

**Interacción fecha de siembra por largo de ciclo en el rendimiento del cultivo de sorgo  
en la zona núcleo de Argentina**

*Tesis presentada para optar al título de Magister de la Universidad de Buenos Aires,  
Área Producción Vegetal*

**Emilia Cejas**  
Ingeniera Agrónoma  
Universidad Nacional de Rosario  
2013

Lugar de trabajo: Bayer



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano  
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires



**COMITÉ CONSEJERO**

*Director de Tesis*

***Brenda Laura Gambin***

*Ingeniera Agrónoma (Universidad de Buenos Aires)*

*Doctor (Universidad de Buenos Aires)*

*Co-director de Tesis*

***Sebastián Arisnabarreta Dupuy***

*Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)*

*Doctor (Universidad de Buenos Aires)*

*Consejero de Estudios*

***Diego Batlla***

*Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)*

*Doctor (Universidad de Buenos Aires)*

***JURADO DE TESIS***

***JURADO***

***Constanza Soledad Carrera***

*Ingeniera Agrónoma (Universidad Nacional de Córdoba)*

*Doctor (Universidad Nacional de Córdoba)*

***JURADO***

***Octavio Pedro Caviglia***

*Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de Entre Ríos)*

*Doctor (Universidad Nacional de Mar del Plata)*

***JURADO***

***Ignacio Antonio Ciampitti***

*Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)*

*Doctor (Universidad de Purdue)*

*Fecha de defensa de la tesis: 14 de junio de 2021*

## **DEDICATORIA**

A todos aquellos que me acompañaron en este proceso y me brindaron aliento y cariño para finalizar la tesis.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mi directora de tesis Gambin, B.L., co-director Arisnabarreta Dupuy, S., consejero de estudios Batlla, D., por la guía y acompañamiento durante este proceso de desarrollo personal y profesional.

A la empresa donde me desempeño Bayer, por otorgarme la posibilidad de estudiar un posgrado y proveerme los recursos para el mismo. A muchos empleados de la empresa por la asistencia en la ejecución de los ensayos a campo en la Estación Experimental de Plant Breeding en Fontezuela y por tomar mis responsabilidades laborales ante mis ausencias por cursado.

A mi familia y amigos por el apoyo incondicional.

## **DECLARACIÓN**

Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo, y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en esta u otra institución.

Ing. Agr. Emilia Cejas

## **PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA TESIS**

Presentación a congreso: Cejas, E., Arisnabarreta Dupuy, S., Gambin, B.L. 2016.

Interacción genotipo por fecha de siembra sobre el rendimiento en sorgo. XXXI Reunión Argentina de Fisiología Vegetal (RAFV, 2016). 13-16 de noviembre, Ciudad de Corrientes, Corrientes, Argentina.

Publicación en revista técnica: Cejas, E.; Carcedo, A.J.P.; Arisnabarreta Dupuy, S.; Gambin, B.L. Impacto de la fecha de siembra en genotipos de sorgo de diferente largo de ciclo. Red de Innovadores, revista técnica Aapresid 2020. 29 de julio 2020. Argentina.

## ÍNDICE GENERAL

Publicaciones derivadas de la tesis	VI
Índice general	VII
Índice de cuadros	IX
Índice de figuras	XII
Abreviaturas	XV
Resumen	XVI
Abstract	XVIII
<b>CAPÍTULO 1</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
1. Introducción	2
1.1 El sorgo en el mundo	2
1.2 Sorgo en Argentina	3
1.3 Ciclo del cultivo y determinación del rendimiento	6
1.4 Manejo del cultivo. Impacto de la fecha de siembra y el largo del ciclo del genotipo	8
1.5 Uso de modelos de simulación para asistir al manejo del cultivo. Impacto del tipo de año (fenómeno ENSO)	11
1.6 OBJETIVOS	14
1.7 HIPÓTESIS	14
<b>CAPÍTULO 2</b>	
<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b>	16
2. Materiales y Métodos	17
2.1 Experimentación a campo	17
2.1.1 Variables fenotípicas	19
2.1.2 Análisis estadístico de los experimentos a campo	20
2.2 Simulaciones	21
2.2.1 Análisis estadísticos de las simulaciones	24



<b>CAPÍTULO 3</b>	
<b>RESULTADOS</b>	26
3. Resultados	27
3.1 Experimentos a campo	27
3.1.1 Condiciones climáticas durante el ciclo del cultivo	27
3.1.2 Fenología, rendimiento y componentes numéricos	29
3.1.3 Producción de biomasa e índice de cosecha	40
3.2 Experimentos simulados	44
3.2.1 Correspondencia entre datos observados y simulados a nivel local	44
3.2.2 Fenología	44
3.2.3 Rendimiento y producción de biomasa	50
<b>CAPÍTULO 4</b>	
<b>DISCUSIÓN</b>	60
4. Discusión general	61
4.1 Contraste de las hipótesis	68
4.2 Futuras líneas de investigación	69
4.2.1. Impacto de las bajas temperaturas en etapas del cultivo	69
4.2.2. Respuesta de los genotipos comerciales al fotoperíodo	69
4.2.3. Materiales ultra-cortos como opción en fechas muy tempranas o muy tardías	70
4.2.4. Experimentos detallados bajo riego	70
4.2.5. Latencia y su interacción con la fecha de siembra	71
4.2.6. Uso de modelo APSIM como herramienta para explorar distintas opciones de manejo e interacciones genotipo x ambiente x manejo	71
<b>CAPÍTULO 5</b>	
<b>CONCLUSIONES</b>	72
5. Conclusiones	73
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	74

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 2.1:</b> Híbridos comerciales de diferente largo de ciclo (Corto, Intermedio, Largo) utilizados en los experimentos de campo.	18
<b>Cuadro 2.2:</b> Coeficientes genéticos de las relaciones que cuantifican fenología, desarrollo del canopeo, crecimiento y fijación de granos en el cultivo de sorgo para los genotipos de diferente ciclo (CC: ciclo corto; CI: ciclo intermedio; CL: ciclo largo) considerados en las simulaciones.	23
<b>Cuadro 2.3:</b> Clasificación en fases ENSO (fases cálidas: Niño; fases neutras: Neutro; fases frías: Niña) de los años históricos simulados comprendidos entre 1984 y 2018.	24
<b>Cuadro 3.1:</b> Media mensual de las temperaturas del aire (°C) durante los meses de octubre a mayo para el año 1 y año 2, y valores históricos (Oct, octubre; Nov, noviembre; Dic, diciembre; Ene, enero; Feb, febrero; Mar, marzo; Abr, abril; May, mayo).	28
<b>Cuadro 3.2:</b> Porcentaje de la suma de cuadrados de cada factor individual y sus interacciones para la duración en días y en tiempo térmico (°Cd) desde siembra (S) a antesis (A), desde antesis (A) a madurez fisiológica (MF), rendimiento por unidad de superficie, número de granos m <sup>-2</sup> y peso de 1000 granos.	30
<b>Cuadro 3.3:</b> Duración en días y en tiempo térmico (°Cd) desde siembra (S) a antesis (A), desde antesis (A) a madurez fisiológica (MF), rendimiento por unidad de superficie (kg ha <sup>-1</sup> ), número de granos m <sup>-2</sup> y peso de 1000 granos (g) para nueve genotipos de sorgo de diferente ciclo (Largo; Intermedio; Corto) sembrados en distintas fechas de siembra (Oct, octubre; Nov, noviembre; Dic, diciembre) durante dos años.	32
<b>Cuadro 3.4:</b> Porcentaje de la suma de cuadrados de cada factor individual (FS, fecha de siembra; G, genotipo) y su interacción para tasa de crecimiento del cultivo en el período crítico (TCC en PC) biomasa acumulada a madurez fisiológica (MF) e índice de cosecha.	41
<b>Cuadro 3.5:</b> Media ± error estándar de la tasa de crecimiento del cultivo en período crítico (TCC en PC) (g m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> ), biomasa a madurez fisiológica (MF) (g m <sup>-2</sup> ) e índice de cosecha para nueve genotipos de sorgo de diferente ciclo (Largo; Intermedio; Corto) sembrados en distintas fechas de siembra (Oct, octubre; Nov, noviembre; Dic, diciembre) durante el año 2.	42

