



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

**CARACTERES FISIOLÓGICOS Y MANEJO AGRONÓMICO PARA MAXIMIZAR EL  
RENDIMIENTO DE SORGO ANTE DIFERENTES TIPOS DE ESTRÉS AMBIENTAL**

**Ing. Agr. Ana Julia Paula Carcedo**

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE DOCTOR EN CIENCIAS AGRARIAS**

**DIRECTORA: Dra. Brenda L. Gambin**

**CO-DIRECTOR: Dr. Lucas Borrás**

**2020**

# CARACTERES FISIOLÓGICOS Y MANEJO AGRONÓMICO PARA MAXIMIZAR EL RENDIMIENTO DE SORGO ANTE DIFERENTES TIPOS DE ESTRÉS AMBIENTAL

Ana J. P. Carcedo

Ingeniera Agrónoma - 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 abril del año 2016 y el 1 de Noviembre del año 2020, bajo la dirección de la Dra. Brenda L. Gambin y el Dr. Lucas Borrás.

---

Carcedo, Ana JP

**Doctorando**

---

Gambin, Brenda L

**Directora**

---

Borrás, Lucas

**Codirector**

Defendida:..... de 2021.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mis directores Brenda y Lucas por guiarme en este proceso, a mi familia y amigos por el apoyo y la contención, y al gran equipo del GIMUCE que se transformó en familia para mí.

## **PUBLICACIONES CIENTÍFICAS DERIVADAS DE LA TESIS**

- Carcedo, A.J.P., Pardo, P.A., Gambin B.L. 2017. "Secondary traits explaining sorghum genotype by environment interactions for grain yield". *Crop and Pasture Science* 68, 599-608 (<https://doi.org/10.1071/CP17015>).
- Carcedo, A.J.P., Gambin B.L. 2019. "Sorghum drought and heat stress patterns across the Argentinean temperate central region". *Field Crop Research* 241, 107552 (<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.06.009>).
- Carcedo, A.J.P., Cejas, E., Gambin, B.L. 2021. "Adapting sorghum sowing date and genotype maturity to rainfall seasonal variation in a temperate region". *In Silico Plants*, 3,1 (<https://doi.org/10.1093/insilicoplants/diab007>).

## **PUBLICACIONES DE EXTENSIÓN DERIVADAS DE LA TESIS**

- Carcedo A.J.P., Gambin B.L. 2019. "Sorgo. Rendimientos potenciales y limitaciones hídricas del cultivo de sorgo en Argentina". *Revista Técnica Maíz 2019 AAPRESID* 129-134.

## **PRESENTACIONES DERIVADAS DE LA TESIS**

- Carcedo, A.J.P., Gambin, B.L. "Patrones de estrés hídrico del cultivo de sorgo en la región central de Argentina" 5ta. Jornada de intercambio académico ámbito público-privado. Marzo 8 y 9, 2018, Manfredi, Córdoba, Argentina. Participación: presentación oral.
- Carcedo, A.J.P., Gambin, B.L. "Uso de modelos de simulación para la caracterización de patrones de estrés hídrico en sorgo granífero" III Workshop Internacional de Ecofisiología de Cultivos. Septiembre 28 y 29, 2017, Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina. Participación: presentación de poster.
- Carcedo, A.J.P., Pardo, P.A., Gambin, B.L. "Bases fisiológicas de la interacción genotipo por ambiente para rendimiento en sorgo granífero". III Simposio Nacional/I Conferencia Internacional de Sorgo. 24 y 25 de Agosto, 2016. Pergamino, Buenos Aires, Argentina. Participación: presentación de poster.

## INDICE

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS .....	1
RESUMEN .....	2
ABSTRACT .....	4
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN GENERAL .....	6
Importancia del cultivo en Argentina.....	6
Descripción de la interacción genotipo x ambiente .....	7
Caracterización de ambientes usando modelos de simulación.....	8
Opciones de manejo y mejoramiento para diferentes ambientes.....	10
OBJETIVOS .....	11
HIPOTESIS .....	12
CAPITULO II: CARACTERES SECUNDARIOS EXPLICANDO LA INTERACION GENOTIPO POR AMBIENTE PARA RENDIMIENTO EN GRANO DE SORGO ..	13
INTRODUCCIÓN.....	13
MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
Genotipos evaluados.....	14
Condiciones ambientales y de manejo .....	15
Caracteres fenotípicos.....	16
Análisis estadístico .....	17
RESULTADOS .....	19
Descripción de los ambientes.....	19
Componentes de varianza.....	19
Análisis de patrones .....	20
Bases fisiológicas de la interacción GxA .....	22
DISCUSIÓN.....	26
CONCLUSIONES.....	29
CAPITULO III: PATRONES DE ESTRÉS DE HÍDRICO Y TÉRMICO A TRAVÉS DE LA REGION TEMPLADA CENTRAL ARGENTINA .....	30

INTRODUCCIÓN.....	30
MATERIALES Y MÉTODOS.....	31
Parametrización y evaluación del modelo.....	31
Descripción de los experimentos.....	32
Mediciones fenotípicas.....	34
Fenología.....	34
Desarrollo del área foliar.....	35
Biomasa y rendimiento.....	35
Calibración del modelo.....	36
Validación de modelo.....	36
Simulación de patrones de estrés hídrico y clasificación de los tipos de estrés.....	37
Frecuencia de estrés térmico.....	40
Tipos de estrés e interacción GxA.....	40
RESULTADOS.....	41
Validación del modelo.....	41
Simulación de patrones de transpiración relativa.....	42
Clasificación en tipos de estrés.....	43
Frecuencia de estrés térmico y su asociación con los tipos de estrés identificados.....	45
Tipos de estrés e interacción GxA.....	47
DISCUSIÓN.....	48
CONCLUSIONES.....	51
CAPITULO IV: EFECTOS DE LA FECHA DE SIEMBRA Y EL LARGO DEL CICLO DE SORGO EN DIFERENTES ESCENARIOS HÍDRICO.....	53
INTRODUCCIÓN.....	53
MATERIALES Y MÉTODOS.....	54
Configuraciones de manejo de cultivos.....	55
Análisis.....	55

Validación de los resultados de las simulaciones .....	56
RESULTADOS .....	57
Patrones de estrés hídrico.....	57
Fenología .....	58
Rendimiento de grano e índice de transpiración relativa .....	61
Biomasa a madurez e índice de cosecha .....	64
Validación de los resultados simulados .....	65
DISCUSIÓN .....	66
CONCLUSIÓN.....	68
CAPITULO V: DISCUSIÓN GENERAL.....	69
INVESTIGACIONES FUTURAS .....	72
CONTRASTE DE HIPÓTESIS ASOCIADAS A LOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	75
CONCLUSIONES FINALES .....	77
BIBLIOGRAFIA .....	79
ANEXO 1: FIGURAS SUPLEMENTARIAS .....	91
ANEXO 2: TABLAS SUPLEMENTARIAS .....	99

## ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

#, Número.

~, Aproximadamente.

±, Más menos.

°Cd, Grado día.

A#, Grupo de ambientes.

Amb, Ambiente.

BLUPS, Best linear unbiased predictors (mejores predictores lineales insesgados).

G#, Grupo de genotipos.

GxA, Interacción genotipo por ambiente.

GxAxM, Interacción genotipo por ambiente por manejo.

GxM, Interacción genotipo por manejo.

ha, Hectárea.

IAF, Índice de área foliar.

IC, Índice de cosecha.

L, Falta de correlación entre ambientes.

MAP, Fosfato mono amónico.

ME, Eficiencia de modelo.

RECM, Raíz del error cuadrado medio.

TE, Tipo de estrés.

TR, Transpiración relativa.

V, Heterogeneidad de varianza.

## RESUMEN

El cultivo de sorgo es de gran importancia a nivel mundial, con características favorables para afrontar diversos tipos de estrés. Además representa una gran contribución a la sustentabilidad de los sistemas productivos por su gran aporte de biomasa luego de la cosecha. A pesar de estas ventajas, el panorama actual engloba escasa inversión en programas de mejoramiento, baja ganancia genética y un planteo productivo sin distinción entre ambientes y con escaso uso de insumos. Esta situación es acentuada por la falta de una caracterización ambiental específica para sorgo y por la falta de información sobre los genotipos y prácticas de manejo más acordes para maximizar la producción en diferentes ambientes. En la presente tesis se estudió la interacción genotipo por ambiente (GxA) para rendimiento en grano y para posibles caracteres secundarios en híbridos comerciales de sorgo. Luego, se realizó una caracterización ambiental del área productiva en términos hídricos y térmicos, y por último se exploraron posibles estrategias de manejo para optimizar el rendimiento de acuerdo al ambiente.

Se determinó la gran importancia de la interacción GxA para rendimiento (relación  $GxA/G=3,48$ ). Ésta fue mayor que los demás caracteres estudiados, relativos a la fenología y a componentes numéricos y fisiológicos del rendimiento (relación  $GxA/G<1,05$ ). Además, se reconocieron caracteres con buena correlación con rendimiento, lo que indica su posible utilización como caracteres secundarios en programas de mejoramiento. Las diferencias en fenología entre los genotipos explicaron gran parte de la interacción GxA a través de su influencia en el peso del grano. Esto demuestra la importancia de la fenología como atributo secundario.

Se utilizó el modelo de simulación del cultivo APSIM-sorgo para caracterizar el ambiente de la región central Argentina en términos hídricos y térmicos. Previo a su uso, el modelo fue calibrado con coeficientes de genotipos locales y validado con información independiente. El modelo simuló de manera adecuada la fenología, biomasa y rendimiento en diversidad de condiciones de crecimiento. Se definieron tres patrones de estrés hídrico y su frecuencia a nivel regional: (i) estrés pre-floración (39%), (ii) estrés terminal leve (38%), y estrés en llenado de granos (23%). No se encontró un patrón predominante, lo que provoca dificultades en la mejora genética del cultivo y a la hora de definir un manejo productivo. Se comprobó que los patrones ayudaron a explicar las interacciones observadas de GxA para el rendimiento en un conjunto de datos experimentales independientes, lo que demuestra la importancia de caracterizar los ambientes objetivo y las posibilidades de adaptación específica. Además brindó información para optimizar las prácticas de manejo en la región,

indicando una buena respuesta al uso de ciclos cortos bajo condiciones de estrés terminal leve y la capacidad de los ciclos largos en estrés pre-floración de escapar al estrés en la etapa más crítica, al ubicar su floración en momentos posteriores. Por otro lado, la frecuencia de estrés térmico (umbral de 33°C) de la región es relativamente baja (aproximadamente tres de cada diez años). Ésta probabilidad se reduce considerablemente cuando se evalúan umbrales mayores (36°C y 38°C). Además, el estrés térmico no se asoció claramente con ningún patrón de estrés hídrico.

Por último se exploraron, a través de simulaciones y luego corroborado con datos experimentales, opciones de fecha de siembra, largo de ciclo y su interacción con los patrones de estrés anteriormente definidos. Los resultados indicaron que, exceptuando el Sur de la región, los productores se favorecerían al ajustar la elección de la fecha de siembra al tipo de estrés presente. Fechas de siembra tempranas (Octubre) fueron convenientes en los años clasificados como estrés terminal leve y estrés en llenado de granos. En cambio, en los años en los que hubo estrés en pre-floración las fechas tardías (Diciembre) fueron más ventajosas.

En esta tesis se generó información de utilidad para los mejoradores de sorgo en ambientes templados, tanto por la descripción de caracteres secundarios como por la caracterización de ambientes en términos hídricos y térmicos que permitirían hacer más eficientes los programas de mejora. También se generaron estrategias de manejo específicas para los patrones de estrés más frecuentes, aportando al proceso de toma de decisiones del productor.

## ABSTRACT

Sorghum is grown worldwide. This crop has favorable characteristics that provides tolerance under different types of stresses. It also contributes to the sustainability of production systems due to its great amount of produced biomass. However, the current context encompasses poor investment in terms of breeding programs and management. Genetic gain is low and management is similar across the productive central region, and is mainly based on low inputs. There is lack of knowledge about which genotype and management practices are ideal to maximize production in different environments. In the present thesis, genotype by environment (GxE) interaction for grain yield and possible secondary traits were studied for sorghum commercial hybrids. Additionally, an environmental characterization in terms of water and heat stress was done for different sites across the central region. Finally, some management strategies to optimize grain yield according to the environment were explored.

An important GxE interaction for grain yield was detected (ratio  $GxE/G=3.48$ ). This interaction was greater than the rest of the studied traits, including phenology, physiological and numerical components (ratio  $GxE/G<1$ ). Traits associated with grain yield were identified, which could be used as secondary traits in breeding programs. Genotypic differences in phenology explained a large proportion of the GxE interaction through their influence on grain weight, demonstrating the relevance of phenology as a secondary trait.

The sorghum crop model of the APSIM software was used for the environmental characterization of the Argentinean central region. Prior to its use, the model was calibrated for local materials, and tested with independent information. Good fit was obtained between observed and simulated phenology, biomass and yield data. It was found that the central productive region is characterized by three water stress patterns with similar frequencies: (i) pre-flowering stress (39%), (ii) low terminal stress (38%), and (iii) grain filling stress (23%). In the context of no predominant pattern, dealing with seasonal variability in breeding programs and for defining crop managements will be challenging. Defined water stress patterns helped explain the observed GxE interactions for grain yield. This shows the relevance of characterizing target environments and the possibility of selecting for specific adaptation. In addition, this results provided information of how enhance management in the region, showing a good yield response of short maturity genotypes in low terminal stress environments, and the capacity of late maturity genotypes of avoiding pre-flowering stress by placing the flowering afterwards. Thermal stress frequency (33°C threshold) was relatively low (about 3 every 10 years). This probability is greatly reduced when considering higher

thresholds (36°C). Thermal stress was not associated with any of the defined water stress patterns.

Lastly, sowing date and maturity types management options and its interaction with previously defined water stress patterns were explored through simulations and later tested with experimental data. The results indicated that, excepting the South of region, farmers should chose sowing dates according to the type of stress. Early sowings (October) improved grain yield under low terminal, and grain filling stress. Instead, late sowings (December) were more convenient under pre-flowering stress.

In this thesis, useful information was generated for sorghum breeders in temperate environments, via the identification of secondary traits and via an environmental characterization in terms of water and heat stress that could help to increase the efficiency of breeding programs. Specific management strategies to increase yield according to the water stress pattern were also generated, facilitating farmers' management decisions.

## CAPITULO I: INTRODUCCIÓN GENERAL

### *Importancia del cultivo en Argentina*

El sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) es el quinto cereal en importancia a nivel mundial (FAO, 2018). En el contexto actual de deterioro de los agroecosistemas e incertidumbre climática, el cultivo de sorgo muestra una perspectiva favorable por aportar sustentabilidad y estabilidad al sistema (Foley et al., 2011). Es un cultivo que se puede incluir en las rotaciones resultando beneficioso para el suelo y con bajo costo en relación al maíz. Además, puede ser un buen reemplazo de éste en una dieta nutritiva, sobre todo en períodos de sequía debido a que es más eficiente en la utilización del agua (Dogget, 1988).

Las ventajas mencionadas del cultivo de sorgo desafortunadamente no se ven reflejadas en la actualidad en una clara intención de siembra. De hecho, la superficie a nivel nacional ha disminuido en los últimos años junto con un estancamiento de los rendimientos, que son bajos (FAO, 2018). En la actualidad se destinan alrededor de 700.000 hectáreas cada año a la producción de sorgo en la República Argentina. La producción nacional total de la campaña 2017-2018 fue de 1.563.445 toneladas, siendo esta la menor en los registros oficiales de nuestro país. Con respecto al rendimiento por hectárea en la campaña 2017-2018 se registró un valor de 3.925 kg ha<sup>-1</sup>, el menor de los últimos 5 años (FAO, 2018). Esta realidad no tan favorable para el sorgo se corresponde con la expansión de maíces tardíos (más estables que los tempranos) en ambientes menos favorables que solían estar ocupados predominantemente por sorgo, y por el fracaso en las exportaciones a China en la campaña 2014-15 que marcó el comienzo en el declive productivo (De Bernardi, 2019). Aunque se prevé que esta situación se revierta en los años venideros debido a dos cambios favorables en el mercado: cotización del sorgo por encima del maíz, y la reanudación de las exportaciones a China (Calzada y Corina, 2018).

Otro motivo que profundiza el declive de la producción de sorgo es el desconocimiento del manejo del cultivo o, más específicamente, de la combinación de genotipo y manejo más acorde para ambientes particulares de producción. La presente tesis pretende avanzar en estos aspectos. Particularmente: en (i) la descripción de la interacción genotipo por ambiente (ii) la caracterización de ambientes y (iii) la definición de genotipos y prácticas de manejo más acorde para diferentes ambientes de producción.

### *Descripción de la interacción genotipo x ambiente*

La interacción genotipo - ambiente se refiere al comportamiento diferencial de genotipos a través de condiciones ambientales variables (Kang, 1997). Una elevada interacción GxA en relación con el efecto genotipo, más que una excepción, es una regla en los análisis de los ensayos multi-ambientales (DeLacy et al., 1996; Chapman et al. 2000a). La presencia de interacción GxA se manifiesta como la disminución de la correlación genotípica entre ambientes, o sea en la forma que éstos discriminan los genotipos (Cooper y DeLacy 1994). Esto genera incertidumbre a los mejoradores a la hora de seleccionar genotipos y definir manejos específicos. Con la misma incertidumbre se encuentran los productores al momento de decidir que genotipo sembrar. La presente tesis aporta información para reducir esta incertidumbre.

La identificación de genotipos superiores es complicada en presencia de interacción GxA, donde los rendimientos relativos de los genotipos varían a través de los ambientes. En este marco Eisemann et al., 1990, definió tres estrategias para lidiar con la interacción GxA: i) ignorarla, y por consiguiente considerarla como parte del error, ii) evitarlas, a través del agrupamiento de ambientes similares y seleccionando específicamente para ellos (Cooper et al, 1996), o iii) utilizarlas, lo que implica seleccionar en un planteo de testeo multi-ambiental representativo de la población de ambientes objetivo (es decir esquemas de selección amplia; DeLacy et al., 1996).

La decisión de no ignorar las interacciones y optar por otra de las estrategias, es decir entre minimizar las interacciones o acentuar las interacciones favorables, requiere un entendimiento profundo de la naturaleza de dichas interacciones. Pocos estudios se han dedicado al análisis de las bases fisiológicas de la interacción GxA, aunque éste podría proporcionar información útil para aumentar el progreso genético (Unger y Baumhardt, 1999). Por ejemplo, al describir la respuesta de distintos híbridos a ambientes específicos se puede seleccionar los que presentan atributos que determinan adaptación a los ambientes de interés (de la Vega y Hall 2002a, 2002b). Además los programas de mejoramiento de sorgo en Argentina están principalmente basados en selección por rendimiento. Ignorando la posibilidad de utilizar caracteres secundarios que describan la interacción GxA para asistir la selección de genotipos y explotar estas interacciones (de la Vega y Hall 2002a, 2002b).

En la presente tesis se exploraron las bases fisiológicas de la interacción GxA de rendimiento en sorgo, tomando como localidad representativa Zavalla para estudiar atributos secundarios que podrían explicar dicha interacción.

## *Caracterización de ambientes usando modelos de simulación*

El agua es una de las variables del ambiente que más limita la producción de cultivos (Mueller et al., 2012). A diferencia de otras (e.g., salinidad, pH del suelo), la limitación por agua es espacial y temporalmente muy variable, lo que complica la definición de opciones de manejo y mejoramiento para mitigarlas. Los ambientes objetivos de sorgo en Argentina en su principal zona de influencia son muy diversos en tipo de suelo, profundidad y capacidad de retención de agua del perfil. Esto, sumado a la estacionalidad y variación anual de las precipitaciones, determina patrones de estrés hídrico de distinta magnitud e intensidad a lo largo del ciclo. Lo mismo sucede con la ocurrencia de eventos de temperaturas extremas, cuya frecuencia ha aumentado en los últimos años (Lobell y Field, 2007).

A nivel nacional no existe una clara caracterización de los ambientes objetivo de producción para sorgo. Debido a esto, tampoco es claro cuáles son las prácticas de manejo y caracteres del genotipo más acordes a cada zona o ambiente de producción. Esto se ve reflejado en amplias brechas entre el rendimiento logrado y el alcanzable a nivel de productor para las diferentes zonas de producción (Gambin, 2015). Es muy sabido que el momento y la intensidad de estrés hídrico causan diferentes efectos sobre el desarrollo y crecimiento del cultivo (Passioura, 1983), y lo que está faltando es una medida de la frecuencia de ocurrencia de estos tipos de estrés. Lo mismo ocurre con estrés térmico, ya sea por eventos de temperaturas extremas o en sinergia con limitaciones de agua. Esta tesis avanzó en este sentido usando una aproximación que ha sido exitosa en otros sistemas de estudio (Chapman et al., 2000b; Chenu et al., 2011; Sadras et al., 2012).

Los modelos de simulación de cultivos son herramientas de gran utilidad para simular el desarrollo y crecimiento de diversos cultivos. Desde 1970, con el desarrollo de la computación, los paquetes de modelos de simulación de cultivos se desarrollaron rápidamente (Passioura, 1996). Actualmente existe una importante diversidad de modelos que cubren un amplio espectro de usos en diferentes especies (Jones et al., 2001; Hammer et al., 2010). En sorgo existe un modelo de simulación de software libre (APSIM, McCown et al., 1995) con una fuerte base ecofisiológica funcional, lo que representa una gran ventaja en el contexto de la presente tesis.

Una de las áreas donde la fisiología y el modelado pueden jugar un rol fundamental en el mejoramiento de cultivos es la caracterización de ambientes, a través de la definición de la naturaleza y frecuencia de eventos de estrés en la población de ambientes objetivo (Hammer y Jordan, 2007). El modelo puede ser combinado con información de suelos y

series climáticas históricas de sitios representativos de la población de ambientes objetivo y predecir, entre muchos atributos del cultivo, un índice de estrés hídrico y patrones térmicos a lo largo de ciclo. Así, los modelos permiten generar un tipo de información que es inviable de obtener en tiempo y forma mediante experimentación *in situ*.

Muchow et al. (1996) demostraron que un modelo de simulación (Hammer y Muchow, 1994) puede ser usado para caracterizar ambientes donde el agua era la principal variable limitante. El modelo de simulación demostró ser más efectivo para caracterizar ambientes que índices basados en datos climáticos o de agua disponible en el suelo (Muchow et al., 1996). Lo que utilizó fue un índice de transpiración relativa a lo largo del ciclo, que es generado de las interacciones dinámicas dentro del modelo. Este índice se usó para definir la naturaleza de la limitación por agua experimentada por el cultivo a través de su estación de crecimiento. Basado en este índice, Chapman et al. (2000b) clasificaron ambientes en la población de ambientes objetivo para sorgo en Australia. Se identificaron tres tipos de ambientes o estreses y se encontró que la frecuencia de los tipos de ambientes en sitios específicos correlacionaba con los patrones de discriminación entre híbridos en los ensayos multi-ambientales. El estudio, extrapolado a un mayor número de sitios (Chapman et al., 2000c), demostró la importancia de la representatividad del ambiente de selección en los programas de mejoramiento. Trabajos similares se han llevado a cabo recientemente en Australia para trigo y arveja (Chenu et al., 2011; Sadras et al., 2012). Además del estrés por agua, el estrés por temperaturas extremas ha sido explorado en alguno de ellos (ejemplo, Löffler et al., 2005 para maíz en Estados Unidos y Sadras et al., 2012 para arveja en Australia).

La ganancia genética de sorgo granífero en la Argentina en los últimos 30 años ha sido de muy baja magnitud (Gizzi y Gambin, 2016). Se hipotetiza que esta baja ganancia puede deberse a la falta de una descripción precisa de los tipos de ambientes que constituyen la población de ambientes objetivo de sorgo en Argentina. La alta variación espacial y temporal de diferentes variables ambientales (agua a la siembra, precipitaciones, tipo de suelos, temperaturas) en la región puede hacer que los ambientes donde se hace selección no representen adecuadamente la población de ambientes objetivo. Se reconoce que este efecto puede reducir, e incluso revertir, la ganancia genética (Cooper et al., 1996). Esta tesis combinó series de suelos y datos climáticos históricos de sitios representativos de producción de sorgo en un modelo de simulación validado para definir los patrones de estrés hídrico y térmico y su frecuencia de ocurrencia.

## Opciones de manejo y mejoramiento para diferentes ambientes

El progreso del mejoramiento de cultivos depende no solo de identificar genotipos favorables, sino además de definir prácticas de manejo que sean compatibles con éstos. La exploración de éstos aspectos en conjunto conlleva innumerables combinaciones posibles (Hammer y Jordan, 2007). La experimentación *in situ* sólo permite explorar una mínima proporción de todas las combinaciones de genotipo (G), manejo (M) y ambiente (A), lo que limita en gran medida este progreso.

Aproximaciones *in silico* permiten superar esta limitación. La fisiología de plantas y cultivos y el modelado han avanzado de tal forma que proveen el banco de conocimiento sobre el cual evaluar consecuencias de cambios genotípicos y de prácticas de manejo (Boote et al., 1996; Chapman et al., 2003; Hammer et al., 2010). Esta ha sido identificada como otra de las áreas donde la fisiología y el modelado pueden jugar un rol fundamental en el mejoramiento de cultivos (Hammer y Jordan, 2007). Esta aproximación sugiere importantes oportunidades de adaptación específica en otros sistemas (Hammer et al., 2014).

Respecto a variables de manejo, la fecha de siembra es un aspecto básico que puede ser evaluado a fin de evitar la coincidencia del periodo de mayor probabilidad de estrés (Enero) con el periodo crítico del cultivo (pre-floración), situación hipotetizada como actual en diversas zonas. Por motivos de bajas temperaturas en el suelo y la priorización de la siembra de otros cultivos de mayor importancia económica (maíz y soja), la siembra del cultivo de sorgo se realiza en una amplia ventana desde Octubre a Enero. No es clara cuál es la fecha óptima en base a los tipos de estrés hídricos más comunes a los que se enfrenta el cultivo. Para las fechas más comunes (fines Octubre-Noviembre) y los ciclos más utilizados (intermedios-largos), se hipotetiza que las probabilidades de ocurrencia de un estrés hídrico sean muy altas durante el periodo crítico del cultivo (~15 días previos a la antesis y durante la floración; Pepper y Prine, 1972; van Oosterom y Hammer, 2008) y comienzo del llenado, con la consecuente reducción en los rendimientos. Cuantificar este aspecto mediante simulaciones y datos experimentales permitió confirmar que un aspecto clave de manejo, como la fecha de siembra, no es óptimo para las principales zonas de producción.

Respecto a caracteres del genotipo, un aspecto básico tiene que ver con la definición del largo de ciclo. Existe una diversidad muy importante en largo de ciclo en sorgo (ciclos cortos, medios y largos, variando desde 60 a 90 días a floración) y las recomendaciones actuales están basadas principalmente en el largo de la estación de crecimiento, sin un claro

concepto del ambiente hídrico o térmico que explora la etapa más crítica del cultivo, durante la pre-floración y floración. La información generada ayuda a definir el ciclo de acuerdo a cada situación particular. Los ciclos cortos pueden ser la mejor opción en ambientes con alta frecuencia de estrés, mientras que los ciclos largos en general presentan mayor potencial de rendimiento y serían ideales en ambientes sin limitaciones (Giorda y Ortíz, 2011). Las mismas fueron exploradas usando el modelo de simulación en la búsqueda de genotipos ideales para diferentes ambientes.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

- Definir caracteres fisiológicos y variables de manejo agronómico que permitan maximizar el rendimiento de sorgo ante diferentes tipos de estrés ambiental.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Evaluar la interacción genotipo por ambiente (GxA) para el rendimiento en grano de sorgo.
- Caracterizar los patrones de estrés hídrico y térmico durante el ciclo del cultivo en las zonas productoras de sorgo en la Rep. Argentina mediante un modelo de simulación.
  - a. Validar el modelo de simulación APSIM sorgo en términos de fenología y crecimiento en diversas condiciones ambientales y genotipos con diferente largo de ciclo.
  - b. Identificar patrones comunes o tipos de estrés en base a momento, magnitud y duración, y determinar su frecuencia de ocurrencia para cada zona productora.
- Explorar el impacto de diferentes opciones de manejo y atributos genotípicos que se adapten a diferentes tipos de estrés.

## HIPOTESIS

### *Hipótesis asociadas a los objetivos específicos*

- La interacción GxA para rendimiento en sorgo es alta. Es posible identificar caracteres secundarios que expliquen parte de esta interacción.
- El modelo de simulación APSIM sorgo es un modelo robusto por lo que será exitosamente validado teniendo en cuenta los coeficientes genotípicos de híbridos de diferente largo de ciclo adaptados a la región.
- En la Rep. Argentina existen diferentes tipos de estrés hídrico que se caracterizan por variaciones en el momento, duración, magnitud y frecuencia de ocurrencia. El tipo de estrés hídrico más frecuente muestra una distribución espacial (en latitudes mayores se presentará mayor frecuencia de estrés), aunque existe una alta variación interanual. La frecuencia de estrés térmico resulta importante solamente en el Norte de la región productiva.
- Existen opciones de manejo y características del genotipo que permiten mitigar los efectos negativos de diferentes tipos de estrés sobre el rendimiento.

## CAPITULO II

### CARACTERES SECUNDARIOS DETRÁS DE LA INTERACION GENOTIPO POR AMBIENTE PARA RENDIMIENTO EN SORGO

#### INTRODUCCIÓN

Es común encontrar una elevada interacción genotipo por ambiente (GxA) en programas de mejoramiento. Ésta representa un problema ya que genera incertidumbre al seleccionar genotipos. La interacción GxA implica menores correlaciones genotípicas entre ambientes y, en consecuencia, la manera en que estos ambientes discriminan a los genotipos (Cooper y DeLacy, 1994). Una descripción de las bases ecofisiológicas de las interacciones GxA en programas de mejoramiento permite acomodar o explotar estas interacciones para aumentar la ganancia genética (Ivory et al., 1991; Cooper y DeLacy, 1994).

Hay varias formas de analizar las interacciones GxA (Cockerham, 1963; Muir et al., 1992; Cooper y DeLacy, 1994; DeLacy et al., 1996; Yan et al., 2007). El análisis de la varianza se ha utilizado tradicionalmente para cuantificar la interacción GxA midiendo el tamaño relativo de los componentes de varianza. Si la relación entre la interacción GxA y la variación genotípica es alta, la interacción se considera un problema para los programas de mejoramiento (Cooper y DeLacy, 1994). Otra forma de analizar las interacciones GxA es distinguir entre interacciones debido a la heterogeneidad de varianza genotípica entre ambientes (Shorter y Mungomery, 1981; Lefkovitch, 1985), o debido a la falta de correlación genética entre ambientes (Dickerson, 1962). Entre éstas dos, las interacciones por falta de correlación son las más problemáticas, ya que implican cambios en el ranking de los genotipos, modificando el genotipo ideal dependiendo del ambiente (Eisemann et al., 1990). Herramientas estadísticas más modernas permiten incorporar covariables genotípicas, ambientales y/o de manejo (M) en los modelos para explorar y cuantificar interacciones GxA, GxM y GxAxM particulares (Gambin et al., 2016).

Una mejor comprensión de las bases ecofisiológicas de la respuesta de distintos híbridos a ambientes específicos puede contribuir a la eficiencia general del programa de mejoramiento al adaptar híbridos a patrones de adaptación específicos (de la Vega y Hall 2002a, 2002b). Aunque la magnitud de la interacción GxA se ha estudiado en diferentes cultivos, incluido el arroz (Liang et al. 2015), maíz (Abakemal et al., 2016), trigo (Bassi et al., 2016) y soja (Qin et al., 2015), se le ha prestado menos atención a desentrañar las bases

ecofisiológicas de estas interacciones. En sorgo las interacciones GxA han sido ampliamente estudiadas en ambientes tropicales y subtropicales de Australia basándose en la clasificación de tipos ambientales (Chapman et al., 2000a; 2000b), aunque en este análisis se hizo hincapié en el componente ambiental de la interacción GxA más que en el genotípico. Un análisis de las bases ecofisiológicas de la interacción GxA en sorgo podría proporcionar información útil para aumentar el progreso genético en ambientes templados, que ha sido limitado (Unger y Baumhardt, 1999; Mason et al., 2008; Assefa y Staggenborg, 2010; Gizzi y Gambin, 2016).

Los programas de mejoramiento de sorgo en Argentina están principalmente basados en selección por rendimiento. La madurez (o largo del ciclo) recomendada en la región templada central es intermedia, a pesar de que las compañías ofrecen híbridos en un amplio rango de tiempo a antesis (~60-90 días). Los híbridos comerciales también varían en otros caracteres como el número de grano  $m^{-2}$ , peso de grano individual, biomasa total e índice de cosecha (IC) (Gizzi y Gambin 2016), y no está claro si esta variabilidad podría ser explotada. Si la interacción GxA es explicada por uno o más caracteres secundarios, estos podrían ser utilizados para asistir en la selección de genotipos y explotar estas interacciones (de la Vega y Hall 2002a, 2002b).

El objetivo de este capítulo fue cuantificar la interacción GxA para rendimiento en grano de sorgo. Para ello, se colectó información de trabajos previos de 22 híbridos comerciales representativos del mercado durante cuatro años bajo diferentes condiciones y manejos. Los ambientes variaron principalmente en agua y nitrógeno (N) disponible desde las primeras etapas. Los caracteres secundarios medidos fueron fenología (tiempo hasta la antesis y duración del período de llenado de granos; de aquí en más referida como duración del llenado), componentes numéricos (número de granos por  $m^{-2}$  y peso individual del grano), biomasa en madurez fisiológica e IC.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### *Genotipos evaluados*

Los genotipos evaluados fueron híbridos simples seleccionados del programa de mejoramiento de Advanta Semillas SAIC, en base a la variabilidad observada del rendimiento en distintos ambientes.

Se evaluaron 22 genotipos, entre los que se incluyeron 13 genotipos de relevancia comercial de diferentes empresas y de diferente época de liberación (ADV123, ADV114,

ADV1200, ADV2499, VDH305, VDH314 de Advanta; 81G29, 83G29 y P84G62 de Pioneer, DK64T de Monsanto; ACA550 de ACA Semillas; MAXIMO de El Sorgal y MS102 de Dow) y pre-comerciales de Advanta Semillas SAIC incluidos para explorar un amplio rango de diversidad genética (Exp ADV-1; Exp ADV-2; Exp ADV-3; Exp ADV-4; Exp ADV-5; Exp ADV-6; Exp ADV-7; Exp ADV-8; Exp ADV-9). Estos híbridos se originaron de líneas parentales endogámicas desarrolladas para Argentina, Australia y Estados Unidos. Todos los híbridos se categorizaron como sorgo granífero, aunque dos (ADV2499 y Exp ADV-9) son también considerados híbridos de doble propósito debido a su alta producción de biomasa.

