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 108, 6399-6404.
- Cirilo, A.G., Andrade, F.H., 1996. Sowing date and kernel weight in maize. *Crop Sci.* 36, 325-331.
- Collins, H. P., Elliot, L. F., Rickman, R. W., Bezdicek, D. F., Papendick, R. I., 1990. Decomposition and interactions among wheat residue components. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54, 780–785.
- Cordone, G., Ferrari, M. C., Ostojic, J. J. R., Planas, G., 1993. Caracterización de los residuos de cosecha de los principales cultivos del norte de la provincia de Buenos Aires. *Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.* 14. 1993 10 25-29.
- Crosbie T.M., 1982. Changes in physiological traits associated with long-term breeding efforts to improve grain yield of maize. pp. 206-223. In: H.D. Loden, D. Wilkinson (Eds.), *Proc. 37th Annual Corn & Sorghum Res. Conf.*, 5-9 Dec. 1982, Vol. 37. American Seed Trade Association, Washington, DC, Chicago, IL.
- Curin, F., Severini, A. D., González, F. G., Otegui, M. E., 2020. Water and radiation use efficiencies in maize: Breeding effects on single- cross Argentine hybrids released between 1980 and 2012. *Field Crops Res.* 246, 107683.
- Diaz, R. J., Rosenberg, R., 2008. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science* 321, 926–929.
- Dirección de Biotecnología, 2019. Secretaría de Valor Agregado, Secretaría de Agroindustria de la República Argentina. Available in <https://www.argentina.gob.ar/agricultura/alimentos-y-bioeconomia/ogm-comerciales> (consulted July 18, 2019).
- Doggett, H., 1988. *Sorghum*. Wiley, New York.
- Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. T., Smith, F., 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Anal chem*, 28, 350-356.
- Duvick, D. N., 1997 What is yield? pp. 332-335. In: G.O. Edmeades, et al. (Eds.), *Developing drought- and low N- tolerant maize*. Proceedings of a Symposium, March 25-29, 1996, CIMMYT, El Batán, Mexico. CIMMYT, México, D.F.
- Duvick, D. N., Smith, J.S.C, Cooper, M., 2004b. Long-term selection in a commercial hybrid maize breeding program. pp. 109-151. In: J. Janick (Ed.), *Plant Breeding Reviews*. Part 2. Long Term Selection: Crops, Animals, and Bacteria, Vol. 24. John Wiley & Sons, New

York.

- Echarte, L., Andrade, F. H., Vega, C. R. C., Tollenaar, M., 2004. Kernel number determination in Argentinean maize hybrids released between 1965 and 1993. *Crop Sci.* 44, 1654-1661.
- Echarte, L., Andrade, F.H., 2000. Harvest index stability of Argentinean maize hybrids released between 1965 and 1993. *Field Crops Res.* 82, 1-12.
- FAO, 2018. Food and Agricultural Organization of the United Nations. Statistics of farming production. Maize and sorghum. Available in <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> (consulted July 18, 2018).
- FAOSTAT, Food and Agricultural Organization of the United Nations Statistics. 2017. <http://faostat3.fao.org/home/E>
- Farré, I., Faci, J. M., 2006. Comparative response of maize (*Zea mays* L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) to deficit irrigation in a Mediterranean environment. *Agricultural Water Management* 83, 135-143.
- Ferraris, G. N., Barraco, M., Ventimiglia, L., Couretot, L., Mousegne, F., 2013. Fertilización en sorgo en el norte y centro-oeste de Buenos Aires. Rendimiento y eficiencia comparada al maíz. *International Plant Nutrition Institute. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica.* 12/2013 19-22.
- Fertilizar Asociación Civil, 2020. Estadísticas de consumo de fertilizantes. https://www.fertilizar.org.ar/?page_id=468 (consulted March 27, 2020).
- Fick, S. E., Hijmans, R. J., 2017. Worldclim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* 37, 4302-4315.
- Fischer, G., Shah, M., Tubiello, F. N., Velhuizen, H. V., 2005. Socio-economic and climate change impacts on agriculture: an integrated assessment, 1990–2080. *Philos T R Soc B* 360, 2067-2083.
- Fischer, R. A., 2015. Definitions and determination of crop yield, yield gaps, and of rates of change. *Field Crops Res.* 182, 9-18.
- Fischer, R. A., Byerlee, D., Edmeades, G., 2014. Crop yields and global food security: will yield increase continue to feed the world? *ACIAR Monograph No. 158.* Australian Centre for International Agricultural Research, Canberra.
- Flores, F., Parodi, B., 2011. Maíces Bt: manejo de la resistencia de los insectos blanco y nuevos eventos disponibles. *EEA INTA Marcos Juárez, Argentina.*
- Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., Chapin, F. S., Coe, M. T., Daily, G. C., Gibbs, H. K., Helkowski, J. H., Holloway, T., Howard, E. A., Kucharik, C. J., Monfreda, C., Patz, J. A., Prentice, I. C., Ramankutty, N., Snyder, P. K., 2005. Global consequences of land use. *Science* 309, 570-574.

- 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, 337-342.
- Follett RF. 2001. Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils. *Soil and Tillage Research* 61, 77–92.
- Gallo, K.P., Daughtry, C.S.T., 1986. Techniques for measuring intercepted and absorbed photosynthetically active radiation in corn canopies. *Agron. J.* 78, 752–756.
- Gambin, B. L., Borrás L., 2011. Genotypic diversity in sorghum inbred lines for grain-filling patterns and other related agronomic traits. *Crop Pasture Sci.* 62, 1026-1036.
- Gambin, B. L., Borrás, L., Otegui, M. E., 2008. Kernel weight dependence upon plant growth at different grain-filling stages in maize and sorghum. *Australian Journal of Agricultural Research* 59, 280-290.
- Gambin, B. L., Coyos, T., Di Mauro, G., Borrás, L., Garibaldi, L., 2016. Exploring genotype, management, and environmental variables influencing grain yield of late-sown maize in central Argentina. *Agricultural Systems* 146, 11-19.
- Gambin, B.L., Borrás, L. 2010. Resource distribution and the trade-off between seed number and seed weight: a comparison across crop species. *Annals of Applied Biology* 156, 91–102.
- Gizzi, G., Gambin, B. L., 2016. Eco-physiological changes in sorghum hybrids released in Argentina over the last 30 years. *Field Crops Res.* 188, 41-49.
- Gregorich, E. G., Carter, M. R., Angers, D. A., Monreal, C., Ellert, B., 1994. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Canadian journal of soil science*, 74, 367-385.
- Hahn, R. R. 1970. Sorghum Production and Utilization. J. S. Wall und W. M. Ross, Major Feed and Food Crops in Agriculture and Food Series. AVI Publishing Company Inc., Connecticut, US.
- Hajjarpoor, A., Kholová, J., Pasupuleti, J., Soltani, A., Burrige, J., Degala, S.B., Gattu, S., Murali, T.V., Garin, V., Radhakrishnan, T., Vadez, V. 2021. Environmental characterization and yield gap analysis to tackle genotype-by-environment-by-management interactions and map region-specific agronomic and breeding targets in groundnut. *Field Crops Res.* 267, 108160.
- 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*, Pearson, C.J. (ed.), Vol,18. Elsevier, Amsterdam, pp. 413-450.
- Hammer, G. L., Carberry, P. S., Muchow, R.C. 1993. Modelling genotypic and environmental