- Cuadro 3.6:** Raíz del error cuadrático medio (RECM) de valores observados para cada año de experimentación versus los valores predichos para días desde siembra (S) a antesis (A), días desde antesis (A) a madurez fisiológica (MF), rendimiento por unidad de superficie ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) y biomasa a MF ( $\text{kg ha}^{-1}$ ). 44
- Cuadro 3.7:** Porcentaje de la suma de cuadrados de cada factor individual (FS, fecha de siembra; G, genotipo; TA, tipo de año) y sus interacciones para la duración en días desde siembra (S) a antesis (A) y para la duración del llenado. 46
- Cuadro 3.8:** Media y desvío estándar de la duración de siembra (S) a antesis (A) y duración del llenado de granos para las distintas fechas de siembra (1-Oct y 15-Oct, octubre; 1-Nov y 15-Nov, noviembre; 1-Dic y 15-Dic, diciembre; 1-Ene, enero) (FS), genotipos de diferente ciclo (ciclo largo, intermedio y corto) (G) y tipo de años categorizados en fases ENSO (Niño, Neutro, Niña) (TA). 48
- Cuadro 3.9:** Porcentaje de la suma de cuadrados de cada factor individual (FS, fecha de siembra; G, genotipo; TA, tipo de año) y sus interacciones para el rendimiento por unidad de superficie, la biomasa final acumulada y el índice de cosecha. 51
- Cuadro 3.10:** Media y desvío estándar de rendimiento por unidad de superficie ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), biomasa a madurez fisiológica ( $\text{g m}^{-2}$ ) e índice de cosecha para las distintas fechas de siembra (1-Oct y 15-Oct, octubre; 1-Nov y 15-Nov, noviembre; 1-Dic y 15-Dic, diciembre; 1-Ene, enero) (FS), genotipos de diferente ciclo (ciclo largo, ciclo intermedio y ciclo corto) (G) y tipo de años categorizados en fases ENSO (Niño, Neutro, Niña) (TA). 52
- Cuadro A.1:** Días de siembra a antesis (S-A), días de antesis a madurez fisiológica (A-MF), Tiempo térmico de siembra a antesis ( $^{\circ}\text{Cd}$ ) (TT S-A), tiempo térmico de antesis a madurez fisiológica ( $^{\circ}\text{Cd}$ ) (TT A-MF), rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), número de granos  $\text{m}^{-2}$  y peso de 1000 granos (g) para 9 híbridos de sorgo de diferente ciclo (Largo; Inter, intermedio; Corto) (G) sembrados en distintas fechas de siembra (Oct, octubre; Nov, noviembre; Dic, diciembre) (FS) durante dos años (año 1: 2015-16; año 2: 2016-17). 84
- Cuadro A.2:** Valores máximos (Máx), media y mínimos (Mín) de duración desde siembra a antesis (S-A) y duración del llenado para tres genotipos de sorgo de diferente ciclo (CL, ciclo largo; CI, ciclo intermedio; CC, ciclo corto) sembrados en distintas fechas de siembra (1-Oct y 15-Oct, octubre; 1-Nov y 15-Nov, noviembre; 1-Dic y 15-Dic, diciembre; 1-Ene, enero) 85

**Cuadro A.3:** Valores máximos (Máx), media y mínimos (Mín) de rendimiento por unidad de superficie ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), biomasa final acumulada ( $\text{g m}^{-2}$ ) e índice de cosecha para tres genotipos de sorgo de diferente ciclo (CL, ciclo largo; CI, ciclo intermedio; CC, ciclo corto) sembrados en distintas fechas de siembra (1-Oct y 15-Oct, octubre; 1-Nov y 15-Nov, noviembre; 1-Dic y 15-Dic, diciembre; 1-Ene, enero).

## ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.1:** Superficie y rendimiento por ha de sorgo ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) a nivel nacional en Argentina durante el período comprendido entre la década de 1960 y 2010. Fuente: FAOSTAT 2016. 4
- Figura 3.1:** Media mensual de radiación solar incidente ( $\text{Mj m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ) y precipitaciones mensuales acumuladas (mm) durante los meses de octubre a mayo para el año 1 y año 2 (Oct, octubre; Nov, noviembre; Dic, diciembre; Ene, enero; Feb, febrero; Mar, marzo; Abr, abril; May, mayo). Las líneas horizontales en el gráfico indican el ciclo del cultivo desde siembra a madurez fisiológica del ciclo más largo para las tres fechas de siembra (O, octubre; N, noviembre; D, diciembre). 27
- Figura 3.2:** Temperaturas del aire diarias ( $^{\circ}\text{C}$ ) máximas ( $T^{\circ} \text{Max}$ ) y mínimas ( $T^{\circ} \text{Mín}$ ) durante los meses de octubre a mayo para el año 1 y año 2 (Oct, octubre; Nov, noviembre; Dic, diciembre; Ene, enero; Feb, febrero; Mar, marzo; Abr, abril; May, mayo). Las líneas horizontales en el gráfico indican el ciclo del cultivo desde siembra a madurez fisiológica del ciclo más largo para las tres fechas de siembra (O, octubre; N, noviembre; D, diciembre). 29
- Figura 3.3:** Días desde siembra (S) a antesis (A) para cada genotipo y fecha de siembra (Oct, octubre; Nov, noviembre; Dic, diciembre). Los genotipos se agrupan en largos (DK64T, MS108, VDH422), intermedios (DK61T, MS109, VDH314) y cortos (DK39T, MS102, ADV114). Las barras indican el error estándar de la media. Letras distintas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) dentro de cada genotipo. 33
- Figura 3.4:** Momento del año (Ene, enero; Feb, febrero; Mar, marzo; Abr, abril; May, mayo) donde se ubicó la antesis (símbolos llenos) y madurez fisiológica (símbolos vacíos) de los genotipos de diferente ciclo (ciclo largo, triángulo; ciclo intermedio, cuadrado; ciclo corto, círculo) en las tres fechas de siembra (Oct, octubre; Nov, noviembre; Dic, diciembre) para los dos años. 35
- Figura 3.5:** Rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) para cada genotipo y fecha de siembra (Oct, octubre; Nov, noviembre; Dic, diciembre). Los genotipos se agrupan en largos (DK64T, MS108, VDH422), intermedios (DK61T, MS109, VDH314) y cortos (DK39T, MS102, ADV114). Las barras indican el error estándar de la media. Letras distintas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) dentro de cada genotipo. 37
- Figura 3.6:** Número de granos por  $\text{m}^2$  para cada genotipo y fecha de siembra (Oct, octubre; Nov, noviembre; Dic, diciembre). Los genotipos se agrupan en largos (DK64T, MS108, VDH422), intermedios (DK61T, MS109, VDH314) y 39

cortos (DK39T, MS102, ADV114). Las barras indican el error estándar de la media. Letras distintas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) dentro de cada genotipo.

**Figura 3.7:** Relación entre el rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) y la biomasa acumulada a madurez fisiológica (MF) ( $\text{g m}^{-2}$ ) (A) y el índice de cosecha (B) para el conjunto de fechas de siembra y genotipos evaluados durante el año 2. Los genotipos se identificaron como ciclo largo (triángulo), ciclo intermedio (cuadrado) y ciclo corto (círculo). 43

**Figura 3.8:** Porcentaje de años donde cada genotipo (ciclo largo; barra gris oscuro; ciclo intermedio, barra gris; ciclo corto, barra gris clara) no alcanzan un llenado de granos completo, en función de las fechas de siembra exploradas (1-Nov; 15-Nov; 1-Dic; 15-Dic; 1-Ene). 46

**Figura 3.9:** Duración en días desde siembra (S) a antesis (A) (A) y duración del llenado (B) para el genotipo de ciclo largo (triángulo), ciclo intermedio (cuadrado) y ciclo corto (círculo) en función de la fecha de siembra (1-Oct y 15-Oct, octubre; 1-Nov y 15-Nov, noviembre; 1-Dic y 15-Dic, diciembre; 1-Ene, enero). 49

**Figura 3.10:** Momento del año (Ene, enero; Feb, febrero; Mar, marzo; Abr, abril; May, mayo; Jun, junio) donde se ubicaría la antesis (símbolos llenos) y fin del llenado del grano (símbolos vacíos) de los genotipos de diferente ciclo (ciclo largo, triángulo; ciclo intermedio, cuadrado; ciclo corto, círculo) en las siete fechas de siembra exploradas (1-Oct y 15-Oct, octubre; 1-Nov y 15-Nov, noviembre; 1-Dic y 15-Dic, diciembre; 1-Ene, enero). 50

**Figura 3.11:** Frecuencia acumulada de rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) para el genotipo de ciclo largo, ciclo intermedio y ciclo corto en cada fecha de siembra (1-Oct y 15-Oct, octubre; 1-Nov y 15-Nov, noviembre; 1-Dic y 15-Dic, diciembre; 1-Ene, enero). 53

**Figura 3.12:** Rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) para el genotipo de ciclo largo (CL), intermedio (CI) y corto (CC) en cada fecha de siembra explorada (1-Oct y 15-Oct, octubre; 1-Nov y 15-Nov, noviembre; 1-Dic y 15-Dic, diciembre; 1-Ene, enero). Las barras indican el error estándar de la media. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas al  $p < 0,05$ , siendo la diferencia mínima significativa (DMS) de  $909 \text{ kg ha}^{-1}$ . 54

**Figura 3.13:** Rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) para años clasificados como Niño, Neutro y Niña en cada fecha de siembra explorada (1-Oct y 15-Oct, octubre; 1-Nov y 15-Nov, noviembre; 1-Dic y 15-Dic, diciembre; 1-Ene, enero). Las barras indican el error estándar de la media. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas al  $p < 0,05$  siendo la diferencia mínima significativa (DMS) de  $912 \text{ kg ha}^{-1}$ . 56

**Figura 3.14:** Índice de cosecha para el genotipo de ciclo largo (CL), intermedio (CI) y corto (CC) en cada fecha de siembra explorada (1-Oct y 15-Oct, octubre; 1-Nov y 15-Nov, noviembre; 1-Dic y 15-Dic, diciembre; 1-Ene, enero). Las barras indican el error estándar de la media. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas al  $p < 0,05$ , siendo la diferencia mínima significativa (DMS) de 0,035.