### *Condiciones ambientales y de manejo*

Se utilizó una base de datos de experimentos previos, con el objetivo de explorar diversidad de condiciones de crecimiento (ambientes). Los experimentos se realizaron durante las campañas 2011-2012, 2012-2013, 2013-2014 y 2014-2015 en el Campo Experimental Villarino, Facultad de Ciencias Agrarias, UNR, Zavalla (33°1'S, 60°53'O, 130 m altitud), provincia de Santa Fe, Argentina. El suelo es un Argiudol vértico arcilloso limoso (Soil Survey Staff, 2014)

Los genotipos fueron evaluados en 8 ambientes (Amb) diferentes dados por la campaña, la disponibilidad de N, agua y densidad de plantas (Tabla 1). Algunos de estos ambientes son representativos de las prácticas de manejo recomendada para la región (densidad de plantas de 20 plantas m<sup>-2</sup> y niveles intermedios de N; Amb II y VIII), o representan el manejo común realizado por los productores (incluida la ausencia de aplicación de N; Amb I y V). En otros ambientes se aplicó riego y/o altos niveles de N (Amb III y VIII).

**Tabla 1.** Descripción general de los ambientes generados.

Amb <sup>a</sup>	Año de siembra	Fecha de siembra	N suelo a la siembra <sup>b</sup> (kg ha <sup>-1</sup> )	N aplicado (kg ha <sup>-1</sup> )	Densidad (pl m <sup>-2</sup> )	Condición hídrica	Lluvia+Riego durante el ciclo (mm) <sup>c</sup>	Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> )
I	2011	1 Nov	33	0	20	Secano	468	8107
II	2012	3 Nov	16	100	20	Secano	525	10358
III	2013	13 Nov	24	200	20	Riego	816	11293
IV	2013	12 Nov	16	0	30	Secano	716	8093
V	2013	12 Nov	16	0	20	Secano	716	8210
VI	2014	13 Nov	12	0	30	Secano	407	9169
VII <sup>d</sup>	2014	13 Nov	12	0	30	Secano	407	7703
VIII	2014	13 Nov	12	150	20	Secano	407	9718

<sup>a</sup> Ambiente; <sup>b</sup> 0-60 cm de profundidad; <sup>c</sup> La lámina de riego se calculó en base al caudal y al tiempo del riego

<sup>d</sup> Defoliación del 75% del área foliar ca. 15 días pre-antesis.

Se logró un estrés temprano en los estadios vegetativos a través de un aumento de la densidad de siembra a 30 plantas  $m^{-2}$  (Amb IV, VI y VII). En el ambiente VII se realizó además un tratamiento de defoliación con reducción del 75% del área foliar en pre-floración del cultivo. El tratamiento de defoliación consistió en reducir el área de la hoja en ~ 75% en relación con el control no tratado al comienzo del período de establecimiento de la semilla (~ 20 días antes de la antesis; Pepper y Prine 1972; van Oosterom y Hammer 2008). Para esto, las cuatro hojas superiores de cada planta se mantuvieron intactas, y todas las hojas debajo fueron retirados a mano. Para cuantificar la magnitud del tratamiento se midió la interceptación de radiación alrededor de la antesis. El porcentaje de radiación interceptada se redujo significativamente ( $p < 0,01$ ) del 95% al 74%, y no hubo diferencias genotípicas evidentes ( $p > 0,05$ ). Los ambientes II, III y IV fueron previamente descritos en Gizzi y Gambin (2016), donde se repiten diez genotipos utilizados en este capítulo.

No todos los genotipos fueron evaluados en todos los ambientes, por lo que la base de datos presentó cierto desbalance (13% de desbalance). Los genotipos 81G29, 83G19, ACA550, ADV1200, DK64T, MAXIMO y MS102 no se probaron en Amb I y V, DK64T en Amb II, 81G29, ADV123, Exp ADV-1, Exp ADV-2 y Exp ADV-4 en Amb III, y ADV123, P84G62 y Exp ADV-1 en Amb IV.

El diseño experimental en cada ambiente fue en bloques completos al azar con tres repeticiones. Las parcelas fueron de cuatro surcos de 5,5 m de largo a un espaciamiento de 0,52 m. Las parcelas fueron sembradas con mayor densidad y luego raleadas para alcanzar la densidad objetivo.

Se tomaron muestras de suelo previo a la siembra y se analizó disponibilidad de N (0-60 cm) y P Bray (0-20 cm). La fertilización con N (UREA) fue realizada en los estadios V3-V5 (Vanderlip y Reeves, 1972) para alcanzar distintos niveles de disponibilidad de N (Tabla 1). Además, se aplicó fosfato monoamónico (MAP) a la siembra a una dosis de 150 kg MAP  $ha^{-1}$ , a excepción de los ambientes IV y V, donde no hubo aplicación de P.

Se controlaron enfermedades y plagas utilizando productos comerciales recomendados. El riego se aplicó con un sistema de riego por aspersión basándose en la apreciación visual de las parcelas y el pronóstico del tiempo.

### *Caracteres fenotípicos*

Los caracteres medidos fueron rendimiento en grano (corregido a 14 % de humedad), días desde la siembra a antesis (de aquí en más días a antesis), duración del

llenado, número de granos por m<sup>2</sup>, peso de 1000 granos, biomasa en madurez fisiológica e IC.

Para el registro de la antesis, se consideró que cada parcela alcanzó dicho estado cuando el 50% de las plantas mostró al menos una antera visible. La madurez fisiológica se determinó cuando 5 de 10 plantas consecutivas presentaron capa negra en granos ubicados en la parte basal de la panoja (van Oosterom y Hammer, 2008). El tiempo a antesis y desde antesis a madurez fisiológica (o duración del llenado) fue calculado en días y en tiempo térmico. Para el cálculo de tiempo térmico se utilizó una temperatura base de 11°C hasta antesis y 5,7°C después de antesis (Hammer et al., 1993; Heiniger et al., 1993). Como el análisis en tiempo térmico presentó resultados similares al análisis con días calendario, los resultados se presentan en días calendario para facilitar su interpretación.

El rendimiento en grano se determinó con la cosecha de panojas correspondientes a una superficie 2 m<sup>2</sup> de los dos surcos centrales de cada parcela en madurez fisiológica.

La biomasa se determinó con cortes de 0,5 m<sup>2</sup>. La biomasa y las panojas fueron secadas y las panojas luego fueron trilladas y pesadas. El peso individual fue estimado usando el peso de 200 granos por parcela y expresado como peso de mil granos, y el número de granos fue calculado como la relación entre el rendimiento y el peso individual de los granos. El IC se determinó como el cociente entre el rendimiento en grano y la biomasa total en madurez fisiológica.

#### *Análisis estadístico*

Los datos fueron analizadas mediante modelos lineales mixtos en R (R Core Team, 2018; versión 3.0.2, lme4 package; Bates et al., 2014). Se ajustaron dos modelos, en uno se consideraron al efecto genotipo (G) y ambiente (A) como fijo y al bloque anidado en ambiente y genotipo x ambiente (GxA) como efectos aleatorios, y un segundo modelo en el que se consideraron todos los efectos como aleatorios para cuantificar los porcentajes de varianza que representan cada uno. Los predictores lineales insesgadas o BLUPs (Robinson, 1991) fueron obtenidos mediante el método de estimación por máxima verosimilitud restringida (REML, Zuur et al., 2009).

Siguiendo similares procedimientos a los descritos en Curti et al. (2014), (método visual) se utilizaron los BLUPs de los efectos de la interacción GxA para rendimiento del primer modelo en el análisis de patrones. Este análisis se realizó para la clasificación de genotipos y ambientes (Cooper y DeLacy, 1994). Los BLUP de rendimiento se estandarizaron dentro de los ambientes (Fox y Rosielle, 1982), resultando en unidades de

desvío estándar. La clasificación empleó un procedimiento de agrupamiento aglomerativo jerárquico (Williams, 1976) basado en la medida de disimilitud del cuadrado de la distancia euclídea, y la estrategia de agrupación fue la suma incremental de cuadrados (Ward, 1963). Se construyeron dos dendogramas como resultado de estos análisis. Un dendograma para investigar las similitudes en rendimiento entre genotipos en términos de sus respuestas relativas en ambientes particulares. El segundo dendograma para explorar las similitudes en el rendimiento entre ambientes en la forma que influyen el rendimiento relativo de los genotipos. Los componentes principales de la matriz de distancia euclídea del rendimiento se estimaron usando la descomposición de valores singulares, y a partir de este análisis se construyó un AMMI biplot de los dos primeros componentes principales. Este análisis fue elegido por explicar de manera efectiva las interacciones GxA integrando componentes aditivos y multiplicativos en un análisis integrado de mínimos cuadrados (Zobel et al., 1988). El análisis de patrones se realizó utilizando el software R (paquete agricolae, De Mendiburu, 2014; paquete de clúster, Maechler et al., 2013). La interpretación del AMMI biplot fue realizada siguiendo los lineamientos de Gauch et al., (2006).

Las bases ecofisiológicas de la interacción GxA se analizaron mediante gráficos que representan la respuesta de los atributos medidos de los diferentes grupos de genotipos contra los diferentes grupos ambientales (DeLacy et al., 1996). Para la construcción de dichos gráficos se utilizaron BLUP estandarizados dentro de los ambientes para los atributos estudiados (Curti et al., 2014). Los BLUP estandarizados se agruparon según su grupo de pertenencia, y se calculó el promedio y desvío estándar. Se realizaron matrices de correlaciones siguiendo el método de Pearson para explorar la relación entre los BLUP de los atributos.

La interacción GxA para rendimiento fue analizada en los componentes debido a la heterogeneidad de la varianza (V) y la falta de correlación entre los ambientes (L) (Cockerham, 1963) como se describe en Chapman et al. (2000b) (ecuaciones 1 y 2):

$$V = \frac{\sum_{j < j'} (\sigma_g(j) - \sigma_g(j'))^2}{e(e-1)} \quad (1)$$

$$L = \sigma_{ge}^2 - V \quad (2)$$

para la comparación de los ambientes  $j$  a  $j'$ , donde  $\sigma_g$  es el desvío estándar de los genotipos,  $\sigma_{ge}^2$  es el componente de variancia para la interacción GxA, y  $e$  es el número de ambientes.

## RESULTADOS

### *Descripción de los ambientes*

Los ambientes representaron condiciones de crecimiento comunes del área en estudio e incluyeron tratamientos adicionales en diferentes momentos durante el ciclo del cultivo para reducir (mediante el riego y la aplicación de N) o aumentar (mediante el aumento de la densidad y defoliación) el nivel de estrés (Tabla 1).

El N a la siembra varió de 16 a 224 kg ha<sup>-1</sup> (Tabla 1). La disponibilidad de agua difirió considerablemente entre años. El contenido de agua disponible en el suelo a la siembra fue cercano a capacidad de campo en 2012 y 2013, y fue del 50% de capacidad de campo en 2014 (Tabla 1). La precipitaciones previas a floración fueron mayores en 2012 y 2013 en comparación con 2011 y 2014 (media de 370 frente a 250 mm, respectivamente), siendo el promedio histórico de 300 mm (media de 42 años). Las precipitaciones durante el periodo crítico del cultivo promedio de todos los genotipos variaron de 14 a 132 mm y la precipitación posterior a la antesis varió de 117 a 294 mm.

### *Componentes de la varianza*

El rendimiento promedio entre los ambientes varió de 7703 a 11293 kg ha<sup>-1</sup> (Tabla 2). El rendimiento más alto se alcanzó bajo riego y alto N (Amb III), y el más bajo en seco, bajo N y defoliado (Amb VII). El rendimiento en el tratamiento defoliado se redujo en aproximadamente un 20%, similar a la reducción en la radiación interceptada en comparación con el control no tratado (Amb VI). Cerca de la mitad de la variación de rendimiento (48,1%) se asoció a diferencias entre ambientes, el 3,9% se debió a la variación entre genotipos y el 13,6% se asoció con la interacción GxA (Tabla 2).

El número de granos m<sup>-2</sup> y el peso de grano individual variaron de manera similar al rendimiento de grano (Tabla 2). El componente ambiental para la variación del número de granos m<sup>-2</sup> fue mayor que el del peso del grano (26,7 vs. 7,2%, respectivamente). La variación entre genotipos explicó 22,6 y 50,3% para el número de granos m<sup>-2</sup> y el peso de grano, respectivamente (Tabla 2).

La variación entre genotipos en el tiempo a antesis representó el 39,7% de la varianza total. La variación entre los ambientes y la interacción GxA para el tiempo a antesis también mostraron ser relevantes (24,0 y 28,2%, respectivamente; Tabla 2). La variabilidad en la duración del llenado del grano se explicó principalmente por diferencias entre

ambientes (54,4% de la varianza total), a pesar de las diferencias significativas entre genotipos. La variación entre genotipos y la interacción GxA representaron el 10% de la varianza total en cada caso (Tabla 2).

**Tabla 2.** Promedio  $\pm$  desvío estándar para caracteres fenotípicos analizados en 8 ambientes. Porcentajes de la varianza asociados al genotipo (G), ambiente (A), interacción (GxA), bloque anidado en A y residual.

Amb.	Rend (kg ha <sup>-1</sup> ) <sup>a</sup>	DA (días) <sup>b</sup>	Llen (días) <sup>c</sup>	NG (#m <sup>-2</sup> ) <sup>d</sup>	P1000 (g) <sup>e</sup>	BioMF (g) <sup>f</sup>	IC <sup>g</sup>
I	8107 $\pm$ 1471	90 $\pm$ 9	39 $\pm$ 3	28527 $\pm$ 5230	22 $\pm$ 2	1922 $\pm$ 269	0,33 $\pm$ 0,06
II	10358 $\pm$ 1093	79 $\pm$ 5	49 $\pm$ 5	37600 $\pm$ 5008	23 $\pm$ 3	2356 $\pm$ 161	0,38 $\pm$ 0,04
III	11293 $\pm$ 1715	81 $\pm$ 8	60 $\pm$ 5	39743 $\pm$ 6630	27 $\pm$ 3	2767 $\pm$ 342	0,39 $\pm$ 0,04
IV	8093 $\pm$ 581	79 $\pm$ 10	57 $\pm$ 6	33121 $\pm$ 4830	23 $\pm$ 3	2222 $\pm$ 216	0,35 $\pm$ 0,04
V	8210 $\pm$ 643	76 $\pm$ 10	57 $\pm$ 5	32345 $\pm$ 3528	24 $\pm$ 3	2126 $\pm$ 226	0,36 $\pm$ 0,04
VI	9169 $\pm$ 672	75 $\pm$ 5	54 $\pm$ 3	36947 $\pm$ 4444	24 $\pm$ 4	2235 $\pm$ 223	0,38 $\pm$ 0,04
VII	7703 $\pm$ 625	76 $\pm$ 5	53 $\pm$ 6	31471 $\pm$ 3436	23 $\pm$ 3	1850 $\pm$ 158	0,39 $\pm$ 0,04
VIII	9718 $\pm$ 731	80 $\pm$ 3	53 $\pm$ 3	39223 $\pm$ 5192	24 $\pm$ 4	2347 $\pm$ 274	0,40 $\pm$ 0,04
% Varianza							
G	3,9	39,7	10,1	22,6	50,3	9,3	16,6
A	48,1	24,0	54,4	26,7	7,2	42,3	10,3
GxA	13,6	28,2	10,4	10,7	16,8	8,0	7,1
Bloque	1,5	2,9	0,3	0,1	0,6	1,6	0,0
Residual	32,8	5,2	24,8	39,9	25,2	38,8	65,9
GxA/G	3,48	0,71	1,03	0,47	0,33	0,87	0,43

<sup>a</sup>Rendimiento en grano al 14% de humedad (Rend); <sup>b</sup>Días a antesis (DA); <sup>c</sup>Duración del llenado (Llen); <sup>d</sup>Número de granos por m<sup>2</sup> (NG); <sup>e</sup>Peso de mil granos (P1000); <sup>f</sup>Biomasa aérea en madurez fisiológica (BioMF); <sup>g</sup>Índice de cosecha (IC).

La biomasa acumulada en madurez fisiológica varió de manera similar al rendimiento. Fue mayor bajo riego y en condiciones de alto N (Tabla 2). El componente ambiental para la variación de biomasa fue mayor que para el IC (42,3 y 10,3%, respectivamente). La variación entre genotipos explicó 9,3 y 16,6% de la variación de la biomasa y el IC, respectivamente (Tabla 2).

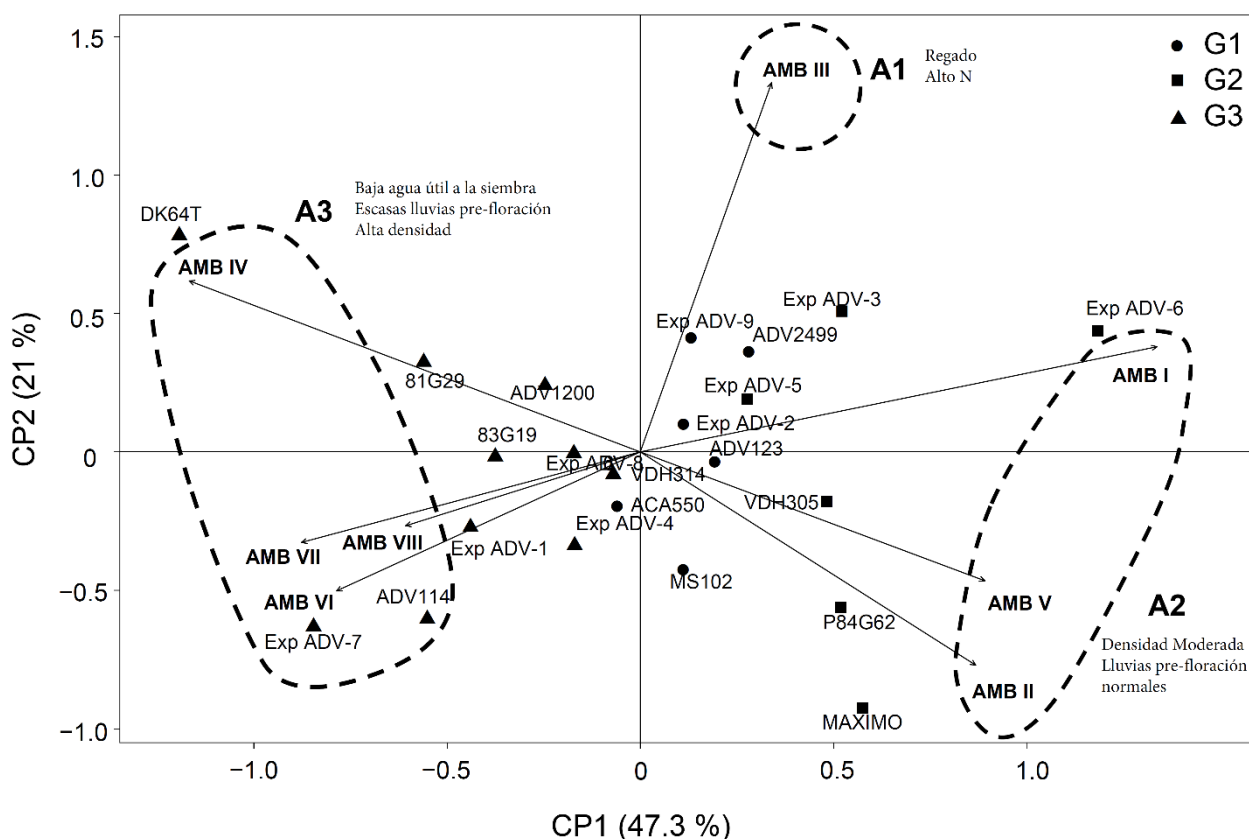
La interacción GxA para rendimiento representó 3,5 veces la varianza genotípica, representando la relación más grande entre los atributos estudiados (Tabla 2). Fue seguido por la duración del llenado de granos (1,03), la biomasa en la madurez (0,87) y el tiempo hasta la antesis (0,71). La relación GxA a G fue inferior a 0,5 para el resto de los atributos (Tabla 2).

### Análisis de patrones

Los genotipos y los ambientes se agruparon en tres grupos de acuerdo a los BLUP de rendimiento. Las agrupaciones de genotipo y ambiente mostraron un nivel de truncamiento que retuvo el 50,8 y el 60,4% de la suma de cuadrados de la interacción GxA

(Anexo 1; Figs. S1 y S2). Los grupos de genotipos G1, G2 y G3 estuvieron compuestos por 6, 6 y 10 genotipos, respectivamente (Anexo 1; Fig. S1). Los grupos de ambientes A1, A2 y A3 estuvieron compuestos por 1, 3 y 4 ambientes, respectivamente (Anexo 1; Fig. S2).

El grupo ambiental A1 incluyó el ambiente irrigado y con alto contenido de N (Amb III), el grupo A2 incluyó Amb I, II y V, y el grupo A3 los Amb IV, VI, VII y VIII (Anexo 1; Fig. S2, y Tabla 1). A3 comprendió ambientes que combinaron bajo contenido de agua a la siembra, densidades de siembra más altas y precipitaciones más bajas antes de la floración, particularmente durante etapas vegetativas tempranas, en comparación con los ambientes agrupados en A2 (Tabla 1). Esto sugiere que estos ambientes experimentaron mayores niveles de estrés hídrico desde las primeras etapas o pre-floración. El grupo ambiental A1 mostró el rendimiento promedio de grano más alto ( $11293 \text{ kg ha}^{-1}$ ), seguido de A2 ( $8771 \text{ kg ha}^{-1}$ ) y A3 ( $8395 \text{ kg ha}^{-1}$ ) (Tabla 2), confirmando que la calidad ambiental disminuye de A1 a A3. Los resultados del análisis de ordenación para el rendimiento confirmaron este agrupamiento (Fig. 1). Los ambientes que se agruparon se ubicaron cercanos entre sí. Los componentes principales 1 y 2 explicaron el 68,3% de la interacción GxA.



**Fig. 1.** AMMI biplot de la primera y segunda componente principal de BLUPs de rendimiento de los 22 genotipos evaluados en los 8 ambientes. Los genotipos están representados con símbolos y los ambientes con vectores. Símbolos iguales indican que pertenecen al mismo grupo según el análisis de cluster. AMB refiere a ambiente.

Un pequeño ángulo (<90°) entre los vectores ambientales que pertenecen al mismo grupo refleja la fuerte correlación positiva entre los ambientes. Los ambientes agrupados en A1 (Amb III) y A2 (Amb I, II y V) mostraron un ángulo de casi 90°, lo que indica que no hay correlación entre los grupos. Los grupos A3 y A1 se correlacionaron negativamente, ya que el ángulo formado entre los vectores era superior a 90° (Fig. 1). Se encontró una correlación negativa entre A2 y A3 (Fig. 1). Esta correlación negativa fue más evidente para Amb IV vs Amb II y V que para Amb I vs Amb VI, VII y VIII.

Los genotipos agrupados en G2 y G3 se ubicaron cerca de los vectores ambientales A2 y A3, respectivamente. Esto indica un rendimiento relativamente mayor de estos genotipos en estos ambientes particulares. Los genotipos correspondientes a G1 se ubicaron cerca del origen, mostrando un rendimiento relativo similar en todos los ambientes evaluados (Fig. 1).

#### *Bases fisiológicas de la interacción GxA*

G1 mostró el rendimiento más bajo, mientras que G2 y G3 mostraron rendimientos similares (Tabla 3). El rendimiento de los grupos de genotipos en los grupos de ambientes evidenciaron de manera clara la interacción GxA (Fig. 2). G1 evidenció el rendimiento más bajo en todos los ambientes (Fig. 2A). De acuerdo con el biplot AMMI (Fig. 1), G2 evidenció un mejor rendimiento relativo bajo niveles de estrés intermedios (A2), mientras que G3 mostró el mayor rendimiento en los ambientes más estresantes (A3) (Fig. 2A). De acuerdo con los resultados de la Fig. 2A, la partición de la interacción GxA indicó que ambos tipos de interacción estaban presentes (59% de la interacción se debió a la heterogeneidad de la varianza, mientras que el 41% se debió a la falta de correlación genética, según Cockerham, 1963).

**Tabla 3.** Promedio de los caracteres fenotípicos ( $\pm$  desvío estándar) de los tres grupos de genotipos.

Grupo	Rend (kg ha <sup>-1</sup> ) <sup>a</sup>	DA (días) <sup>b</sup>	Llen (días) <sup>c</sup>	NG (#m <sup>-2</sup> ) <sup>d</sup>	P1000 (g) <sup>e</sup>	BioMF (g) <sup>f</sup>	IC <sup>g</sup>
G1	8233 $\pm$ 1736	80 $\pm$ 15	49 $\pm$ 11	36277 $\pm$ 8079	20 $\pm$ 4	2099 $\pm$ 455	0.35 $\pm$ 0.07
G2	9266 $\pm$ 1743	79 $\pm$ 8	54 $\pm$ 7	33550 $\pm$ 5731	25 $\pm$ 2	2253 $\pm$ 320	0.37 $\pm$ 0.05
G3	9287 $\pm$ 1335	77 $\pm$ 7	53 $\pm$ 7	34682 $\pm$ 5702	25 $\pm$ 3	2182 $\pm$ 301	0.38 $\pm$ 0.04

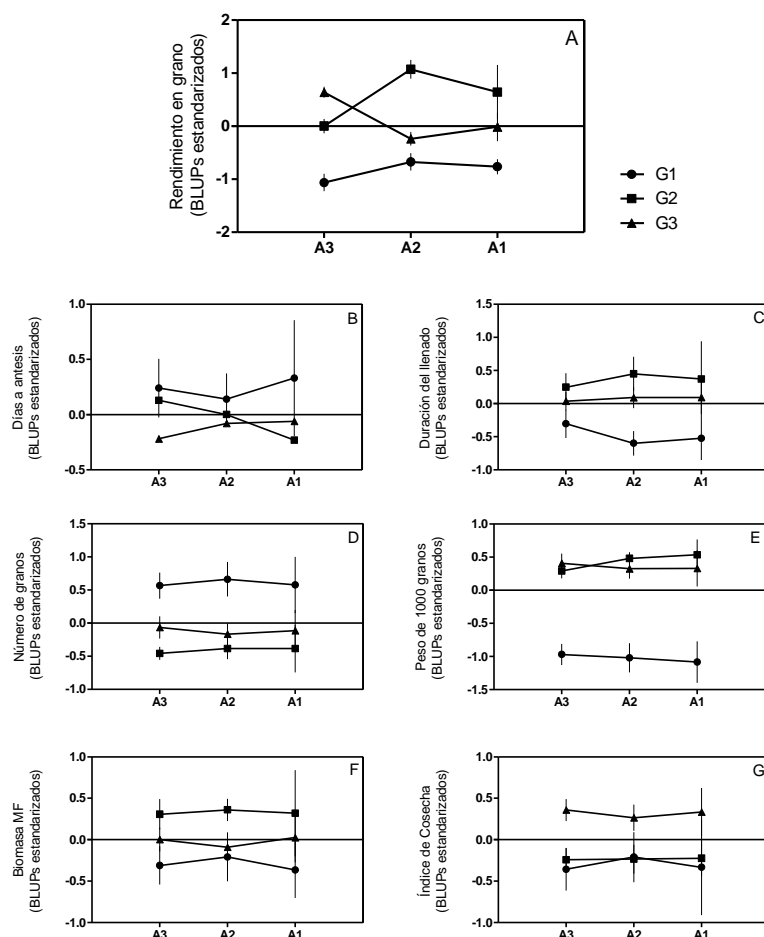
<sup>a</sup>Rendimiento en grano al 14% de humedad (Rend); <sup>b</sup>Días a antesis (DA); <sup>c</sup>Duración del llenado (Llen); <sup>d</sup>Número de granos por m<sup>2</sup> (NG); <sup>e</sup>Peso de mil granos (P1000); <sup>f</sup>Biomasa aérea en madurez fisiológica (BioMF); <sup>g</sup>Índice de cosecha (IC).

Los genotipos dentro de G1 mostraron una menor duración de llenado, un peso de grano bajo y un número de grano alto m<sup>-2</sup> (Tabla 3; Figs. 2C, 2E y 2D). También tendieron a

presentar un mayor tiempo a antesis y menor biomasa a madurez, aunque fue evidente una gran variación entre los genotipos dentro de este grupo para ambos caracteres (Fig. 2B). Los caracteres para este grupo fueron estables en todos los ambientes. No hubo diferencias evidentes entre los grupos para el resto de los caracteres estudiados (Tabla 3; Fig. 2).

Contrariamente a G1, los genotipos dentro de G2 mostraron una mayor duración del periodo de llenado, mayor peso de grano y menor número de grano m<sup>-2</sup> (Tabla 3; Fig. 2C, E y D). También tendieron a altos niveles de biomasa a madurez (Fig. 2F). Estos cuatro caracteres también fueron estables en todos los ambientes. Este grupo de genotipos mostró un menor tiempo a antesis en el ambiente fertilizado e irrigado A1, y un claro retraso en ambientes más estresantes (Fig. 2B).

El grupo G3 exhibió valores promedio para la mayoría de los caracteres (Fig. 2). Mostraron un menor tiempo a antesis y un mayor peso de grano individual e IC (Fig. 2B, E y G). Estos caracteres también fueron estables en todos los ambientes.



**Fig. 2.** Rendimiento (A), días a antesis (B), duración de llenado (C), número de granos (D), peso de mil granos (E), biomasa en madurez fisiológica (MF) (F) e índice de cosecha (G) para los tres grupos de genotipos en los tres grupos de ambientes. Los valores en la figura corresponden a BLUPS estandarizados, por lo que 0 representaría la media, y un valor de 1 es un desvío estándar sobre la media y -1 un desvío estándar por debajo de la media. Las barras verticales indican el error estándar.

La asociación entre los BLUP para el rendimiento y los seis caracteres difirieron según el grupo de ambiente. Los BLUP de rendimiento se correlacionaron significativamente ( $p < 0.05$ ) con el peso de grano en todos los grupos ambientales (Tabla 4; Figs. 3A, 3B y 3D). En A2, los BLUP de rendimiento también se correlacionaron positivamente con la duración del llenado ( $p < 0,05$ ; Tabla 4; Fig. 3C). En el ambiente más estresante A3, el rendimiento se asoció negativamente con el tiempo a antesis ( $p < 0,05$ ; Tabla 4; Fig. 3E). El rendimiento no mostró correlación significativa con el resto de los caracteres (Tabla 4).

El número de grano  $m^{-2}$  y el peso del grano se correlacionaron negativamente en todos los grupos ambientales (Tabla 4).

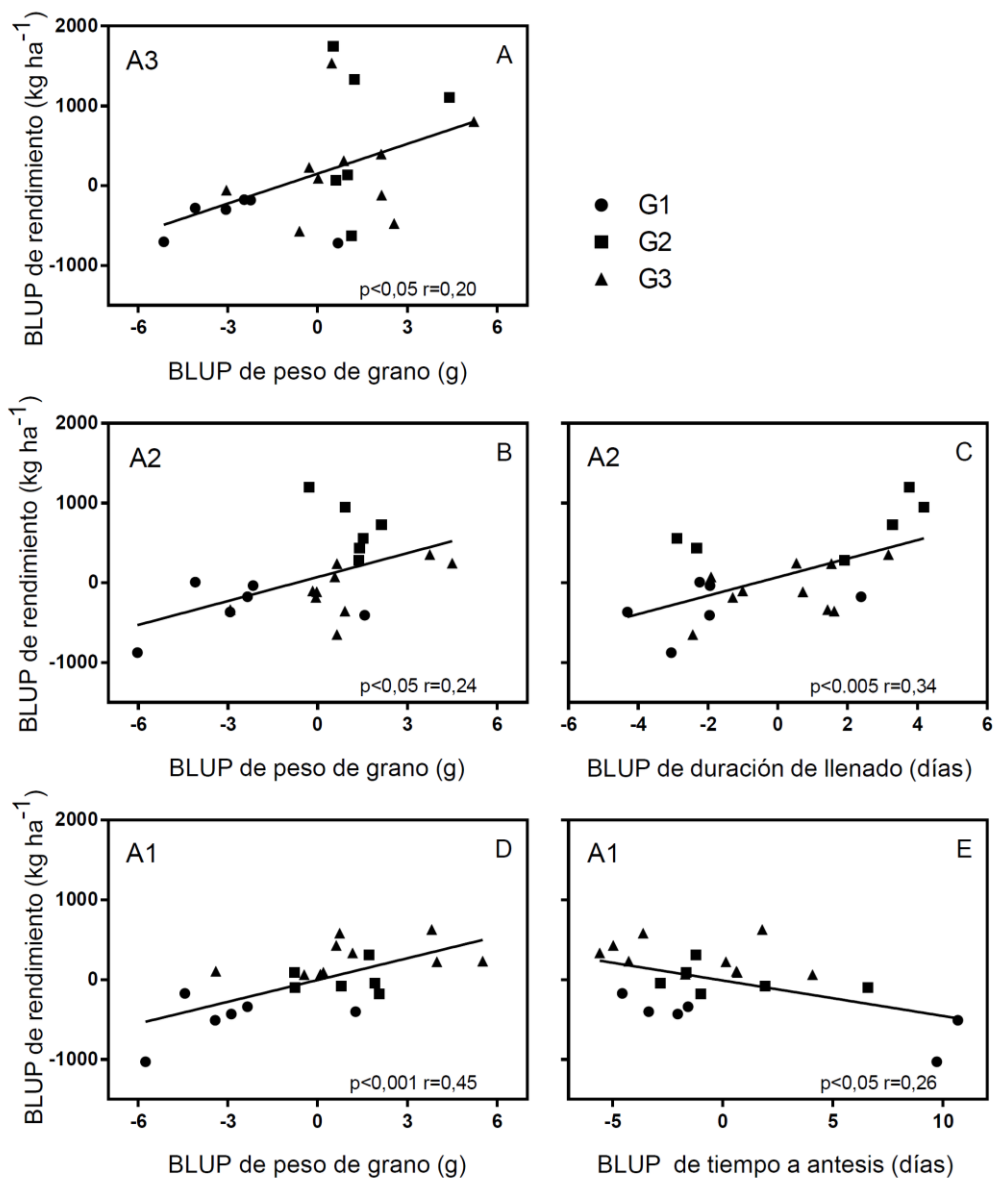
**Tabla 4.** Coeficientes de correlación de Pearson de los caracteres estudiados para cada grupo ambiental. Las correlaciones significativas ( $p < 0,05$ ) se muestran resaltadas.