- control of leaf area dynamics in grain sorghum. *Field Crops Res.* 33, 293-310.
- Heiniger, R. W., Vanderlip, R. L., Kofoid, K. D. 1993 Caryopsis weight patterns within the sorghum panicle. *Crop Sci.* 33, 543–549.
- Hernández, C.M., Faye, A., Ly, M.O., Stewart, Z.P., Vara Prasad, P.V., Mendes Bastos, L., Nieto, L., Carcedo, A.J.P., Ciampitti, I.A. 2021. Soil and climate characterization to define environments for summer crops in senegal. *Sustainability* 13, 11739.
- Hernández, F., Amelong, A., Borrás L., 2014. Genotypic differences among Argentinean maize hybrids in yield response to stand density. *Agron. J.* 106, 2316-2324.
- Hijmans, R. J., van Etten, J., 2012. raster: Geographic analysis and modeling with raster data. R package version 2,0-12. <http://CRAN.R-project.org/package=raster> (consulted April 1, 2020).
- Huggins, D. R., Buyanovsky, G. A., Wagner, G. H., Brown, J. R., Darmody, R. G., Peck, T. R., Lesoing, G. W., Vanotti, M. B., Bundy, L. G., 1998. Soil organic C in the tallgrass prairie-derived region of the corn belt: effects of long-term crop management. *Soil and Tillage Research* 47, 219–234.
- Hulse, J. H., Laing, E. M., Pearson, O. E., 1980. Sorghum and the millets: their composition and nutritive value. Academic Press, London. UK.
- Hunter, J. L., TeKrony, D. M., Miles, D. F., Egli, D. B., 1991. Corn seed maturity indicators and their relationship to uptake of carbon-14 assimilate. *Crop Sci.* 31, 1309-1313.
- INASE, 2019. Instituto nacional de semillas: registro de cultivares. In: <https://gestion.inase.gov.ar/consultaGestion/> (consulted July 18, 2019).
- Johnson, J.M.F., Barbour, N.M., Weyers, S.L. 2007. Chemical composition of crop biomass impacts its decomposition. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71, 155-162.
- Kamble, P. N., Bååth, E., 2016. Comparison of fungal and bacterial growth after alleviating induced N-limitation in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 103, 97-105.
- Khoury, C. K., Bjorkman, A. D., Dempewolf, H., Ramirez-Villegas, J., Guarino, L., Jarvis, A., Rieseberg, L. H., Struik P. C., 2014. Increasing homogeneity in global food supplies and the implications for food security. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 111, 4001-4006.
- Kumar, S. R., Hammer, G. L., Broad, I., Harland, P., McLean, G. 2009. Modelling environmental effects on phenology and canopy development of diverse sorghum genotypes. *Field Crops Res.* 111, 157-165.
- 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. *Global Environ Chang.* 23, 892-901.
- Li, Q. S., Willardson, L. S., Deng, W., Li, X. J., Liu, C. J., 2005. Crop water deficit estimation and irrigation scheduling in western Jilin province, Northeast China *Agric. Water Manage.* 71, 47-60.

- Liu, J. J., Sui, Y. Y., Yu, Z. H., Shi, Y., Chu, H. Y., Jin, J., Liu, X. B., Wan, G. H., 2014. High throughput sequencing analysis of biogeographical distribution of bacterial communities in the black soils of northeast China. *Soil Biology and Biochemistry*, 70, 113–122.
- Lobell, D. B., Burke, M. B., Tebaldi, C., Mastrandea, M. D., Falcon, W. P., Naylor, R. L., 2008. Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030. *Science* 319, 607-610.
- Lobell, D. B., Cassman, K. G., Field, C. B., 2009. Crop Yield Gaps: Their Importance, Magnitudes, and Causes. *Annual Review of Environment and Resources* 34, 179-204.
- Ludlow, M. M., Muchow, R. C., 1990. A Critical evaluation of traits for improving crop yields in water-limited environments. *Adv. Agron.* 43, 107-153.
- Luo, D., Ganesh, S., Koolaar, J., 2021. `_predictmeans`: Calculate Predicted Means for Linear Models. R package version 1.0.6
- Luque, S. F., Cirilo, A. G., Otegui, M. E., 2006. Genetic gains in grain yield and related physiological attributes in Argentine maize hybrids. *Field Crops Res.* 95,383-397.
- Lynch, M. J., Mulvaney, M. J., Hodges, S. C., Thompson, T. L., Thomason, W. E., 2016. Decomposition, nitrogen and carbon mineralization from food and cover crop residues in the central plateau of Haiti. *SpringerPlus* 5, 973.
- Magrin, G. O., Marengo, J. A., Boulanger, J. P., Buckeridge, M. S., Castellanos, E., Poveda, G., Scarano, F. R., Vicuna, S. 2014. Central and South America. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge. UK.
- Mason, S. C., Kathol, D., Eskridge, K. M., Galusha, T. D., 2008. Yield increase has been more rapid for maize than for grain sorghum. *Crop Sci.* 48, 1560-1568.
- McKenzie, H. A y Wallace H. S. 1953. "The Kjeldahl determination of Nitrogen: A critical study of digestion conditions temperature, catalyst and oxidizing agent". *Australian Journal of Chemistry* 7, 55-70.
- Meghji, M. R., Dudley, J. W., Lambert, R. J., Sprague, G. F., 1984. Inbreeding depression, inbred and hybrid grain yields, and other traits of maize genotypes representing three eras. *Crop Science* 24, 545-549.
- Melillo, J. M., Aber, J. D., Muratore, J. F., 1982. Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics. *Ecology*, 63, 621-626.
- 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: *Practical Applications of Agricultural System Models to Optimize the Use of Limited Water*, Ahuja, L. R., Ma, L., Lascano, R. J. (ed.), *Adv. Agric. Syst. Model.* 5. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI. p. 351-374.