58

**Figura 3.15:** Relación entre el rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) y la biomasa acumulada a madurez fisiológica ( $\text{g m}^{-2}$ ) (MF) (A) y el índice de cosecha (B) para el conjunto de fechas de siembra y genotipos. Los genotipos se identificaron como ciclo largo (triángulo), ciclo intermedio (cuadrado) ciclo corto (círculo).

59

**ABREVIATURAS**

<b>FS</b>	Fecha de siembra
<b>G</b>	Genotipo
<b>S-A</b>	Siembra -Antesis
<b>A-MF</b>	Antesis - Madurez fisiológica
<b>TT</b>	Tiempo térmico
<b>TCC</b>	Tasa de crecimiento del cultivo
<b>PC</b>	Período crítico
<b>CC</b>	Ciclo corto
<b>CI</b>	Ciclo intermedio
<b>CL</b>	Ciclo largo
<b>RECM</b>	Raíz del Error Cuadrado Medio
<b>TA</b>	Tipo de año



## RESUMEN

El sorgo es el quinto cereal más importante a nivel mundial, siendo Argentina el segundo exportador. Su importancia a nivel local determina que sea crítico el estudio de aspectos básicos de manejo como es una correcta selección de combinación de fecha de siembra y largo de ciclo que permita maximizar los rendimientos en un rango de ambientes diversos. Este tipo de información es actualmente faltante en el cultivo de sorgo a nivel local. La presente tesis evaluó mediante experimentos a campo y simulaciones a través del modelo APSIM (**A**gricultural **P**roduction **S**ystems **s**IMulator), diferentes combinaciones de fecha de siembra y largo de ciclo sobre la fenología, el rendimiento y sus componentes numéricos (número de granos  $m^{-2}$  y peso de mil granos), la producción de biomasa y el índice de cosecha. Los experimentos a campo se realizaron en Fontezuela (Pergamino, Provincia de Bs As) durante dos años en secano, utilizando tres fechas de siembra contrastantes (mediados de octubre, mediados de noviembre y mediados de diciembre) y nueve genotipos comerciales de diferente largo de ciclo (largo, intermedio y corto). Las simulaciones permitieron explorar un mayor rango de fechas de siembra y condiciones ambientales, e involucraron siete fechas de siembra (desde el 1 de octubre al 1 de enero, cada 15 días), tres genotipos de diferente largo de ciclo, durante 34 años de la serie histórica local. Los años fueron clasificados de acuerdo con la fase ENSO (El Niño–Southern Oscillation) en Niño, Neutro y Niña, a fin de explorar el impacto de años con diferentes condiciones climáticas, distribución y probabilidad de precipitaciones.

El atraso en la fecha de siembra acortó el ciclo del cultivo en todos los genotipos a través de la reducción en el tiempo a antesis, mientras que aumentó el tiempo desde antesis a la madurez fisiológica. Si bien los rendimientos fueron máximos en la fecha de mediados

de noviembre y en los ciclos intermedios, se observó una interacción significativa entre la fecha de siembra y el genotipo ( $p < 0,05$ ). Los ciclos largos maximizaron el rendimiento en la fecha temprana e intermedia (octubre y noviembre), los ciclos intermedios en la fecha intermedia (noviembre) y los ciclos cortos en la fecha más tardía (diciembre). Las variaciones de rendimiento estuvieron principalmente asociadas a variaciones en el número de granos  $m^{-2}$  ( $r^2$ : 0,60;  $p < 0,001$ ). Las fechas de siembra tempranas y los ciclos largos mostraron mayor producción de biomasa a madurez fisiológica que las fechas tardías y los ciclos cortos. Siembras tempranas con genotipos de ciclo intermedio maximizaron el índice de cosecha. Las diferencias de rendimiento estuvieron principalmente asociadas con variaciones en el índice de cosecha ( $r^2$ : 0,60;  $p < 0,001$ ), y en menor medida a la biomasa ( $r^2$ : 0,26;  $p$ : 0,006). Las simulaciones confirmaron los resultados de los experimentos a campo, y mostraron además que existe un amplio rango de fechas de siembra donde es posible lograr altos rendimientos de sorgo para los diferentes ciclos explorados en la presente tesis. Estas fechas irían desde principios de octubre a mediados de noviembre. A partir de esta fecha, no sería recomendado sembrar ciclos largos. Los ciclos intermedios no deberían sembrarse después de principios de diciembre, donde sólo los ciclos cortos obtienen altos rendimientos. Finalmente, fechas de enero no serían recomendadas en esta zona. Si bien existió una tendencia hacia mayores rendimientos en fechas más tardías en años pronosticados como Niña, se observaron rendimientos similares en un importante rango de fechas de siembra (desde el 1 de octubre al 1 de diciembre) y tipos de año. La presente tesis genera información práctica de relevancia para el manejo del cultivo.

**Palabras Claves:** *Sorghum bicolor* (L.) Moench, fecha de siembra, genotipo, fase ENSO, APSIM 7.8.

## ABSTRACT

Sorghum is the fifth most important cereal worldwide, with Argentina representing the second exporter. Although its local importance determines that the study of basic aspects of management is critical, such as a correct selection of the combination of planting date and length of growth cycle that permitted to maximize yield across a wide environmental range. This type of information is currently lacking in sorghum cultivation at the local level. This thesis evaluated through field experiments and simulations through the APSIM (Agricultural Production Systems sIMulator) different planting date and length of growth cycle combinations on phenology, yield and its components (grain number per unit area and individual grain weight), biomass at maturity, and dry matter harvest index. Field trials were conducted at Fontezuela (Pergamino, Buenos Aires Province) during two growing seasons, using three contrasting planting dates (mid-October, mid-November and mid-December) and nine commercially-available sorghum hybrids with differences in growth cycle (late-, intermediate- and short- maturing). Simulations allowed to explore a wider range of planting dates and environmental conditions and involved seven planting dates (from October 1<sup>st</sup> to January 1<sup>st</sup>, every 15 days), three genotypes varying on growth cycle, during 34 years of local historical climatic series. Years were classified according to ENSO phases (El Niño-Southern Oscillation) in Niño, Neutro and Niña, in order to explore the impact of years with different climatic conditions, distribution and probability of rainfall.

Delayed planting date shortened the crop cycle in all genotypes through the reduction in time to anthesis while increased the time from anthesis to physiological maturity. While yields were maximized at the sowing date of mid-November and using intermediate cycles, an important planting date by genotype interaction was observed ( $p < 0.05$ ). Late maturity

hybrids showed maximum yield at the early and intermediate sowing date (October and November). Intermediate maturity at the intermediate sowing date (November) and short maturity at the later sowing date (December). Yield variations were mainly associated with variations in grain number  $m^{-2}$  ( $r^2$ : 0.60;  $p < 0.001$ ). Earlier planting dates and late maturity hybrids showed higher biomass at maturity than later sowing dates and short maturity hybrids. Early plantings with intermediate cycle genotypes maximized the harvest index. Yield differences were mainly related to variations in harvest index ( $r^2$ : 0.60;  $p < 0.001$ ) and to a lesser extent the biomass ( $r^2$ : 0.26;  $p$ : 0.006). Simulations confirmed field trials results and also showed that there is a wide sorghum planting dates window where it is possible to achieve high sorghum yields for the different maturity genotypes explored in this study. This window ranges from the beginning of October to mid of November. For later sowings, late maturity genotypes are not recommended. Intermediate maturity genotypes should not be planted after early December, when only short materials obtained high yields. Finally, sowing dates of January are not recommended. Although there was a trend to higher yields at later sowing dates during years predicted as la Niña, yield stability was evident for an important range of planting dates (from the beginning of October to beginning of December) and year types. This thesis generates relevant practical information for sorghum management.