Grupo Ambiental	Carácter	Días a antesis	Duración del llenado	Número de granos $m^{-2}$	Peso de grano	Biomasa en madurez	Índice de cosecha
A3	Rendimiento	-0,19	0,31	0,02	<b>0,45</b>	0,26	0,10
	Días a antesis		-0,12	0,31	<b>-0,48</b>	0,29	<b>-0,77</b>
	Duración del llenado			-0,03	0,24	-0,09	0,26
	Número de granos $m^{-2}$				<b>-0,67</b>	0,15	0,01
	Peso de grano					0,32	0,28
	Biomasa en madurez						<b>-0,39</b>
A2	Rendimiento	-0,23	<b>0,58</b>	-0,38	<b>0,49</b>	0,17	0,00
	Días a antesis		-0,12	0,16	-0,33	<b>0,58</b>	<b>-0,80</b>
	Duración del llenado			-0,23	0,38	0,08	0,04
	Número de granos $m^{-2}$				<b>-0,80</b>	-0,03	0,14
	Peso de grano					0,16	0,22
	Biomasa en madurez						<b>-0,59</b>
A1	Rendimiento	<b>-0,51</b>	0,08	-0,23	<b>0,67</b>	0,25	0,40
	Días a antesis		0,17	0,11	-0,42	0,34	<b>-0,84</b>
	Duración del llenado			0,06	-0,10	-0,18	0,00
	Número de granos $m^{-2}$				<b>-0,83</b>	-0,21	0,19
	Peso de grano					0,33	0,13
	Biomasa en madurez						<b>-0,58</b>

Los resultados del AMMI (Fig. 1) confirmaron los de agrupamiento. Los vectores de los ambientes agrupados por el cluster presentaron ángulos pequeños en el biplot. Esto demuestra su fuerte correlación positiva. La primer y segunda componente explicaron el 63,3% de la variación en la interacción. Los ambientes agrupados en A3 y A2 se encontraron en aproximadamente un ángulo de  $90^\circ$ , indicando que no hubo correlación. En cambio, A1 y A3 tendieron a estar negativamente correlacionados (ángulo mayor a  $90^\circ$ ). A2 y A1 presentaron una evidente correlación negativa. Los genotipos agrupados en G2 y G3 se encontraron dispersos cerca de los vectores A2 y A1, respectivamente. Esto indica el

mejor comportamiento de estos genotipos en esos ambientes. Los genotipos correspondientes a G1, se ubicaron cerca al origen, indicando que su comportamiento es similar a través de los ambientes (Fig. 1).

El cluster G1 mostró un menor rendimiento relativo en todos los ambientes explorados (Fig. 2A). El cluster G2 mostró mejor comportamiento en los ambientes más favorables (A1 y A2), mientras que G3 lo hizo en los ambientes menos favorables (A3) (Fig. 2A).



**Fig. 3.** Correlación entre los mejores predictores lineales insesgados (BLUP) para el rendimiento y (A) peso de grano en el grupo ambiental A3, (B) peso de grano y (C) duración del llenado en el grupo ambiental A2, y (D) peso del grano y (E) tiempo hasta la antesis para el grupo ambiental A1. Cada punto representa un genotipo individual. El mismo símbolo indica el genotipo que pertenece al mismo grupo basado en similitudes en el rendimiento en ambientes particulares.

## DISCUSIÓN

Las contribuciones relativas del genotipo y la interacción GxA para el rendimiento, la fenología, y los componentes numéricos y fisiológicos encontrados en los materiales en este estudio, están en acuerdo con resultados anteriores (Chapman et al., 2000b; Rackshit et al., 2012; Gizzi y Gambin, 2016). La gran proporción de GxA a G para el rendimiento complica la identificación de genotipos superiores y podría explicar en parte la baja ganancia genética encontrada para el sorgo en esta región de producción (Gizzi y Gambin, 2016). También sugiere que la respuesta a la selección indirecta para ambientes objetivo usando unos pocos ambientes controlados sería difícil basado solo en rendimiento. Por otro lado, la gran contribución relativa de los efectos G para la mayoría de los atributos secundarios sugiere que la interacción GxA no sería un impedimento importante para lograr una alta respuesta de selección para estos atributos. La estabilidad en diferentes ambientes para diferentes atributos también brinda oportunidades de selección en diferentes ambientes.

Particionar la interacción GxA para el rendimiento en la heterogeneidad de varianza y la falta de correlación entre los ambientes proporciona una mejor comprensión de la interacción (Cooper y DeLacy, 1994). La heterogeneidad de la varianza según los cálculos presentados en Cockerham 1963, fue mayor y representó el 59% de la interacción GxA. Se identificó un grupo de genotipos que muestran un rendimiento relativamente bajo en todos los ambientes, lo que indica que estos genotipos no expresan atributos deseables para obtener altos rendimientos en las condiciones de crecimiento exploradas en este estudio. Este grupo tiene características distintivas y estables en términos de fenología (floración tardía, menor duración de llenado) y componentes de rendimiento (peso de grano bajo) (Fig. 2). Estos atributos podrían usarse como secundarios y no deseados durante la selección. Estos genotipos establecen un alto número de grano  $m^{-2}$  que no compensa la reducción en el peso del grano. Los genotipos de floración más tardía alcanzaron la antesis de principios a mediados de Febrero, exponiendo el período anterior a la antesis a condiciones más favorables en términos de disponibilidad de agua en comparación con los materiales más cortos. Esto podría explicar su alto número de granos. Sin embargo, el período posterior a la antesis para estos materiales se coloca en condiciones progresivamente más desfavorables en términos de radiación y superponiendo el periodo con el periodo de probabilidad de heladas, lo que explica la reducción en la duración del llenado y el peso del grano. Esto también está respaldado por la correlación negativa entre el tiempo a antesis y el IC en todos los ambientes (Tabla 4). Los genotipos de floración más tardía generalmente se recomiendan para siembras tempranas, lo que confirma los resultados actuales. Los

resultados sugirieron que las estrategias de selección para aumentar el rendimiento en la población de ambientes deberían centrarse en genotipos de madurez corta o intermedia.

Por otro lado, la interacción por falta de correlación fue del 41%. La falta de correlación representa un problema para los programas de mejoramiento debido al cambio de ranking de los genotipos (Chapman et al., 2000b). Los ambientes se agruparon siguiendo la disponibilidad y el uso del agua durante las etapas tempranas o previas a la floración, lo que sugiere un gradiente de menor a mayor nivel de estrés de A1, A2 y A3, respectivamente. La falta de correlación indicó que los genotipos respondían de manera diferente al estrés en pre-floración, y proporciona evidencias de que la selección basada en el rendimiento en condiciones de estrés bajo podría no implicar una mejora en condiciones de estrés. Esto es similar en estudios previos de trigo (Cooper et al., 1995) pero diferente a maíz, en el cual el progreso genético positivo fue evidente tanto en condiciones de agua como de sequía (Cooper et al., 2014). En otras palabras, tanto en condiciones de disponibilidad hídrica abundante como en escasa, los genotipos de maíz que fueron rankeados superiores fueron los mismos, y al seleccionar por alto rendimiento en condiciones ambientales favorables, se selecciono a su vez para condiciones desfavorables.

La correlación entre los efectos genotípicos para el rendimiento y otros atributos en diferentes ambientes ayuda a definir los atributos que pueden usarse como secundarios en selección indirecta para mejorar el rendimiento en cada tipo ambiental (Curti et al., 2014). Se identificó que los efectos genotípicos sobre la mayor duración del llenado de granos contribuyeron positivamente al peso y al rendimiento de grano en ambientes con bajos niveles de estrés (A1 y A2), aunque la contribución fue significativa solo en A2 (Fig. 3; Tabla 4). El peso del grano de sorgo depende en gran medida de la disponibilidad de la fuente durante el período efectivo de llenado del grano (Gambin y Borrás, 2007), lo que sugiere que estos ambientes muestran condiciones favorables (disponibilidad hídrica y temperaturas moderadas) durante el período posterior a la antesis, y que los genotipos que podrían explotarlo resultan en mayor rendimiento. Gambin y Borrás (2011) trabajando con líneas endocriadas en ambientes similares al de la presente tesis encontraron grandes variaciones en la duración del llenado de granos y concluyeron que seleccionar un llenado de granos más largo puede aumentar el peso y el rendimiento sin correlaciones negativas con el número de granos. La falta de correlación entre el tiempo a antesis y la duración del llenado del grano sugiere que ambos atributos podrían combinarse independientemente.

Por otro lado, los efectos genotípicos en el tiempo a antesis hicieron una contribución significativa en el rendimiento de grano solo en los ambientes más estresantes (Fig. 3), lo que muestra que los materiales cortos (G3) se recomiendan para ambientes que muestran

una disponibilidad de agua reducida en etapas tempranas del cultivo. Curiosamente, un tiempo más corto para la antesis tuvo un impacto positivo en el rendimiento al aumentar el peso del grano. Respecto a este último punto, hipotetizamos que se debe a cambios en las condiciones ambientales al adelantar el comienzo del llenado. El grupo de genotipos G2 evidenció un retraso en el tiempo de floración en estas condiciones, comportándose de manera similar a los genotipos de floración tardía G1 (Fig. 2B). El sorgo es conocido por su capacidad para retrasar el tiempo de floración cuando se expone a condiciones limitadas de agua durante las etapas previas a la floración (Donatelli et al., 1992; Craufurd et al., 1993). Los resultados de esta tesis sugieren que este retraso no es deseable debido a sus consecuencias negativas sobre el peso del grano. Un retraso en el tiempo de floración implica exponer el período posterior a la floración a condiciones de crecimiento más pobres (baja radiación y aumento de probabilidades de que el llenado termine prematuramente debido a temperaturas bajas extremas), similares a los genotipos de floración tardía. Aunque atribuyo este comportamiento a causas climáticas impactando sobre el crecimiento, puede también haber causas fisiológicas detrás. Craufurd et al., (1993) menciona que el estrés hídrico retrasa la diferenciación de primordio, y de la panoja posterior, entonces el estrés prefloración podría estar limitando el tamaño de los ovarios, y por lo tanto su capacidad de destino. También se confirmó la existencia de diferencias genotípicas para este rasgo que no se habían informado previamente para genotipos comerciales locales.

El rendimiento se correlacionó positivamente con el peso del grano en todos los ambientes y no se correlacionó con el número de grano  $m^{-2}$  (Tabla 4), lo que significa que las variaciones genotípicas en el peso del grano fueron más importantes que las variaciones del número de grano. El número de granos y el peso se correlacionaron negativamente (Tabla 4). Según estos resultados, la selección por rendimiento ha hecho aumentar indirectamente el peso de granos, a expensas del número de granos, por un efecto de correlación genética positiva entre rendimiento y peso de granos vs. rendimiento y número de granos en estos materiales resultados de un programa de mejoramiento genético determinado.

Estudios previos han propuesto para ayudar a la selección del mejoramiento el uso de ensayos controlados para identificar genotipos superiores en un conjunto más amplio de ambientes objetivos (Zavala-García et al., 1992; Cooper et al., 1997). En este contexto, es crítico definir qué condiciones son representativas de la población objetivo de ambientes. En este primer capítulo, no se definió claramente qué ambientes son representativos de la población de ambientes objetivo, para ello es necesario evaluar mayor cantidad de

ambientes controlados. Además fue evidente la necesidad de una mejor comprensión de los tipos de estrés que definen los ambientales objetivo.

## CONCLUSIONES

Se comprobó una gran interacción GxA para rendimiento en sorgo. La gran contribución relativa de los efectos genotípicos para la mayoría de los caracteres secundarios sugiere que la interacción GxA no sería un impedimento importante para lograr una alta respuesta de selección para estos caracteres.

Las estrategias de selección para aumentar el rendimiento en ambientes templados deben centrarse en genotipos de floración temprana o intermedia con una larga duración de llenado de granos que permita maximizar el peso del grano. Los híbridos de floración tardía ubican el período de llenado del grano en condiciones de crecimiento desfavorables (respecto a radiación y temperatura) que afectan el tamaño del grano.

Bajo ambientes que muestran condiciones limitadas de agua en las etapas previas a la floración, los materiales de floración temprana parecen ser deseables (mayor radiación). Los híbridos que expresan un retraso en el tiempo de floración en esta situación no son deseables debido a sus consecuencias negativas en la reducción del peso del grano.

## CAPITULO III

### PATRONES DE ESTRÉS HÍDRICO Y TÉRMICO EN LA REGION TEMPLADA CENTRAL ARGENTINA

#### INTRODUCCIÓN

Los productores agropecuarios valoran el cultivo de sorgo porque tiene costos de producción relativamente bajos, tiene una capacidad particular para resistir diferentes tipos de estrés abiótico, incluido el déficit o exceso de agua, y tiene una elevada biomasa remanente que mejora las propiedades físicas y químicas de los suelos (Doggett, 1988). Es por estas razones que el cultivo de sorgo suele relegarse a suelos menos fértiles. Esto se ha intensificado durante las últimas décadas con el avance de cultivos más rentables como el maíz y la soja. De acuerdo con esto, la tecnología aplicada (incluida la fertilización con N o P, el control de malezas y plagas) en toda la región es baja, especialmente en comparación con otros cultivos (Brihet, 2017), y la proporción de productores que aplican estos bajos niveles tecnológicos ha aumentado en la última década (Brihet y Gayo, 2016). Como ya se ha mencionado en capítulos anteriores, las prácticas agronómicas utilizadas por los productores de sorgo actualmente no se basan en una comprensión clara de las interacciones GxAxM (genotipo por ambiente por manejo), lo que está en acuerdo con la brecha de rendimiento estimada (Gambin, 2015).

Actualmente no existe una definición clara de las poblaciones ambientales objetivo de sorgo en Argentina. Por esta razón, no son claros qué caracteres genotípicos o prácticas de manejo se necesitan en diferentes ambientes de producción. Los ambientes de producción de sorgo varían en tipo de suelo, profundidad del suelo y retención de agua. Esto, combinado con la variación estacional y anual de la lluvia y la temperatura, determina diferentes patrones de estrés hídrico durante el ciclo del cultivo. Es bien sabido que el momento, la intensidad y la duración del estrés hídrico causan diferentes efectos sobre el crecimiento y el desarrollo de los cultivos (Passioura, 1983), y lo que falta es una medida de la frecuencia de aparición de diferentes tipos de estrés para la región.

Lo mismo se aplica con el estrés térmico, que se pronostica que será más frecuente en un futuro cercano (Lobell y Field, 2007). Se ha demostrado el efecto negativo directo del estrés térmico sobre el desarrollo de las flores de sorgo y la formación de granos (Prasad et al., 2008; 2015; Singh et al., 2016), pero no se ha descrito la frecuencia de las temperaturas extremas que afectan al sorgo en nuestra región. Debido a que la sequía

generalmente ocurre cuando también se experimenta estrés térmico, es importante explorar la frecuencia de ocurrencia de estrés hídrico y térmico en conjunto. Este tipo de información en sorgo es actualmente limitada (Rötter et al., 2018).

Los modelos de simulación son una herramienta valiosa para simular el crecimiento y el desarrollo de los cultivos (Passioura, 1996). Desempeñan un papel fundamental en el mejoramiento de cultivos cuando se usan: (i) para caracterizaciones ambientales, con el fin de identificar la naturaleza y la frecuencia de los eventos de estrés en la población objetivo de los ambientes, y (ii) para predecir el resultado de las combinaciones de GxM en los ambientes objetivo (Hammer y Jordan, 2007). Existen evidencias del uso de modelos de simulación para estos fines en varias especies (incluyendo sorgo) y regiones (Chapman et al., 2000a; Chenu et al., 2011; Hammer et al., 2014; Sadras et al., 2012; Seyoum et al., 2017; Singh et al., 2017). Es importante disponer de esta información para distintas regiones de producción, ya que permite comparar estrategias de manejo o mejoramiento, incluyendo caracteres de potencial interés agronómico, condiciones de testeo de los materiales, planificación de ensayos y criterios de selección.

Los objetivos de este capítulo fueron a) validar el modelo de simulación APSIM sorgo en términos de fenología y crecimiento en diversas condiciones ambientales para diferentes ciclos; b) identificar patrones comunes o tipos de estrés en base a momento, magnitud y duración y determinar su frecuencia de ocurrencia para cada zona productora.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### *Parametrización y evaluación del modelo*

El Simulador de Sistemas de Producción Agrícola (APSIM, McCown et al., 1995) es una plataforma modular de modelado. Los módulos de la planta simulan procesos fisiológicos y el módulo de manejo permite especificar reglas de manejo que caracterizan el escenario que se está simulando. Opera en un intervalo de tiempo diario en respuesta a los datos meteorológicos diarios y las características del suelo (Keating et al., 2003).

El módulo APSIM-sorgo fue descrito en detalle por Hammer et al. (2010). El modelo contiene procesos que simulan la fenología, el desarrollo del canopeo, el crecimiento del cultivo y la dinámica del N. La fenología simula varios estadios de desarrollo, utilizando tiempo térmico objetivo para cada etapa (Muchow y Carberry, 1990; Muchow y Sinclair, 1994). La acumulación de biomasa en condiciones óptimas solo está limitada por la radiación, y se calcula como el producto de la radiación interceptada y la eficiencia del uso

de la radiación (Hammer et al., 2010). Por otro lado, cuando el cultivo está bajo estrés por sequía y la acumulación de biomasa está limitada por agua, la biomasa se calcula como el producto de la transpiración y la eficiencia de transpiración (Hammer et al., 2010). La partición de biomasa está directamente relacionada con el tiempo térmico a través de coeficientes de partición.

### *Descripción de los experimentos*

Los datos para la parametrización del modelo se obtuvieron de ensayos de campo realizados durante las temporadas de cultivo 2014 y 2016 en el Campo Experimental Villarino, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Rosario, en Zavalla (33° 1 'S, 60° 53' W, 130 m de altitud), Provincia de Santa Fe, Argentina. El tipo de suelo era un limo arcilloso limoso Argiudol vértico (Soil Survey Staff, 2014) (Tabla 5). La validación del modelo se realizó utilizando experimentos de campo independientes realizados entre las campañas 2011 y 2016 en Zavalla, y durante 2016 en Laguna Larga (31° 48'S; 63° 46' O), provincia de Córdoba (tipo de suelo franco limoso Haplustol éntico), Venado Tuerto (33° 40' S; 61° 58' O), provincia de Santa Fe (tipo de suelo franco limoso Argiudol típico) y Gálvez (31° 59' S; 61° 15' O), provincia de Santa Fe (limo arcilloso limoso Argiudol típico), Argentina.

Los experimentos para la parametrización del modelo se realizaron en condiciones no limitantes de agua y N (Mercau et al., 2007), mientras que las pruebas del modelo incluyeron experimentos bajo disponibilidad variable de agua y N (Tabla 5). Se utilizaron tres genotipos comerciales de ADVANTA SAIC: ADV114 (ciclo corto), VDH314 (ciclo intermedio) y VDH422 (ciclo largo), siendo estos materiales representativos de la variabilidad de largos de ciclo comunes en la región central. Los datos recopilados proporcionaron una base sólida para parametrizar aspectos del modelo asociados con las diferencias genotípicas, y para la validación del modelo.

En todos los experimentos se utilizó un diseño de bloques al azar con tres repeticiones. Las parcelas fueron de cuatro surcos de 5,5 m de largo a 0,52 m de espaciamiento. Se tomaron muestras de suelo hasta 60 cm de profundidad antes de la siembra para determinar las condiciones iniciales. Esto incluyó determinaciones de la cantidad de P (ppm, 0-20 cm) y N-NO<sub>3</sub> (0-60 cm) por espectrofotometría. El contenido de agua disponible en el suelo se determinó en cada experimento hasta 2 m de profundidad. El contenido de agua del suelo se determinó por el método gravimétrico (Black y Power, 1965).

**Tabla 5.** Detalle de los experimentos de campo realizados para la parametrización y validación del modelo. La disponibilidad de N incluye los nitratos a la siembra (0-60 cm) más el N aplicado con fertilizantes. Los símbolos “+” y “-” indican si las medidas fenotípicas fueron realizadas o no respectivamente: + en fenología incluye tiempo a iniciación floral, antesis y madurez fisiológica; + en área foliar indica aparición foliar, desarrollo del área foliar y senescencia durante el ciclo del cultivo; + en biomasa indica mediciones regulares durante el ciclo del cultivo; “r” indica que los muestreos de fenología y biomasa fueron realizados en momentos específicos. <sup>c</sup> Los valores incluyen riego adicional en antesis.

Exp	Sitio	Año	Fecha de siembra	Genotipo	Lluvias desde la siembra hasta Abril (mm)	Densidad (pl m <sup>-2</sup> )	Agua útil a la siembra (mm)	Disponibilidad de N (kg ha <sup>-1</sup> )	Fenología / Área foliar / Biomasa / Rendimiento
<i>Parametrización del modelo</i>									
1	Zavalla	2014	Nov 13	ADV114, VDH314, VDH422	879 <sup>c</sup>	18	264	162	+ / + / + / +
2	Zavalla	2016	Nov 3	ADV114, VDH314, VDH422	816	20	264	178	+ / + / + / +
<i>Validación del modelo</i>									
3	Zavalla	2011	Nov 1	ADV114, VDH314, VDH422	581	20	70	27	r / - / r / +
4	Zavalla	2012	Nov 3	ADV114, VDH314, VDH422	763	20	264	118	r / - / r / +
5	Zavalla	2012	Dic 13	ADV114, VDH314	630	24	264	118	r / - / - / +
				ADV114, VDH314	630	17	264	118	r / - / - / +
6	Zavalla	2012	Nov 3	ADV114, VDH314, VDH422	763	20	264	118	r / - / r / +
7	Zavalla	2013	Nov 13	ADV114, VDH314, VDH422	451 <sup>c</sup>	18	264	229	r / - / r / +
8	Zavalla	2013	Nov 12	ADV114, VDH314, VDH422	366	18	264	16	r / - / r / +
				ADV114, VDH314, VDH422	366	28	264	16	r / - / r / +
9	Zavalla	2014	Nov 13	ADV114, VDH314, VDH422	779	28	134	162	r / - / r / +
				ADV114, VDH314, VDH422	779	20	134	18	r / - / r / +
				ADV114, VDH314, VDH422	779	18	134	162	+ / + / + / +
10	Zavalla	2014	Nov 3	VDH314	779	8	134	12	r / - / r / +
				VDH314	779	18	134	12	r / - / r / +
				VDH314	779	28	134	12	r / - / r / +
11	Zavalla	2016	Nov 3	ADV114, VDH314, VDH422	816	20	264	109	+ / + / + / +
12	Zavalla	2016	Dic 16	ADV114, VDH314, VDH422	763	20	239	184	+ / + / + / +
				ADV114, VDH314, VDH422	763	20	239	253	+ / + / + / +
13	Galvez	2016	Oct 30	ADV114, VDH314, VDH422	559	20	240	115	r / - / r / +
14	Laguna Larga	2016	Dic 10	ADV114, VDH314, VDH422	387	20	217	227	r / - / r / +
15	Venado Tuerto	2016	Nov 11	ADV114, VDH314, VDH422	477	20	265	206	r / - / r / +

Se aplicó N (en forma de UREA) en la etapa V4-V5 (Vanderlip y Reeves, 1972) y se aplicó MAP en la siembra para alcanzar diferentes niveles de fertilización de N según el experimento particular (Tabla 5). Las parcelas se sembraron y ralearon después de emerger a la densidad objetivo (Tabla 5). En todos los experimentos, las malezas y las plagas se controlaron según fuera necesario.

### *Mediciones fenotípicas*

Los experimentos fueron muestreados regularmente para desarrollo y crecimiento de manera similar a la descrita en van Oosterom et al. (2010). Esto incluyó experimentos realizados para la parametrización del modelo y varios experimentos realizados para la validación (Tabla 5). El resto de los experimentos incluyeron algunas variaciones en la información fenotípica que estaba disponible para la validación.

### Fenología

Se observó el momento de iniciación de la panoja, antesis y madurez fisiológica por parcela. El inicio de la panoja se estimó mediante disección del ápice de una planta por parcela cada 2-3 días desde 30 días posteriores a la emergencia. La antesis se registró el día en que el 50% de las plantas de los dos surcos centrales tenían anteras visibles. La madurez fisiológica se registró después de observaciones visuales de la capa negra en granos basales en cinco de diez plantas aleatorias consecutivas (van Oosterom y Hammer, 2008). Las panojas fueron protegidas con redes para prevenir el daño por parte de pájaros.

La duración de las etapas se estimó en tiempo térmico (TT, °Cd) usando una función lineal, y teniendo en cuenta la temperatura media diaria (T), la temperatura base (Tb, 11°C, antes de la antesis; 5,7°C, después de la antesis), la temperatura óptima (Topt, 30°C) y la temperatura umbral máxima (Tmax, 42°C) (Hammer et al., 1993; Heiniger et al., 1993):

- |   |                              |
|---|------------------------------|
| a) $TT = 0$   | cuando $T < Tb$ o $T > Tmax$ |
| b) $TT = T - Tb$  | cuando $Tb < T < Topt$ ,     |
| c) $TT = (Topt - Tb) \times [1 - (T - Topt) / (Tmax - Topt)]$ | cuando $Topt < T < Tmax$     |

La ecuación a) indica que, si la T se encuentra por debajo de Tb o por encima de Tmax, el cultivo no acumula TT para el desarrollo. La ecuación b) indica que, si la T se encuentra entre Tb y Topt, la cantidad de TT que se acumula ese día corresponde a la diferencia entre T y Tb, por último, la ecuación c) indica si T se encuentra entre Topt y Tmax,

TT se afecta por un factor, que disminuye el TT acumulado por día cuanto más lejano T es a Top, y cuanto más cercano es a Tmax.

### Desarrollo del área foliar

El área foliar de las hojas completamente expandidas se estimó midiendo la longitud (L) y el ancho (A) de cada hoja en el tallo principal y en los macollos, en cinco plantas consecutivas marcadas en cada parcela. Esta medición se realizó tanto en el tallo principal como en los macollos. Para evitar repeticiones en la medición, cada hoja y cada macollo fue enumerado con marcador indeleble en la medida de su aparición. Se registró el número de hojas completamente expandidas y senescidas a intervalos semanales en las mismas plantas. Se consideró que una hoja se encontraba completamente expandida cuando su lígula era fácilmente visible, y senescida si menos de la mitad del área de la lámina permanecía verde. A partir de las dimensiones conocidas de esas hojas, el área foliar total por planta se calculó siguiendo Muchow y Carberry (1990):  $L \times A \times 0,75$ . Además se tuvo en cuenta el área foliar verde de las hojas aparecidas que no completaron su expansión siguiendo la metodología de Muchow y Carberry (1990), que considera esta área es igual al área de la siguiente hoja y al 60% de la que la subsiguiente.

### Biomasa y rendimiento

Se determinó la biomasa aérea a través de cortes de  $0,5 \text{ m}^2$  por parcela en los momentos coincidentes con V5 (Vanderlip y Reeves, 1972), inicio de la panícula, ~20 días antes de la antesis, 10 días después de la antesis y la madurez fisiológica. La biomasa siempre se midió después de secar las plantas en una estufa de aire forzado a  $65^\circ\text{C}$  durante al menos una semana. Las panojas se removieron y se pesaron por separado. Las panojas siempre se cortaron un centímetro por debajo de la primera ramificación primaria, tenga o no esta ramificación flores (sea ésta fértil o no). Los macollos fueron tratados como el tallo principal.

El rendimiento de grano se determinó cosechando las panojas de  $2 \text{ m}^2$  por parcela de los dos surcos centrales en madurez fisiológica. La biomasa vegetativa y las panojas se secaron y las panojas se trillaron y pesaron. El peso individual del grano se estimó usando una muestra de 200 granos por parcela, y el número de granos se calculó como la relación entre el rendimiento de grano y el peso individual de un grano.

### Calibración del modelo

El modelo APSIM-sorgo se calibró manualmente para híbridos comerciales de sorgo de ADVANTA SAIC (ADV114, VDH314, VDH422) utilizando datos empíricos sobre crecimiento, desarrollo y rendimiento de los experimentos 1 y 2 (Tabla 5). Los parámetros genotípicos relevantes para simular APSIM-sorgo se obtuvieron siguiendo la metodología descrita por Hammer et al. (2010). Estos incluyeron parámetros que cuantifican los efectos genotípicos sobre la fenología, el desarrollo del canopeo, el crecimiento y la formación de granos. Los parámetros para cada genotipo particular se describen en la Tabla 6.

Los genotipos se consideraron insensibles al fotoperiodo, usando para ello datos de experimentos con los mismos genotipos en diferentes fechas de siembra (Cejas et al., 2020). El tiempo térmico de emergencia se estableció en 80°Cd respecto a una temperatura base de 11°C (Muchow y Carberry, 1990). Para el cálculo del área foliar total máxima por planta, se usó el promedio de las repeticiones de las mediciones de área foliar a través del ciclo del cultivo, y se ajustó la función descrita por Hammer et al., (2010). El número de macollos fértiles se consideró cero, en base a datos previos observados de experimentos anteriores bajo las densidades recomendadas en la región (16-20 pl m<sup>-2</sup>).

**Tabla 6.** Parámetros genéticos para estimar la fenología, el desarrollo del dosel, el crecimiento y el seteo de granos del modelo del cultivo de sorgo, para los genotipos utilizados en este estudio.

Parámetros	Genotipo		
	ADV114	VDH314	VDH422
Tiempo térmico a iniciación floral (°Cd)	340	387	430
Tiempo térmico de antesis a madurez fisiológica (°Cd)	795	810	799
$\gamma$ (Coeficiente del tallo principal)	3,2	3,2	3,23
$\alpha$ (Coeficiente de área foliar total; °Cd <sup>-1</sup> )	0,012	0,01	0,008
$\beta$ (Punto de inflexión del área foliar total; °Cd)	540	583	609
$\kappa$ (Materia seca por semilla; g grano <sup>-1</sup> )	0,000523	0,000604	0,00052

### Validación del modelo

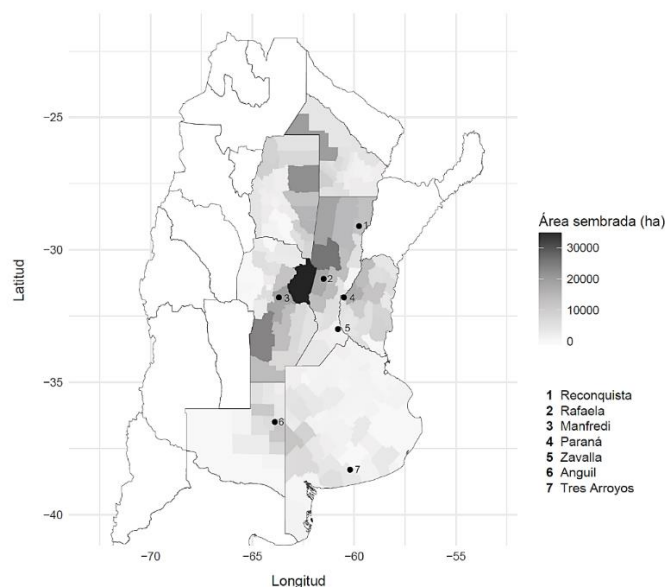
La prueba del modelo se realizó comparando datos simulados y observados de fenología (días antes de la antesis y madurez fisiológica), aparición de las hojas, índice de área foliar (IAF), biomasa aérea y rendimiento. El tiempo de aparición de las hojas, IAF y biomasa se midieron en los experimentos 9, 11 y 12 (Tabla 5). En la mayoría de los experimentos, la biomasa se obtuvo en dos tiempos (por ejemplo, en antesis y madurez fisiológica; Tabla 5).

El ajuste entre el valor observado y el simulado se comprobó utilizando el error cuadrado medio (RECM), el índice D (Willmott, 1981) y la eficiencia del modelo (ME) (Wallach, 2006).

#### *Simulación de patrones de estrés hídrico y clasificación de los tipos de estrés*

Los patrones de estrés hídrico se estimaron usando el modelo ya validado, según la metodología de Chapman et al. (2000a). El modelo se configuró para calcular el valor diario de la transpiración relativa (TR), el tiempo a antesis, el tiempo a madurez fisiológica y el rendimiento. La TR se calcula como la relación entre la transpiración potencial del cultivo y la transpiración real que puede ocurrir dada la cantidad de agua del suelo disponible ese día. Varios estudios ya han utilizado la TR como medida del estrés hídrico (Chapman et al., 2000a; Chenu et al., 2011; Hammer et al., 2014; Sadras et al., 2012; Seyoum et al., 2017).

Las simulaciones se realizaron para siete sitios representativos de la producción de sorgo, distribuidos en la región central (Tabla 7; Fig. 4). Para cada sitio, se identificó un tipo de suelo representativo basado en los datos proporcionados por el instituto de suelos de INTA (<http://geointa.inta.gov.ar/>, consultado el 1 de Enero de 2017). Las propiedades funcionales del suelo requeridas por APSIM se derivaron de las descripciones de series de suelos de INTA y conforme a las revisiones hechas por Gijssman et al. (2002), Probert et al. (1998), Saxton et al. (1986) y el protocolo para el desarrollo de parámetros APSOIL (Dalglish et al., 2006) (Tabla 7).



**Fig. 4.** Mapa de la región en estudio. Los sitios elegidos para la caracterización ambiental están marcados con puntos negros. Los límites provinciales están marcados. El sombreado indica el área sembrada promedio de sorgo observada entre 2006 y 2016 para cada departamento.