- Miller, F.R., Kebede, Y. 1984. Genetic contributions to yield gains in sorghum, 1950–1980. In: Fher, W. (Ed.), Genetic Contributions to Yield Gains of Five Major Crop Plants. Am. Soc. Agron., Crop Sci. Soc. Am., Madison, WI, pp. 1–14.
- Muchow, R. C. 1988. Effect of nitrogen supply on the comparative productivity of maize and sorghum in a semi-arid tropical environment III. Grain yield and nitrogen accumulation. *Field Crops Res.* 18, 31-43.
- Muchow, R. C. 1990. Effect of high temperature on grain-growth in field-grown maize. *Field Crops Res.* 23, 145-158.
- Muchow, R. C., 1988. Effect of nitrogen supply on the comparative productivity of maize and sorghum in a semi-arid tropical environment I. Leaf growth and leaf nitrogen. *Field Crops Res.* 18, 1-16.
- Muchow, R. C., 1989a. Comparative productivity of maize, sorghum and pearl millet in a semi-arid tropical environment I. Yield potential. *Field Crops Res.* 20, 191-205.
- Muchow, R. C., 1989b. Comparative productivity of maize, sorghum and pearl millet in a semi-arid tropical environment II. Effect of water deficits. *Field Crops Res.* 20, 207-219.
- Muchow, R. C., Carberry, P. S., 1990. Phenology and leaf area development in a tropical grain sorghum. *Field Crops Res.* 23, 221–237.
- Muchow, R. C., Davis, R. 1988. Effect of nitrogen supply on the comparative productivity of maize and sorghum in a semi-arid tropical environment II. Radiation interception and biomass accumulation. *Field Crops Res.* 18, 17-30.
- Mueller, S. M., Messina, C. D., Vyn, T. J., 2019. Simultaneous gains in grain yield and nitrogen efficiency over 70 years of maize genetic improvement. *Sci. Rep.* 9, 1-8.
- NASA, 2017. Prediction of worldwide energy resource. (Accessed August 2020). <http://power.larc.nasa.gov>
- NeSmith, D. S., Ritchie, J. T., 1992a. Effects of soil water-deficits during tassel emergence on development and yield component of maize (*Zea mays*). *Field Crops Res.* 28, 251-256.
- NeSmith, D. S., Ritchie, J. T., 1992b. Maize (*Zea mays* L.) response to a severe soil water deficit during grain filling. *Field Crops Res.* 29, 23–35.
- Nhantumbo, A. B., Kätterer, T., Ledin, S., Du Preez, C. C., 2009. Carbon loss from *Brachystegia spiciformis* leaf litter in the sandy soils of southern Mozambique. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 83, 13-26.
- Norwood, C. A., Currie, R. S., 1997. Dryland corn vs. grain sorghum in Western Kansas. *J. Prod. Agric.* 10, 152–157.
- Novelli, L. E., Caviglia, O. P., Piñeiro, G., 2017. Increased cropping intensity improves crop residue inputs to the soil and aggregate-associated soil organic carbon stocks. *Soil Till Res* 165,128-136.

- Oosterheld, M., 2008. Impacto de la agricultura sobre los ecosistemas. Fundamentos ecológicos y problemas más relevantes. *Ecología Austral* 18, 337-346.
- Otegui, M. E., Andrade, F. H., Suero, E. E., 1995. Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. *Field Crops Res.* 40, 87-94.
- Otegui, M. E., Ruiz, R. A., Petruzzi, D., 1996. Modeling hybrid and sowing date effects on potential grain yield of maize in a humid temperate region. *Field Crop Res.* 47, 167-174.
- Passioura, J. B., 1996. Simulation models: Science, snake oil, education, or engineering? *Agronomy Journal* 88, 690-694.
- Paustian, K., Andre'n, O., Janzen, H. H., Lal, R., Smith, P., Tian, G., Tiessen, H., Van Noordwijk, M., Woomer, P. L., 1997. Agricultural soils as a sink to mitigate CO2 emissions. *Soil Use and Management* 13, 230–244.
- Pfeiffer, B. K., Pietsch, D., Schnell, R. W., Rooney, W. L., 2019. Long-term selection in hybrid sorghum breeding programs. *Crop Sci.* 59, 150-164.
- Pinheiro J, Bates D, DebRoy S, Sarkar D, R Core Team, 2022. *_nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models_*. R package version 3.1-155
- Podestá, G., Bert, F., Rajagopalan, B., Apipattanavis, S., Laciána, C., Weber, E., Easterling, W., Katz, R., Letson, D., Menendez, A., 2009. Decadal climate variability in the Argentine Pampas: regional impacts of plausible climate scenarios on agricultural systems. *Climate Research* 40, 199-210.
- R Core Team., 2017. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- ReTAA, 2020. Relevamiento de tecnología agrícola aplicada de la bolsa de cereales. <http://www.bolsadecereales.com/retaa-informes-anuales> (consulted April 1, 2020).
- Ritchie, J. T., NeSmith, D. S., 1991. Temperature and crop development. In: Hanks, J., Ritchie, J.T. (Eds.), *Modelling Plant and Soil Systems*. Agronomy Monogram, 31.ASA, CSSA, an SSSA, Madison, WI, pp. 5–29.
- Ritchie, S. W., Hanway, J. J., 1986. How a corn plant develops. Special Report No. 48. Iowa State University and Technology Cooperative Extension Service, Ames Iowa.
- Rooney, W. L., 2004. Sorghum improvement - Integrating traditional and new technology to produce improved genotypes. *Advances in Agronomy* 83, 37-109.
- Rosenow, D. T., Quisenberry, J. E., Wendt, C. W., Clark, L. E., 1983. Drought tolerant sorghum and cotton germplasm. *Agric. Water Manage.* 7, 207-222.
- Rossi, G., 2015. Retenciones: larga historia de tensiones. Informe Semanal. Mercados. Bolsa de Cereales de Rosario. Pags. 1-4.
- Rurinda, J., Mapfumo, P., van Wijk, M. T., Mtambanengwe, F., Rufino, M. C., Chikowo, R., Giller, K. E. 2014. Comparative assessment of maize, finger millet and sorghum for

- household food security in the face of increasing climatic risk. *Eur. J. Agronomy*. 55, 29-41.
- Russell, W. A., 1985. Evaluations for plant, ear, and grain traits of maize cultivars representing seven eras of breeding. *Maydica* 30, 85-96.
- Russell, W. A., 1991. Genetic improvement of maize yields. *Advance in Agronomy* 46, 245-298.
- 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 Security* 6, 447-459.
- Secretaría de Agroindustria, 2019. Ministerio de Produccion y trabajo. <https://www.agroindustria.gob.ar/sitio/areas/estimaciones/estimaciones/metodologia/index.php> (consulted July 18, 2019).
- SIIA, Sistema Integrado de Información Agropecuaria. 2017. <https://datos.magyp.gob.ar/>
- Sinclair, T. R., Hammer, G. L., Van Oosterom, E. J., 2005. Potential yield and water-use efficiency benefits in sorghum from limited maximum transpiration rate. *Funct. Plant Biol.* 32, 945-952.
- Singh, B. U., Padmaja, P.G., Seetharama, N., 2004. Biology and management of the sugarcane aphid, *Melanaphis sacchari* (Zehntner) (Homoptera: Aphididae), in sorghum: a review. *Crop Prot.* 23, 739-755.
- Singh, B. R., Singh, D. P., 1995. Agronomic and physiological responses of sorghum, maize and pearl millet to irrigation. *Field Crops Res.* 42, 57-67.
- Slafer, G. A., Kernich, G. C., 1996. Have changes in yield (1900-1992) been accompanied by a decreased yield stability in Australia cereal production? *Aust. J. Agric. Res.* 47, 323-334.
- Smidt, E.R., Conley, S.P., Zhu, J., Arriaga, F.J. 2016. Identifying field attributes that predict soybean yield using random forest analysis. *Agronomy Journal* 108, 637-46.
- Smith, J. S. C., Duvick, D. N., Smith, O. S., Cooper, M., Feng, L., 2004. Changes in pedigree backgrounds of pioneer brand maize hybrids widely grown from 1930 to 1999. *Crop Science* 44, 1935-1946.
- Soil Survey Staff, 2014. Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture. Web Soil Survey. <https://websoilsurvey.sc.egov.usda.gov/> (consulted April 1, 2020).
- Soil Survey Staff. 1994. Keys to Soil Taxonomy. 6th ed. USDA-SCS.
- Somda, Z. C., Mahomed, M. T. M., Kays, S. J., 1991. Analysis of leaf shedding and dry matter recycling in sweetpotato. *Journal of plant nutrition*, 14, 1201-1212.
- Song, Y., Birch, C., Qu, S., Dohert, A., Hanan, J., 2010. Analysis and modelling of the effects of water stress on maize growth and yield in dryland Conditions. *Plant Production Science* 13, 199-208.