**Key Words:** *Sorghum bicolor* (L.) Moench, planting date, genotype, phase ENSO, APSIM 7.8.

**CAPÍTULO 1**  
**INTRODUCCIÓN**

## **1. Introducción**

### **1.1 El sorgo en el mundo**

El sorgo es el quinto cereal más importante del mundo por el volumen de producción y la superficie cultivada. La producción a nivel mundial en el año 2017 fue de 57 millones de tn (FAOSTAT, 2019), luego de los cultivos de maíz (1134 millones de tn), trigo (773 millones de tn), arroz (769 millones de tn) y cebada (147 millones de tn). Alrededor del 90% de la superficie dedicada al cultivo de sorgo se encuentra en países en desarrollo, principalmente en zonas agroecológicas caracterizadas por la escasez de precipitaciones. Los usos del sorgo son múltiples y dependen de su genética. Su destino principal es la alimentación para ganado, aunque en algunos países el consumo humano es importante. En África se produce a través de todo el continente, pero en los países del norte como Nigeria, Sudan, Ethiopia y Burkina Faso su producción alcanza el 70% del total producido por el continente. También posee propiedades para usos industriales, como insumo para la producción de papel, adhesivos, refinamiento de minerales y elaboración de embutidos, entre otros (Taylor, 2003).

El cultivo de sorgo es un componente fundamental en las rotaciones agrícolas, mejorando el balance de carbono en el suelo, reduciendo la erosión hídrica y eólica, mejorando el drenaje y la aireación del suelo. Se destaca por su alta eficiencia fotosintética, su capacidad de generar biomasa, y su adaptabilidad a ambientes extremos (altas temperaturas, déficit hídrico, suelos salinos e inundables) (Doggett, 1988). Su tolerancia a la sequía está asociada a un sistema radical denso y profundo capaz de extraer agua en profundidad (Wright et al., 1983; Singh y Singh, 1995), su habilidad para mantener los

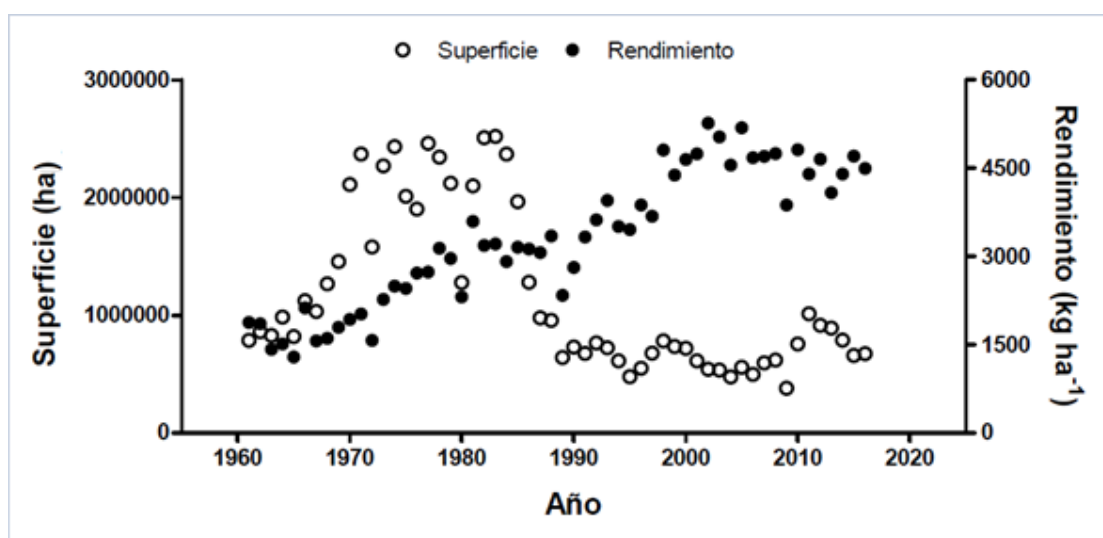
estomas abiertos a bajos niveles de potencial agua de hoja a través de ajuste osmótico (Ludlow y Muchow, 1990) y su habilidad para atrasar el desarrollo reproductivo (Wright et al., 1983).

Debido a sus características de cultivo tolerante, en diversas partes del mundo el sorgo se siembra con un nivel bajo a medio de tecnología, ya que lo que se busca es estabilidad más que potencial de rendimiento. A esto se le suma bajas ganancias genéticas reportadas, principalmente cuando se lo compara con otros cultivos (Gizzi y Gambin, 2016; Pfeiffer et al., 2019). Esto determina altas brechas de rendimiento entre el alcanzado por el productor ( $6000 \text{ kg ha}^{-1}$ ) y el potencial limitado por agua ( $8700 \text{ kg ha}^{-1}$ ) para la zona en estudio (Gambin, 2015), que en sorgo se encuentran en valores de magnitud del 50% (FAOSTAT, 2019; <http://www.yieldgap.org/>).

Se espera que la demanda mundial de alimentos aumente un 60% para 2050 (FAO, 2016). Si a esta situación se le suma la problemática del cambio climático, las limitaciones de los recursos naturales y otro tipo de demandas (biocombustibles), claramente presupone un reto importante para la agricultura a nivel mundial (Foley et al., 2011). Los productores tendrán que desempeñar un rol fundamental para lograr satisfacer las necesidades planteadas. El desafío de la agricultura para los próximos años es producir más, con los mismos recursos y de forma sustentable (Foley et al., 2011). En este contexto, el sorgo resulta interesante por sus características de cultivo resistente a adversidades y por su elevada producción de biomasa. Sin embargo, el conocimiento sobre el manejo del cultivo debe mejorar para reducir las brechas de rendimiento entre el potencial y el actualmente alcanzado.

## **1.2 Sorgo en Argentina**

La República Argentina se ubica dentro de los principales productores de sorgo, siendo el segundo exportador a nivel mundial (FAOSTAT, 2016). Históricamente y durante la década del '70, se destinaban alrededor de 2,5 millones de ha al cultivo de sorgo a nivel nacional (Figura 1.1). Esta superficie se redujo drásticamente a partir de la década de los '80, junto con la rápida adopción del cultivo de soja. Desde alrededor del año 1990 la superficie ha sido estable año tras año y ronda las 700 000 ha (FAOSTAT 2016).



**Figura 1.1.** Superficie y rendimiento por ha de sorgo (kg ha<sup>-1</sup>) a nivel nacional en Argentina durante el período comprendido entre la década de 1960 y 2010. Fuente: FAOSTAT 2016.

El rendimiento del cultivo a nivel nacional muestra una clara tendencia general de aumento al analizar registros históricos desde 1961 (FAOSTAT 2016), aunque evidencia claros períodos de estancamiento (Figura 1.1). Uno de ellos durante la década de los '80, en concordancia con el incremento del área sembrada con soja, y otro desde el 2000 hasta el 2010 con las nuevas tecnologías que siguieron favoreciendo el avance de esta oleaginosa



(Reboratti, 2010). A esto se le suma también el incremento del área del cultivo de maíz, lo que también fue promovido por tecnologías que favorecieron a este cereal (Williams et al., 1997; Dirección de Biotecnología, 2018; Flores y Parodi, 2011). En ambos períodos hubo un desplazamiento del cultivo de sorgo hacia ambientes de producción más pobres. El rendimiento por hectárea a nivel nacional tiene una tendencia a decrecer desde el año 2002, donde registró los mayores valores cercanos a los 5200 kg ha<sup>-1</sup> (FAOSTAT, 2016). Actualmente, el rendimiento promedio a nivel nacional es de 4700 kg ha<sup>-1</sup>, siendo este rendimiento similar al observado en otras áreas templadas del mundo donde se destina el cultivo para diferentes propósitos, que incluyen principalmente el consumo animal como grano o forraje (Reddy et al., 2012).

Los ambientes de producción de sorgo en Argentina cubren un área amplia de alrededor de 65 millones de ha. Esta área se ubica desde las latitudes 24 a 40°S, e involucra el área de la Llanura Pampeana hasta la Llanura Chaco Pampeana (Alvarez y Lavado, 1998). Los principales órdenes taxonómicos de suelos encontrados son Molisoles en la Llanura Pampeana, Alfisoles en el Chaco, Entisoles y Aridisoles en el oeste de ambas regiones (Soil Survey Staff, 1994). Los mismos muestran importante variación en profundidad de suelo y contenido de arcillas (Alvarez y Lavado, 1998). La temperatura promedio anual varía de 14°C en el sur a 23°C en el norte y la precipitación varía de 200 mm en el oeste a 1200 mm en el este. Esta diversidad de clima y suelo determina que los rendimientos varíen en las diferentes zonas productivas del país desde condiciones cercanas a las potenciales con más de 12000 kg ha<sup>-1</sup> en el centro de la Llanura Pampeana, a zonas de baja producción por alto niveles de estrés hídrico en menos de 3000 kg ha<sup>-1</sup> en el sur oeste de la Llanura Pampeana (<http://www.siiia.gov.ar/>).