**Tabla 7.** Especificaciones de suelo y clima para las simulaciones.

Localidad	Ubicación de las estaciones meteorológicas (Latitud, longitud)	Años	Promedio de lluvias (mm) (1/09-31/03)	Temperatura (°C) (1/09 - 31/03)		Taxonomía de suelo	Profundidad (cm)	Agua útil a la siembra (mm)	Rendimiento simulado (kg ha <sup>-1</sup> )		
				Mínimo	Máximo				Media	Mínimo	Máximo
Reconquista	-29,1, -59,7	1970-2017	956 ± 288	17,2	28,8	Natracualf vértico	148	168	9085	2572	13574
Rafaela	-31,1, -61,5	1956-2017	778 ± 217	14,9	28,2	Argiudol éuico	148	206	10021	2437	16078
Manfredi	-31,8, -63,7	1970-2017	674 ± 145	13,2	27,1	Haplustol éntico	73	95	8303	2395	14843
Paraná	-31,8, -60,5	1956-2017	808 ± 234	15,9	27,2	Argiudol aquíco	155	201	9700	1833	12070
Zavalla	-33,0, -60,8	1973-2017	752 ± 173	14,0	26,6	Natracualf típico	152	199	10368	2882	16788
Anguil	-36,5, -63,9	1964-2017	584 ± 162	11,1	26,5	Haplustol éntico	95	112	5618	1076	12694
Tres Arroyos	-38,, -60,2	1971-2017	539 ± 104	10,3	24,1	Argiudol petrocálcico	85	99	3804	1339	8402

Los datos diarios de temperatura máximas y mínimas y precipitaciones se obtuvieron las estaciones meteorológicas del INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agrícola; <http://siga2.inta.gov.ar/>, consultado el 1 de Enero de 2017) y de la Facultad de Ciencias Agrarias (Tabla 7). Debido a la gran faltante de datos, y para uniformar la fuente, se utilizaron los datos diarios de radiación solar incidente de la Predicción de la NASA del Recurso Energético Mundial (POWER) - Recurso Climatológico para Agroclimatología (NASA, 2017). Los datos de radiación solar de NASA-POWER están bien correlacionados con los datos medidos de radiación solar en áreas con topografía plana (Van Wart et al., 2013; White et al., 2011).

El modelo se usó para simular la siembra y el crecimiento de los cultivos durante cada año disponible en la base histórica y para estimar la TR de cada día. Se estableció una densidad fija de 16 000 plantas por hectárea. Respecto a la siembra, se determinó como regla que ésta solo tendría lugar luego de una lluvia de al menos 15 mm (sin considerar un máximo) en el lapso de 6 días, en el periodo comprendido entre el 15 de Octubre y el 30 de Noviembre. Para estas simulaciones se utilizó el cultivar de ciclo intermedio (VDH314), que representa la opción de manejo más común utilizada en la región. Para realizar las simulaciones se estableció el supuesto de que el perfil de agua del suelo se encontraba a mitad de su capacidad antes de la siembra de cada cultivo para simulación, y que los nutrientes (particularmente N) no fueron limitantes. Aunque esta última condición no represente la situación típica de la región, permite simplificar la interpretación de los resultados (Muchow et al., 1996). Se estima que la no limitación de N puede provocar cierta sobreestimación del nivel de estrés (es decir, valores de TR más bajos) en algunos sitios (particularmente en los sitios del Norte) ya que las limitaciones de N reducen el IAF y por lo tanto la demanda de agua por parte del modelo (Hammer et al., 2010). Sin embargo, se espera que no afecte significativamente los patrones de estrés hídrico.

La clasificación del estrés hídrico en tipos de estrés (TE) se realizó siguiendo la metodología de Chapman et al. (2000a). Por cada 100 grados-días de tiempo térmico, los valores diarios de TR fueron promedio para formar una matriz de TR para cada campaña en un sitio. Se utilizó un método de agrupamiento jerárquico para agrupar las campañas simuladas de todos los sitios en grupos (i.e. TE) de acuerdo con la similitud del patrón de TR entre años. El método de clasificación empleado fue un procedimiento de agrupamiento aglomerativo jerárquico (Williams, 1976) basado en la medida de disimilitud de la distancia euclidiana cuadrada, y la estrategia de agrupación fue la suma incremental de cuadrados (Ward, 1963) y se aplicó simultáneamente en todo el conjunto de datos (329 años), es decir a los años de datos meteorológicos disponibles de los 7 sitios. Se calculó un patrón

promedio de TR para cada uno de estos TE. Se calcularon las distribuciones de frecuencia de cada TE en cada sitio.

#### *Frecuencia de estrés térmico*

Se exploró la frecuencia de ocurrencia de estrés térmico extremo dentro de cada TE. Los umbrales máximos de temperatura diaria fueron 33°C, 36°C y 38°C, y se basaron en las diferencias de sensibilidad genotípica al estrés térmico encontradas en Singh et al. (2015; 2017). El período en que se evaluaron las temperaturas máximas comenzó desde 50°Cd antes de la antesis y finalizó 150°Cd después de la antesis (cálculo de tiempo térmico explicado en la sección fenología del **CAPÍTULO II**). Esto se realizó para cada año y sitio particular en base a la fecha de antesis simulada. Varios autores consideran este período como el momento en que el estrés por altas temperaturas tiene las mayores consecuencias, afectando el desarrollo reproductivo y en particular la germinación del polen y la formación de semillas (ventana crítica, Prasad et al., 2008; Nguyen et al., 2013; Singh et al., 2015, 2016). Para cada sitio se describió la frecuencia de ocurrencia de 1, 2, 3, 4 o más de 4 días con temperaturas máximas por encima de cada umbral (cálculo manual). Para probar la asociación entre TE y el estrés térmico, se realizó una prueba de bondad de ajuste utilizando el paquete R "vcd" (Meyer et al., 2017).

#### *Tipos de estrés e interacción GxA*

Se exploró la asociación entre TE y la interacción observada de GxA para rendimiento utilizando datos de diferentes experimentos. Los experimentos se describen en la Tabla S1 (Anexo 2), e involucraron la mayoría de los experimentos realizados para la validación del modelo, descritos en la Tabla 5, y experimentos adicionales en Gálvez, provincia de Santa Fe, Argentina, provistos por Advanta Semillas SAIC y pertenecientes al programa de mejoramiento de sorgo. Los experimentos en Gálvez se realizaron utilizando un diseño de bloques al azar con dos repeticiones. Las parcelas eran cuatro surcos de 5 m de largo y 0,52 m de espaciamiento. Los experimentos se fertilizaron con N a una dosis de 120 kg N ha<sup>-1</sup> en forma de UREA y MAP a una dosis de 80 kg ha<sup>-1</sup>.

Las parcelas se sembraron en exceso y se ralearon en V3 (Vanderlip y Reeves, 1972) a la densidad objetivo. El N del suelo y el contenido de agua disponible en la siembra se obtuvieron a través de muestras de suelo, como se describió previamente. Esta información no estaba disponible para los experimentos XIII a XX (Anexo 2; Tabla S1), por lo

que se estimaron a partir de lotes cercanos en el área donde esta información estaba disponible.

Los ensayos se simularon utilizando datos climáticos de las estaciones meteorológicas del INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agrícola; <http://siga2.inta.gov.ar/>). Los datos del suelo se obtuvieron de la sección de suelos de INTA ([www.geointa.inta.gov.ar/](http://www.geointa.inta.gov.ar/)). El patrón de índice de TR para cada ensayo se determinó como se describió anteriormente. Los ensayos se clasificaron en cada TE en función de la suma mínima de las diferencias cuadradas para el patrón TR en comparación con el patrón TR del TE (Chenu et al., 2011). Se aplicó un análisis de componentes principales a la matriz GxA, con los datos estandarizados por ambiente (Fox y Rosielle, 1982). El análisis y el biplot de AMMI resultante se produjeron utilizando el software estadístico R (R Core Team, 2018, versión 3.4.4, paquete agricolae, de Mendiburu, 2014). Se realizó un análisis de biplot AMMI para mejorar la visualización de las interacciones GxA mediante la integración de componentes aditivos y multiplicativos en un análisis integrado de mínimos cuadrados (Zobel et al., 1988).

## RESULTADOS

### *Validación del modelo*

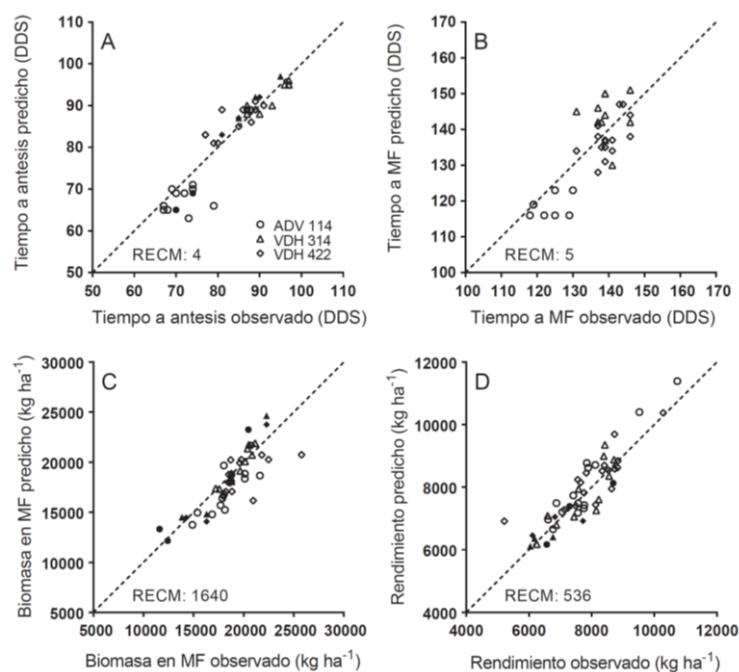
Primero se validó el modelo APSIM-sorgo para genotipos y condiciones de crecimiento representativos de la región. El modelo simuló con adecuada precisión la fenología del cultivo, la biomasa y el rendimiento, como se muestra cuando se comparan los valores observados y los valores predichos para diferentes genotipos y condiciones de crecimiento. Estas condiciones incluyeron variaciones en el genotipo, el agua y la disponibilidad de N. Los valores para RECM, índice D y ME confirman la robustez del modelo (Tabla 8). El RECM fue de 4 días para el tiempo hasta la antesis (Tabla 8; Fig. 5A), 5 días para el tiempo hasta la madurez fisiológica (Tabla 8; Fig. 5B), 1640 kg ha<sup>-1</sup> para la biomasa del cultivo en la madurez fisiológica (Tabla 8; Fig. 5C), y 536 kg ha<sup>-1</sup> para rendimiento de grano (Tabla 8; Fig. 5D). La eficiencia del modelo para la biomasa en la madurez fisiológica fue el más bajo de los caracteres probados (0,59; Tabla 8). Sin embargo, el modelo simuló satisfactoriamente los datos observados (índice D>0,85; Tabla 8). El número de hojas, el IAF y la biomasa a través del ciclo del cultivo mostraron una buena correspondencia con los valores medidos para los tres genotipos parametrizados (Anexo 1; Fig. S3 y S4).

**Tabla 8.** Medidas de acuerdo entre el modelo y los datos medidos. RECM significa raíz del error cuadrado medio y ME es eficiencia del modelo.

Estimadores de precisión	Días a antesis(d)	Días a madurez fisiológica (d)	Biomasa en madurez fisiológica(kg ha <sup>-1</sup> )	Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> )
RECM	4	5	1640	536
Índice D	0,99	0,98	0,89	0,93
ME	0,81	0,72	0,59	0,74

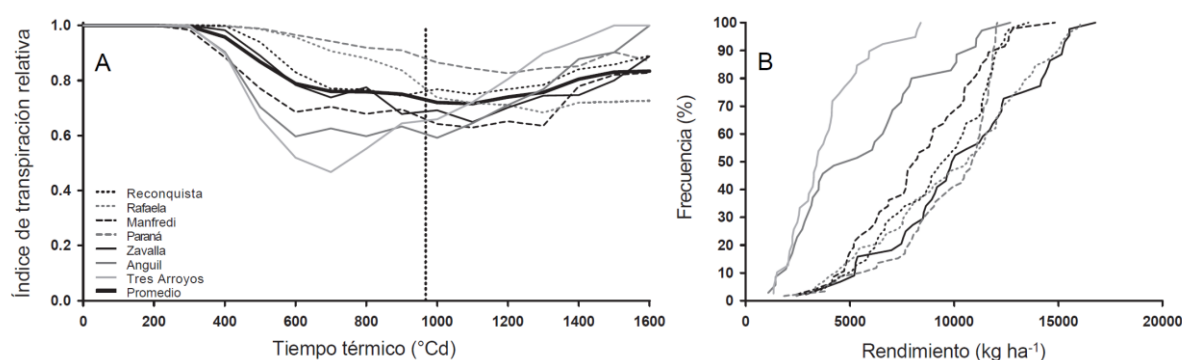
### Simulación de patrones de transpiración relativa

Una vez validado el modelo, se exploraron los patrones de estrés para diferentes sitios de la región utilizando registros climáticos históricos y con un manejo productivo de referencia. Se exceptuaron 3 a 6 campañas dependiendo del sitio por no cumplir la regla de siembra. Siete y tres campañas simuladas en Tres Arroyos y Anguil, respectivamente, se descartaron debido a una finalización anticipada del ciclo de cultivo asociado con bajas temperaturas (datos no mostrados). La fecha de siembra promedio tuvo lugar a fines de Octubre en todos los sitios. El tiempo hasta la antesis y la madurez fisiológica varió de 83 a 118 días, y de 132 a 169 días respectivamente, en todos los sitios. Los valores simulados para fenología están de acuerdo con un genotipo de madurez intermedia.



**Fig. 5.** Relación entre valores observados y predichos para (A) tiempo a antesis, (B) tiempo a madurez fisiológica, (C) biomasa en madurez fisiológica, y (D) rendimiento. Los símbolos vacíos corresponden a los experimentos realizados en Zavalla, los símbolos cerrados corresponden a los experimentos realizados en Laguna Larga, Gálvez y Venado Tuerto. MF es madurez fisiológica; DDS es días desde la siembra. RECM es raíz del error cuadrado medio.

Los patrones del índice de transpiración relativa variaron mucho entre los sitios y las campañas. La TR media en todas las campañas y sitios disminuyó desde las etapas previas a la floración (aproximadamente la etapa V4; Vanderlip y Reeves, 1972) y fue de aproximadamente 0,75 alrededor de la floración y la mayor parte del período de llenado de granos (Fig. 6A). El momento y la intensidad del estrés difirieron con el sitio, desde niveles bajos de estrés (TR = 0,80) durante el llenado de granos en Paraná, hasta niveles intermedios de estrés (TR = 0,45) particularmente durante las etapas previas a la floración en Tres Arroyos (Fig. 6A).



**Fig. 6.** (A) Índice de transpiración relativa (TR) durante el ciclo del cultivo promedio de las diferentes campañas en cada sitio. La línea vertical punteada indica floración. (B) Frecuencias acumuladas de rendimientos simulados para todas las campañas en cada sitio.

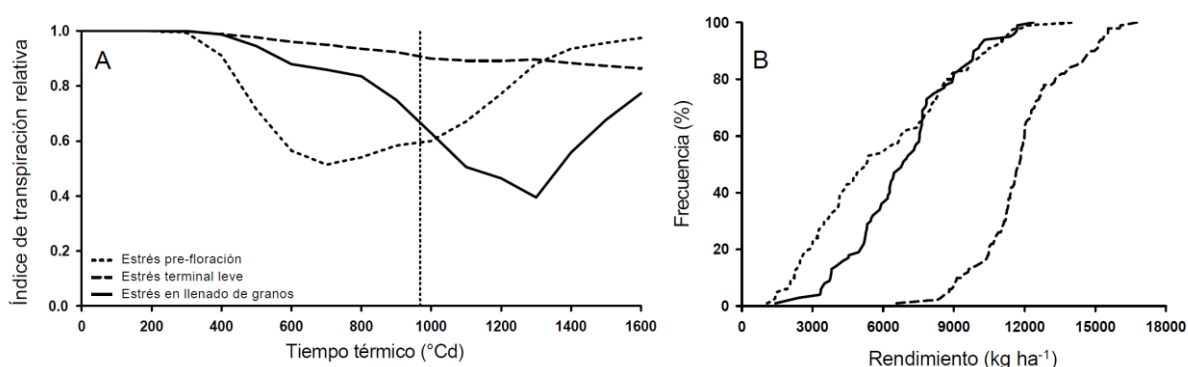
El rendimiento medio simulado varió de 3804 a 10368 kg ha<sup>-1</sup> entre los sitios (Tabla 7). Los valores más bajos correspondieron a los sitios oeste y Sur (Manfredi, Anguil y Tres Arroyos), mostrando niveles más bajos de precipitación y profundidad del suelo en comparación con el resto de los sitios (Tabla 7; Fig. 4). Esto también es acorde con los valores más bajos del índice TR (Fig. 6A, y Anexo 1; Fig. S5). El rendimiento máximo varió de 8402 a 16788 kg ha<sup>-1</sup> a través de los sitios (Tabla 7; Fig. 6B), lo que indica el alto potencial sin limitaciones de agua y N. El rendimiento mínimo varió de 1076 a 2882 kg ha<sup>-1</sup> entre sitios (Tabla 7, Fig. 6B).

#### Clasificación en tipos de estrés

La agrupación de 329 trayectorias de TR indicó tres grupos principales o TE, que explicaron el 74% de la suma total de cuadrados (dendrograma no mostrado). El TE definido varió principalmente en el tiempo y la intensidad del estrés, y se identificaron como: (i) un estrés pre-floración que se alivió durante el llenado del grano, con una frecuencia de ocurrencia del 39%, (ii) un estrés terminal leve, con un 38% de frecuencia, y (iii) un estrés en

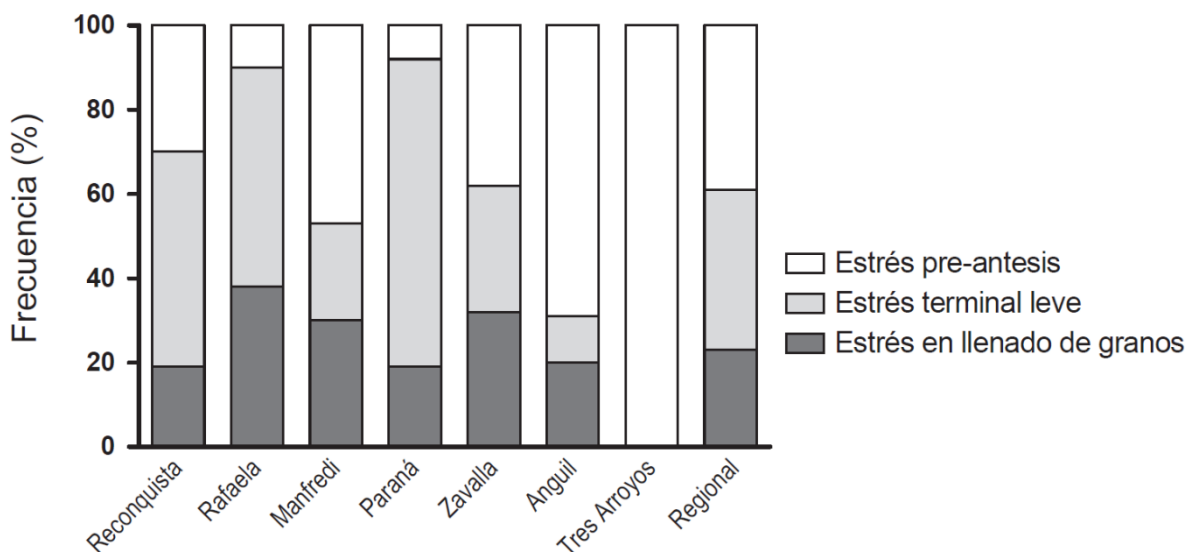
llenado de granos, que se evidenció en el 23% de los años (Fig. 7A, y Anexo 1; Fig. S6). Tanto el estrés pre-floración como en llenado de granos mostraron un nivel de estrés moderado alrededor de la antesis del cultivo ( $TR \sim 0,6$ ; Fig. 7A).

La Fig. 7B describe la frecuencia de distribución del rendimiento para cada TE. El estrés terminal leve evidenció los niveles de rendimiento más altos, mientras que los rendimientos más bajos se observaron con el estrés pre-floración (Fig. 7B). El rendimiento bajo estrés terminal leve siempre fue superior a  $6000 \text{ kg ha}^{-1}$ , mientras que este nivel de rendimiento se observó en el 55% de las campañas que muestran TE de estrés pre-floración. Esta frecuencia fue inferior al 40% cuando el estrés ocurrió durante el llenado de granos (Fig. 7B).



**Fig. 7.** (A) Índice de transpiración relativa (TR) durante el ciclo promedio de las campañas agrupadas bajo un mismo tipo de estrés. La línea vertical punteada representa la floración promedio. (B) Frecuencias acumuladas de rendimientos simulados para las campañas agrupadas bajo un mismo tipo de estrés.

La frecuencia de ocurrencia de cada TE varió considerablemente entre los sitios (Fig. 8). Para los sitios del Sur (Anguil y Tres Arroyos), el estrés pre-floración fue el más común (69% y 100% de frecuencia, respectivamente). Los sitios del noreste (Reconquista, Rafaela y Paraná) presentaron una alta frecuencia estrés terminal leve (51%; 52% y 73%, respectivamente). Zavalla muestra frecuencias de TE similares a la distribución regional (es decir, considerando la totalidad de sitios x años), seguida de Manfredi (Fig. 8). El estrés en llenado de granos mostró una frecuencia de 0 a 38% en los diferentes sitios, evidenciando una menor variación en comparación con los otros TE.



**Fig. 8.** Distribución de frecuencias de los tipos de estrés en cada sitio y a nivel regional (i.e., considerando la totalidad de sitios x años).

#### *Frecuencia de estrés térmico y su asociación con los tipos de estrés identificados*

La frecuencia de ocurrencia de temperaturas extremas disminuye de los sitios del Norte al Sur (Tabla 9). Los sitios del noreste (Reconquista, Rafaela y Paraná) mostraron una frecuencia intermedia (~30 a 50%) de temperaturas superiores a 33°C durante más de 4 días durante la ventana crítica, mientras que la probabilidad de menos días con temperaturas superiores a este umbral fue menor (~10 a 20%). Zavalla y Manfredi mostraron una frecuencia intermedia (~30%) de experimentar un día con temperatura superior a 33°C, mientras que la frecuencia de más días con temperatura superior a 33°C fue baja (menos del 16%). Los sitios del Sur (Anguil y Tres Arroyos) muestran una probabilidad similar (y menos del 14%) de tener cualquier cantidad de días con una temperatura superior a 33°C (Tabla 9).

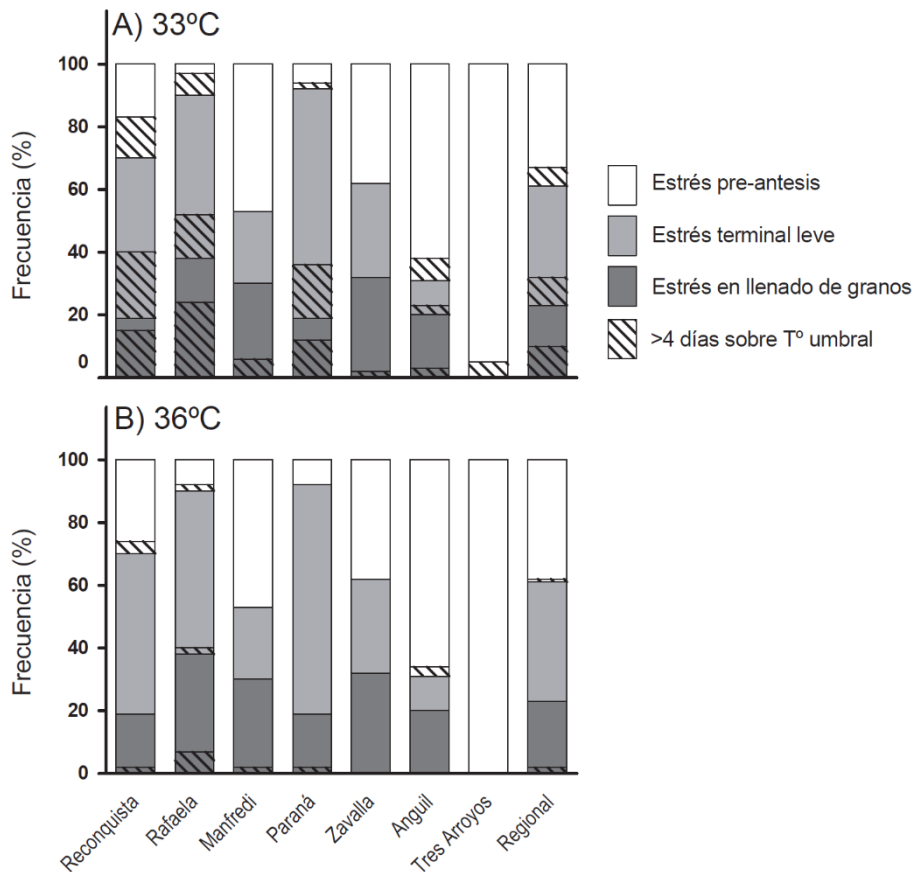
La frecuencia de años que experimentaron más de 4 días con una temperatura máxima superior a 33°C no se asoció claramente con ningún TE (Anexo 2; Tabla S2), aunque tendió a ser más frecuente cuando el estrés fue durante el llenado (Fig. 9A). Esto fue particularmente cierto para los sitios del noreste (Reconquista, Rafaela y Paraná; Fig. 9A).

**Tabla 9.** Probabilidad de años con diferente número de días con temperatura por encima de diferentes umbrales (33, 36 y 38 °C) durante 150 °Cd alrededor de floración, para diferentes sitios en la región central argentina.

Sitio	Umbrales térmicos (°C)	Días				
		1	2	3	4	>4
Reconquista	33	9	19	9	13	49
	36	15	19	11	6	6
	38	19	2	4	2	0
Rafaela	33	10	9	17	9	45
	36	14	7	3	12	10
	38	5	10	5	0	2
Paraná	33	14	8	22	8	31
	36	14	7	2	3	2
	38	8	0	0	0	0
Manfredi	33	28	11	9	2	6
	36	6	2	0	0	2
	38	4	0	0	0	2
Zavalla	33	30	14	16	14	2
	36	20	2	2	0	0
	38	7	0	0	0	0
Anguil	33	13	14	7	3	13
	36	13	6	0	6	3
	38	4	3	0	0	0
Tres Arroyos	33	8	5	8	3	5
	36	0	3	0	0	0
	38	0	0	0	0	0

La mayoría de los sitios, con excepción de los sitios del Sur, mostraron frecuencia de ocurrencia de un día con una temperatura superior a 36°C, aunque esta probabilidad fue baja (15-20%). La probabilidad de experimentar más de 2 días con una temperatura por encima de este umbral fue baja para la mayoría de los sitios, y varió de ninguna probabilidad en los sitios del Sur a cierta frecuencia al moverse a latitudes más bajas (Tabla 9). La frecuencia de años con más de 4 días con temperatura superior a 36°C fue muy baja, pero se asoció principalmente con estrés pre-floración y en llenado de granos (Fig. 9B).

Solo en Reconquista la probabilidad de experimentar un día con una temperatura superior a 38°C mostró una frecuencia moderada (~20%), mientras que esta frecuencia fue inferior al 10% o nula para el resto de los sitios (Tabla 9). En general, la frecuencia de someterse a dos o más días con una temperatura superior a 38°C fue inferior al 10% en la mayoría de los sitios, siendo nula en la mayoría de los casos al moverse a latitudes más altas (Tabla 9). Por esta razón, la frecuencia de años que experimentaron más de 4 días con una temperatura superior a 38°C no estuvo claramente relacionado con ningún TE (no mostrado).



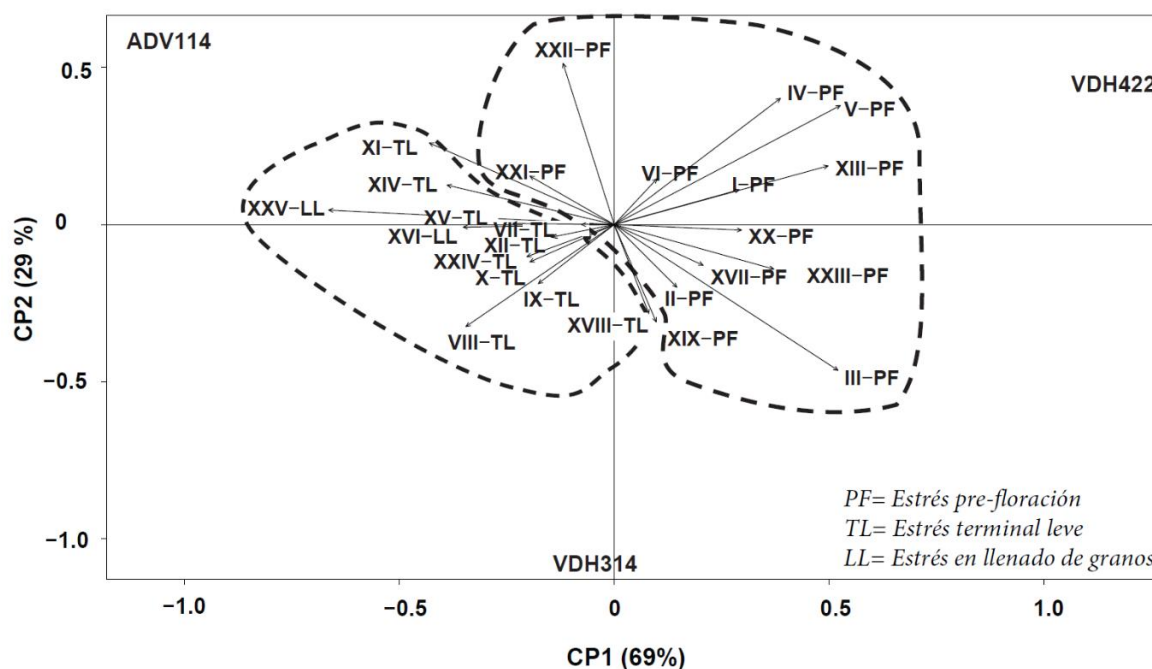
**Fig. 9.** Distribuciones de frecuencia de los TE en cada sitio y para toda la región. En cada barra se muestra la proporción de años con >4 días con temperatura máxima por encima del umbral (A, 33 °C; B, 36 °C) alrededor de la floración.

### Tipos de estrés e interacción GxA

La frecuencia de ocurrencia de cada TE en los experimentos observados se clasificó de manera similar a los valores simulados en las diferentes combinaciones de sitios y campañas, siendo el 52% de los experimentos clasificados como estrés pre-floración, 40% como estrés terminal leve y 8% como estrés en llenado de grano. El rendimiento promedio fue de 7657 kg ha<sup>-1</sup> para el estrés terminal leve, 7560 kg ha<sup>-1</sup> para el estrés pre-floración y 6600 kg ha<sup>-1</sup> para el estrés en llenado.

Los TE clasificados explicaron parte de la interacción GxA para rendimiento (Fig. 10). El genotipo de madurez tardía VDH422 mejoró su rendimiento relativo en campañas clasificadas como estrés pre-floración (Fig. 10). Este genotipo alcanzó la antesis una vez que se alivió el estrés pre-floración (Anexo 1; Fig. S7). El genotipo de ciclo corto ADV114 mostró mayor rendimiento relativo en campañas clasificadas con estrés terminal leve (Fig. 10). El rendimiento relativamente bajo de este material en campañas con estrés pre-floración se asocia con la coincidencia del estrés hídrico con el período crítico de definición

del rendimiento (Anexo 1; Fig. S7). De acuerdo con esto, los valores medios de TR durante el período crítico fueron 0,63 para VDH422 y 0,56 para ADV114 en campañas clasificadas con estrés pre-floración (Anexo 1; Fig. S7). El genotipo de ciclo intermedio VDH314 mostró un buen comportamiento relativo en la mayoría de los TE, y presentó la mayor estabilidad de rendimiento (score cercano a cero para el CP1, Fig. 10).



**Fig. 10.** Primer y segundo componentes principales (PC) AMMI biplot para rendimiento de tres genotipos (ADV114, ciclo corto; VDH314, ciclo intermedio; VDH422, ciclo largo) evaluados en 25 ambientes. Los genotipos están representados por letras y los ambientes por vectores. Los ambientes que pertenecen a los tipos de estrés en pre-floración y de estrés terminal leve están encerrados en líneas discontinuas.

## DISCUSIÓN

El área Argentina cultivada con sorgo ha disminuido durante los últimos años (FAO, 2018). La presencia de cultivos más rentables como el maíz y la soja, la baja ganancia genética de sorgo en comparación con otros cultivos (Gizzi y Gambin, 2016; Luque et al., 2006; de Felipe et al., 2016) y la ausencia de tecnología transgénica que proporcione soluciones fáciles para el manejo de malezas y plagas se encuentran entre las principales razones detrás de la reducción en la adopción de sorgo por parte de los productores. En este contexto, se propone una caracterización de los patrones de estrés hídrico y térmico para la región central argentina. Esta caracterización es nueva en la región y ofrece información valiosa para ayudar a la mejora del cultivo, a través de una mejor definición de la población de ambientes objetivo (Chapman et al., 2000a). La información también

ayudará al manejo del cultivo, ya que provee la base hacia la definición de las mejores combinaciones de GxM para TE particulares (Hammer et al., 2014).

La región central del sorgo argentino se caracteriza por tres patrones principales de estrés hídrico o TE, que difieren principalmente en el momento del estrés: (i) un estrés pre-floración que muestra un 39% de ocurrencia, (ii) un estrés terminal leve que muestra un 38% de ocurrencia y (iii) un estrés en llenado de granos que es menos frecuente (23%). Tanto el estrés en pre-floración como el estrés en llenado mostraron una intensidad moderada (promediando valores mínimos de TR de 0,4; Fig. 7A). Se esperaba que la intensidad del estrés oscilara entre valores bajos y moderados en estos ambientes templados, caracterizados por niveles de lluvia más altos y suelos más profundos en comparación con otras regiones del mundo como Australia (Chapman et al., 2000a; Hammer et al. 2014). Basado en genotipos de madurez más cortos, el cinturón de sorgo australiano se caracteriza por un estrés hídrico posterior a la floración con intensidades de estrés más altas (valores de TR menores a 0,25) (Chapman et al., 2000a). De manera similar a lo encontrado por Chapman et al. (2000a), los TE definidos discriminaron los patrones de estrés hídrico y los niveles de rendimiento más claramente que cuando estos caracteres se analizaron por sitio (Fig. 7 versus Fig. 6), lo que demuestra la importancia de una caracterización ambiental.

Los TE definidos están de acuerdo con la alta interacción GxA observada para el rendimiento (**Capítulo II**; Fig.7). Para esta región, las compañías de semillas generalmente recomiendan genotipos de ciclo intermedio en fechas de siembra normales de Octubre- Noviembre, lo que está de acuerdo con el comportamiento de este tipo de material en los diferentes TE (Fig. 7). Los genotipos de ciclo corto y largo también son opciones disponibles en esta región, y los resultados de éste capítulo sugieren que cada ciclo sería ideal para un TE particular. El ciclo largo permite el escape a la sequía durante la ventana crítica bajo un estrés pre-floración, mientras que un genotipo de ciclo corto haría coincidir el estrés hídrico con el período crítico de definición del rendimiento. Esto significa que el largo del ciclo es un rasgo genotípico relevante que se puede ajustar de acuerdo al TE particular. La fecha de siembra es un aspecto de manejo relevante para lidiar con los TE. Retrasar la fecha de siembra, por ejemplo, podría ayudar a escapar el déficit hídrico, al evitar la coincidencia del estrés pre-floración con el período crítico de floración en genotipos de ciclo corto. Estos supuestos son evaluados en el **Capítulo IV**.