- Spagnoli, F. C., Mace, E., Jordan, D., Borrás, L., Gambin, B. L., 2016. Quantitative trait loci of plant attributes related to sorghum grain number determination. *Crop Sci.* 56, 3046-3054.
- Specht, J. E., Hume, D. J., Kumudini, S. V., 1999. Soybean yield potential – A genetic and physiological perspective. *Crop Sci.* 39, 1560-1570.
- SSMA, 2016. Informe sobre sorgo. Ministerio de Agroindustria, Buenos Aires, Argentina. <https://www.magyp.gob.ar/new/0-0/programas/dma/granos/Informe%20de%20Sorgo-SEPTIEMBRE%202016.pdf> (consulted July 18, 2019).
- Stone, L. R., Schlegel, A. J., Gwin, R. E. jr, Khan, A. H., 1996. Response of corn, grain sorghum, and sunflower to irrigation in the High Plains of Kansas. *Agricultural Water Management* 30, 251-259.
- Thangarajan, R., Bolan, N. S., Tian, G., Naidu, R., Kunhikrishnan, A., 2013. Role of organic amendment application on greenhouse gas emission from soil. *Science of the Total Environment*, 465, 72-96.
- Tian, G., Kang, B. T., Brussaard, L., 1992. Biological effects of plant residues with contrasting chemical compositions under humid tropical conditions decomposition and nutrient release. *Soil biology and Biochemistry*, 24, 1051-1060
- Tirfessa, A., McLean, G., Mace, E., van Oosterom, E., Jordan, D., Hammer, G. 2020. Differences in temperature response of phenological development among diverse Ethiopian sorghum genotypes are linked to racial grouping and agroecological adaptation. *Crop Sci.* 60, 977-990.
- Tollenaar, M., Dwyer, L. M., Stewart, D. W., 1992. Ear and kernel formation in maize hybrids representing three decades of grain yield improvement in Ontario. *Crop Science* 32, 432-438.
- Tollenaar, M., Mihajlovic, M., Aguilera, A., 1991. Temperature response of dry matter accumulation, leaf photosynthesis, and chlorophyll fluorescence in an old and a new maize hybrid during early development. *Canadian Journal of Plant Science* 71:353-359.
- Tollenaar, T., Lee, E. A., 2002. Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize. *Field Crops Res.* 75, 161-169.
- Trabucco, A., Zomer, R. J., 2019. Global aridity index and potential evapotranspiration (ET₀) climate database v2. figshare. Fileset. Dataset.
- USDA. United States Department of Agriculture. Gain Report. Global Agricultural Information. 21/04/2017.
- Valentinuz, O. R., Tollenaar, M., 2004. Vertical profile of leaf senescence during the grain-filling period in older and newer maize hybrids. *Crop Science* 44, 827-834.

- van Oosterom, E. J., Borrell, A. K., Chapman, S. C., Broad, I. J., Hammer, G. L., 2010. Functional dynamics of the nitrogen balance of sorghum: I. N demand of vegetative plant parts. *Field Crops Res.* 115, 19-28.
- van Oosterom, E. J., Hammer, G. L., 2008. Determination of grain number in sorghum. *Field Crops Res.* 108, 259-268.
- van Wart, J., Grassini, P., Cassman, K. G., 2013. Impact of derived global weather data on simulated crop yields. *Glob. Change Biol. Bioenergy* 19, 3822–3834.
- Vanderlip, R. L., Reeves, H. E., 1972. Growth stages of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Agron J.* 64, 13–16.
- Vega, C. R. C., Sadras, V. O., Andrade, F. H., Uhart, S. A., 2000. Reproductive allometry in soybean, maize and sunflower. *Ann. Bot.* 85, 461-468.
- Wheeler, T., von Braun J., 2013. Climate change impacts on global food security. *Science.* 341, 508-513.
- 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.
- Williams, W. P., Sagers, J. B., Hanten, J. A., Davis, F. M., Buckley, P. M., 1997. Transgenic corn evaluated for resistance to fall armyworm and Southwestern corn borer. *Crop Science* 37, 957–962.
- Wright, G. C., Smith, R. C. G., McWilliam, J. R., 1983. Differences between two grain sorghum genotypes in adaptation to drought stress. I. Crop growth and yield responses. *Aust. J. Agric. Res.* 34, 615-626.
- Wright, G. C., Smith, R. C. G., 1983. Differences between two grain sorghum genotypes in adaptation to drought stress. II. Root water uptake and water use. *Aust. J. Agric. Res.* 34, 627-636.
- Yang, Z., van Oosterom, E. J., Jordan, D. R., Hammer, G. L., 2010. Genetic variation in potential grain size affects grain growth and yield of sorghum. *Crop Sci.* 50, 685–695.
- Zaborski, E. R. 1995. Response of microbial and microarthropod decomposers to inorganic and organic nitrogen sources in reduced tillage corn-soybean agroecosystems. PhD. Thesis, McGill University, Montreal, QC.
- Zuur, A. F., Ieno, E. N., Walker, N. J., Saveliev, A. A., Smith, G. M., 2009. Mixed effects models and extensions in ecology with R. Springer, New York.

Anexo 1: Figuras suplementarias

Tabla S1. Parámetros y errores estándar (e.e.) de los modelos ajustados de superficie cosechada de maíz y sorgo. Modelos descritos en la Fig. S1.