### 1.3 Ciclo del cultivo y determinación del rendimiento

Predecir la fenología es crítico para definir el momento del año donde ocurren etapas críticas del cultivo, y para el uso de modelos que permitan explorar el impacto de diferentes estrategias de manejo y elección de genotipos (Kumar et al., 2009). El uso de escalas fenológicas en este sentido es sumamente importante. La escala de Vanderlip y Reeves (1972), establece nueve diferentes estados fenológicos del cultivo de sorgo durante su ciclo. La antesis a nivel de canopeo (50% de floración, estado 6) ocurre en pleno período crítico del cultivo, etapa donde se define el principal componente del rendimiento (i.e., número de granos  $m^{-2}$ ). El mismo tiene lugar desde aprox. 20 días previos a la antesis y hasta unos diez días posteriores a la misma (Pepper y Prine, 1972; van Oosterom y Hammer, 2008). La madurez fisiológica es otro estado importante que identifica el máximo peso seco del grano, y con ello, el rendimiento final del cultivo (Vanderlip y Reeves, 1972). El fotoperíodo y las temperaturas que experimenta el cultivo impacta sobre los días desde siembra a antesis (S-A) y desde antesis a madurez fisiológica (A-MF), respuesta que será modulada por la diferente sensibilidad a estos factores de cada genotipo. Estudios donde se evaluaron diferentes fechas de siembra y largos de ciclo han reportado rangos de 47 a 65 días (S-A) y 32 a 49 días (A-MF) (Hammer y Broad, 2003). El tiempo térmico requerido para cumplir con cada etapa varía con la fecha de siembra como así también con la precocidad intrínseca de los genotipos (Kumar et al., 2009).

El rendimiento del cultivo está determinado por sus componentes numéricos, es decir, el número de granos por unidad de superficie y el peso de grano individual. El establecimiento de éstos ocurre en distintos momentos a lo largo del ciclo del cultivo (Cárcova et al., 2003). El rendimiento en sorgo presenta una estrecha asociación con el

número de granos por unidad de superficie (Craufurd y Peacock, 1993), al igual que otros cultivos como el maíz (Cirilo y Andrade, 1994). En sorgo, el número de granos se establece tempranamente luego de la diferenciación del punto de crecimiento (Vanderlip y Revees, 1972). Sin embargo, el número final depende de la cantidad de primordios florales que sobreviven y llegan a formar granos viables durante el período crítico. De esta manera, el número de granos establecidos muestra una fuerte asociación con la tasa de crecimiento del cultivo alrededor de floración (van Oosterom y Hammer, 2008). Una vez fijado el número de granos, variaciones en el peso de grano repercuten en el rendimiento final. Este componente es el producto de la tasa de llenado de grano y de la duración del llenado (Cárcova et al., 2003). Ambos pueden ser afectados por factores genéticos, ambientales, y por su interacción (Egli, 1990). La presencia de algún tipo de estrés reduce significativamente el peso de grano final (Pepper y Prine, 1972; Jourdan et al., 2018), siendo el peso de grano altamente dependiente de los asimilados disponibles por grano durante el llenado (Gambin y Borrás, 2007).

El rendimiento también puede ser explicado a través de componentes fisiológicos, es decir, la biomasa aérea total acumulada a madurez y el índice de cosecha. Altos rendimientos en sorgo (7100 - 9400 kg ha<sup>-1</sup>) estuvieron asociados a alta producción de biomasa (14300 - 17600 kg ha<sup>-1</sup>) y altos índices de cosecha (0,47 - 0,57) (Hammer y Broad, 2003). La generación de biomasa depende de la radiación incidente diaria, la eficiencia de intercepción de la radiación por parte del canopy y la eficiencia de conversión (Cárcova et al., 2003; Cirilo y Andrade, 1994). Por su parte el índice de cosecha refleja la partición de fotoasimilados hacia los granos, el cual depende del genotipo, del ambiente y su interacción (Cárcova et al., 2003). El productor debe elegir prácticas de manejo que aseguren alta producción de biomasa y/o alto índice de cosecha.

#### **1.4 Manejo de cultivo: Impacto de la fecha de siembra y el largo de ciclo del genotipo**

En la actualidad existen líneas de investigación en el país y en diferentes regiones del mundo enfocadas en el cultivo de sorgo. Sin embargo, cuando se lo compara especialmente con otros cultivos de mayor superficie a nivel nacional como soja o maíz, existe información limitada del manejo del cultivo de sorgo. Actualmente y en la mayoría de las zonas de producción, el sorgo se produce con un nivel de tecnología de bajo a medio, principalmente en términos de fertilización, densidad y control de malezas (Brihet y Gayo, 2016). La región núcleo Sur dentro de la Región Pampeana, de interés en la presente tesis, es una de las más productivas en términos de rendimiento, donde existe un 50% de tecnología implementada, principalmente dada por un mayor uso de fertilizante (Brihet y Gayo, 2016). Es en estas regiones donde optimizar las prácticas de manejo, como son la elección de la fecha de siembra y el ciclo del cultivo a sembrar, pueden tener mayor impacto sobre el rendimiento del cultivo.

La fecha de siembra es una práctica de manejo básica en cualquier cultivo. La misma determina el ambiente fototermal (radiación y temperatura) e hídrico al cual va a estar expuesto el cultivo a lo largo del ciclo. Con esta práctica se busca reducir el riesgo de heladas, evitar temperaturas sub- o supra-óptimas que afecten negativamente etapas importantes (emergencia, floración y llenado de granos) o modifiquen desfavorablemente la longitud de las etapas de desarrollo (Otegui y López Pereira, 2003). Además, se busca alcanzar altos niveles de radiación y condiciones hídricas favorables en etapas críticas (i.e. alrededor de floración, Otegui y López Pereira, 2003). Diversos trabajos han demostrado el impacto de condiciones desfavorables como altas temperaturas (Prasad et al., 2015) o

déficit hídrico (Pepper y Prine, 1972) alrededor de floración, sobre el rendimiento del cultivo de sorgo. Por estos motivos, la elección de una correcta fecha de siembra es crítico para maximizar los rendimientos.

En sorgo, un estudio en Australia determinó variaciones de rendimiento desde 4700 a 9400 kg ha<sup>-1</sup> debido a cambios en fecha de siembra bajo riego, lo que demuestra el impacto del ambiente fototermal sobre el rendimiento (Hammer y Broad, 2003). Los rendimientos superiores fueron alcanzados con fecha de siembra de la última quincena de septiembre y primera de noviembre, que maximizaron la producción de biomasa y el índice de cosecha, lo cual fue a su vez logrado con ciclos largos (Hammer y Broad, 2003). Otro estudio que identificó cambios en las prácticas de manejo en conjunto con el avance genético determinó que la fecha de siembra media se adelantó de 1,5 a 2 semanas de 1957 a 2008 en la zona núcleo de producción de sorgo en USA (Assefa y Staggenborg, 2010), aunque este cambio no contribuyó al aumento de los rendimientos en secano. En Argentina, es importante evaluar el impacto de la fecha de siembra sobre el rendimiento de sorgo de distinto ciclo en secano.

Debido a bajas temperaturas en el suelo durante la primavera y la priorización de la siembra de otros cultivos de mayor relevancia económica (maíz y soja), la siembra del cultivo de sorgo en la zona núcleo del país, tiene lugar en una amplia ventana de siembra durante el mes de octubre y noviembre. En su mayoría se usan ciclos intermedios a largos. Estas fechas y ciclos determinarían que las probabilidades de ocurrencia de un estrés hídrico sean muy altas durante el período crítico del cultivo (aprox. 20 días previos a la antesis y comienzo del llenado) (Pepper y Prine, 1972; van Oosterom y Hammer, 2008), con la consecuente reducción en los rendimientos. No es claro qué combinación de fecha de siembra y largo de ciclo permite ubicar el período crítico con anticipación al mes de enero,

mes de mayor demanda ambiental y menor probabilidad de precipitaciones (Maddonni, 2012). Las fechas tardías (diciembre) en el cultivo de sorgo también son una opción interesante de la cual no se cuenta con información clara respecto al comportamiento de los genotipos comerciales actuales en dicho ambiente.