En general, la TE más frecuente en los diferentes sitios estuvo de acuerdo con la distribución espacial de las precipitaciones anuales. Los sitios con alta frecuencia de estrés pre-floración (más del 60%, como Anguil y Tres Arroyos) se ubicaron debajo de la isohieta de 750 mm (por debajo de los 36° de latitud; Telesca et al., 2012). Los sitios con alta

frecuencia de estrés terminal leve (más del 50%, como Reconquista, Rafaela y Paraná) estaban por encima de la isohieta de 1000 mm. Estos sitios también muestran una capacidad de retención de agua del suelo más favorable. A pesar de esto, y con la excepción de Tres Arroyos, todos los TE estuvieron representados en todos los sitios (Fig. 8). Esto ciertamente complica el proceso de selección, ya que los experimentos de testeo de genotipos de los programas de mejoramiento en determinados sitios o años podrían no representar la población de ambientes objetivo. Se ha demostrado que esto podría disminuir o incluso revertir la ganancia genética (Cooper et al., 1996). Para el caso particular en Argentina, podría explicar parcialmente la baja ganancia genética de este cultivo en los últimos 30 años (Gizzi y Gambin, 2016). La estrategia de ponderación de los ensayos de selección sería relevante para mejorar la eficiencia de los programas de mejora (Chapman et al., 2000b).

La definición de la frecuencia de ocurrencia de patrones de estrés hídrico proporciona información relevante para los programas de mejoramiento al definir sitios objetivo para una adaptación amplia o específica (Chapman et al., 2000a; Chenu et al., 2011). Sitios como Zavalla o Manfredi mostraron frecuencias de los TE similares a la frecuencia regional, lo que indica que estos sitios son adecuados para ser utilizados en un programa de selección amplio. Tres Arroyos o Anguil son lugares ideales para desarrollar programas de mejoramiento para situaciones de estrés pre-floración, mientras que Paraná no es un sitio ideal para este propósito. Por otro lado, Tres Arroyos y Anguil, y Paraná también podrían considerarse para incluir en un programa de selección por adaptación amplia, ya que garantizan el muestreo de TE (pre-floración y terminal leve, respectivamente) en un número limitado de años (2 o 3), garantizando que los tres TE están muestreados en el conjunto de ensayos usado para tomar la decisión de avance comercial de un híbrido. El beneficio adicional del análisis incluye agrupar sitios de frecuencias similares, reducir costos y aumentar la eficiencia de un programa de mejoramiento (Chapman et al., 2000a).

El estrés térmico alrededor de floración en sorgo podría disminuir significativamente el rendimiento al reducir la fijación de granos (Prasad et al., 2006, 2015, Singh et al., 2015, 2016). En este estudio, se exploraron diferentes temperaturas máximas críticas, ya que se ha demostrado que el umbral de temperatura que afecta la fijación de granos depende del genotipo (Singh et al., 2015). Se demostró que la frecuencia de situaciones de estrés térmico con una duración de magnitud significativa (más de 4 días; Prasad et al., 2015) con temperaturas superiores a 33°C alrededor del período de floración es relativamente baja (aproximadamente tres de cada diez años), y que esta probabilidad se reduce en gran medida para temperaturas superiores a 36°C (Fig. 6), siendo prácticamente nula para

temperaturas superiores a 38°C. Éstos resultados indicaron que el estrés térmico actualmente no representa una limitación importante para la región, aunque se espera que sea más frecuente en escenarios climáticos futuros (se estima que las temperaturas medias aumenten entre 0,5 y 2,5°C para 2100; IPCC, 2007). Aunque se desconocen las temperaturas umbral críticas para genotipos locales, esta información sería relevante solo para los genotipos utilizados en latitudes más bajas de la región en estudio donde la frecuencia de estrés térmico es mayor.

La frecuencia de más de cuatro días con temperaturas máximas por encima de un umbral particular no se asoció consistentemente con ningún TE. La falta de asociación probablemente esté relacionada con el hecho de que se exploraron los efectos directos del estrés térmico, y no los efectos indirectos a través del aumento del déficit de presión de vapor y el estrés hídrico (Lobell et al., 2015). Aunque el estrés térmico y la sequía a menudo ocurren juntos, es posible y relativamente común que ocurran de manera independiente (por ejemplo, Sadras et al., 2012). Distinguir entre los riesgos asociados con la sequía y el estrés térmico es útil al definir estrategias de mejoramiento y manejo (Lobell et al., 2015). Los sitios que muestran un estrés térmico muy bajo o nulo, como Zavalla, se vuelven de interés para el mejoramiento particularmente por el estrés por sequía. Por el contrario, la frecuencia de más de 4 días con una temperatura superior a 33°C fue mayor durante las campañas que mostraron estrés hídrico en los sitios del Norte (Reconquista, Rafaela y Paraná) (Fig. 6). Esto significa que los mejoradores probablemente seleccionarán tanto por estrés hídrico como térmico en las campañas que muestran un estrés en llenado del granos en la parte Norte de la región en estudio.

Finalmente, el modelo APSIM-sorgo ha sido probado para genotipos y condiciones de crecimiento particulares, ofreciendo la oportunidad de explorar combinaciones GxAxM *in silico* de interés. El modelo podría usarse para definir combinaciones ideales de GxM en ambientes objetivo (Hammer y Jordan, 2007).

## CONCLUSIONES

En la ventana de siembra típica (fines de Octubre a mediados de Noviembre), la región central templada de Argentina se caracteriza por niveles de estrés hídrico intermedios a bajos, que difieren principalmente en el momento del estrés. El estrés térmico alrededor de la floración mostró una frecuencia intermedia en las latitudes más bajas. No se encontró una asociación entre latitud y el TE (i.e TE predominantes respecto a la latitud de la localidad). Además, los TE ayudaron a explicar las interacciones observadas de GxA para rendimiento,

proporcionando información relevante para definir la población de ambientes objetivo, sitios de testeo y futuros caracteres de interés del genotipo o prácticas relevantes de manejo de acuerdo con el TE.

La agrupación de sitios de frecuencia similar puede ayudar a manejar la variabilidad espacial. Debido a la gran variabilidad en las frecuencias de TE mostradas por los sitios estudiados, se pueden alcanzar grandes mejoras de rendimiento cuando se buscan combinaciones específicas de GxM.

## CAPITULO IV

### EFFECTOS DE LA FECHA DE SIEMBRA Y EL LARGO DE CICLO DE SORGO EN DIFERENTES ESCENARIOS HÍDRICOS

#### INTRODUCCIÓN

La tecnología aplicada para la producción de sorgo en muchas áreas agrícolas de todo el mundo es baja, especialmente en comparación con otros cultivos (Fischer et al., 2014; Brihet, 2017). La fecha de siembra es una práctica de manejo crítica (Rodríguez et al., 2018; Hammer et al. 2014), pero los estudios que exploran el efecto de diferentes fechas de siembra en sorgo son escasos. Bajo condiciones de humedad del suelo adecuadas, el criterio principal para decidir la fecha de siembra de sorgo se basa en la temperatura del suelo. La germinación y la emergencia se ven afectadas con temperaturas inferiores a 10°C (Anda y Pinter, 1994; Yu et al., 2004). En consecuencia, la fecha de siembra debe tener lugar cuando la temperatura del suelo sea superior a 15°C, garantizando el stand de plantas y su uniformidad.

Las fechas de siembra recomendadas también buscan evitar la coincidencia de la floración con los meses donde la probabilidad de estrés térmico y sequía es alta (Prasad et al., 2008; Lobell et al., 2015), así como evitar heladas durante el llenado del grano. La probabilidad de estrés hídrico puede variar significativamente año a año (Chapman et al., 2000b; **Capítulo III**), y no hay información sobre cómo esta variabilidad podría ser manejada con fechas de siembra, genotipo, o la combinación de ambos. Una exploración adecuada del impacto de la fecha de siembra y el largo de ciclo en ambientes de producción templados puede ayudar a definir estrategias de manejo, aumentar la productividad de los cultivos o identificar caracteres potenciales para programas de mejoramiento (Clarke et al., 2019; Hammer et al. 2014).

Los ambientes de cultivo de sorgo en la región central Argentina están sujetos a tres posibles patrones de estrés hídrico o tipo de estrés (TE) dependiendo del año (**Capítulo III**): (i) estrés hídrico pre-floración, (ii) estrés terminal leve y (iii) estrés en llenado de granos. Se hipotetiza que la fecha ideal de siembra y el ciclo dependen del TE. En condiciones de estrés terminal leve, las fechas de siembra tempranas combinadas con una madurez intermedia a larga aumentarían el rendimiento a través del aumento de la biomasa total (Hammer y Broad, 2003). Lo mismo puede esperarse en condiciones de estrés en llenado, aunque en este caso el aumento de rendimiento estaría dado por un incremento en el IC. En

cambio, en los escenarios de estrés en pre-floración, suponemos que atrasos en la fecha de siembra en combinación con materiales más cortos evitaría la coincidencia del periodo crítico con el pico de estrés (van Oosterom y Hammer, 2008; **Capítulo II**). Actualmente, el rango de fechas de siembra utilizado por el productor abarca desde Octubre a Diciembre, pero sin un claro entendimiento del momento del año donde ocurren las etapas críticas.

Los modelos de simulación de cultivo son una herramienta valiosa para evaluar los efectos del manejo y de caracteres del genotipo en diferentes ambientes (Clarke et al., 2019, Flohr et al., 2017, Hammer et al., 2014, Baumhard et al., 2005). En este capítulo se generan estrategias de manejo para patrones específicos de estrés hídrico de sorgo a través de un modelo predictivo confiable (Hammer et al., 2010). El objetivo de este capítulo fue explorar el impacto de diferentes combinaciones de fecha de siembra y largo de ciclo en un amplio rango latitudinal sujeto a diferentes TE, y definir estrategias de manejo que se adapten a las condiciones de la campaña. Las estrategias definidas se contrastaron con datos observados a campo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó el modelo de sorgo validado en el **Capítulo III** (Hammer et al. 2010; Hammer y Muchow, 1994) que opera dentro del modelo de sistemas de cultivo Simulador de Sistemas de Producción Agrícola (APSIM), versión 7.8 (Keating et al., 2003; McCown et al., 1995) para realizar simulaciones en 4 sitios representativos de la región central argentina (Tabla 10).

Estos sitios se seleccionaron a partir de los resultados del **Capítulo III**, para representar las distintas distribuciones de frecuencias de TE de la región central Argentina, abarcando un amplio rango latitudinal (29° a 37° S; **Capítulo III**). A partir de este punto se hará referencia a las localidades de acuerdo a su ubicación: Norte (Reconquista), Centro Oeste (Manfredi), Centro Este (Zavalla) y Sur (Anguil).

**Tabla 10.** Especificaciones de clima y suelo para las simulaciones del modelo.

Sitio	Latitud, longitud	Años	Media de lluvias (mm) (1/09-31/03)	Tipo de suelo	Profundidad (cm)	Agua útil a la siembra (mm)
Reconquista (Norte)	-29,1, -59,7	1970-2017	956 ± 288	Natracualf vértico	148	168
Manfredi (Centro Oeste)	-31,8, -63,7	1970-2017	674 ± 145	Haplustol éntico	73	95
Zavalla (Centro Este)	-33,0, -60,8	1973-2017	752 ± 173	Natracualf típico	152	199
Anguil (Sur)	-36,5, -63,9	1964-2017	584 ± 162	Haplustol éntico	95	112

### *Configuraciones de manejo de cultivos*

Se utilizó APSIM para simular siembras de sorgo cada 15 días a partir del 15 de Octubre hasta el 1 de Enero. Se evitó la siembra de 1 de Enero en los sitios de Sur y Centro Oeste debido a la gran probabilidad de heladas anteriores a madurez fisiológica que correspondían a esas fechas. Las demás prácticas de manejo fueron las mismas en todos los años y sitios simulados, reflejando un manejo estándar en la región. La densidad de siembra se estableció en 16 plantas  $m^{-2}$  (a una profundidad de 30 mm) con un espacio entre hileras de 52 cm. El contenido inicial de agua disponible en el suelo se fijó en 50% y se supuso que los nutrientes no eran limitantes durante el ciclo del cultivo. Aunque esto último no refleja las condiciones reales de producción (es decir, la fertilización no es una práctica común y, cuando se hace, las tasas de N aplicadas son bastante bajas; Brihet, 2017), esta suposición simplifica la interpretación de resultados, dándole más importancia a los efectos de interés.

Se probaron tres híbridos comerciales representativos de diferente ciclo: ciclo corto (ADV114), intermedio (VDH314) y largo (VDH422). Los parámetros genotípicos para las simulaciones APSIM ya fueron descritas previamente (Tabla 6; **Capítulo III**).

Las variables simuladas en cada campaña fueron el tiempo desde siembra hasta la floración, y hasta la madurez fisiológica, el índice de transpiración relativa (TR), la biomasa aérea total en madurez fisiológica, IC y el rendimiento de grano.

### *Análisis*

En cada campaña, el patrón de estrés hídrico basado en el manejo estándar (es decir, el genotipo VDH314 sembrado el 15 de Octubre) se clasificó en función de su similitud en cada uno de los TE previamente definidos (**Capítulo III**). Esto se realizó a través de la suma mínima de las diferencias al cuadrado (Chenu et al., 2011).

Debido a que el rango de fechas de siembra varió con el sitio, el análisis fue realizado independientemente en cada sitio. Para cada variable de interés se ajustó un modelo mixto (lme4 package, lmer function; Bates et al. 2015) en R (R Core Team, 2018). El efecto del TE, fecha de siembra, genotipo, y todas sus interacciones se asumieron como efectos fijos. Mientras que el año fue tratado como observación experimental y se asumió aleatorio (Baumhardt et al., 2005). El análisis de días a antesis se realizó excluyendo las simulaciones en las que el ciclo del cultivo terminó prematuramente debido a la ocurrencia

de heladas provocando que no llegue a esta etapa (Sur, 20% de las simulaciones; Centro Oeste, 5% de las simulaciones).

El promedio de rendimiento y de días (en el caso de la fenología) de cada efecto significativo fueron comparados con la prueba de menor diferencia significativa de Fisher (LSD) en el nivel de probabilidad de 0,05. Finalmente, se realizó una prueba de correlación de Pearson de la relación entre biomasa en madurez fisiológica y rendimiento en grano.

#### *Validación de los resultados de las simulaciones*

Se utilizó una base de datos de 32 experimentos a campo con diferentes genotipos y fechas de siembra para verificar la concordancia con los resultados obtenidos a través de las simulaciones. Los experimentos fueron conducidos cerca del sitio definido como Centro Este (Anexo 2; Tabla S3). Los ensayos realizados en Venado Tuerto (n=20) (33° 40' S; 61° 58' O) provincia de Santa Fe (suelo tipo franco limoso, Argiudol típico; Soil Survey Staff, 2014) pertenecen al programa de mejoramiento de sorgo de Advanta Semillas SAIC de Venado Tuerto desde las campañas 2007 hasta 2018. Los experimentos en Zavalla (n=6) (33° 1' S, 60° 53' O), Santa Fe (suelo tipo franco limoso, Argiudol vértico; Soil Survey Staff, 2014), fueron realizado en el Campo Experimental Villarino, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Rosario en las campañas 2012, 2016 y 2017. Los experimentos en Pergamino (n=6) (33° 54' S; 60° 27' O), Buenos Aires (suelo tipo franco limoso, Argiudol típico; Soil Survey Staff, 2014) fueron conducidos en la Estación Experimental de Bayer Fontezuela en las campañas 2015 y 2016 (Cejas et al., 2020).

Se utilizó un diseño experimental de bloques al azar con tres repeticiones (Zavalla y Pergamino) o dos repeticiones (Venado Tuerto). Las fechas de siembra tuvieron lugar entre el 1 de Noviembre y 16 de Diciembre en Venado Tuerto, del 1 de Noviembre al 27 de Diciembre en Zavalla, y del 17 de Octubre al 20 de Diciembre en Pergamino. En cada experimento se sembraron los 3 genotipos: ADV114 (corto), VDH314 (intermedio), y VDH422 (largo), excepto en Zavalla, donde en la campaña 2012 solo se sembró sólo el genotipo VDH314 y en la campaña 2017 los genotipos VDH314 y ADV114.

Las parcelas fueron de cuatro surcos de 5-6 m de largo a 0,52 m de espaciamiento. Los experimentos se fertilizaron con 120-150 kg ha<sup>-1</sup> de UREA y 80 kg ha<sup>-1</sup> de MAP, siguiendo las recomendaciones regionales para evitar la deficiencia de nutrientes (Fontanetto, 2008). Las parcelas se sembraron en exceso y se ralearon hasta la densidad objetivo (16-18 pl m<sup>-2</sup>) en V3 (Vanderlip y Reeves, 1972).

Debido a la falta de información de las condiciones iniciales, las campañas fueron clasificadas según TE correspondiente a la clasificación previa del sitio representativo del Centro Este (Zavalla; **Capítulo III**). Esta clasificación considera el patrón de estrés hídrico de un genotipo de madurez intermedia sembrado a finales de Octubre-principios de Noviembre, la densidad de plantas es de 16 plantas m<sup>-2</sup> y sin restricciones de N. Para evaluar la fecha de siembra, se realizaron 3 grupos (temprana, de Octubre a mediados de Noviembre; intermedia, de mediados de Noviembre a principios de Diciembre; tardía, a partir de principios de Diciembre). El criterio para la clasificación fue mantener el equilibrio entre el número de observaciones y el rango de días explorados en cada grupo.

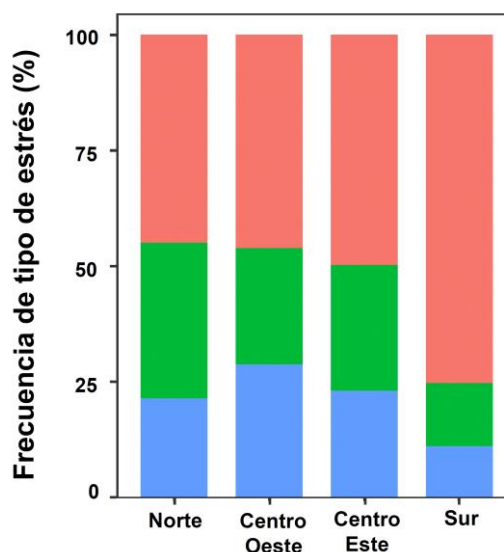
El conjunto de datos se analizó con modelos mixtos en R de manera similar a lo descrito para las simulaciones. El TE, la fecha de siembra, el genotipo y todas las interacciones posibles se establecieron como efectos fijos, mientras que el sitio, el bloque y el año se consideraron como efectos aleatorios. Se comprobó el supuesto de homoscedasticidad y Gaussianos (Zuur et al., 2009) para los residuos estandarizados del modelo con análisis gráficos y fueron válidos en todos los casos. Para ambos modelos ajustados el objetivo fue comparar las diferencias entre los efectos, por lo que las variables de interés fueron establecidas como fijas.

## RESULTADOS

### *Patrones de estrés hídrico*

La frecuencia de ocurrencia de cada TE calculada en este capítulo, varió considerablemente entre los sitios (Fig. 11). El estrés pre-floración fue el TE más frecuente, con una frecuencia de casi el 50% en todos los sitios, y con mayor la preponderancia en el Sur (75%; Fig. 11). El estrés terminal leve y el estrés en llenado mostraron frecuencias uniformes de ocurrencia en todos los sitios, siendo aproximadamente 25% en el Norte y ambos sitios centrales, y alrededor de 12,5% en el Sur (Fig. 11).

La fecha de siembra y el genotipo afectaron significativamente el número de días a antesis simulados en todos los sitios; la suma de ambos efectos explicó del 80 al 95% de la varianza total (Tabla 11). Retrasar la fecha de siembra redujo los días a antesis. La duración de la siembra a la antesis promedió entre 81 días (Norte) a 111 días (Sur). Retrasar la fecha de siembra redujo los días a la antesis entre 14 a 20 días (Tabla 11). El ciclo corto (ADV114) alcanzó la antesis de 74 a 103 días desde la siembra dependiendo del sitio, el ciclo intermedio (VDH314) de 82 a 113 días y el ciclo largo de 87 a 121 días (Tabla 11).



**Fig. 11.** Distribución de frecuencias de los TE (rojo: estrés en pre-floración; verde: estrés terminal leve; azul: estrés en llenado) en cada sitio en estudio.

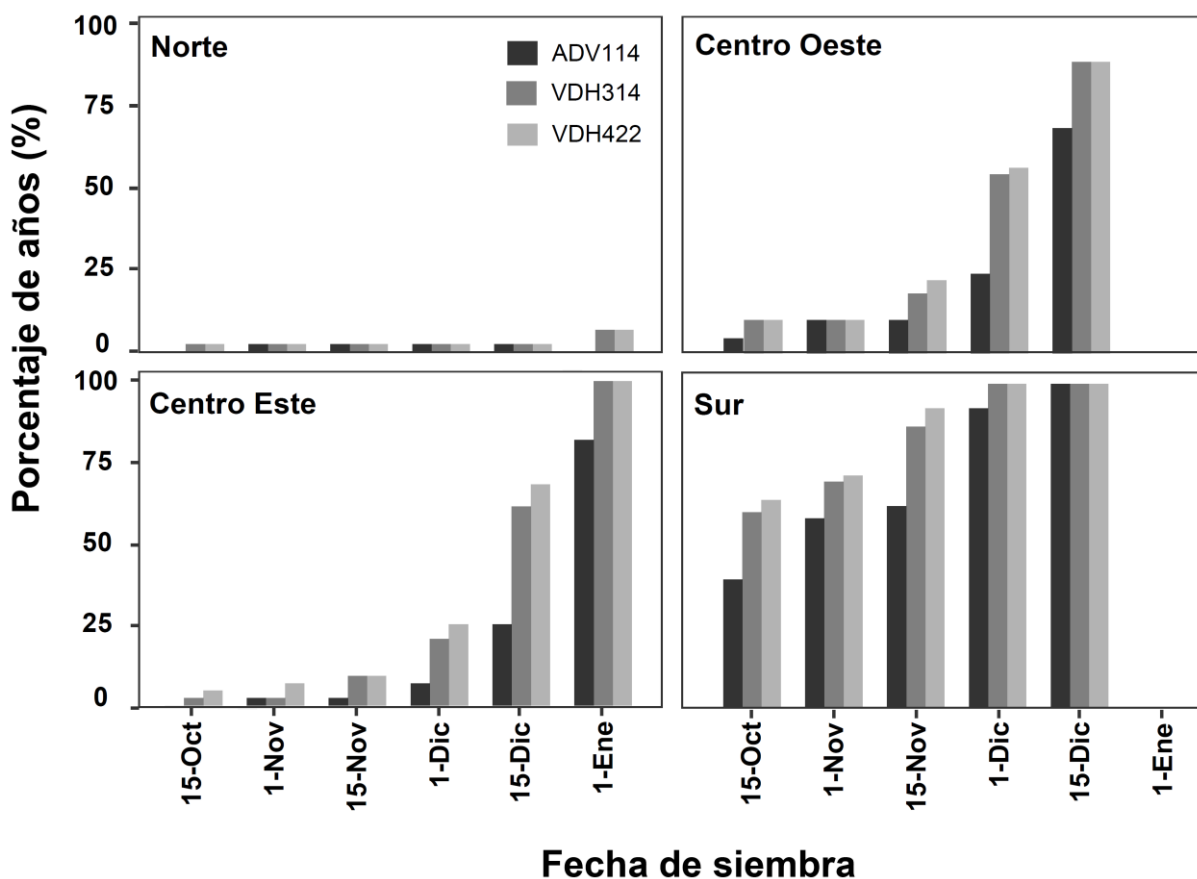
### Fenología

La interacción fecha de siembra por genotipo para días a antesis sólo fue significativa en latitudes más altas donde se exploró un amplio rango de fechas de siembra (Centro Este; Tabla 11). Retrasar la fecha de siembra desde mediados de Octubre hasta mediados de Diciembre redujo los días a antesis de manera similar en todos los genotipos, mientras que aumentó a partir de esa fecha. La duración de los días a antesis aumentó en 4, 5 y 20 días en comparación con la fecha de siembra de mediados de Diciembre para un ciclo corto, intermedio y largo, respectivamente (Anexo 1; Fig. S8).

La fecha de siembra y el genotipo afectaron significativamente la duración del llenado de granos en todos los sitios, explicando ambos efectos del 37 al 97% de la varianza total (Tabla 11). Retrasar la fecha de siembra aumentó o acortó la duración del llenado de granos según el sitio. La duración del llenado aumentó con las siembras tardías en el sitio Norte. La misma tendencia se observó en los sitios centrales, a excepción de las siembras tardías, donde se redujo el llenado de granos (Tabla 11). En el Sur, retrasar la fecha de siembra siempre acortó la duración del llenado del grano. La duración del llenado de granos fue mayor (53 d) para los genotipos ADV114 y VDH314, en comparación con VDH422 (48 días; Tabla 11).

La interacción entre la fecha de siembra y el genotipo para la duración del llenado fue significativa en tres sitios, siendo esta interacción más importante en términos de suma de cuadrados a mayor latitud (Tabla 11). En todos los casos, la interacción se asoció con el cambio relativo en la duración del llenado al retrasar las fechas de siembra. En el Norte, la

duración del llenado aumentó en la siembra del 15 de Diciembre y el 1 de Enero, siendo este incremento más importante (de 5 a 11 días) en el genotipo intermedio y largo. Por el contrario, en ambos sitios centrales la interacción fue dada por una reducción significativa en la duración del llenado de granos en la última fecha de siembra dependiendo del genotipo. Esta reducción fue de 7 y 5 días para el ciclo intermedio y de 10 y 29 días para el genotipo de ciclo largo, en el Centro Oeste y Centro Este, respectivamente.



**Fig. 12.** Porcentaje de años en los que cada genotipo (corto: ADV114, gris oscuro; intermedio: VDH314, gris intermedio; largo: VDH422, gris claro) no alcanzó el estado de madurez fisiológica (código de etapa 10 en el módulo de fenología APSIM) para cada sitio (Norte, Centro Oeste, Centro Este y Sur).

La probabilidad de que el cultivo no alcance la madurez fisiológica debido a bajas temperaturas aumentó con el retraso en la fecha de siembra (Fig. 12). El TE no mostró un efecto significativo en los días a antesis ni en la duración del llenado de granos (Tabla 11).

**Tabla 11.** Días desde la siembra hasta la antesis (S - A) y duración del llenado del grano (Llenado) simulados para cada sitio y TE, fecha de siembra y genotipo. Los componentes de la varianza se expresan como porcentaje de la varianza total explicada por los efectos. \*, \*\*, \*\*\* indican diferencias de significancia en  $p < 0,05$ ,  $< 0,01$  y  $< 0,001$ , respectivamente. Los valores con diferentes letras son significativamente diferentes en  $p < 0,05$ .

Efecto	Norte		Centro Oeste		Centro Este		Sur	
	S - A	Llenado	S - A	Llenado	S - A	Llenado	S - A	Llenado
	Días							
<i>Tipo de estrés</i>								
Estrés pre-floración	84 a	51 a	99 a	54 a	98 a	55 a	113 a	44 a
Estrés terminal leve	79 a	49 a	98 a	55 a	93 a	55 a	109 a	45 a
Estrés en llenado de granos	81 a	50 a	95 a	53 a	97 a	55 a	106 a	48 a
<i>Fecha de siembra</i>								
15 Oct	90 d	47 a	104 c	53 b	106 d	52 b	123 d	49 c
1 Nov	85 c	47 a	99 b	54 bc	99 c	54 bc	115 c	49 c
15 Nov	81 b	48 ab	95 a	56 cb	94 b	56 c	109 b	47 c
1 Dic	77 a	49 b	94 a	57 d	91 a	60 d	104 a	42 b
15 Dic	76 a	52 c	95 a	50 a	91 a	61 d	103 a	32 a
1 Ene	77 a	58 d			98 c	46 a		
<i>Genotipo</i>								
ADV114	74 a	50 b	89 a	56 b	87 a	57 b	103 a	48 c
VDH314	82 b	52 c	98 b	56 b	97 b	57 b	113 b	45 b
VDH422	87 c	48 a	105 c	50 a	106 c	51 a	121 c	41 a
<i>Componentes de la variancia</i>								
Tipo de estrés (TE)	7	2	2	0	2	0	7	3
Fecha de siembra (FS)	33 ***	78 ***	17 ***	29 ***	12 ***	21 ***	41 ***	79 ***
Genotipo (G)	55 ***	18 ***	78 ***	41 ***	68 ***	16 ***	53 ***	18 ***
TE x FS	5	1	2	0	10	11	0	0
TE x G	0	0	0	0	1	0	0	0
FS x G	0	1 **	0	30 ***	7 ***	52 ***	0	0
TE x FS x G	0	0	0	0	0	0	0	0

## Rendimiento de grano e índice de transpiración relativa

El TE explicó una gran proporción de la variabilidad total del rendimiento en todos los sitios (Tabla 12). El rendimiento fue mayor bajo estrés terminal leve y, dependiendo del sitio, se redujo en un 25-45% y 30-42% cuando el estrés fue en pre-floración y en el llenado, respectivamente. Las diferencias entre TE no fueron significativas en el Sur probablemente debido al alto desbalance de años clasificados en cada TE (Fig. 11).

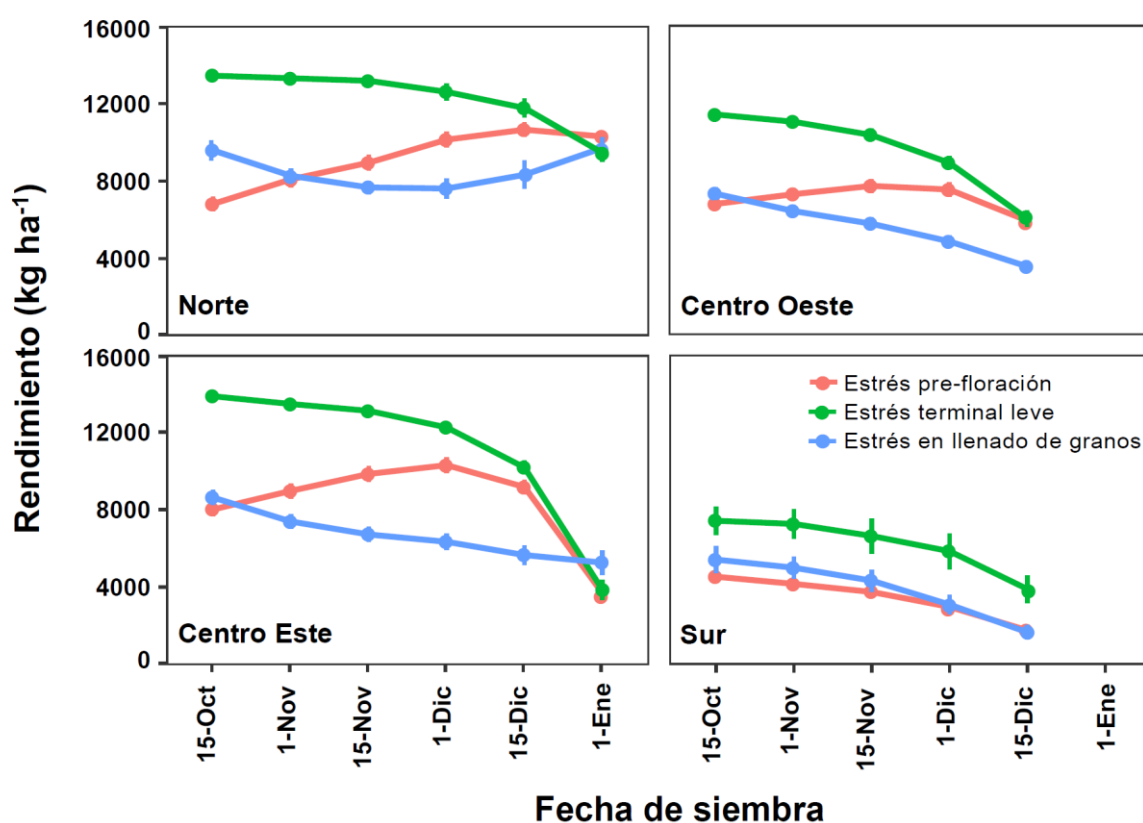
La fecha de siembra afectó significativamente el rendimiento, a excepción del Norte (Tabla 12). En los sitios del Centro Oeste y Sur el rendimiento fue mayor en la fecha de siembra más temprana (15 de Octubre), y disminuyó con las fechas de siembra más tardías. El rendimiento fue estable desde el 15 de Octubre al 1 de Diciembre en el Centro Este, y disminuyó a partir de esa fecha (Tabla 12). Se debe aclarar que puede haber efectos confundidos en ambos sitios centrales debido a la presencia de interacciones con G. Las diferencias genotípicas contribuyeron en menor medida a variaciones de rendimiento, siendo más alto en el ciclo corto ADV114, intermedio en el ciclo intermedio VDH314 y más bajos en el ciclo largo VDH422 (Tabla 4).

**Tabla 12.** Rendimiento en grano ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) para cada sitio y TE, fecha de siembra y genotipo. Los componentes de la varianza se expresan como porcentaje de la varianza total explicada por los efectos. \*, \*\*, \*\*\* indican diferencias de significancia en  $p < 0,05$ ,  $< 0,01$  y  $< 0,001$ , respectivamente. Los valores con diferentes letras son significativamente diferentes en  $p < 0,05$ .