Nivel	Superficie cosechada (has.)					
	Maíz			Sorgo		
	Intercepto	$\beta 1$ (e.e.)	$\beta 2$ (e.e.)	Intercepto	$\beta 1$ (e.e.)	$\beta 2$ (e.e.)
Nacional	981045609	-985311 (562690)	247 (141)	354614972	-352988 (401419)	88 (101)
Región						
I	1059740518	-1067641 (243003)	269 (61)	-38712801	38955 (172636)	-10 (43)
II	1588481722	-1601529 (586661)	404 (147)	496255019	-496379 (416698)	124 (105)
III	1330184033	-1344242 (586661)	340 (147)	277696973	-273171 (416698)	67 (105)
IV	1340023326	-1350012 (586661)	340 (147)	1050409906	-1046261 (416698)	261 (105)
V	960702274	-964370 (586661)	242 (147)	716154647	-713057 (416957)	178 (105)
VI	2833689137	-2838288 (586661)	711 (147)	627965188	-625634 (416698)	156 (105)
VII	1850836359	-1841705 (586661)	458 (147)	449271583	-448766 (416698)	112 (105)
VIII	1452402651	-1455992 (586661)	365 (147)	585932123	-586630 (416698)	147 (105)
IX	618085417	-626970 (586661)	159 (147)	431162288	-423881 (416698)	104 (105)
X	300706150	-302001 (586661)	76 (147)	200239973	-200093 (418003)	50 (105)
XI	-176545160	176177 (586661)	-44 (147)	226606214	-226083 (416698)	56 (105)
XII	-797609337	798659 (586661)	-200 (147)	-25216954	25408 (432108)	-6 (108)
XIII	1015350175	-1017554 (594727)	255 (149)	-40537013	41012 (420175)	-10 (105)
XIV	358591266	-358882 (586661)	90 (147)	7382469	-7251 (426405)	2 (107)
Año		***			***	
Región		***			***	
Año x Región		***			***	

*, **, *** significativo a $p < 0.05$, 0.01 , y 0.001 respectivamente, ns: no significativo.

Tabla S2. Parámetros y errores estándar (e.e.) de los modelos ajustados de rendimiento de maíz y sorgo. Modelos descritos en la Fig. S2.

Nivel	Rendimiento (kg ha ⁻¹)					
	Maíz			Sorgo		
	Intercepto	β1 (e.e.)	β2 (e.e.)	Intercepto	β1 (e.e.)	β2 (e.e.)
Nacional	3459122	-3581 (1654)	1.306 (0.414)	-2264391	2212 (1809)	-0.539 (0.454)
Región						
I	1421450	-1524 (587)	0.408 (0.147)	-767499	723 (736)	-0.169 (0.185)
II	4069091	-4158 (1437)	1.47 (0.360)	-3481533	3457 (1621)	-0.857 (0.407)
III	2259379	-2400 (1665)	1.044 (0.417)	-6765205	6696 (1836)	-1.655 (0.461)
IV	4528292	-4668 (2185)	1.611 (0.548)	-2029567	1948 (2218)	-0.466 (0.557)
V	2650466	-2762 (1867)	1.127 (0.468)	-3597652	3558 (1879)	-0.879 (0.472)
VI	4362652	-4529 (1811)	1.583 (0.454)	-3332782	3251 (1844)	-0.791 (0.463)
VII	6737531	-6885 (1450)	2.168 (0.363)	909584	-986 (1656)	0.267 (0.416)
VIII	4732677	-4873 (1741)	1.662 (0.436)	501194	-584 (1801)	0.168 (0.452)
IX	448156	-569 (1594)	0.582 (0.399)	-1649803	1598 (1706)	-0.386 (0.428)
X	1961529	-2086 (1689)	0.962 (0.423)	15440	-55 (1899)	0.025 (0.477)
XI	-4600176	4541 (1656)	-0.712 (0.415)	-4761540	4752 (1771)	-1.185 (0.445)
XII	1797413	-1903 (1697)	0.911 (0.425)	-10987817	11005 (2239)	-2.754 (0.562)
XIII	10828877	-10956 (2135)	3.179 (0.535)	-2705833	2633 (2078)	-0.639 (0.521)
XIV	7230366	-7367 (1643)	2.285 (0.412)	6951539	-7034 (2044)	1.78 (0.513)
Año		***			***	
Región		***			***	
Año x Región		***			***	

*, **, *** significativo a $p < 0.05$, 0.01 , y 0.001 respectivamente, ns: no significativo.

Tabla S3. Parámetros y errores estándar (e.e.) de los modelos ajustados de residuales relativos de rendimiento de maíz y sorgo. Modelos descriptos en la Fig. S3.

Nivel	Residuales relativos de rendimiento			
	Maíz		Sorgo	
	Intercepto	$\beta 1$ (e.e.)	Intercepto	$\beta 1$ (e.e.)
Nacional	447	-0.214 (0.083)	240	-0.112 (0.103)
Región				
I	454	-0.219 (0.029)	146	-0.065 (0.042)
II	484	-0.230 (0.072)	323	-0.153 (0.092)
III	361	-0.171 (0.083)	355	-0.169 (0.103)
IV	220	-0.099 (0.111)	49	-0.016 (0.124)
V	330	-0.156 (0.094)	210	-0.098 (0.108)
VI	638	-0.310 (0.091)	368	-0.178 (0.106)
VII	135	-0.059 (0.072)	140	-0.062 (0.093)
VIII	572	-0.274 (0.087)	619	-0.301 (0.102)
IX	557	-0.268 (0.080)	105	-0.044 (0.097)
X	426	-0.205 (0.085)	119	-0.052 (0.107)
XI	634	-0.307 (0.083)	345	-0.163 (0.100)
XII	508	-0.244 (0.086)	226	-0.102 (0.141)
XIII	801	-0.388 (0.110)	245	-0.113 (0.116)
XIV	143	-0.063 (0.08)	116	-0.05 (0.115)
Año		***		***
Región		***		***
Año x Región		***		***

*, **, *** significativo a $p < 0.05$, 0.01 , y 0.001 respectivamente, ns: no significativo.