El mejoramiento de sorgo en Argentina, entre otros atributos, ha generado materiales con mayor permanencia del área foliar verde en post-floración (*stay-green*) y crecimiento post-floración (Gizzi y Gambin, 2016). Estos aspectos podrían determinar un mejor comportamiento de los materiales actuales a fechas más tardías. Así permitir durante el llenado de granos, una menor removilización de reservas de los tallos, logrando cañas más fortalecidas y a su vez reducir el impacto negativo de la incidencia de plagas de importancia como el barrenador del tallo (Gizzi y Gambin, 2016; Sadras et al., 2020). A diferencia del maíz donde las fechas de siembra tardía actualmente representan el 60% de la superficie del cultivo a nivel nacional (PAS, 2015), el sorgo nunca se pensó como un cultivo para fechas tardías por ser genéticamente no modificado, pero la mejora en estos atributos podría indirectamente lograr altos rendimientos en fechas tardías.

Tanto los productores como los programas de mejoramiento genético seleccionan genotipos en función del ambiente. Para lograr un éxito en la selección, es crítico tener conocimiento del ambiente de producción y de las características de los materiales a sembrar (de la Vega y Fuentes, 2003). Estudios realizados en numerosos ambientes sobre la estabilidad del rendimiento de sorgo con híbridos precoces, intermedios y tardíos, demostraron que existe una gran interacción genotipo x ambiente para rendimiento y número de grano  $m^{-2}$ . Genotipos precoces e intermedios mostraron mayor estabilidad a través de los ambientes en comparación con los híbridos tardíos (Mohammad y Francis, 1983). La interacción genotipo x ambiente, se explicó en más del 50% por el largo de ciclo

de los híbridos, reportando mayor interacción con grupos de madurez más largos (Mohammad et al., 1984). Ante condiciones de agua limitante, los ciclos cortos han mostrado mayor rendimiento, dado por la habilidad de mantener granos de mayor tamaño en ambientes de alta competencia por agua (i.e. mayor índice de cosecha) (Blum, 1970). Para maximizar el rendimiento, el entendimiento del comportamiento de los genotipos es clave.

En Argentina, existe una diversidad muy importante en largo de ciclo en sorgo. En el mercado se encuentran genotipos de ciclos cortos, intermedios y largos, variando desde 60 a 90 días a floración. La elección del híbrido a sembrar debería determinarse por el largo de ciclo y luego por el potencial de rendimiento, tipo de panoja, tolerancia al vuelco y quebrado, entre otros atributos (Carrasco et al., 2011). 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. En términos generales, los ciclos largos se recomiendan en fechas tempranas, mientras que se debería optar por ciclos más cortos a medida que se atrasa la fecha de siembra (Trucillo y Ortiz, 2012). Actualmente, hay una mayor difusión de materiales de ciclo corto o ultracorto, originalmente desarrollados para zonas de mayor latitud, que potencialmente tendrían un nicho para fechas de siembra tardías o de segunda (Gambin et al., 2013). La liberación al mercado de estos genotipos ha ampliado la ventana de siembra en sorgo. No hay un claro entendimiento de qué ciclo es ideal para diferentes fechas de siembra.

### **1.5 Uso de modelos de simulación para asistir al manejo del cultivo. Impacto del tipo de año (fenómeno ENSO)**

Los modelos de simulación agronómica 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) con una fuerte base ecofisiológica funcional (Hammer et al., 2010), lo que representa una gran ventaja en el contexto del presente proyecto. El modelo permite simular el fenotipo de un cultivo, teniendo en cuenta procesos fisiológicos, que utilizan la relación oferta – demanda de luz, carbono, agua y nitrógeno (Hammer et al., 2001).

El progreso del mejoramiento en cultivos depende de identificar combinaciones favorables de genotipos y prácticas de manejo a partir de una innumerable combinación posible de esos factores (Hammer y Jordan, 2007). La experimentación *in situ* sólo permite explorar una mínima proporción de todas las combinaciones de genotipo (G) y ambiente (A), lo que limita en gran medida este progreso. Aproximaciones *in silico* permiten superar esta limitación. La fisiología de planta 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).

El rendimiento de los cultivos en secano es altamente afectado por las variaciones interanuales en las precipitaciones. El fenómeno Niño Oscilación del Sur (ENSO) es uno de los fenómenos atmosféricos a nivel regional que influencia el clima de una localidad en particular. En el mismo se observan fases extremas: años calurosos, fríos o años sin un patrón extremo que determina cambios en el régimen de lluvias (probabilidades de



precipitación, distribución y frecuencia de las mismas) conocidos como años Niños, Niñas y Neutrales, respectivamente (Podestá et al., 1999). Los años Niños evidencian lluvias superiores a la media histórica durante los meses de noviembre a enero, mientras que en los años Niñas o Neutros estas lluvias son inferiores o iguales a la media, respectivamente.

Es conocido el impacto de este fenómeno sobre los rendimientos de diversos cultivos incluido el sorgo (Garnett y Khandekar, 1992; Podestá et al., 1999). Eventos cálidos-Niño favorecerían el rendimiento en maíz, soja y sorgo, mientras que eventos fríos-Niña lo reducirían (Hammer et al., 2001). Otro estudio ha determinado que la reducción del rendimiento en maíz y sorgo ante la presencia de eventos fríos fue más consistente que el aumento de rendimiento cuando hay eventos cálidos (Podestá et al., 1999).

La predicción de un año Niño, Neutro o Niña es de mucha utilidad para la toma de decisiones de manejo. Se han reportado mejoras en el retorno neto al productor cuando las decisiones de manejo del cultivo estuvieron alineadas con la fase de ENSO predicho (Meinke et al., 2001). Particularmente, los modelos de simulación han permitido explorar el impacto de años Niños, Neutros o Niñas sobre decisiones de manejo como la fecha de siembra en otros cultivos como maíz (Monzón et al., 2012) y maní (Woli et al., 2013). En ambos casos se han podido determinar las fechas de siembra óptimas de acuerdo con el tipo de año pronosticado, e incluso combinado con otras variables de manejo o ambiente, como el cultivo antecesor o el largo de ciclo del híbrido. En el presente proyecto se pretende explorar el impacto de la fecha de siembra y largo de ciclo en sorgo por medio de dos metodologías *in situ* (por medio de experimentación a campo) e *in silico* (por medio del uso de un modelo de simulación APSIM). Esta última, permitiría evaluar el impacto de años Niños, Neutros y Niñas sobre las estrategias de manejo. De esta manera, por medio del uso de ambas metodologías se exploraría una mayor diversidad de ambientes y estrategias de

manejo, a fin de lograr una mejor predicción de la combinación de fecha de siembra y largo de ciclo ideal de acuerdo con el ambiente de producción.

## **1.6 OBJETIVOS**

De esta manera, los objetivos del presente trabajo son,

1. Evaluar la respuesta en fenología, rendimiento y sus componentes numéricos (número y peso de grano) y fisiológicos (biomasa en madurez e índice de cosecha) de genotipos comerciales de sorgo de ciclo corto, intermedio y largo en diferentes fechas de siembra.
2. Explorar el impacto de la clasificación del tipo de año (Niño, Neutro y Niña) sobre la fenología, rendimiento, biomasa en madurez e índice de cosecha de genotipos de sorgo de diferente ciclo en diferentes fechas de siembra usando el modelo de simulación APSIM.

## **1.7 HIPÓTESIS**

Las hipótesis que se postulan en esta tesis son,

1. Los ciclos largos o intermedios maximizan el rendimiento en fechas tempranas (octubre) debido a una mayor producción de biomasa a madurez, mientras que los ciclos cortos lo hacen en fechas tardías (diciembre) dado por un mayor índice de cosecha. Las fechas de siembra de noviembre no son las óptimas para ningún largo de ciclo del cultivo.

2. En años con buena disponibilidad hídrica en etapas tempranas del cultivo o clasificados como Niño o Neutro, los máximos rendimientos se alcanzan con ciclos largos en fechas de siembra temprana (octubre), mientras que en años con disponibilidad hídrica deficiente o clasificados como Niña, los máximos rendimientos se alcanzan con ciclos cortos en fechas de siembra tardías (diciembre).