Efecto	Norte	Centro Oeste	Centro Este	Sur
	$\text{kg ha}^{-1}$			
<i>Tipo de estrés</i>				
Estrés pre-floración	9159 b	7029 b	8350 b	3445 a
Estrés terminal leve	12323 a	9525 a	11133 a	6220 a
Estrés en el llenado	8530 b	5564 b	6685 b	3909 a
<i>Fecha de siembra</i>				
15 Oct	9663 a	8048 a	9764 a	4954 a
1 Nov	9905 a	7936 b	9854 a	4600 b
15 Nov	10118 a	7783 c	10042 a	4136 c
1 Dic	10441 a	7084 cd	9949 a	3321 cd
15 Dic	10539 a	5257 d	8664 b	2003 d
1 Ene	9897 a		4110 c	
<i>Genotipo</i>				
ADV114	10217 a	7746 a	9532 a	4635 a
VDH314	10344 a	7308 b	9002 b	3712 b
VDH422	9723 b	6611 c	7657 c	3061 c
<i>Componentes de la varianza</i>				
Tipo de estrés (TE)	68 ***	59 ***	34 ***	53
Fecha de siembra (FS)	0	22 ***	28 ***	33 ***
Genotipo (G)	1 ***	4 ***	5 ***	15 ***
TE x FS	30 ***	13 ***	22 ***	0
TE x G	0	<1 **	0	0
FS x G	0	1 ***	10 ***	0
TE x FS x G	0	0	0	0

La interacción entre la fecha de siembra y el genotipo fue significativa en los sitios centrales (Tabla 12), donde retrasar la fecha de siembra redujo el rendimiento en una magnitud mayor en los genotipos de ciclo intermedio y largo en comparación con el genotipo de ciclo corto. En el Centro Oeste, los rendimientos se redujeron significativamente después del 1 de Noviembre para el ciclo intermedio y largo, mientras que fue a partir de mediados de Noviembre para el ciclo corto. Se observó una tendencia similar en el Centro Este, aunque las fechas críticas de siembra fueron el 1 de Diciembre y mediados de Diciembre para el ciclo intermedio-largo y corto, respectivamente (Tabla 12).

El efecto de la fecha de siembra dependió del patrón de estrés hídrico, excepto en la región Sur donde no hubo interacción significativa (Tabla 12). Retrasar la fecha de siembra promovió una reducción acelerada del rendimiento bajo estrés terminal leve (Fig. 13). Por otro lado, retrasar la fecha de siembra resultó en un incremento del rendimiento bajo estrés en pre-floración (Fig. 13). Finalmente, retrasar la fecha de siembra redujo linealmente el rendimiento de grano bajo estrés de llenado de grano, excepto en el sitio Norte donde hubo una recuperación del rendimiento en siembras posteriores (Fig. 13).



**Fig. 13.** Promedio de rendimiento de grano simulado según la clasificación de los años en cada TE, en 5 a 6 fechas de siembra, comenzando desde el 15 de Octubre y cada 15 días a partir de esa fecha, y para cada sitio. Las líneas verticales indican el error estándar.

La respuesta del rendimiento bajo diferentes fechas de siembra y TE estuvo de acuerdo con los cambios en el índice de TR alrededor de la antesis (Tabla 13). Los altos rendimientos bajo estrés terminal leve están de acuerdo con los altos valores de transpiración relativa ( $TR > 0,74$ ; Tabla 13). En los escenarios de estrés pre-floración, retrasar la fecha de siembra mejoró el índice de TR alrededor del período crítico en todos los sitios ( $p < 0,05$ ). En las campañas que presentaron estrés en llenado, retrasar la fecha de siembra implicó una reducción en el índice de TR alrededor de la floración, que sólo se revierte en las fechas de siembra de Enero en los sitios del Norte y Centro Este (Tabla 13).

Aumentos del índice de TR al atrasar la fecha de siembra no resultaron en beneficios en el rendimiento cuando este atraso implicó ubicar el período crítico o el período de llenado de granos en condiciones de temperatura o radiación solar decrecientes. En el sitio Sur, por ejemplo, retrasar la fecha de siembra siempre mejoró el índice de TR (Tabla 13). Sin embargo, el rendimiento disminuyó consistentemente ante el atraso en la fecha de siembra (Fig. 13).

**Tabla 13.** *Traspiración relativa promedio en floración para cada TE para los 4 sitios.*

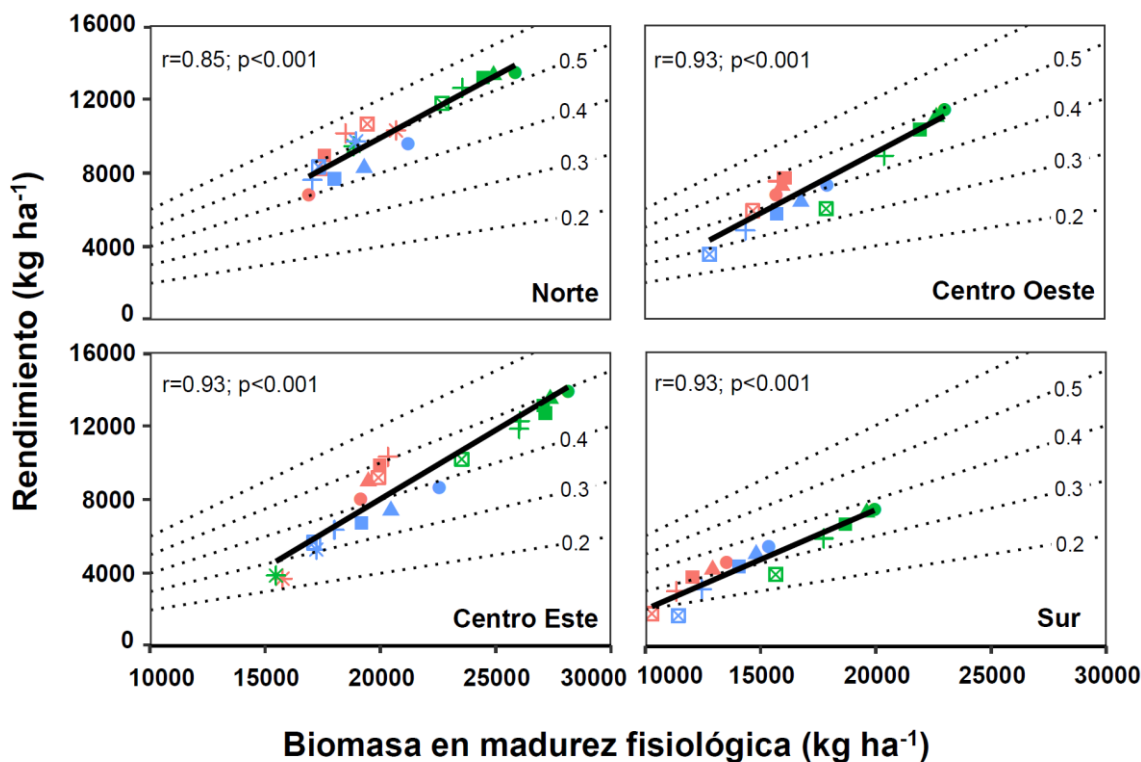
Tipo de estrés	Fecha de siembra	Norte	Centro Oeste	Centro Este	Sur
Estrés previo floración	15 Oct	0,51	0,59	0,53	0,57
	1 Nov	0,61	0,61	0,63	0,67
	15 Nov	0,66	0,63	0,69	0,70
	1 Dic	0,75	0,69	0,83	0,80
	15 Dic	0,84	0,81	0,88	0,84
	1 Ene	0,90		0,92	
Estrés terminal leve	15 Oct	0,87	0,76	0,81	0,74
	1 Nov	0,85	0,78	0,84	0,75
	15 Nov	0,87	0,81	0,86	0,75
	1 Dic	0,89	0,89	0,90	0,86
	15 Dic	0,96	0,92	0,95	0,92
	1 Ene	0,88		0,95	
Estrés en llenado de granos	15 Oct	0,71	0,61	0,65	0,76
	1 Nov	0,65	0,58	0,59	0,67
	15 Nov	0,57	0,59	0,59	0,62
	1 Dei	0,50	0,54	0,62	0,59
	15 Dic	0,66	0,52	0,69	0,51
	1 Ene	0,88		0,95	

Finalmente, la interacción entre el TE y el genotipo sólo fue significativa en el sitio Centro Oeste (Tabla 12), donde el rendimiento bajo estrés en pre-floración fue similar para el ciclo intermedio y largo.

## Biomasa a madurez fisiológica e índice de cosecha

Las variaciones de rendimiento se asociaron con variaciones tanto en la biomasa a madurez fisiológica como en el IC (Fig. 14). La biomasa acumulada en madurez y el IC fueron mayores bajo estrés terminal leve ( $p < 0,05$ ). Bajo este TE, ambos caracteres fueron más altos en las siembras tempranas y disminuyeron con el retraso en la fecha de siembra ( $p < 0,05$ ; Fig. 14). Esta reducción fue mayor en los sitios centrales y de mayor latitud.

La biomasa fue menor ( $p < 0,05$ ) y mostró valores comparables bajo estrés en pre-floración y llenado de granos, siendo las diferencias de rendimiento entre fechas de siembra explicadas principalmente por diferencias en IC (Fig. 14). Bajo estrés pre-floración, las siembras tardías aumentaron el IC. Bajo estrés en llenado de granos, tanto la biomasa como el IC fueron más altos en las siembras tempranas y disminuyeron con el retraso en la fecha de siembra.



**Fig. 14.** Relación entre el rendimiento simulado y la biomasa a madurez fisiológica para los años clasificados en cada TE (representados con colores: ● rojo, estrés pre-floración; ● verde, estrés terminal leve; ● azul, estrés en llenado de granos) y fechas de siembra (representados con símbolos: ●, 15 de Octubre; ▲, 1 de Noviembre; ■, 15 Noviembre; +, 1 de Diciembre; ☒, 15 de Diciembre; \*, 1 de Enero). Las líneas punteadas representan isolíneas de índice de cosecha

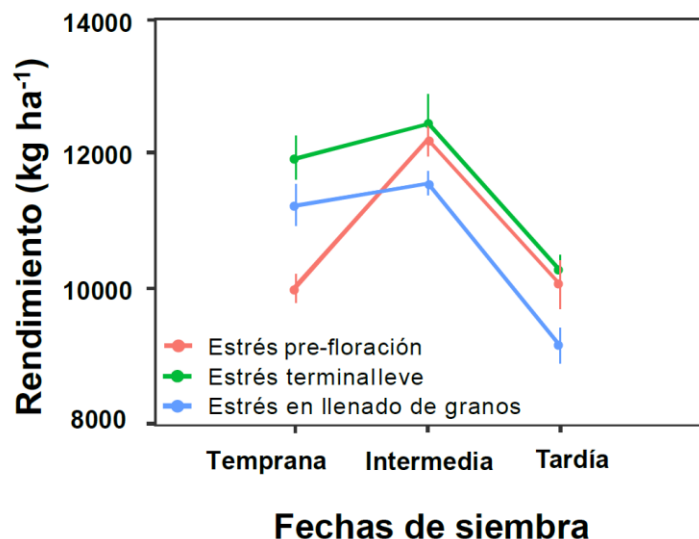
## Validación de los resultados simulados

Los datos observados del Centro Este estuvieron de acuerdo con los datos simulados, mostrando una interacción significativa entre el TE y la fecha de siembra para el rendimiento (Tabla 14). Bajo estrés terminal leve o estrés en llenado, el rendimiento fue mayor en las fechas de siembra de Octubre a mediados de Diciembre (identificado como temprano o intermedio en la Fig. 15). En contraste, el rendimiento fue mayor en las siembras de mediados de Noviembre a mediados de Diciembre bajo estrés pre-floración, y se redujo significativamente en las siembras anteriores (Fig. 15). El rendimiento se redujo significativamente en siembras tardías (desde mediados de Diciembre) independientemente del TE.

Al igual que en los datos simulados, no se detectó interacción significativa TE x genotipo ni TE x fecha de siembra x genotipo para el rendimiento.

**Tabla 14.** Componentes de la variancia para rendimiento expresado como porcentaje de la variancia total explicada para cada efecto. \*, \*\*, \*\*\* indican diferencias de significancia en  $p < 0,05$ ,  $< 0,01$  y  $< 0,001$ , respectivamente.

Efectos	Porcentaje de la variancia (%)
Tipo de estrés (TE)	35 **
Fecha de siembra (FS)	5 *
Genotipos (G)	18 **
TE x FS	18 **
TE x G	3
FS x G	19 **
TE x FS x G	2



**Fig. 15.** Rendimiento observado para los años clasificados en cada TE, a través de diferentes fechas de siembra. Los detalles de los experimentos se encuentran en Tabla S3 (Anexo 2), e incluyen 3 genotipos comerciales de sorgo bajo un amplio rango de regímenes hídricos, en un periodo de 12 años y en tres sitios del Centro Este. Las barras verticales indican el error estándar.

## DISCUSIÓN

La interacción GxA generalmente explica una proporción importante de la variabilidad total del rendimiento en grano (Chapman et al., 2000b, **Capítulo II**). En este contexto, los modelos de simulación de cultivos son una herramienta valiosa para explorar el impacto de diferentes combinaciones de caracteres del genotipo y/o manejo en una población de ambientes objetivo y para definir estrategias potenciales de mejora (Whitbread et al., 2010; Hammer et al., 2014; Chenu et al., 2011, Clarke et al., 2019). Esto podría ser particularmente importante en los cultivos sujetos a una inversión relativamente baja en investigación. La experimentación virtual puede proporcionar la base para definir una experimentación in situ más específica.

Se demostró que las fechas de siembra que maximizan el rendimientos dependen del TE particular, aunque este resultado dependió del rango latitudinal. En los sitios del Sur, las fechas de siembra tempranas proporcionaron los mayores rendimientos independientemente del TE explorado. Esto ocurre incluso a pesar de que las fechas de siembra más tempranas ubican el período crítico de definición del rendimiento bajo valores de índice de TR más bajos en el 75% de los años. Las fechas de siembra tempranas en el Sur produjeron más biomasa debido al aumento del largo de ciclo, y también resultaron en un mayor IC que las siembras tardías. Retrasar la fecha de siembra también redujo el IC debido a una reducción anticipada en la duración del llenado de granos debido a las bajas temperaturas. Este estudio provee información novedosa para el área, siendo que las fechas de siembra suelen tener lugar desde finales de Noviembre (Bolsa de Cereales, 2020).

Actualmente, los productores de sorgo en altas latitudes están limitados por las bajas temperaturas del suelo en la siembra. Los resultados de este capítulo demostraron que los genotipos tolerantes al frío deberían ser un objetivo prioritario del mejoramiento para la producción de sorgo en latitudes altas. Recientemente se han identificado genes candidatos prometedores que confieren tolerancia al frío en plántulas (Parra-Londono et al., 2018; Moghimi et al., 2019). De manera similar, se ha detectado variabilidad genotípica para la temperatura base previa a la antesis que tiene un gran valor para el mejoramiento en regiones templadas (Tirfessa et al., 2020).

El ajuste de las fechas de siembra según el TE sigue una estrategia de escape de la sequía (Begg y Turner, 1976). Retrasar la fecha de siembra en años con estrés pre-floración anticiparía el estrés hídrico a etapas vegetativas, evitando la coincidencia de déficit hídrico con etapas críticas (van Oosterom y Hammer, 2008), y aumentaría el IC optimizando el uso del agua alrededor de floración (Sadras y Connor, 1991). Retrasar la fecha de siembra en

años con estrés en llenado anticiparía el estrés a etapas más críticas y, por esta razón, las siembras tempranas resultan en mayores rendimientos.

Los productores deben definir las combinaciones de genotipo y manejo antes de la campaña agrícola y enfrentar el riesgo que representa la incertidumbre del ambiente (Hammer et al., 2020). El equilibrio entre rendimiento y riesgo es un factor importante que enfrentan los productores en los sistemas de cultivo desarrollados y de subsistencia (Clarke et al., 2019; Hammer et al., 2014). Las opciones de manejo de alto nivel de insumos favorecen el alto rendimiento en ambientes potenciales, pero conllevan un mayor riesgo en ambientes pobres. Las opciones de manejo más conservadoras, por otro lado, reducen el riesgo, pero implican menores rendimientos en campañas favorables (Hammer et al., 2020). En nuestra región, una estrategia conservadora podría ser la mejor opción en el Norte y el Centro Este, ya que el rendimiento perdido por retrasar las fechas de siembra hasta mediados de Noviembre/ principios de Diciembre bajo estrés terminal leve o estrés en llenado es menor (1464-1947 kg ha<sup>-1</sup> para cada fecha promediando los dos TE) que el rendimiento ganado por retrasar las siembras bajo un estrés en pre-floración (3833-2287 kg ha<sup>-1</sup>; Fig. 13). Esta diferencia no es positiva en el Centro Oeste, en consecuencia las fechas de siembra tempranas implican un menor riesgo.

Las siembras tardías como estrategia para proporcionar estabilidad de rendimiento también se usan en la región en estudio para el cultivo de maíz (Gambin et al., 2016). En sorgo, esta estrategia tiene importantes consecuencias locales. La siembra posterior implica exponer el cultivo a alta presión de malezas y de insectos. Sin embargo, la tecnología aplicada en sorgo generalmente es baja, el control de malezas es uno de los principales problemas de producción y los pesticidas generalmente no se aplican (Brihet y Gayo, 2016; Brihet, 2017). Esto implica varios desafíos para el mejoramiento y manejo del sorgo en la región.

Otro aspecto a considerar sería la posibilidad de que un estrés pre-floración retrase la antesis en genotipos de sorgo que manifiesten latencia (Wright et al., 1983; Craufurd et al., 1993). Aunque APSIM simula el impacto del estrés hídrico en la fenología (Hammer et al., 2010), lo hace de manera similar para todos los genotipos. Existe evidencia local de diferencias genotípicas importantes en el retraso en el tiempo de floración (hasta 25 días) en respuesta al estrés hídrico previo a la floración, que es en gran medida independiente de la madurez del genotipo (Pardo y Gambin, 2014). En consecuencia, el impacto de la madurez del genotipo podría ser mayor de lo simulado en el presente estudio, particularmente en siembras muy tardías en sitios centrales y del Sur. La evaluación de APSIM en este sentido sería claramente importante para usar esta herramienta en regiones templadas.

## CONCLUSIONES

La fecha de siembra en sorgo proporciona una estrategia de escape para reducir el impacto de los diferentes patrones de estrés hídrico que normalmente afectan a la región. Por el contrario, la madurez del genotipo utilizada localmente parece menos importante para este propósito.

Las siembras tardías (desde mediados de Noviembre hasta principios de Diciembre) proporcionan una estrategia conservadora para reducir el riesgo en los sitios del Norte y Centro Este, mientras que en los sitios Centro Oeste y Sur la fecha de siembra debe ser lo más temprana posible (Octubre).

Estos resultados tienen importantes consecuencias para el mejoramiento y manejo del sorgo en regiones templadas.

## CAPITULO V

### DISCUSION GENERAL

La realidad productiva del cultivo de sorgo en Argentina se circunscribe a suelos de baja calidad productiva, con aplicación de bajos niveles tecnológicos y un claro desconocimiento de las interacciones entre el genotipo, el ambiente y el manejo (Brihet, 2017). En esta tesis se avanzó en estas cuestiones desde distintos enfoques apuntando a entender las interacciones, los ambientes de producción y a explorar estrategias de manejo y genotipo para aumentar la productividad.

Un primer paso fue interpretar las interacciones GxA para rendimiento de sorgo de nuestros ambientes a través del estudio de caracteres secundarios (de la Vega y Hall, 2002a; 2002b). Este aspecto fue abordado en el **Capítulo II**, en el que no solo se determinó la importancia de la interacción en los ambientes explorados (relación  $GxA/G = 3,48$ ), sino que además se definieron caracteres secundarios (días a antesis y peso de grano individual) que pueden asistir al mejoramiento en programas de selección. Siendo que el mejoramiento de sorgo en Argentina se focaliza principalmente en la selección por rendimiento, este estudio desarrolla la posibilidad de realizar selección secundaria con caracteres más estables y que presentan correlación con rendimiento.

A su vez, una mejor comprensión de las bases fisiológicas de las respuestas diferenciales de los híbridos a ambientes específicos puede contribuir a la eficiencia general de programas de mejoramiento mediante la adaptación de híbridos a patrones de adaptación específicos (de la Vega y Hall, 2002a; 2002b). Esto va de la mano con el uso de poblaciones de ambientes objetivo en programas de mejoramiento. Es sabido que una discordancia entre los ambientes explorados en los ensayos multi-ambientales y los ambientes objetivos enlentecen o incluso disminuyen el avance genético (Cooper et al., 1996). Esto se acentúa si consideramos que los ambientes productivos en Argentina abarcan una gran extensión de latitud 24 a 40°S, lo que conlleva a una gran diversidad climática y edáfica. Por estos motivos, una caracterización de ambientes para poder agruparlos y crear una definición clara de las poblaciones objetivo de los ambientes de sorgo en Argentina resulta fundamental a la hora de lidiar con la interacción GxA.

El concepto de ambiente puede resultar muy amplio, y en esta tesis me enfoqué en captar la variabilidad de los patrones hídricos durante el ciclo del cultivo dada la variación interanual de precipitaciones. Las amplias variaciones de temperaturas y precipitaciones provocan distintos patrones hídricos en cada campaña. Conocer dichos patrones permite

determinar el momento, intensidad y duración del estrés hídrico, lo que define el efecto que tiene el mismo sobre el crecimiento y desarrollo del cultivo (Passioura, 1983). Esta caracterización fue abordada a través del uso de modelos de simulación. Los modelos de simulación son una herramienta valiosa para simular el crecimiento y desarrollo de cultivos (Passioura, 1996). Desempeñan un papel fundamental en la mejora de cultivos cuando se usan: (i) para caracterizar ambientes, con el fin de identificar la naturaleza y la frecuencia de los eventos de estrés en la población de ambientes objetivo (Chapman et al., 2000b; abordado en el **Capítulo III**), y (ii) para predecir el resultado de las combinaciones de GxM en los ambientes objetivo (Hammer y Jordan, 2007; abordado en el **Capítulo IV**).

En el **Capítulo III** se definieron tres patrones de estrés hídrico de relativa similar frecuencia, que variaron principalmente en el momento y la intensidad del estrés. Por otro lado, la frecuencia de estos patrones varió entre sitios según su distribución geográfica y de precipitaciones, aumentando hacia el Sur la frecuencia del estrés en pre-floración. Éste conocimiento sobre los principales TE de los ambientes objetivo y sus frecuencias, puede ayudar a la selección de sitios en programas de mejoramiento. (Chenu et al., 2011). Los patrones descritos ayudaron a explicar parte de la interacción GxA al analizar genotipos de diferente largo de ciclo, lo que demuestra la importancia de la fenología como estrategia para mitigar el estrés o aprovechar un ambiente potencial. A su vez, éste mayor entendimiento de las interacciones GxA producto de la caracterización del ambiente permite adecuar las estrategias de selección (Cooper y DeLacy, 1994). Un ejemplo de dicha adecuación consiste en analizar los resultados de los ensayos multi-ambientales considerando los TE por separado, lo que disminuiría el efecto de la interacción GxA y aumentaría la heredabilidad (Löffler et al., 2005). El conocimiento de las frecuencias de TEs en la población de ambientes objetivo permite ponderar cada ensayo en función de su representatividad, incrementando de esta manera la correlación genética (y en consecuencia la respuesta correlacionada a la selección) entre los ambientes de selección y objetivo en una estrategia de selección por adaptación amplia.

La realidad productiva del sorgo en Argentina involucra un mismo manejo generalizado para una gran región que, como ya se ha mencionado, es muy variable. Se han demostrado las ventajas sustanciales que confiere utilizar planteos específicos de GxM en sub regiones con frecuencias de TE diferentes (Hammer et al., 2014; Chenu et al., 2013), confiriéndole al estudio un gran impacto en el medio productivo. Estos aspectos fueron abordados en el **Capítulo IV**, haciendo hincapié en largo de ciclo (atributo del genotipo) y fecha de siembra (práctica de manejo). Los resultados indicaron a las siembras tardías como una opción para escapar al estrés (Begg y Turner, 1976) en años con estrés pre-

floración, ya que anticiparía el estrés hídrico a etapas vegetativas, evitando la coincidencia de déficit hídrico con etapas críticas (van Oosterom y Hammer, 2008). Las siembras tardías se emplean actualmente en la región en el cultivo de maíz como estrategia para lograr estabilidad de rendimiento (Gambin et al., 2016). En sorgo este planteo de manejo presenta ciertos obstáculos, considerando que retrasar la fecha de siembra implica exponer el cultivo a alta presión de malezas y de insectos, y que la aplicación de tecnologías para control de adversidades es baja (Brihet y Gayo, 2016; Brihet, 2017). Por otro lado, para estrés terminal leve y estrés en llenado fueron más convenientes fechas de siembra tempranas. En el caso de estrés en llenado, retrasar la fecha de siembra anticiparía el estrés a etapas más críticas y, por esta razón, las siembras tempranas resultan en mayores rendimientos. Por otro lado, años con estrés terminal leve, en los que la condición hídrica no es un problema, se ven favorecidos por fechas de siembra tempranas que colocan la floración en el momento del año con mayor radiación (Hall et al., 1992).

En este capítulo también se confirma la importancia del largo de ciclo. El rendimiento disminuyó con el aumento en el largo de ciclo en todas las regiones. El impacto del largo del ciclo fue menor en el Norte y aumentó hacia el Sur, pero en todos los casos sugirió que los genotipos cortos proporcionan el mejor equilibrio entre la producción de biomasa y el IC. Este resultado concuerda con lo observado en el **Capítulo II**. El uso de genotipos de madurez intermedia y tardía aumentó la probabilidad de que la etapa de llenado se vea afectado negativamente por la disminución de las temperaturas, particularmente para las fechas de siembra desde el 1 de Diciembre. Sería relevante explorar un mayor número de materiales de cada largo de ciclo, ya que ciclos cortos generalmente limitan el potencial de rendimiento (Jordan et al., 1983; Hammer et al., 2014).

Como se mencionó en el **Capítulo III**, la elección de un planteo de manejo es complejo en el marco de no haber un TE predominante. Entonces, aunque la presente tesis colabore en la caracterización ambiental, el TE de cada campaña representa una incertidumbre para el productor, por lo que la decisión de la práctica de manejo más adecuada sigue siendo un desafío. Con la finalidad de disminuir el riesgo que asumen los productores, en el **Capítulo IV** se plantean estrategias conservativas para cada parte de la región sorguera central Argentina. En el Norte y en el Centro Este la reducción del rendimiento por atrasar la fecha de siembra a mediados de Noviembre principios de Diciembre en escenarios de estrés terminal leve o estrés en llenado de granos fue menor que el aumento al atrasar la fecha de siembra en escenarios de estrés en pre-floración. Esta relación entre pérdida y ganancias no se evidenció en el Centro Oeste de la región por lo que las siembras tempranas son la mejor opción. En el Sur siempre resultaron más

convenientes las siembras tempranas. Este último aspecto sugeriría que el factor más limitante no sería el hídrico sino las bajas temperaturas.

Se debe aclarar que en cuanto a las prácticas de manejo y a caracteres del genotipo se evaluaron solo los considerados principales (fecha de siembra y largo del ciclo). Por lo que quedan varias combinaciones de opciones de manejos (por ejemplo fertilización y densidades de siembra) y caracteres de genotipos (por ejemplo número de macollos, latencia) por explorar. A pesar de que quedan muchos aspectos por explorar, en el desarrollo de esta tesis se ha avanzado mucho, generado información novedosa con claras implicancias tanto en el medio productivo como para programas de desarrollo.

## INVESTIGACIONES FUTURAS

A continuación detallo nuevas interrogantes que han surgido a partir de la presente tesis:

- *Variabilidad genotípica en latencia*

Como ya se mencionó en el **Capítulo IV**, la plasticidad de la fenología (localmente denominado “latencia”; Ludlow y Muchow, 1990) es un aspecto particular de sorgo que requiere más investigación. Brevemente, ante un estrés el sorgo tiene la capacidad de prolongar la duración de etapas vegetativas alargando el filocrono o deteniendo la expansión foliar (Craufurd et al., 1993). Este atraso en la floración tiene lugar hasta que se reestablezca la condición hídrica. Aunque ha sido identificado como un carácter potencialmente beneficioso ante estrés hídricos intermitentes en prefloración, el atraso implica ubicar las etapas reproductivas en condiciones desfavorables de radiación y temperatura. Existe, a la vez, una importante variabilidad fenotípica en su expresión (Pardo y Gambin, 2014), cuya relevancia en términos productivos aún no ha sido explorada.

- *Variabilidad genotípica para tolerancia a bajas temperaturas.*

En el **Capítulo IV** se indicó los beneficios de realizar siembras más tempranas. Estas conclusiones se obtuvieron en el marco de exploraciones *in silico*, lo que conlleva a que hay aspectos de la realidad que no están representados. Actualmente APSIM considera como condiciones que pueden desencadenar un problema en la emergencia a: i) siembras muy profundas, ii) falta de humedad a la siembra, y iii) altas temperaturas en la emergencia ([apsim.info/documentation](http://apsim.info/documentation)). Por lo que se ignora el efecto de las bajas temperaturas en la obtención de una emergencia

uniforme del cultivo. Bajo condiciones adecuadas de humedad, la siembra debería llevarse a cabo con temperaturas de suelo por encima de 15°C. De esta forma, la etapa no se prolonga demasiado (duración de la etapa siembra-emergencia de no más de dos semanas, Muchow y Carberry, 1990), y se evita la exposición de las semillas a patógenos y plagas, no decae el vigor de las mismas, y se garantiza el stand de plantas y la uniformidad en la emergencia (Anda y Pinter, 1994; Yu et al., 2004). Estas condiciones son rara vez alcanzadas en fechas de siembras tempranas (principios de Octubre; Maddoni, 2012), y no hay información precisa en sorgo del comportamiento de materiales locales a baja temperatura en etapas tempranas. Sería relevante la exploración de la variabilidad genotípica disponible para definir la posibilidad de realizar efectivamente el adelanto de la fecha de siembra.

- *Densidad y espaciamento entre surcos.*

De la misma manera que se evaluaron largo de ciclo y fecha de siembra, existen otras prácticas de manejo que restan explorar. El uso de densidades más bajas y mayor espaciamento entre surcos para paliar el efecto de la escases hídrica es común en Australia. En estos ambientes el estrés se caracteriza principalmente por ocurrir en post floración (Chapman et al., 2000b) por lo que esta estrategia le permite almacenar agua en el entresurco, a la que el cultivo alcanzará en las instancias finales. Esta estrategia se podría describir como un uso racional de los recursos y permite lograr que los requerimientos del cultivo coincidan con la oferta de hídrica (lluvias/ disponibilidad de agua útil en el suelo) (Debaeke y Aboudrade, 2004). A diferencia del escenario australiano donde la mayor diferencia entre los TE es la intensidad del estrés (Chapman et al., 2000b), en el **Capítulo III** se muestra que para la región sorquera en Argentina la mayor diferencia es el momento del ciclo del cultivo en el que el pico de estrés comienza. El estudio de estas estrategias en nuestros ambientes sería un aspecto novedoso y desafiante para avanzar.

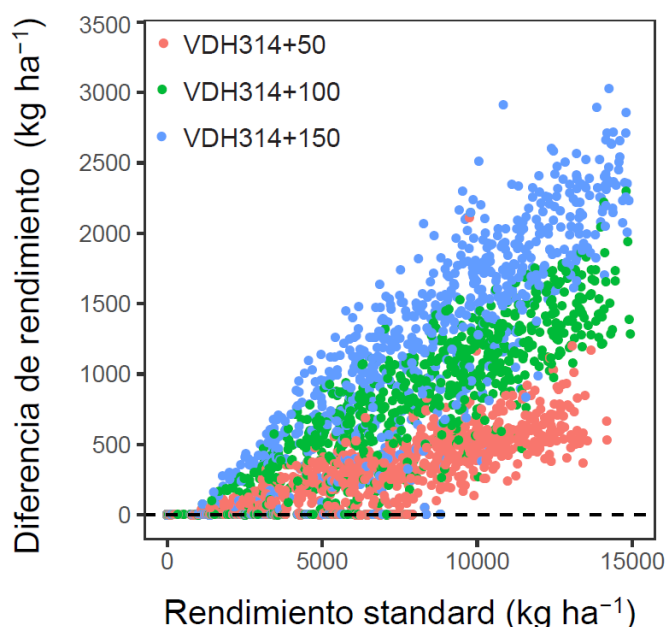
- *Evaluación de caracteres genotípicos de interés para diferentes TE in situ.*

Evaluar a campo los patrones de estrés más frecuentes es posible a través del uso de un rain-out shelter. Este dispositivo permite bloquear la lluvia de las parcelas, ocasionándoles un estrés controlado independientemente de la variabilidad del año. Con esta herramienta es posible forzar las condiciones a campo para que representen los distintos TE, evaluar la respuesta a la variabilidad genética y a distintas opciones de manejo y corroborar las conclusiones *in silico*. Esta alternativa ya se está realizando. Como primer paso se evaluaron los dos TE más frecuentes en la región (estrés pre-floración y estrés terminal leve, **Capítulo III**) con genotipos

locales de similar largo de ciclo para evaluar cómo la variabilidad en la estructura del canopeo (número de macollos, área foliar, altura, ángulo; Hammer et al., 1993) y aspectos relacionados (intercepción de la radiación, temperatura foliar; Mutava et al., 2011) afectaron al rendimiento y sus componentes (número de granos, peso de granos). Resultados preliminares de este estudio indican una importante interacción GxTE para rendimiento.

- *Genotipos virtuales.*

Los modelos de simulación representan una herramienta muy útil a la hora de probar distintas combinaciones no solo de prácticas de manejo sino también distintas variaciones en caracteres genotípicos como macollaje (Hammer et al., 2014) o staygreen (Kholová et al., 2014). Esto sirve para orientar a los fitomejoradores a posibles caracteres de interés para el mejoramiento. Algunos caracteres a explorar derivados de esta tesis serían: mayor resistencia a las bajas temperaturas, emergencia más rápida y uniforme, y aumento en la duración del llenado. En la Fig. 16 se observa un ejemplo de esta aplicación. En tres sitios del **Capítulo IV** (Norte, Centro Este y Centro Oeste), se probaron tres modificaciones de la duración del llenado (incrementos de 50, 100 y 150°Cd) del genotipo de ciclo intermedio VDH314, sembrando el 15 de Noviembre, con una densidad de 16 pl ha<sup>-1</sup>, y sin deficiencias de N.



**Fig. 16.** Relación entre el rendimiento del genotipo standard (sin modificar) y la diferencia de rendimiento obtenida entre el genotipo modificado y el genotipo standard. Los colores representan diferentes modificaciones de la duración del llenado del genotipo standard (VDH314): azul, duración del llenado más 150°Cd; verde duración del llenado más 100°Cd; rojo, duración del llenado más 50°Cd, para los 3 sitios estudiados sembrando el 15 de Noviembre, con una densidad de 16 pl ha<sup>-1</sup>, y sin deficiencias de N.