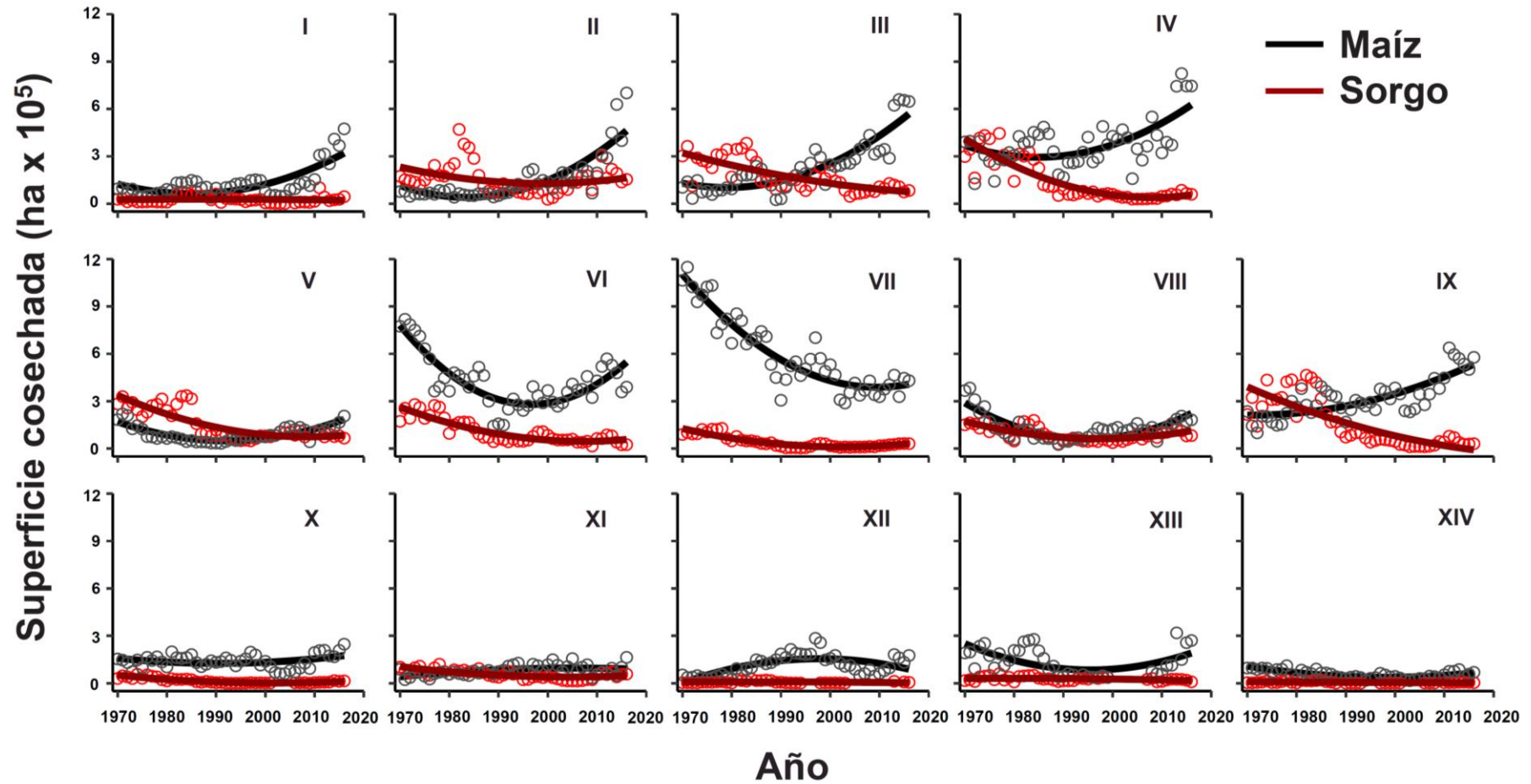


Fig. S1. Tendencias de superficie cosechada de maíz (puntos grises, línea negra) y sorgo (puntos rojos, línea roja oscura) para cada región (I a XIV) durante el periodo analizado (1970 a 2016). Las líneas representan los modelos ajustados, y cada punto es la suma de la superficie cosechada de todos los departamentos en un año determinado en cada región.

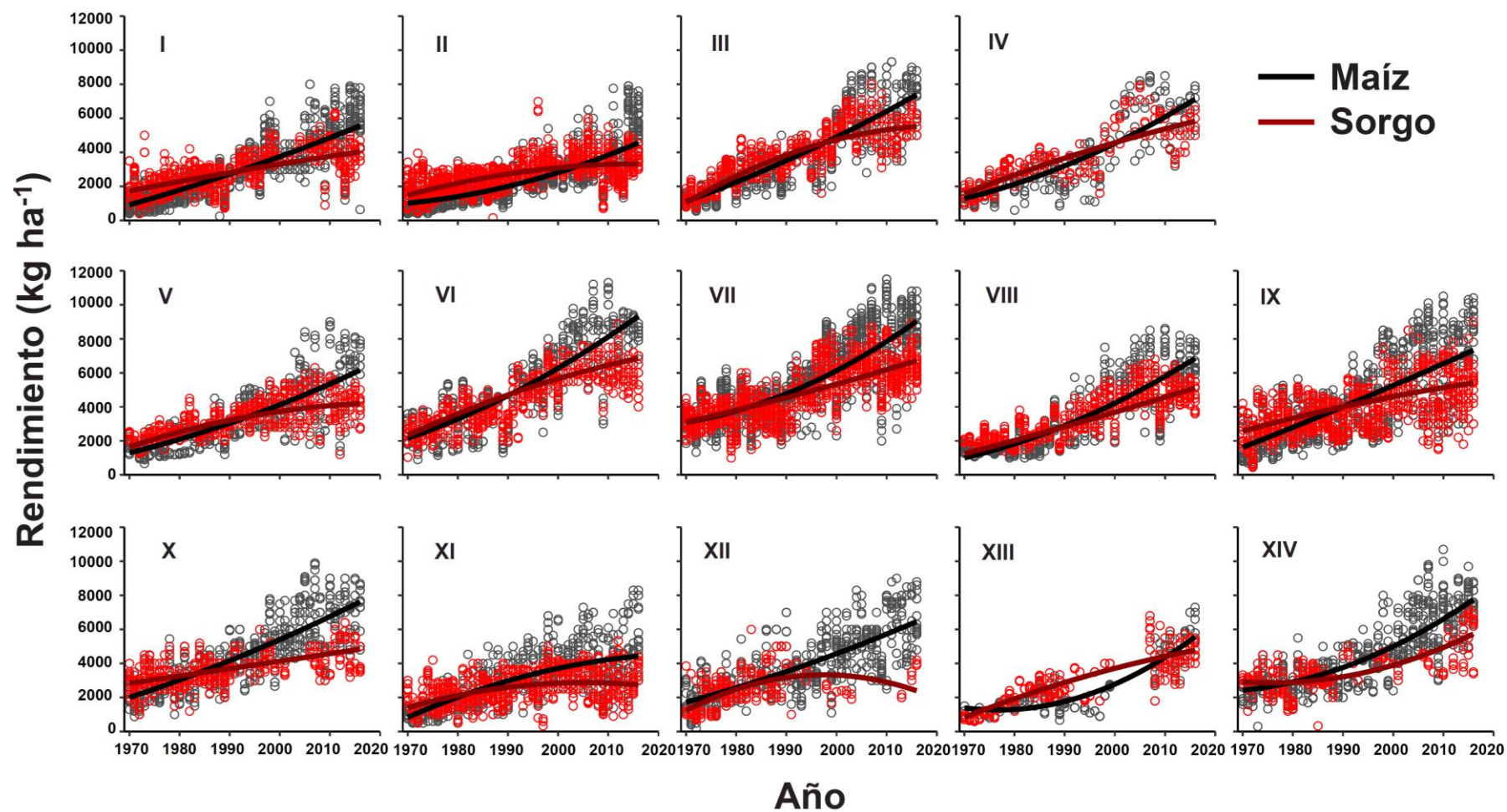


Fig. S2. Tendencias de rendimiento de maíz (puntos grises, línea negra) y sorgo (puntos rojos, línea roja oscura) para cada región (I a XIV) durante el periodo analizado (1970 a 2016). Las líneas representan los modelos ajustados, y cada punto es el dato a nivel departamental.