**CAPÍTULO 2**  
**MATERIALES Y MÉTODOS**

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1 Experimentación a campo

Se llevaron a cabo experimentos en la Estación Experimental de Bayer Fonzuebla (33°53'13.22"S, 60°27'13.77"O), Partido de Pergamino, Provincia de Buenos Aires, durante dos campañas consecutivas (2015/2016 y 2016/2017), que de aquí en adelante se referirán como año 1 y año 2. Los experimentos fueron sembrados en bloques completos aleatorizados con tres repeticiones. El diseño utilizado fue en parcelas divididas, donde la fecha de siembra fue la parcela principal y el genotipo la sub-parcela. Cada unidad experimental (sub-parcela) contó con cuatro hileras de 5 m de largo distanciadas a 0,52 m. Los tratamientos consistieron en 3 fechas de siembra y 9 genotipos de diferente ciclo (Cuadro 2.1). Las fechas de siembra se clasificaron como tempranas (17 y 29 octubre para el año 1 y 2, respectivamente), intermedias (17 de noviembre ambos años) y tardías (11 y 20 de diciembre para el año 1 y 2, respectivamente), considerando ventanas de siembra típicas de la zona. Los genotipos testeados fueron híbridos comerciales de sorgo de distintas compañías (Cuadro 2.1), representativos de la zona bajo estudio. Los experimentos se sembraron con una sembradora experimental de conos bajo siembra directa. La densidad objetivo fue de 200000 plantas ha<sup>-1</sup>. Para lograr esta densidad se sembró el doble de semilla y se raleó a la densidad objetivo en V3-V4 (Vanderlip y Reeves, 1972). A fin de evitar efectos confundidos de deficiencias de nutrientes, particularmente N, los experimentos se llevaron a cabo sin limitaciones de nutrientes. Para ello se buscó alcanzar una disponibilidad de nutrientes de 150 kg N ha<sup>-1</sup> (Fontanetto, 2008), considerando lo disponible en el suelo (0-60 cm) más el fertilizante. De esta manera, y posterior a un

análisis de suelo, se aplicó urea a razón de 92 y 138 kg N ha<sup>-1</sup> para el año 1 y 2, respectivamente. Los experimentos se mantuvieron libres de malezas, plagas y enfermedades durante el ciclo.

**Cuadro 2.1:** Híbridos comerciales de diferente largo de ciclo (Corto, Intermedio, Largo) utilizados en los experimentos de campo.

Ciclo	Híbrido	Empresa
Corto	ADV114	Advanta
	MS102	Dow
	DK39T	Bayer
Intermedio	VDH314	Advanta
	MS109	Dow
	DK61T	Bayer
Largo	VDH422	Advanta
	MS108	Dow
	DK64T	Bayer

Se obtuvieron los registros diarios durante el año 1 y año 2 de experimentación, de temperatura del aire máximas y mínimas (°C), precipitaciones (mm) y radiación solar incidente (Mj m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) de la estación meteorológica de la Estación Experimental Agropecuaria (EEA) INTA Pergamino (<https://siga2.inta.gov.ar/>). Las precipitaciones diarias fueron sumadas mensualmente para obtener los milímetros de lluvias acumulados en el mes (mm). Los valores diarios de radiación solar incidente (Mj m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) durante el mes fueron promediados. La temperatura, se mantuvo en datos diarios de temperatura mínima y máxima y media diaria (°C); también se calculó el promedio mensual de la temperatura media diaria (°C).

### 2.1.1 Variables fenotípicas

En cada unidad experimental se realizaron determinaciones durante el año 1 y año 2 de experimentación a campo. El número de plantas, se midió en los dos surcos centrales una semana después del raleo y a la cosecha, a fin de asegurar la densidad objetivo. Para la medición de los días a antesis y madurez fisiológica, se registró la fecha de antesis, cuando el 50% de las plantas mostraron anteras visibles y madurez fisiológica, cuando al menos 5 de cada 10 plantas consecutivas mostraron capa negra en los granos basales (van Oosterom y Hammer, 2008). La duración desde la siembra a antesis y desde antesis a madurez se consideró en días y en tiempo térmico ( $^{\circ}\text{Cd}$ ). Para los análisis de tiempo térmico se usaron los modelos descritos por Hammer et al. (1993), y se consideró una temperatura base de  $11^{\circ}\text{C}$  para la etapa vegetativa (Hammer et al., 1993) y de  $5,7^{\circ}\text{C}$  para la etapa posterior a la antesis (Heiniger et al., 1993).

El rendimiento por unidad de superficie y sus componentes numéricos fueron determinados en madurez fisiológica donde se procedió a cosechar manualmente las panojas de una superficie de  $5,2\text{ m}^2$  y de  $3,7\text{ m}^2$  de los dos surcos centrales en el año 1 y 2, respectivamente. El año 2 se cosechó una menor superficie, debido a que los cortes de biomasa (pre- y post-floración y madurez fisiológica) fueron realizados sobre los mismos surcos centrales. Las muestras fueran secadas en estufa a  $40^{\circ}\text{C}$  durante un mínimo de una semana. Luego, cada muestra fue procesada con una trilladora estática (ALMACO desgranadora MODELO 2013), a partir de la cual se determinó el peso total de los granos y su humedad mediante un humidímetro (marca Delver). Se tomó y se pesó una alícuota de 300 granos para determinar el peso de mil granos ( $\text{mg } 1000\text{ granos}^{-1}$ ). El número de granos

$\text{m}^{-2}$  se determinó mediante el cociente entre el rendimiento y el peso de grano individual. El rendimiento fue expresado en  $\text{kg ha}^{-1}$ .

La biomasa por unidad de superficie, evaluada en el año 2 de experimentación, se realizó en un área de  $0,5 \text{ m}^2$  por unidad experimental en tres momentos del ciclo del cultivo: pre- y post-floración y madurez fisiológica. El corte de pre-floración se realizó 15-20 días previos a la antesis y corresponde al inicio del período crítico del cultivo, mientras que el corte post-floración se realizó 10 días posteriores a la antesis y corresponde al fin del período crítico (van Oosterom y Hammer, 2008). Las plantas provenientes de cada corte fueron procesadas para separar biomasa vegetativa (tallos y hojas) de reproductiva (panojas), y fueron guardadas en bolsas de red para determinar su peso seco, una vez secadas en estufa durante 96 hs a  $65 \text{ }^\circ\text{C}$  (Gizzi y Gambin, 2016). A partir de estos cortes se determinó la tasa de crecimiento del cultivo durante el período crítico como el cociente entre la biomasa acumulada desde pre hasta post floración ( $\text{g m}^{-2}$ ) y el número de días entre ambos cortes (Gizzi y Gambin, 2016). Finalmente, el índice de cosecha se estimó como el cociente entre el rendimiento y la biomasa total acumulada en madurez fisiológica.

### **2.1.2 Análisis estadístico de los experimentos a campo**

Se realizó un ANOVA usando modelos lineales mediante el software *Infostat* (Di Rienzo et al., 2017). Para las variables que fueron medidas ambas campañas, se ajustó un modelo lineal donde se evaluó el efecto genotipo, fecha de siembra, el año y todas sus posibles interacciones, los cuales fueron considerados en el modelo como efectos fijos, mientras que el bloque se consideró como efecto aleatorio. Se chequearon los supuestos de normalidad a través del gráfico de Q-Q Plot normal de dispersión de los residuos obtenidos



versus los cuantiles teóricos y prueba de hipótesis de Shapiro Wilks sobre los residuos (Zuur et al., 2009). Asimismo, se chequeó el supuesto de homogeneidad de varianza por medio del gráfico de dispersión de residuos versus predichos y una prueba de Levene (Di Rienzo et al., 2017). El análisis de la varianza se realizó a partir de sumas de cuadrados. Posteriormente, las diferencias entre tratamientos fueron analizadas mediante diferencias mínimas significativas (DMS) con un  $\alpha < 0,05$ . Para las variables que fueron medidas durante una campaña (índice de cosecha, tasa de crecimiento del cultivo alrededor del período crítico y biomasa a madurez fisiológica), se ajustó un modelo similar, pero sin el efecto año. Se procedió de manera similar al modelo indicado previamente. Se utilizó análisis de regresión lineal para evaluar el grado de asociación entre variables, de esta manera se estimó el impacto de las variaciones de la biomasa acumulada a madurez fisiológica y el índice de cosecha sobre el rendimiento.

## **2.2 Simulaciones**

Se utilizó el modelo de simulación APSIM sorgo (McCown et al., 1996; Hammer et al., 2010). El mismo ha sido recientemente validado para la región central de Argentina y en base a coeficientes genotípicos de tres híbridos comerciales representativos de ciclo corto, intermedio y largo usados en el presente proyecto (ADV114 como ciclo corto, VDH314 como ciclo intermedio y VDH422 como ciclo largo) (Carcedo y Gambin, 2019).

Como primer paso al uso del modelo, se realizó una validación de éste usando los datos de los experimentos de la presente tesis. Para ello, se especificaron las condiciones iniciales de suelo, fecha de siembra, densidad, genotipo junto con información meteorológica y se contrastaron los valores simulados y los valores observados de fenología

(días a antesis y a madurez fisiológica), rendimiento por unidad de superficie y biomasa a madurez fisiológica. Para verificar la robustez del modelo se evaluó el RECM (Raíz del Error Cuadrado Medio).

El modelo de simulación fue ajustado para el ambiente de producción en el cual se llevó a cabo la experimentación a campo. La serie de suelo Pergamino (Argiudol típico, profundidad de 160 cm) provista por INTA (<https://geointa.inta.gov.ar/>) fue utilizada como base de información para ingresar las especificaciones solicitadas por el software (Protocolo de desarrollo APSOIL), que responden principalmente a los límites hídricos (superior o capacidad de campo, inferior o punto de marchitez permanente y de saturación) de la zona.