Los resultados que se visualizan en la Fig. 16 indican que los genotipos modificados siempre ocasionaron incrementos respecto al original y esas diferencias fueron mayores en los mejores ambientes (ambientes en los que el standard presentaba los mayores rendimientos). Además se puede ver que a medida que la duración del llenado se incrementa, el efecto sobre el rendimiento siempre fue mayor. Por lo que se deduciría que aumentar la duración del llenado de los genotipos sería favorable en términos de rendimiento.

- *Ampliación de la validación de APSIM.*

Uno de los productos de esta tesis es la validación para tres genotipos comerciales del modelo de simulación APSIM de sorgo para la región central Argentina. La validación habilita la utilización de dicho modelo para futuras investigaciones, como las mencionadas en puntos anteriores. Un siguiente paso que ampliaría las posibilidades de su utilización sería la validación del modelo para otras regiones, condiciones, y genotipos.

- *Evaluación de caracteres secundarios.*

En el **Capítulo II** se exploraron distintos caracteres que diferenciaron los genotipos, aunque el principal componente analizado fue rendimiento y el resto fueron secundarios. Por lo tanto, el análisis planteado para este capítulo priorizo como estos caracteres secundarios ayudaron a describir la variabilidad en rendimiento, y su interacción GxA. Dejando de lado la posibilidad de agrupar genotipos por caracteres secundarios.

## **CONTRASTE DE HIPÓTESIS ASOCIADAS A LOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

### **CAPÍTULO II**

- **La interacción GxA para rendimiento en sorgo es alta. Es posible identificar caracteres secundarios que explican parte de esta interacción.**

En el Capítulo II de mi tesis se determinó la presencia de una alta interacción genotipo por ambiente para rendimiento (relación  $GxA/G=3,48$ ). Las diferencias en fenología entre los genotipos explicaron gran parte de la interacción GxA debido a su influencia en el peso del grano. Las evidencias encontradas en el segundo capítulo permiten aceptar la hipótesis propuesta.

### CAPÍTULO III

- **El modelo de simulación APSIM sorgo es un modelo robusto por lo que será exitosamente validado teniendo en cuenta los coeficientes genotípicos de híbridos de diferente largo de ciclo adaptados a la región.**

El modelo de simulación APSIM simuló con precisión la fenología, biomasa y rendimiento del cultivo para genotipos y condiciones de crecimiento localmente representativos. Estas condiciones incluyeron variaciones en la disponibilidad hídrica y N disponibilidad. Los valores de RECM, D-índice y ME confirman la robustez del modelo (ver Capítulo III). Por lo que, las evidencias encontradas en el tercer capítulo permiten aceptar la hipótesis propuesta.

- **En la Rep. Argentina existen diferentes tipos de estrés hídrico que se caracterizan por variaciones en el momento, duración, magnitud y frecuencia de ocurrencia. El tipo de estrés más frecuente muestra una distribución espacial (en latitudes mayores se presentará mayor frecuencia de estrés), aunque existe una alta variación interanual. La frecuencia de estrés térmico resulta importante solamente en el Norte de la región productiva.**

Se definieron tres patrones de estrés hídrico que variaron principalmente en el momento y la intensidad del estrés, y se identificaron como: (i) un estrés pre-floración que se alivió durante llenado de granos, con una frecuencia de ocurrencia del 39%, (ii) un estrés terminal leve, con 38% de frecuencia, y (iii) un estrés en llenado de grano, que se evidenció en el 23% de los años. Tanto el estrés pre-floración como el de llenado de granos evidenciaron niveles de estrés moderado alrededor de la antesis. El estrés pre-floración presentó frecuencia crecientes de Norte a Sur, mientras que las localidades más al Norte tuvieron altas frecuencias de estrés terminal leve. Las evidencias encontradas en el tercer capítulo permiten aceptar la hipótesis propuesta.

### CAPÍTULO IV

- **Existen opciones de manejo y características del genotipo que permiten mitigar los efectos negativos de diferentes tipos de estrés sobre el rendimiento.**

Las evidencias sugieren que no hay una combinación de fecha de siembra y largo de ciclo que represente una clara ventaja dependiendo del TE. La fecha de siembra aparece como principal estrategia en todas las zonas. En ambientes con estrés terminal leve y estrés en llenado fueron favorables adelantos en la fecha de siembra. Por el contrario, para los escenarios de estrés hídrico previo a floración fue más conveniente atrasar la fecha de

siembra. Esto se observó en todos los sitios evaluadas con excepción del Sur, donde la limitada ventana de crecimiento siempre favoreció el adelanto en la fecha de siembra. Para la región central, se demostró que el largo de ciclo sería otra estrategia en las fechas normalmente usadas. El ciclo corto permite maximizar el rendimiento en ambientes con estrés leve, mientras que el ciclo largo permite mitigar al mismo en ambiente con estrés en prefloración. El ciclo intermedio muestra un comportamiento intermedio. Las evidencias encontradas en el cuarto capítulo permiten aceptar la hipótesis propuesta.

## CONCLUSIONES FINALES

- La interacción GxA para el rendimiento fue importante (relación  $GxA/G = 3,48$ ). En cambio para los demás caracteres estudiados la contribución genotípica relativa sugiere que la interacción GxA no es un impedimento importante para lograr respuesta a la selección (1,03 para la duración del llenado de grano, 0,87 para biomasa en la madurez, 0,71 para el tiempo a antesis, y menos de 0,5 para el resto de los caracteres estudiados). Este aspecto, sumado a una buena correlación con el rendimiento, permitió definir caracteres secundarios que podrían utilizarse en un proceso de selección indirecta.
- Se obtuvieron los coeficientes genotípicos del modelo APSIM para tres híbridos comerciales comunes en la región, cuya validación presentó un buen ajuste entre los datos simulados y los datos observados. La presente tesis habilita su utilización para investigaciones futuras, siendo los coeficientes una herramienta que trasciende su aplicación en este estudio.
- Se caracterizaron los patrones de estrés hídrico más típicos para la región central de Argentina, cuya principal diferencia fue el momento del estrés.
- El estrés térmico en floración mostró una frecuencia de ocurrencia intermedia en las latitudes más bajas, y no se encontró una clara asociación con los patrones de estrés hídrico.
- Los patrones de estrés hídrico descriptos ayudaron a explicar las interacciones de GxA observadas para el rendimiento, y confirmaron la importancia de la fenología o el ciclo del genotipo como estrategia para mitigar el impacto de un estrés hídrico.
- La fecha de siembra en sorgo también proporciona una estrategia de escape para reducir el impacto de los diferentes patrones de estrés hídrico.

- En el Centro y Norte de la región, en las campañas bajo estrés terminal leve y estrés en llenado fueron favorables adelantos en la fecha de siembra. Por el contrario, para los escenarios de estrés hídrico previo a floración fue más conveniente atrasar la fecha de siembra.
- En el Sur de la región fechas de siembra tempranas fueron más convenientes. Lo que indica que el mejoramiento debería ir en pos de genotipos que se adapten a dichos planteos (por ejemplo, mejor comportamiento a las bajas temperaturas para las siembras tempranas).

## BIBLIOGRAFÍA

- Abakemal, D., Shimelis, H., Derera, J., 2016. Genotype-by-environment interaction and yield stability of quality protein maize hybrids developed from tropical highland adapted inbred lines. *Euphytica* 209, 757-769.
- Anda, A., Pinter, L., 1994. Sorghum germination and development as influenced by soil temperature and water content. *Agronomy Journal* 86, 621-624.
- Assefa, Y., Staggenborg, S.A., 2010. Grain sorghum yield with hybrid advancement and changes in agronomic practices from 1957 through 2008. *Agronomy Journal* 102, 703-706.
- Bassi, F.M., Bentley, A.R., Charmet, G., Ortiz, R., Crossa, J., 2016. Breeding schemes for the implementation of genomic selection in wheat (*Triticum* spp.). *Plant Science* 242, 23-36.
- Bates, D., Maechler, M., Bolker, B., Walker, S., 2014. lme4: Linear mixed-effects models using Eigen and S4. R package version 1.1-7, <http://CRAN.R-project.org/package=lme4>.
- Baumhardt, R.L., Tolk, J.A., Winter, S.R., 2005. Seeding practices and cultivar maturity effects on simulated dryland grain sorghum yield. *Agronomy Journal* 97, 935-942.
- Begg, J. E., Turner, N. C., 1976. Crop water deficits. *Advances in Agronomy* 28, 161-217.
- Black, A.L., Power, J.F., 1965. Effect of chemical and mechanical fallow methods on moisture storage, wheat yields, and soil erodibility. *Soil Science Society of America Journal* 29, 465-468.
- Bolsa de Cereales, 2020. Panorama agrícola semanal. <http://www.bolsadecereales.org> (último acceso en Julio 2020).
- Boote, K.J., Jones, J.W., Pickering, N.B., 1996. Potential uses and limitations of crop models. *Agronomy Journal* 88, 704-716
- Brihet, J., Gayo, S., 2016. Análisis regional y adaptación de tecnologías. Departamento de Investigación y Prospectiva. Bolsa de Cereales. (último acceso en Julio 2020). [http://www.bolsadecereales.com/imagenes/retaa/2016-08/2016/Simposio\\_Sorgo\\_AIANBA\\_ReTAA\\_BC\\_24\\_08\\_16.pdf](http://www.bolsadecereales.com/imagenes/retaa/2016-08/2016/Simposio_Sorgo_AIANBA_ReTAA_BC_24_08_16.pdf)
- Brihet, J., 2017. Lanzamiento campaña gruesa 2017-2018. Departamento de Investigación y Prospectiva. Bolsa de Cereales. (último acceso en Julio 2020). [http://www.bolsadecereales.com/imagenes/retaa/2017-04/Lanzamiento\\_Gruesa\\_Bloque\\_ReTAA\\_27\\_09\\_17.pdf](http://www.bolsadecereales.com/imagenes/retaa/2017-04/Lanzamiento_Gruesa_Bloque_ReTAA_27_09_17.pdf)

- Calzada, J., Corina, S., 2018. El sorgo en épocas de crisis comercial mundial. Informativo semanal de BCR. Edición 1883. <https://www.bcr.com.ar/es/mercados/investigacion-y-desarrollo/informativo-semanal/noticias-informativo-semanal/el-sorgo-en> (último acceso en Agosto 2020).
- Cejas, E., Carcedo, A.J.P., Arisnabarreta Dupuy, S., Gambin. B.L., 2020. Impacto de la fecha de siembra en genotipo de sorgo de distinto largo de ciclo. Revista técnica maíz 2020 AAPRESID, Santa Fe, Argentina, 16-23.
- Chapman, S.C., Cooper, M., Butler, D.G., Henzell, R.G., 2000a Genotype by environment interactions affecting grain sorghum. I. Characteristics that confound interpretation of hybrid yield. *Australian Journal of Agricultural Research* 51, 197-207.
- Chapman, S.C., Cooper, M., Hammer, G.L., Butler, D.G., 2000b. Genotype by environment interactions affecting grain sorghum. II. Frequencies of different seasonal patterns of drought stress are related to location effects on hybrid yields. *Australian Journal of Agricultural Research* 51, 209-221.
- Chapman, S.C., Hammer, G.L., Butler, D.G., Cooper, M., 2000c. Genotype by environment interactions affecting grain sorghum. III. Temporal sequences and spatial patterns in the target population of environments. *Australian Journal of Agricultural Research* 51, 223-233.
- Chapman, S.C., Cooper, M., Podlich, D., Hammer, G., 2003. Evaluating plant breeding strategies by simulating gene action and dryland environment effects. *Agronomy Journal* 95, 99-113.
- Chenu, K., Cooper, M., Hammer, G.L., Mathews, K.L., Dreccer, M.F., Chapman, S.C., 2011. Environmental characterization as an aid to wheat improvement: interpreting genotype-environmental interactions by modeling water-deficit patterns in North-Eastern Australia. *Journal of Experimental Botany* 62, 1743-1755.
- Chenu, K., Deihimfard, E., Chapman, S.C., 2013. Large-scale characterization of drought pattern: a continent-wide modelling approach applied to the Australian wheatbelt – spatial and temporal trends. *New Phytologist* 198, 801-820.
- Clarke, S.J., McLean, J., George-Jaeggli, B., McLean, G., de Voil, P., Eyre, J.X., Rodriguez, D., 2019. Understanding the diversity in yield potential and stability among commercial sorghum hybrids can inform crop designs. *Field Crops Research* 230, 84-97.
- Cockerham, C.C., 1963. Estimation of genetic variances. En: *Statistical genetics and plant breeding* (WD Hanson, HF Robinson, eds.) pp. 53-94. NAS-NRC, Washington DC.

- Cooper, M., DeLacy, I.H., 1994. Relationships among analytical methods used to study genotypic variation and genotype-by-environment interaction in plant breeding multi-environment experiments. *Theoretical and Applied Genetics* 88, 561-557.
- Cooper, M., Woodruff, D.R., Eisemann, R.L., Brennan, P.S., DeLacy, I.H., 1995. A selection strategy to accommodate genotype-by-environment interaction for grain yield of wheat: managed-environments for selection among genotypes. *Theoretical and Applied Genetics* 90, 492-502.
- Cooper, M., DeLacy, I.H., Basford, K., 1996. Relationships among analytical methods used to analyse genotypic adaptation in multi-environment trials. En: 'Plant adaptation and crop improvement'. (M Cooper, GL Hammer, eds) pp. 193-224. CAB International, Wallingford, UK.
- Cooper, M., Stucker, R.E., DeLacy, I.H., Harch, B.D., 1997. Wheat breeding nurseries, target environments, and indirect selection for grain yield. *Crop Science* 37, 1168-1176.
- Cooper, M., Gho, C., Leafgren, R., Tang, T., Messina, C., 2014. Breeding drought-tolerant maize hybrids for the US corn-belt: discovery to product. *Journal of Experimental Botany* 65, 6191-6204.
- Craufurd, P. Q., Flower, D. J., Peacock, J. M., 1993. Effect of heat and drought stress on sorghum (*Sorghum bicolor*). I. Panicle development and leaf appearance. *Experimental Agriculture* 29, 61-76.
- Curti, R.N., de la Vega, A.J., Andrade, A.J., Bramardi, S.J., Bertero, H.D., 2014. Multi-environmental evaluation for grain yield and its physiological determinants of quinoa genotypes across Northwest Argentina. *Field Crops Research* 166, 46-57.
- Dalgliesh, N., Hochman, Z., Huth N., Holzworth, D., 2006. Protocol for the development of APSOIL parameter values for use in APSIM ([www.csiro.au](http://www.csiro.au), último acceso en Julio 2018).
- De Bernardi, L.A., 2019. Perfil del Sorgo. MAGyP. [https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/ss\\_mercados\\_agropecuarios/informes/perfil-de-sorgo-2019.pdf](https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/ss_mercados_agropecuarios/informes/perfil-de-sorgo-2019.pdf) (último acceso Agosto 2020).
- de Felipe, M., Gerde, J.A., Rotundo, J.L., 2016. Soybean genetic gain in maturity groups III to V in Argentina from 1980 to 2015. *Crop Science* 56, 3066-3077.
- de la Vega, A.J., Hall, A.J., 2002a. Effects of planting date, genotype and their interactions on sunflower yield: I. Determinants of oil-corrected grain yield. *Crop Science* 42, 1191-1201.
- de la Vega, A.J., Hall, A.J., 2002b. Effects of planting date, genotype and their interactions on sunflower yield: II. Components of oil yield. *Crop Science* 42, 1202-1210.

- de Mendiburu, F., 2014. *Agricolae: Statistical procedures for agricultural research*. Rpackage version 1.2–4. Disponible en: <https://cran.r-project.org/package=agricolae> (último acceso en Enero 2018).
- Debaeke, P., Aboudrare, A., 2004. Adaptation of crop management to water-limited environments. *European Journal of Agronomy*. 21, 433-446.
- DeLacy, I.H., Basford, K.E., Cooper, M., Bull, J.K., McLaren, C.G., 1996. Analysis of multi-environment trials—an historical perspective. En: *Plant adaptation and crop improvement* (M Cooper, G Hammer, eds) pp. 39-124. CABI International, Wallingford, UK.
- Dickerson, G.E., 1962. Implications of genetic-environmental interaction in animal breeding. *British Society of Animal Science*. 4, 47-63.
- Doggett, H., 1988. *Sorghum*. Second edition. Tropical agricultural series. Longman Scientific, Essex, UK.
- Donatelli, M., Hammer G.L., Vanderlip R.L., 1992. Genotype and water limitation effect on phenology, growth, and transpiration efficiency in grain sorghum. *Crop Science* 32, 781-786.
- Eisemann, R.L., Cooper, M., Woodruff, D.R., 1990. Beyond the analytical methodology—better interpretation and exploitation of genotype-by-environment interaction in breeding. En: *Genotype-by-environment interaction and plant breeding*. (MS Kang, ed) pp. 108-117. Louisiana State University, Louisiana.
- FAO, 2018. Food and agricultural organization of the united nations statistics of farming production, sorghum. Disponible en <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> (último acceso en Julio 2020)
- 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.
- Flohr, B.M., Hunt, J.R., Kirkegaard, J.A., Evans, J.R., 2017. Water and temperature stress define the optimal flowering period for wheat in south-eastern Australia. *Field Crop Research* 209, 108-119.
- 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.

- Fontanetto, H., Keller, O., Albrecht, J., Giailevra, D., Negro, C. Belotti, L., 2008. Agromercado: Aspectos de manejo y fertilización nitrogenada para el sorgo granífero. Cuadernillo clásico de sorgo N° 148.
- Fox, P.N., Rosielle, A.A., 1982. Reducing the influence of environmental main-effects on pattern analysis of plant breeding environments. *Euphytica* 31, 645-656.
- Gambin, B.L., Borrás, L., 2007. Plasticity of sorghum kernel weight to increased assimilate availability. *Field Crops Research* 100, 272-284.
- Gambin, B.L., Borrás, L., 2011. Genotypic diversity in sorghum inbred lines for grain-filling patterns and other related agronomic traits. *Crop and Pasture Science* 62, 1026-1036.
- Gambin, B.L., 2015. Explorando brechas de rendimiento de sorgo. *Revista Técnica en Siembra Directa Maíz*. AAPRESID, Santa Fe, Argentina, 83-90.
- Gambin, B.L., Pardo, P.A., Trucillo, V., 2015. Estrategias de generación de rendimiento en híbridos comerciales de sorgo. II Simposio Nacional de Sorgo. Pergamino, Buenos Aires, 1 y 2 de Agosto 2012.
- Gambin, B.L., Coyos, T., Di Mauro, G., Borrás, L., Garibaldi L.A., 2016. Exploring genotype, management, and environmental variables influencing grain yield of late-sown maize in central Argentina. *Agricultural System* 146 11-19.
- Gauch, H. G. (2006). *Statistical Analysis of Yield Trials by AMMI and GGE*. *Crop Science*, 46, 1488-1500.
- Gijsman, A.J., Jagtap, S.S., Jones, J.W., 2002. Wading through a swamp of complete confusion: How to choose a method for estimating soil water retention parameters for crop models. *European Journal of Agronomy* 18, 75-105.
- Giorda, L.M., Ortiz, D., 2011. Informe Actualización Técnica N° 19. INTA EEA. Marcos Juárez 53-65.
- Gizzi, G., Gambin, B.L., 2016. Eco-physiological changes in sorghum hybrids released in Argentina over the last 30 years. *Field Crops Research* 188, 41-49.
- Hall, A.J., Rebella, C.M., Ghera, C.M., Culot, J.P., 1992. Field-crop systems of the Pampas. En: *Ecosystems of the world: Field crop ecosystems* (CJ Pearson, ed) pp. 413-449. Elsevier, Amsterdam.
- Hammer, G.L., Carberry, P.S., Muchow, R.C., 1993. Modelling genotypic and environmental control of leaf area dynamics in grain sorghum. I. Whole plant level. *Field Crops Research* 33, 293-310.
- Hammer, G.L., Muchow, R.C., 1994. Assessing climatic risk to sorghum production in water-limited subtropical environments. I. Development and testing of a simulation model. *Field Crops Research* 36, 221-234.

- Hammer, G. L., Broad, I.J., 2003. Genotype and environment effects on dynamics of harvest index during grain filling in sorghum. *Agronomy Journal* 95, 199-206.
- Hammer, G.L., Jordan, D.R., 2007. An integrated systems approach to crop improvement. En: *Scale and complexity in plant systems research: gene–plant–crop relations* (JHJ Spiertz, PC Struik, HH van Laar, eds) pp. 45-61. Springer, Dordrecht.
- Hammer, G.L., van Oosterom, E., McLean, G., Chapman, S.C., Broad, I., Harland, P., Muchow, R.C., 2010. Adapting APSIM to model the physiology and genetics of complex adaptive traits in field crops. *Journal of Experimental Botany* 61, 2185-2202.
- Hammer, G.L., McLean, G., Chapman, S., Zheng, B., Doherty, A., Harrison, M.T., van Oosterom, E., Jordan, D., 2014. Crop design for specific adaptation in variable dryland production environments. *Crop Pasture Science* 65, 614-626.
- Hammer, G. L., McLean, G., van Oosterom, E., Chapman, S., Zheng, B., Wu, A., Doherty, A., Jordan, D., 2020. Designing crops for adaptation to the drought and high-temperature risks anticipated in future climates. *Crop Science* 60, 605-621.
- Heiniger, R.W., Vanderlip, R.L., Kofoid, K.D., 1993. Caryopsis weight patterns within the sorghum panicle. *Crop Science* 33, 543-549.
- IPCC, 2007. Intergovernmental panel on climate change fourth assessment report: Climate change 2007. World Meteorological Organization, Geneva
- Ivory, D.A., Kaewmeechai, S., DeLacy, I.H., Basford, K.E, 1991. Analysis of the environmental component of genotype × environment interaction in crop adaptation evaluation. *Field Crops Research* 28, 71-84.
- Jones, J.W., Keating, B.A., Porter, C.H., 2001. Approaches to modular model development. *Agricultural Systems*, 70, 421-443.
- Jordan, W.R., Dugas, W.A., Jr. and Shouse, P.J., 1983. Strategies for crop improvement for drought-prone regions. *Agricultural Water Management* 7, 281-299.
- Kang, M.S., 1997. Using Genotype-by-Environment Interaction for Crop Cultivar Development. En: *Advances in Agronomy* (DL Sparks, ed) pp. 199-252. Academic Press
- Keating, B.A., Carberry, P.S., Hammer, G.L., Probert, M.E., Robertson, M.J., Holzworth, D., Huth, N.I., Hargreaves, J.N.G., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verburg, K., Snow, V., Dimes J.P., Silburn, M., Wang, E., Brown, S., Bristow, K.L., Smith, C.J., 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal Agronomy* 18, 267-288.
- Kholová, J., Murugesan, T., Kaliamoorthy, S., Malayee, S., Baddam, R., Hammer, G.L., McLean, G., Deshpande, S., Hash, T., Craufurd, P.Q., Vadez V., 2014. Modelling the

- effect of plant water use traits on yield and stay-green expression in sorghum. *Functional Plant Biology* 41, 1019-1034.
- Lefkovitch, L.P., 1985. Multi-criteria clustering in genotype-environment interaction problems. *Theoretical and Applied Genetics* 70, 585-589.
- Liang, S., Ren, G., Liu, J., Zhao, X., Zhou, M., McNeil, D., Ye, G., 2015. Genotype-by-environment interaction is important for grain yield in irrigated lowland rice. *Field Crops Research* 180, 90-99.
- Lobell, D.B., Field, C.B., 2007. Global scale climate–crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environmental Research Letters* 2, 014002.
- Lobell, D.B., Hammer, G.L., Chenu, K., Zheng, B., Mclean, G., Chapman, S. C., 2015. The shifting influence of drought and heat stress for crops in northeast Australia. *Global Change Biology* 21, 4115-4127.
- Löffler, C.M., Wei, J., Fast, T., Gogerty, J., Langton, S., Bergman, M., Merrill, B., Cooper, M., 2005. Classification of maize environments using crop simulation and geographic information systems. *Crop Science* 45, 1708-1716.
- Ludlow, M.M., Muchow. R.C., 1990. A critical evaluation of traits for improving crop yields in water-limited environments. *Advances in Agronomy*. 43, 107-153.
- 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 Research* 95, 383-397.
- Maechler, M., Rousseeuw, P., Struyf, A., Hubert, M., Hornik, K., 2013. Cluster: Cluster analysis basics and extensions. R package version 1.14.4.
- Maddonni, G.A., 2012. Analysis of the climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina-a probabilistic approach. *Theoretical Applied Climatology* 107, 325-345.
- 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 Science* 48, 1560-1568.
- McCown, R.L., Hammer, G.L., Hargreaves, J.N.G., Holzworth, D., Huth, N.I., 1995. APSIM: an agricultural production system simulation model for operational research. *Mathematics and Computers in Simulation* 39, 225-231.
- Mercau, J.L., Dardanelli, J.L., Collino, D.J., Andriani, J.M., Irigoyen, A., Satorre, E.H., 2007. Predicting on-farm soybean yields in the pampas using CROPGRO-soybean. *Field Crops Research* 100, 200-209.
- Meyer, D., Zeileis, A., Hornik, K., 2017. vcd: Visualizing Categorical Data. R package version 1.4-4.

- Moghimi, N., Desai, J. S., Bheemanahalli, R., Impa, S. M., Vennapusa, A. R., Sebela, D., Perumal, R., Doherty, C.J., Jagadish S.V.K., 2019. New candidate loci and marker genes on chromosome 7 for improved chilling tolerance in sorghum. *Journal of Experimental Botany* 70, 3357-3371.
- Muchow, R.C., Carberry, P.S., 1990. Phenology and leaf area development in a tropical grain sorghum. *Field Crops Research* 23, 221-237.
- Muchow R. C., Sinclair T. R., 1994. Nitrogen Response of Leaf Photosynthesis and Canopy Radiation Use Efficiency in Field-Grown Maize and Sorghum. *Crop Science* 34, 721-727.
- Muchow, R.C., Cooper, M., Hammer, G.L., 1996. Characterizing environmental challenges using models. En: *Plant adaptation and crop improvement*. (M Cooper, GL Hammer, eds) pp. 349-364. CABI International, Wallingford, UK.
- Mueller, N.D., Gerber, J.S., Johnston, M., Ray, D.K., Ramankutty, N., Foley, J.A., 2012. Recent patterns of crop yield growth and stagnation. *Nature* 490, 254-257.
- Muir, W., Nyquist, W.E., Xu, S., 1992. Alternative partitioning of the genotype-by-environment interaction. *Theoretical and Applied Genetics* 84, 193-200.
- Mutava, R.N., Prasad, P.V.V., Tuinstra, M.R., Kofoid, K.D., Yu, J., 2011. Characterization of sorghum genotypes for traits related to drought tolerance. *Field Crops Research* 123, 10-18.
- NASA, 2017. Prediction of Worldwide Energy Resource. <http://power.larc.nasa.gov> (último acceso en Julio 2017).
- Nguyen, C.T., Singh, V., van Oosterom, E.J., Chapman, S.C., Jordan, D.R., Hammer G.L., 2013. Genetic variability in high temperature effects on seed-set in sorghum. *Functional Plant Biology* 40, 439-448.
- Pardo, P.A., Gambin, B.L., 2014. Diferencias entre híbridos de sorgo en latencia. *Revista Técnica en Siembra Directa Maíz y Sorgo AAPRESID*. 35-42.
- Parra-Londono, S., Fiedler, K., Kavka, M., Samans, B., Wieckhorst, S., Zacharias, A., Uptmoor, R., 2018. Genetic dissection of early-season cold tolerance in sorghum: genome-wide association studies for seedling emergence and survival under field and controlled environment conditions. *Theoretical and applied genetics* 131, 581-595.
- Passioura, J. B., 1983. Roots and drought resistance. *Agricultural water management* 7, 265-280.
- Passioura, J. B., 1996. Simulation models: science, snake oil, education, or engineering?. *Agronomy Journal* 88, 690-694.

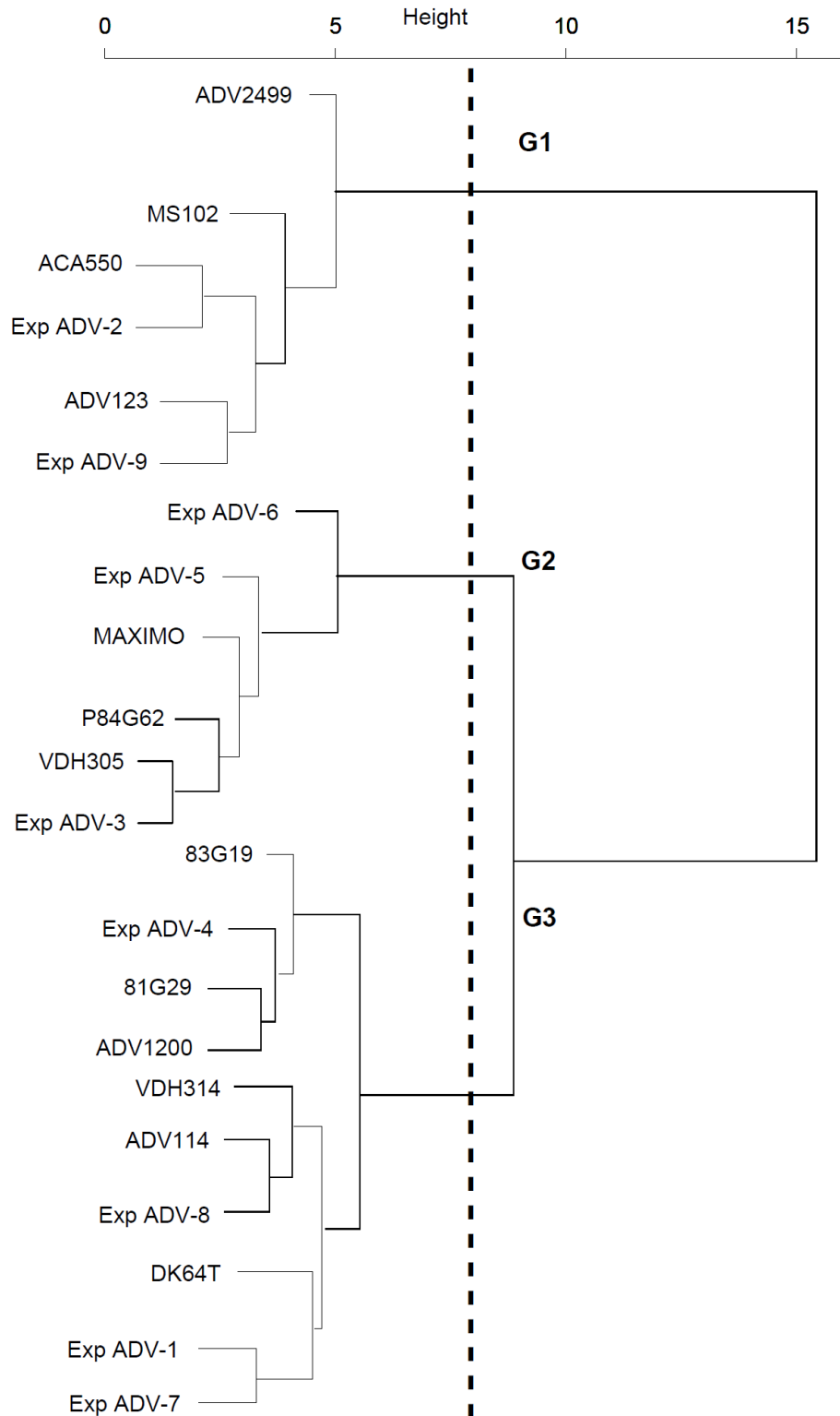
- Pepper G.E., Prine G.M., 1972. Low light intensity effects on grain sorghum at different stages of growth. *Crop Science* 12, 590-593.
- Prasad, P.V.V., Boote, K.J., Allen, L.H., 2006. Adverse high temperature effects on pollen viability, seed-set, seed yield, and harvest index of grain-sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] are more severe at elevated carbon dioxide due to higher tissue temperatures. *Agricultural and Forest Meteorology* 139, 237-251.
- Prasad, P.V.V., Pisipati, S.R., Mutava, R.N., Tuinstra, M.R., 2008. Sensitivity of grain sorghum to high temperature stress during reproductive development. *Crop Science* 48, 1911-1917.
- Prasad, P.V.V., Djanaguiraman, M., Perumal, R., Ciampitti, I.A., 2015. Impact of high temperature stress on floret fertility and individual grain weight of grain sorghum: sensitive stages and thresholds for temperature and duration. *Frontiers in Plant Science* 6, 820.
- Probert, M.E., Dimes, J.P., Keating, B.A., Dalal, R.C., Strong, W.M., 1998. APSIM's water and nitrogen modules and simulation of the dynamics of water and nitrogen in fallow systems. *Agricultural Systems* 56, 1-28.
- Qin, J., Xu, R., Li, H., Yang, C., Liu, D., Liu, Z., Zhang, L., Lu, W., Frett, T., Chen, P., Zhang, M., Qiu, L., 2015. Evaluation of productivity and stability of elite summer soybean cultivars in multi-environment trials. *Euphytica* 206, 759-77.
- R Core Team, 2018. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Rackshit, S., Ganapathy, K.N., Gomashe, S.S., Rathore, A., Ghorade, R.B., Nagesh Kumar, M.V., Ganesmurthy, K., Jain, S.K., Kamtar, M.Y., Sachan, J.S., Ambekar, S.S., Ranwa, B.R., Kanawade, D.G., Balusamy, M., Kadam, D., Sarkar, A., Tonapi, V.A., Patil, J.V., 2012. GGE biplot analysis to evaluate genotype, environment and their interactions in sorghum multi-location data. *Euphytica* 185, 465-479.
- Robinson, G.K., 1991. That BLUP is a good thing: the estimation of random effects. *Statistical Science* 6, 15-32.
- Rodríguez, D., de Voil, P., Hudson, D., Brown, J.N., Hayman, P., Marrou, H., Meinke, H., 2018. Predicting optimum crop designs using crop models and seasonal climate forecasts. *Scientific Reports* 8, 2231.
- Rötter, R.P., Appiah, M., Fichtler, E., Kersebaum, K. C., Trnka, M., Hoffmann, M. P., 2018. Linking modelling and experimentation to better capture crop impacts of agroclimatic extremes- A review. *Field Crops Research* 221, 142-156.