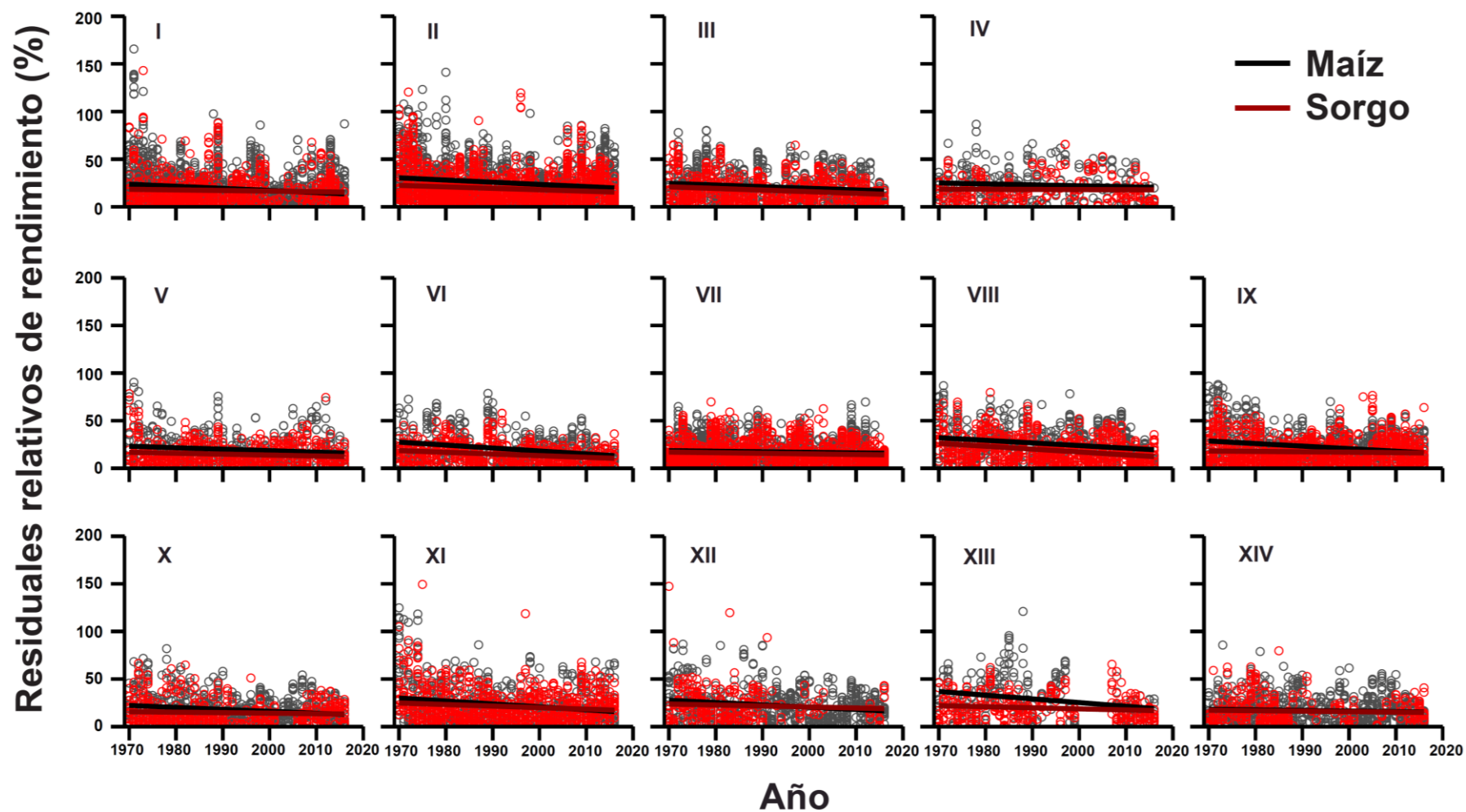


Fig. S3. Tendencias de residuales relativos de rendimiento de maíz (puntos grises, línea negra) y sorgo (puntos rojos, línea roja oscura) para cada región (I a XIV) durante el periodo analizado (1970 a 2016). Las líneas representan los modelos ajustados, y cada punto es el dato a nivel departamental.

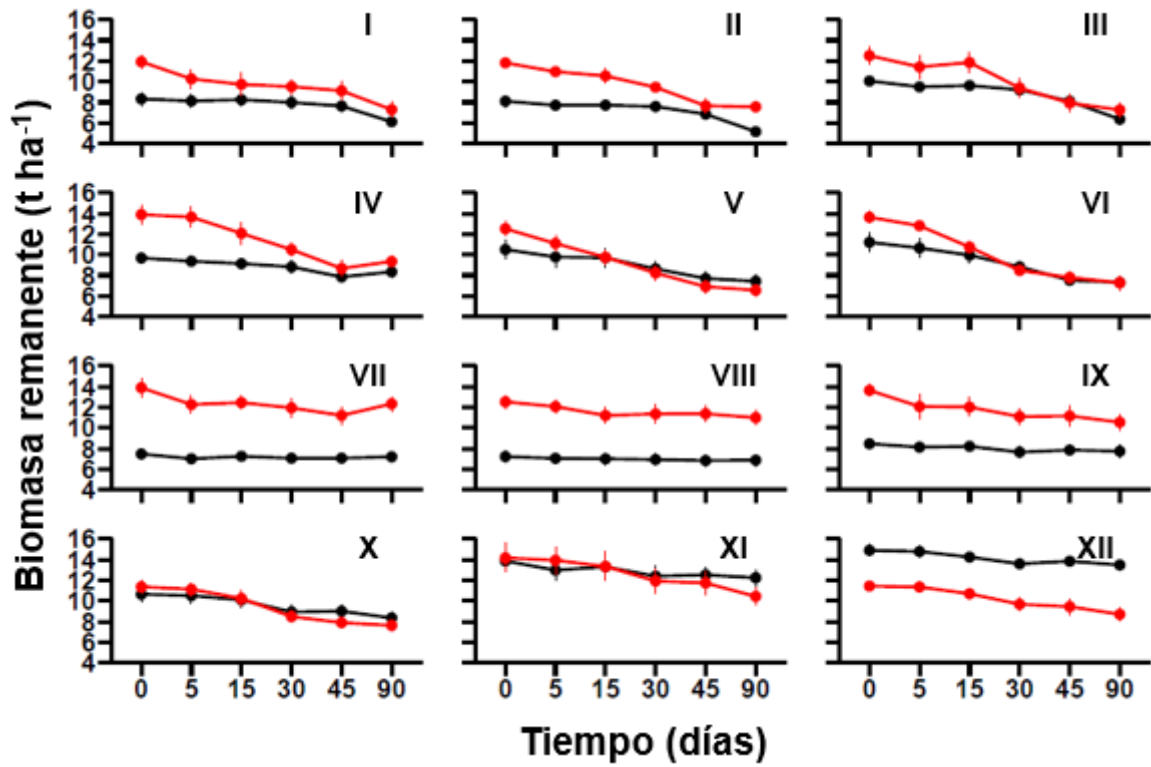


Fig. S4. Evolución de la biomasa remanente de maíz (negro) y sorgo (rojo) durante los 90 días de permanencia del rastrojo en el campo. Cada punto es la media de dos híbridos. Las barras verticales indican error estándar.