- Sadras V.O., Connor D.J., 1991. Physiological basis of the response of harvest index to the fraction of water transpired after anthesis: A simple model to estimate harvest index for determinate species. *Field Crops Research* 26, 227-239.
- Sadras, V.O., Lake, L., Chenu K., McMurray, L.S., Leonforte A., 2012. Water and thermal regimes for field pea in Australia and their implications for breeding. *Crop Pasture Science*. 63, 33-44.
- Saxton, K.E., Rawls, W.J., Romberger, J.S., Papendick, R.I., 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science Society of America Journal* 50, 1031-1036
- Seyoum, S., Chauhan, Y., Rachaputi, R., Fekybelu, S., Prasanna, B., 2017. Characterising production environments for maize in eastern and southern Africa using the APSIM Model. *Agricultural and Forest Meteorology* 247, 445-453.
- Shorter, R., Mungomery, R.E., 1981. Analysis of variance of data from multi-environment trials. En: *Interpretation of plant response and adaptation to agricultural environments*. (DE Byth, VE Mungomery. eds) pp. 12-26. Australian Institute of Agricultural Science, Brisbane
- Singh, V., Nguyen, C.T., van Oosterom, E.J., Chapman, S.C., Jordan, D.R., Hammer, G.L., 2015. Sorghum genotypes differ in high temperature responses for seed set. *Field Crops Research* 171, 32-40.
- Singh, V., Nguyen, C.T., Yang, Z., Chapman, S.C., van Oosterom, E.J., Hammer, G.L., 2016. Genotypic differences in effects of short episodes of high-temperature stress during reproductive development in sorghum. *Crop Science* 56, 1561-1572.
- Singh, V., Nguyen, C.T., McLean, G., Chapman, S.C., Zheng, B., van Oosterom, E.J., Hammer G.L., 2017. Quantifying high temperature risks and their potential effects on sorghum production in Australia. *Field Crops Research* 211, 77-88.
- Soil Survey Staff, 2014. *Keys to Soil Taxonomy*, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, D.C.
- Telesca, L., Pierini, J.O., Scian, B., 2012. Investigating the temporal variation of the scaling behavior in rainfall data measured in central Argentina by means of detrended fluctuation analysis. *Physica A* 391, 1553-1562.
- 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 Science* 60, 977-990.

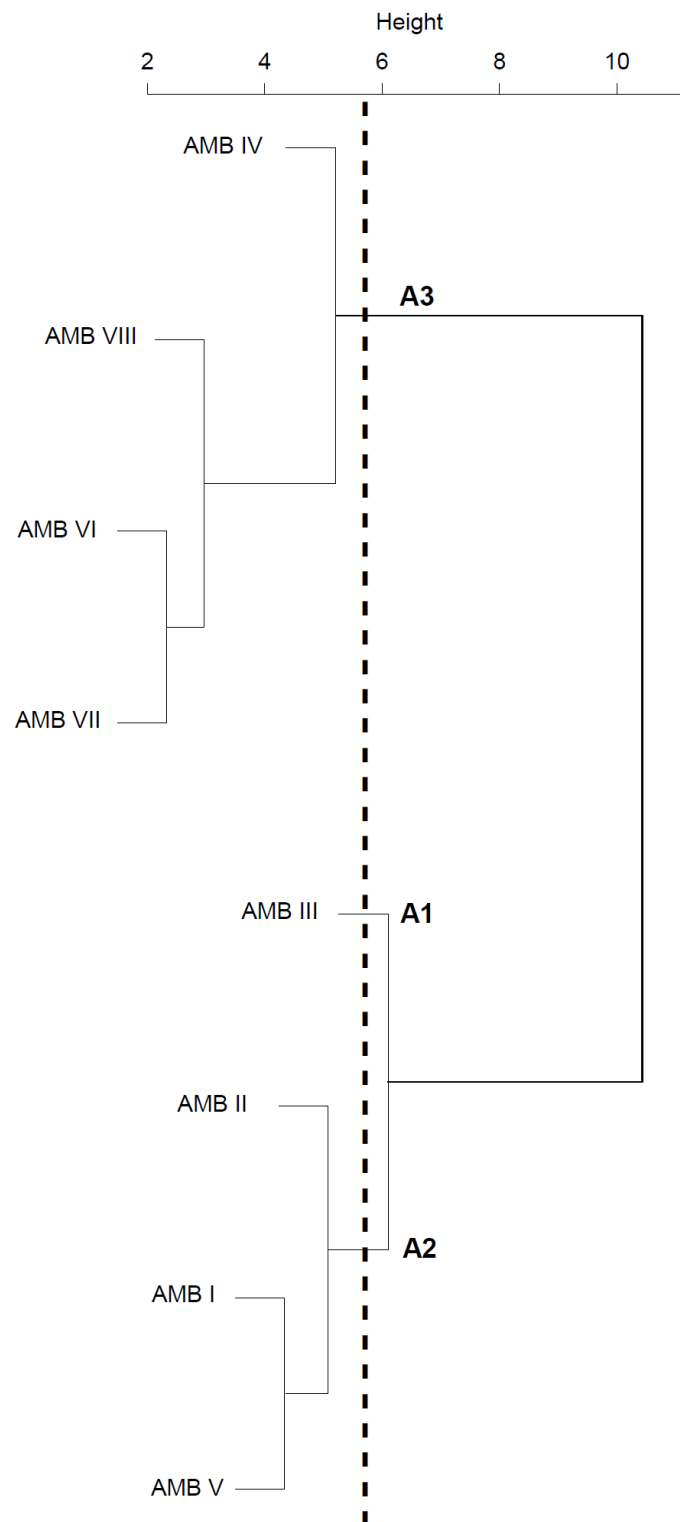
- Unger, P.W., Baumhardt, R.L., 1999. Factors related to dryland grain sorghum yield increases: 1939 through 1997. *Agronomy Journal* 91, 870-875.
- van Oosterom, E.J., Hammer, G.L., 2008. Determination of grain number in sorghum. *Field Crops Research* 108, 259-268.
- van Oosterom, E.J., Borrell, A.K., 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 Research* 115, 19-28.
- Van Wart, J., Grassini, P., Cassman, K.G., 2013. Impact of derived global weather data on simulated crop yields. *Global Change Biology* 19, 3822-3834.
- Vanderlip, R.L., Reeves, H.E., 1972. Growth stages of sorghum (*Sorghum bicolor*, (L.) Moench.). *Agronomy Journal* 64, 13-16.
- Wallach, D., 2006. Evaluating crop models. En: *Working with dynamic crop models*. (D Wallach, D Makowski, JW Jones, eds) pp. 11-49. Elsevier, Amsterdam.
- Ward, J.H., 1963. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American statistical association* 58, 236-244.
- Whitbread, A.M., Robertson, M.J., Carberry, P.S., Dimes J.P., 2010. How farming systems simulation can aid the development of more sustainable smallholder farming systems in southern Africa. *European Journal of Agronomy* 32, 51-58.
- 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. *Agronomy Journal* 103, 1242-1251.
- Williams, W.T., 1976. *Pattern analysis in agricultural science*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- Willmott, C.J., 1981. On the validation of models. *Physical Geography* 2, 184-194.
- 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. *Australian Journal of Agricultural Research*, 34, 615-626.
- Yan, W., Kang, M.S., Ma, B., Woods, S., Cornelius, P.L., 2007. GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data. *Crop Science* 47, 643-655.
- Yu, J., Tuinstra, M.R., Claassen, M.M., Gordon, W.B., Witt, M.D., 2004. Analysis of cold tolerance in sorghum under controlled environment conditions. *Field Crop Research*. 85, 21-30.
- Zavala-García, F., Bramel-Cox, P.J., Eastin, J.D., Witt, M.D., Andrews, D.J., 1992. Increasing the efficiency of crop selection for unpredictable environments. *Crop Science* 32, 51-57.

- Zobel, R.W., Wright, M.J., Gauch, H.G., 1988. Statistical analysis of a yield trial. *Agronomy Journal* 80, 388-393.
- 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.

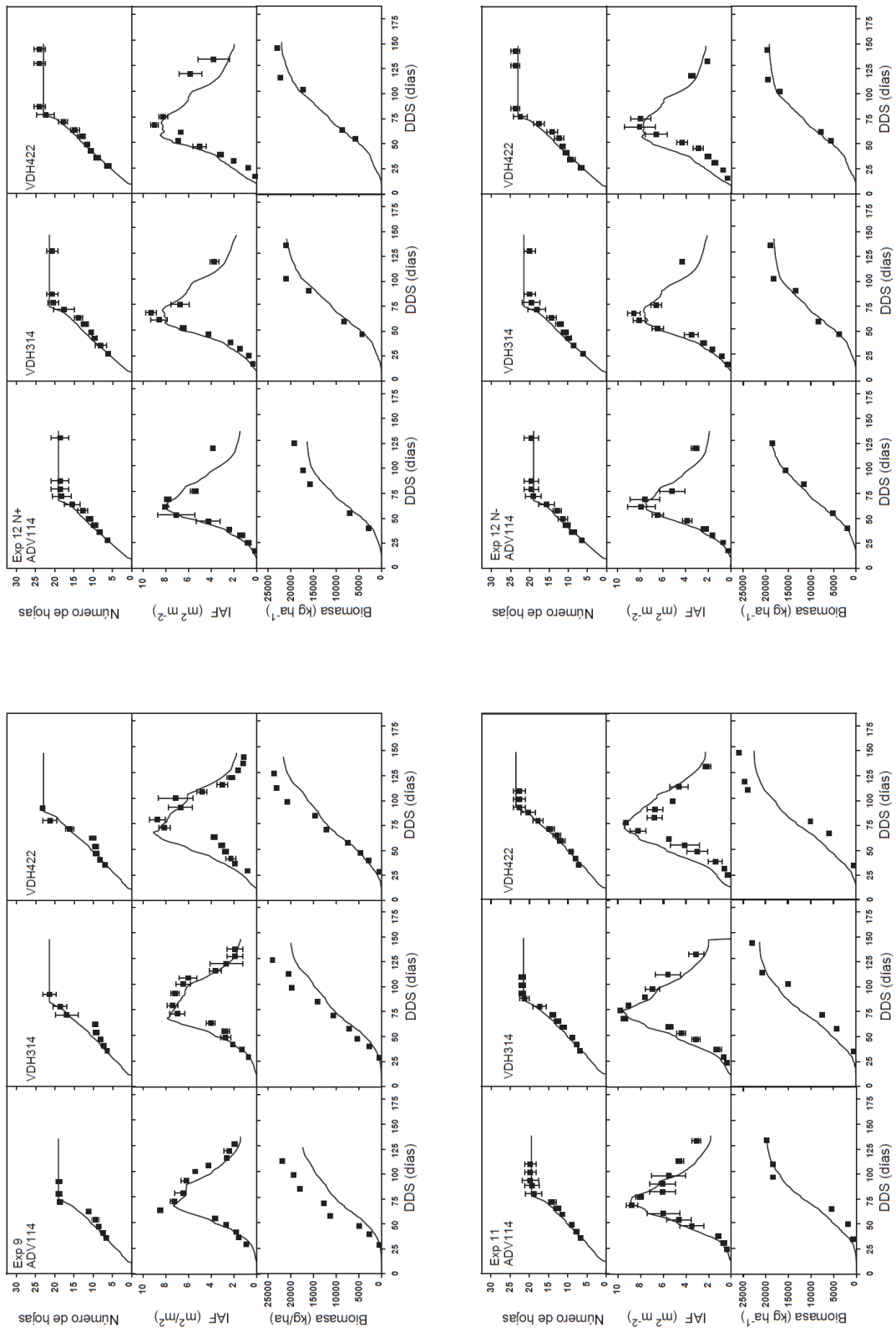
## ANEXO 1: FIGURAS SUPLEMENTARIAS



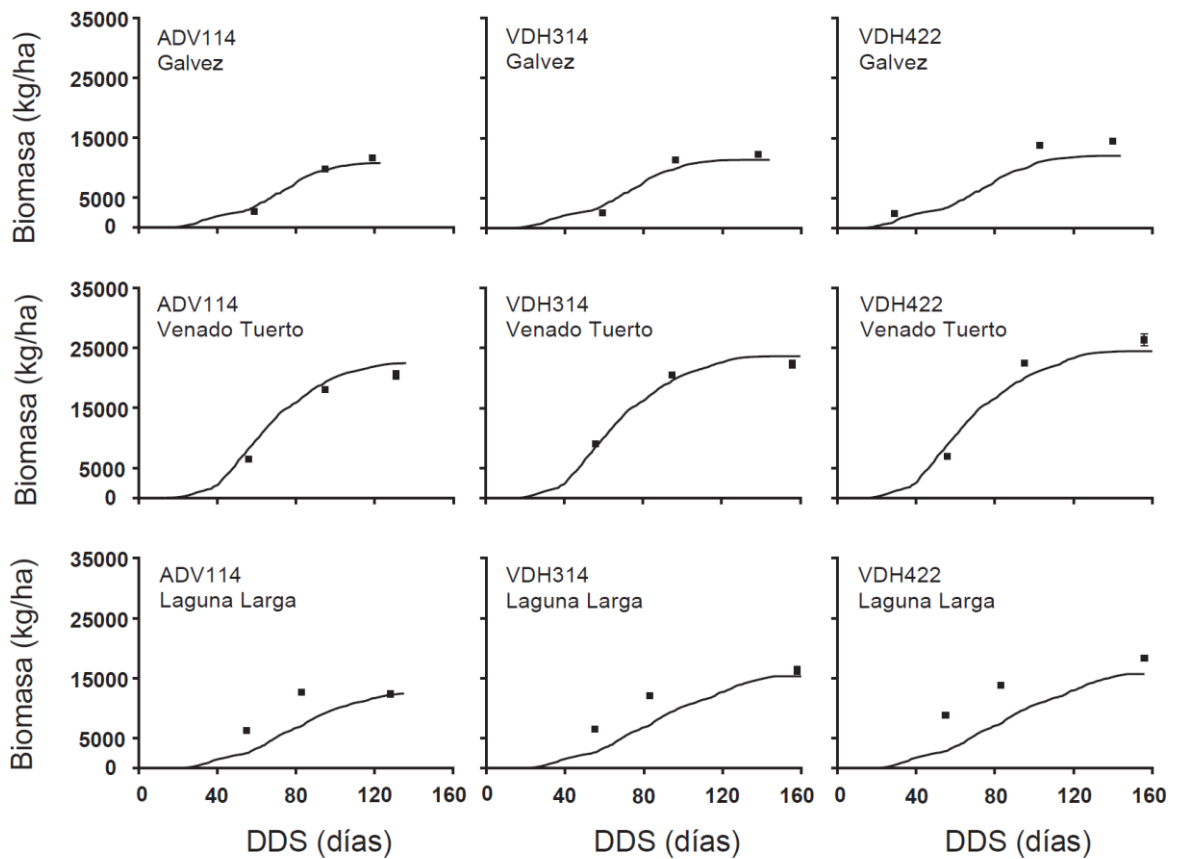
**Fig. S1.** Dendrograma de clasificación de 22 genotipos de sorgo de acuerdo a su respuesta relativa de rendimiento en ocho ambientes.



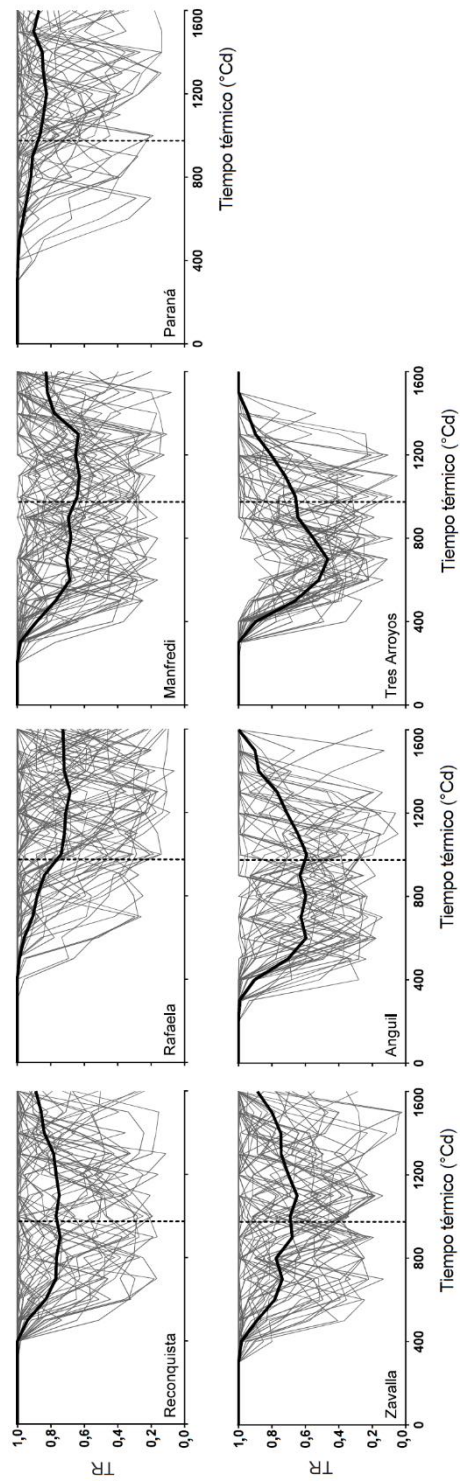
**Fig. S2.** Dendrograma de clasificación de ocho ambientes según la forma en que diferenciaron 22 genotipos de sorgo para rendimiento.



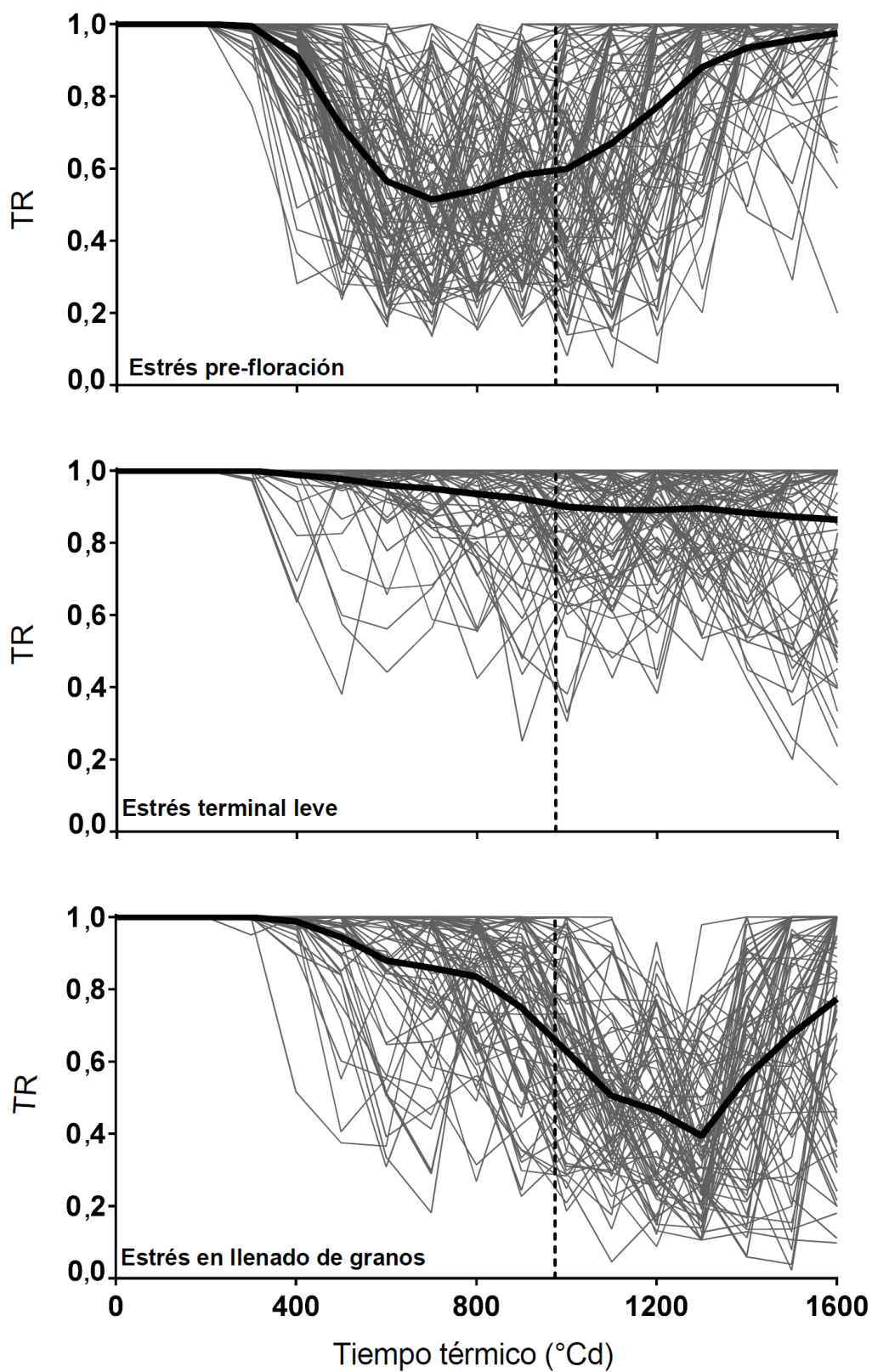
**Fig. S3.** Atributos simulados (líneas) y observados (símbolos) a través del ciclo del cultivo en días después de la siembra (DDS) para los Exp. 9, 11 y 12 (Tabla 5). Las líneas verticales indican el error estándar. Para cada genotipo los paneles muestran los atributos número de hojas, índice de área foliar (IAF) y biomasa.



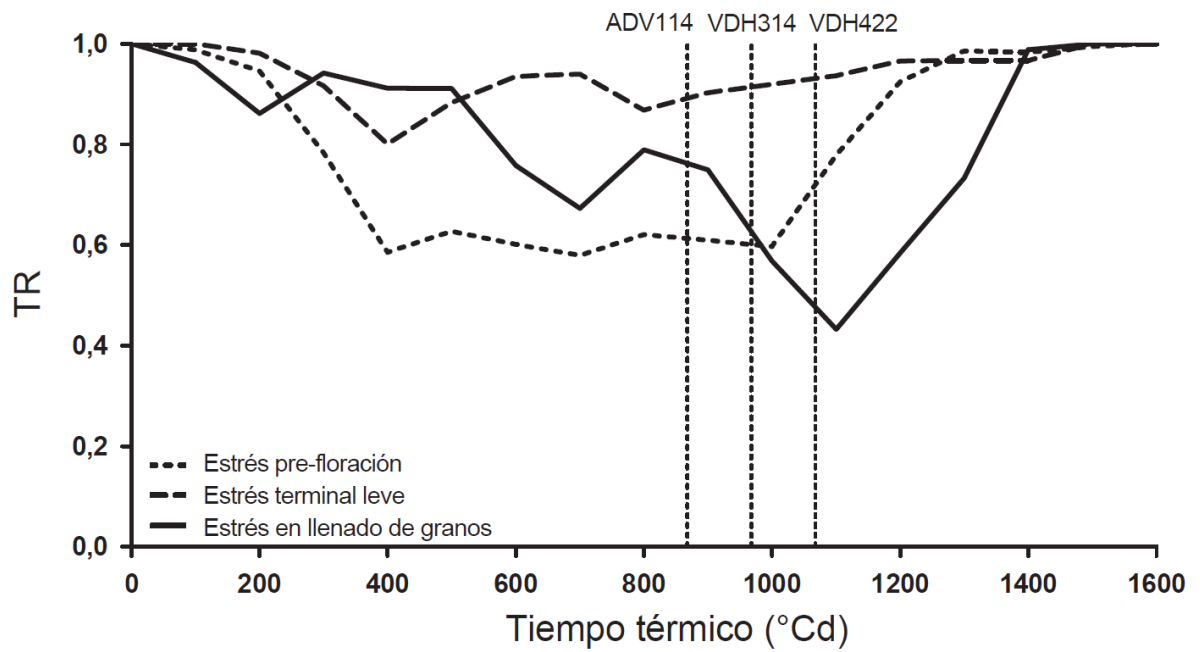
**Fig. S4.** Biomasa simulada (líneas) y observada (símbolos) a través del ciclo del cultivo en días después de la siembra (DDS) para los experimentos conducidos en Gálvez, Laguna Larga, y Venado Tuerto (Tabla 5). Las líneas verticales representan el error estándar.



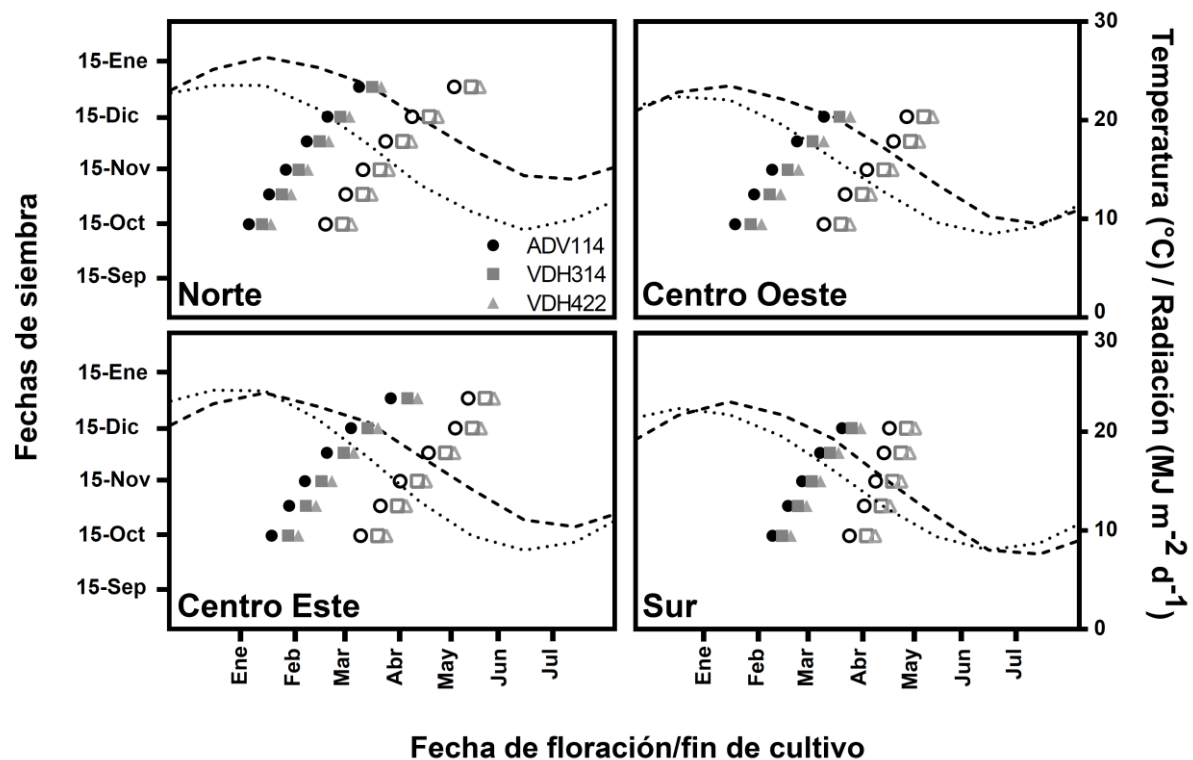
**Fig. S5.** Índice de transpiración relativa ( $TR$ ) a través del ciclo del cultivo para cada sitio. La línea punteada vertical indica la fecha media de floración y las líneas gruesas la transpiración relativa media en cada sitio.



**Fig. S6.** Índice de transpiración relativa (TR) a través del ciclo del cultivo para las campañas clasificadas en cada TE. La línea punteada vertical indica la fecha de floración y la línea gruesa la transpiración relativa media para cada TE.



**Fig. S7.** Promedio de la transpiración relativa durante el ciclo del cultivo para las campañas clasificadas en cada TE. Las líneas punteadas verticales representan el momento de floración de cada genotipo. Los experimentos están descritos en la Tabla S1.



**Fig. S8.** Fecha media de floración simulada (símbolos llenos) y madurez (símbolos vacíos) para tres genotipos de sorgo (corto: ADV114, círculo negro; intermedio: VDH314, cuadrados gris oscuro; largo: VDH422, triángulos gris claro) sembrados en 5 a 6 fechas de siembra comenzando en 15 de Octubre y cada 15 días a partir de esa fecha. Las líneas punteadas representan la radiación media y las líneas discontinuas representan la temperatura media.

## ANEXO 2: TABLAS SUPLEMENTARIAS

**Tabla S1.** Detalles de los experimentos a campos conducidos para la validación de los TE realizados en el Capítulo III, que comprende 25 ensayos, 3 genotipos de sorgo (ADV114, VDH314, VDH422) por ensayo, por un periodo de 10 años en la región central de Argentina. PF indica estrés pre-floración, TL indica estrés terminal leve, y LL indica estrés en llenado.

Exp	Sitio	Año	Fecha de siembra	Lluvias desde siembra a Abril (mm)	Densidad de siembra (pl m <sup>-2</sup> )	AUS <sup>a</sup> (mm)	Disponibilidad de N (kg ha <sup>-1</sup> )	Media de rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> )	TE
I	Zavalla	2011	Nov 1	581	20	70	27	7787	PF
II	Zavalla	2012	Nov 3	763	20	264	118	8558	PF
III	Zavalla	2012	Nov 3	763	20	264	118	7988	PF
IV	Zavalla	2013	Nov 13	451	18	264	229	10989	PF
V	Zavalla	2013	Nov 12	366	18	264	16	8894	PF
VI	Zavalla	2013	Nov 12	366	28	264	16	7909	PF
VII	Zavalla	2014	Nov 13	779	28	134	162	7501	TL
VIII	Zavalla	2014	Nov 13	779	20	134	18	7589	TL
IX	Zavalla	2014	Nov 13	779	18	134	162	7595	TL
X	Zavalla	2016	Nov 3	816	20	264	109	6931	TL
XI	Zavalla	2016	Dic 16	763	20	239	184	6025	TL
XII	Zavalla	2016	Dic 16	763	20	239	253	7768	TL
XIII	Gálvez	2007	Nov 12	622	19	287	137	7655	PF
XIV	Gálvez	2009	Nov 6	883	19	150	136	8504	TL
XV	Gálvez	2010	Nov 1	689	19	243	134	7592	TL
XVI	Gálvez	2011	Nov 4	579	19	210	103	5477	LL
XVII	Gálvez	2012	Nov 1	671	19	283	151	6800	PF
XVIII	Gálvez	2013	Nov 7	642	19	229	115	7863	TL
XIX	Gálvez	2014	Nov 10	710	19	277	113	6205	PF
XX	Gálvez	2015	Nov 6	634	19	237	115	4720	PF
XXI	Gálvez	2016	Nov 5	559	19	240	115	7758	PF
XXII	Galvez	2016	Oct 30	559	20	240	115	6486	PF
XXIII	Laguna Larga	2016	Dic 10	387	20	217	227	6526	PF
XXIV	Laguna Larga	2016	Dic 16	387	20	217	227	9201	TL
XXV	Venado Tuerto	2016	Nov 11	477	20	265	206	7728	LL

<sup>a</sup> AUS, contenido de agua útil a la siembra hasta los 200 cm de profundidad.

**Tabla. S2.** Resultados del test de bondad de ajuste ( $L^2$ ) entre TE y estrés térmico con umbrales de 33°C y 36°C, y su significancia (P value).

Sitio	Umbral de 33°C		Umbral de 36°C	
	$L^2$	P value	$L^2$	P value
Reconquista	4,76	0,093	9,89	0,071
Rafaela	10,75	0,056	9,87	0,072
Manfredi	3,86	0,145	3,79	0,150
Paraná	10,61	0,060	2,47	0,290
Zavalla	1,11	0,573	0,00	1,000
Anguil	0,04	0,982	2,39	0,303
Tres Arroyos	0,00	1,000	0,0000	1,000

**Tabla. S3.** Detalles de los experimentos de sorgo utilizados para la validación en el Capítulo IV.

Sitio	Año	Tipo de estrés	Genotipo	Fecha de siembra	Fecha de siembra
Venado tuerto	2007	Estrés pre-floración	ADV114, VDH314, VDH422	6-Dic	Intermedio
	2008	Estrés terminal leve	ADV114, VDH314, VDH422	12-Dic	Tardía
	2009	Estrés terminal leve	ADV114, VDH314, VDH422	4-Nov	Temprana
			ADV114, VDH314, VDH422	16-Nov	Intermedio
	2010	Estrés pre-floración	ADV114, VDH314, VDH422	16-Dic	Tardía
			ADV114, VDH314, VDH422	24-Nov	Intermedio
	2011	Estrés pre-floración	ADV114, VDH314, VDH422	1-Nov	Temprana
			ADV114, VDH314, VDH422	12-Dic	Tardía
	2012	Estrés en llenado de granos	ADV114, VDH314, VDH422	6-Nov	Temprana
			ADV114, VDH314, VDH422	6-Dic	Intermedio
	2013	Estrés pre-floración	ADV114, VDH314, VDH422	15-Nov	Temprana
			ADV114, VDH314, VDH422	11-Dic	Tardía
	2014	Estrés en llenado de granos	ADV114, VDH314, VDH422	6-Nov	Temprana
			ADV114, VDH314, VDH422	5-Dic	Intermedio
	2015	Estrés en llenado de granos	ADV114, VDH314, VDH422	21-Nov	Intermedio
			ADV114, VDH314, VDH422	15-Dic	Tardía
	2016	Estrés en llenado de granos	ADV114, VDH314, VDH422	11-Nov	Temprana
			ADV114, VDH314, VDH422	16-Dic	Tardía
2017	Estrés terminal leve	ADV114, VDH314, VDH422	8-Dic	Tardía	
2018	Estrés terminal leve	ADV114, VDH314, VDH422	15-Dic	Tardía	
Zavalla	2012	Estrés en llenado de granos	ADV114, VDH314, VDH422	3-Nov	Temprana
			ADV114, VDH314	13-Dic	Tardía
	2016	Estrés en llenado de granos	ADV114, VDH314, VDH422	1-Nov	Temprana
			ADV114, VDH314, VDH422	16-Dic	Tardía
2017	Estrés terminal leve	VDH314	6-Nov	Temprana	
		VDH314	27-Dic	Tardía	
Pergamino	2015	Estrés en llenado de granos	ADV114, VDH314, VDH422	17-Oct	Temprana
			ADV114, VDH314, VDH422	16-Nov	Intermedio
			ADV114, VDH314, VDH422	11-Dic	Tardía
	2016	Estrés en llenado de granos	ADV114, VDH314, VDH422	29-Oct	Temprana
			ADV114, VDH314, VDH422	17-Nov	Intermedio
			ADV114, VDH314, VDH422	20-Dic	Tardía