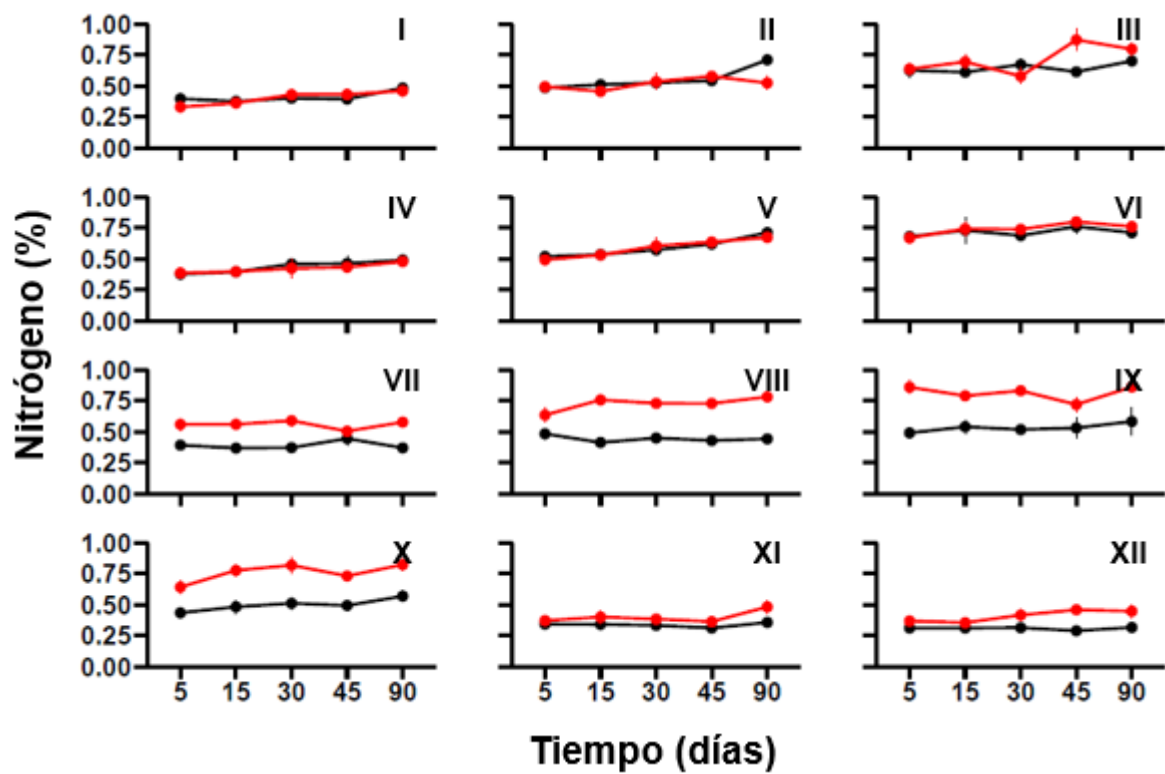


Fig. S5. Porcentaje de nitrógeno en el rastrojo de maíz (negro) y sorgo (rojo) en relación con el tiempo (5, 15, 30, 45 y 90 días) que el rastrojo estuvo en el campo luego del procesado en cada uno de los ambientes explorados (I a XII). Barras verticales indican error estándar a partir de los dos híbridos de cada cultivo y 3 repeticiones.

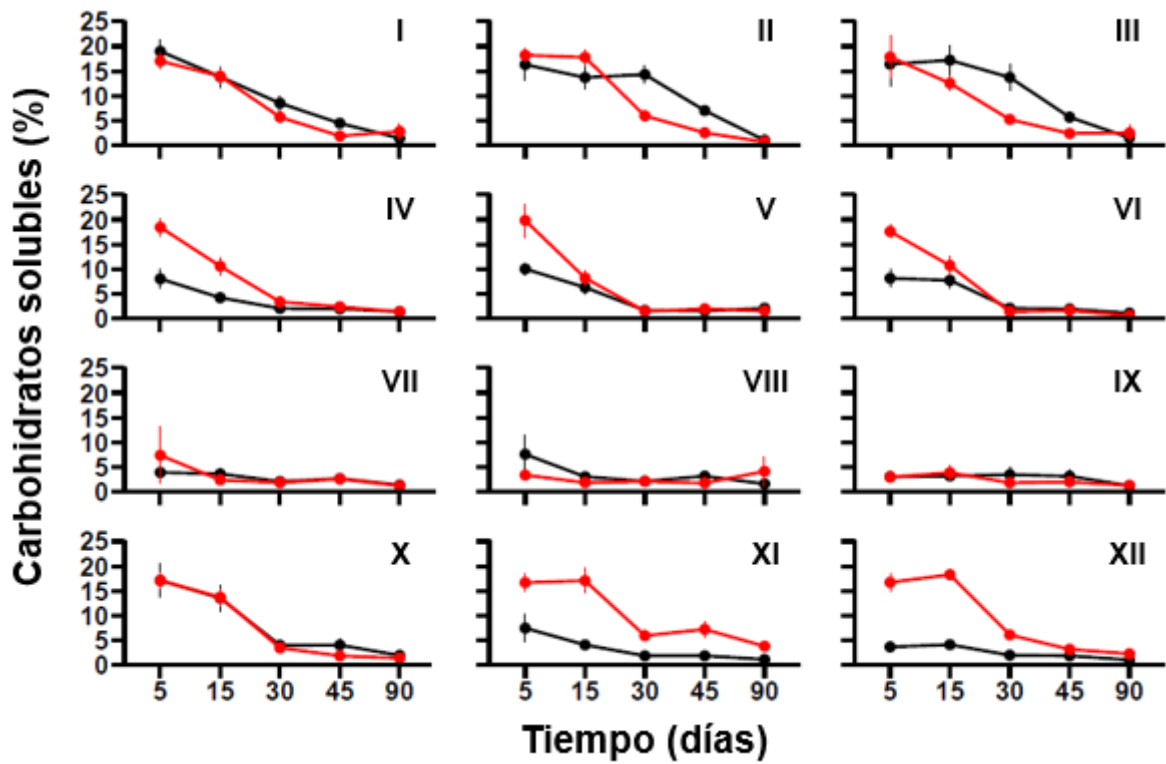


Fig. S6. Porcentaje de carbohidratos solubles en el rastrojo de maíz (negro) y sorgo (rojo) en relación con el tiempo (5, 15, 30, 45 y 90 días) que el rastrojo estuvo en el campo luego del procesado en cada uno de los ambientes explorados (I a XII). Barras verticales indican error estándar a partir de los dos híbridos de cada cultivo y 3 repeticiones.