Se utilizaron datos diarios climáticos históricos (1984 a 2018) de temperatura máxima y mínima (°C) y precipitaciones (mm) de la estación meteorológica de la EEA INTA Pergamino (<https://siga2.inta.gov.ar/>). Los datos de radiación incidente diaria ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ) fue provista por la NASA (Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER) - Climatology Resource for Agroclimatology) (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>).

Para cada año, se simularon la combinación de 7 fechas de siembra (desde 1 de octubre y cada 15 días) y los 3 genotipos de diferente ciclo (ciclo largo: VDH422; ciclo intermedio: VDH314; ciclo corto: ADV114). Las fechas de siembra fueron definidas en base al período libre de heladas, y teniendo en cuenta las limitaciones en cuanto a temperatura de suelo a la siembra para este cultivo (Carrasco et al., 2011). Así, las fechas de siembra exploradas comenzaron en octubre hasta enero (fechas de siembra de octubre: 1-oct, 15-oct; fechas de siembra de noviembre: 1-nov, 15-nov; fechas de siembra de diciembre: 1-dic, 15-dic y fecha de siembra de enero: 1-ene). Los coeficientes genéticos de

cada genotipo (Cuadro 2.2) corresponden a parámetros que cuantifican fenología (tiempo térmico a iniciación de panoja ( $^{\circ}\text{Cd}$ ), tiempo térmico A-MF<sup>a</sup> ( $^{\circ}\text{Cd}$ ), desarrollo del área foliar (coeficiente de vástago principal:  $\gamma$ ; coeficiente de producción de área foliar por planta ( $^{\circ}\text{Cd}^{-1}$ ):  $\alpha$ ; coeficiente de inflexión del área foliar ( $^{\circ}\text{Cd}$ ):  $\beta$ ) y determinación del número de granos (materia seca por grano;  $\text{g grano}^{-1}$ :  $\kappa$ ) y cuyos detalles pueden encontrarse en Hammer et al. (2010).

**Cuadro 2.2:** Coeficientes genéticos de las relaciones que cuantifican fenología, desarrollo del canopeo, crecimiento y fijación de granos en el cultivo de sorgo para los genotipos de diferente ciclo (CC: ciclo corto; CI: ciclo intermedio; CL: ciclo largo) considerados en las simulaciones.

Coeficiente genético	Genotipo		
	ADV114 (CC)	VDH314 (CI)	VDH422 (CL)
Tiempo térmico a iniciación de panoja ( $^{\circ}\text{Cd}$ )	340	387	430
Tiempo térmico A-MF <sup>a</sup> ( $^{\circ}\text{Cd}$ )	795	810	799
$\gamma$ (coeficiente de vástago principal)	3,2	3,2	3,23
$\alpha$ (coeficiente de producción de área foliar por planta; $^{\circ}\text{Cd}^{-1}$ )	0,012	0,01	0,008
$\beta$ (coeficiente de inflexión del área foliar ; $^{\circ}\text{Cd}$ )	540	583	609
$\kappa$ (materia seca por grano; $\text{g grano}^{-1}$ )	0,000523	0,000604	0,00052

<sup>a</sup> A-MF significa desde antesis a madurez fisiológica.

Las condiciones iniciales y otros aspectos de manejo fueron iguales en todas las simulaciones y similares a las condiciones de los experimentos de campo. Se consideró un perfil con el 50% de agua útil disponible a la siembra. La densidad considerada fue de 18 plantas  $\text{m}^{-2}$ . Se aplicó N a una dosis de 300 kg de N  $\text{ha}^{-1}$ .

Cada uno de los años fue clasificado en Niño, Neutro o Niña siguiendo los procedimientos descritos en Podestá et al. (1999). El fenómeno ENSO se midió por medio del índice *Sea Surface Temperatures* (SST), (<https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/sst/>). Este índice mide la

fluctuación de presiones del aire ocurriendo en el Océano Pacífico y se evalúa considerando 5 anomalías consecutivas de la temperatura en la superficie del mar durante períodos de 3 meses. El estándar de medida conocido como *Oceanix Index Niño* (ONI) se utilizó para determinar cada episodio. Los episodios Niño son caracterizados por valores positivos ONI mayores o iguales a  $+0,5^{\circ}\text{C}$  (fases cálidas “*Warm*”). Los episodios Niña son caracterizados por valores negativos ONI menores o iguales a  $-0,5^{\circ}\text{C}$  (fases frías “*Cold*”). Finalmente, los episodios Neutros se caracterizan por valores entre  $-0,5^{\circ}\text{C}$  y  $+0,5^{\circ}\text{C}$ . De esta manera, de los 35 años evaluados, 11 años fueron categorizados como año Niño, 13 como Neutros y 11 como año Niña (Cuadro 2.3).

**Cuadro 2.3:** Clasificación en fases ENSO (fases cálidas: Niño; fases neutras: Neutro; fases frías: Niña) de los años históricos simulados comprendidos entre 1984 y 2018.

Fase ENSO	Años												
Niño	1986	1987	1991	1994	1997	2002	2004	2006	2009	2015	2018		
Neutro	1984	1985	1989	1990	1992	1993	1996	2001	2003	2005	2012	2013	2014
Niña	1988	1995	1998	1999	2000	2007	2008	2010	2011	2016	2017		

### 2.2.1 Análisis estadístico de las simulaciones

De manera similar a los experimentos de campo, cada variable fue analizada por ANOVA usando modelos lineales mediante el software *Infostat* (Di Rienzo et al., 2017). Se ajustó un modelo lineal donde se evaluó el efecto genotipo, fecha de siembra, el tipo de año (Niño, Neutro y Niña) y todas sus posibles interacciones, los cuales fueron considerados en el modelo como efectos fijos. Se chequearon los supuestos de normalidad a través del gráfico de Q-Q Plot normal de dispersión de los residuos obtenidos versus los cuantiles

teóricos y prueba de hipótesis de Shapiro Wilks sobre los residuos (Zuur et al., 2009). A su vez, se chequearon el supuesto de homogeneidad de varianza por medio del gráfico de dispersión de residuos versus predichos y una prueba de Levene (Di Rienzo et al., 2008). El análisis de la varianza se realizó a partir de sumas de cuadrados. Posteriormente, las diferencias entre tratamientos fueron analizadas mediante diferencias mínimas significativas (DMS) con un  $\alpha < 0,05$ . Se utilizó análisis de regresión lineal para evaluar el grado de asociación entre variables, de esta manera se estimó el impacto de las variaciones de la biomasa acumulada a madurez fisiológica y el índice de cosecha sobre el rendimiento.

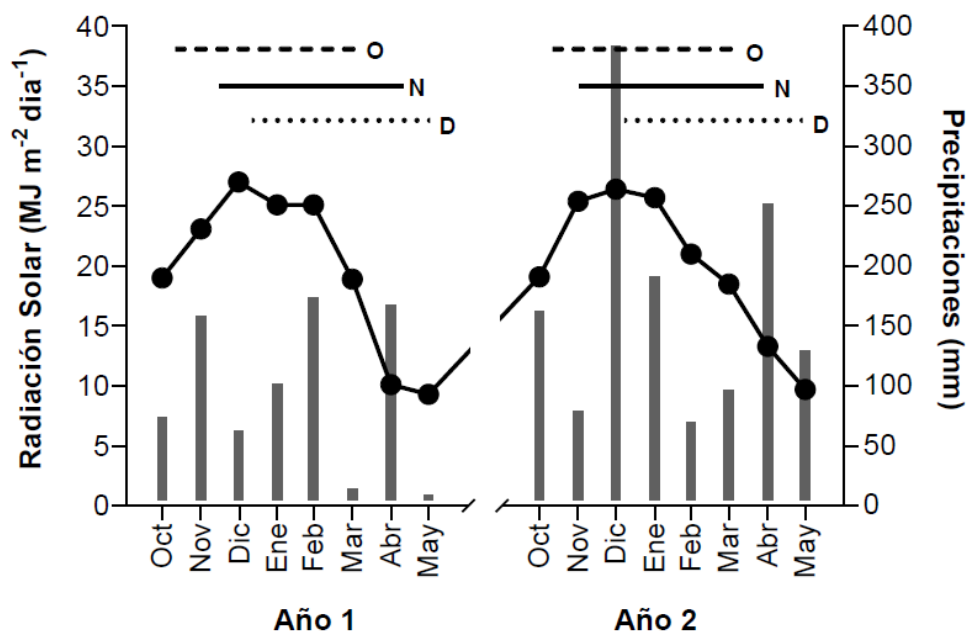
**CAPÍTULO 3**  
**RESULTADOS**

### 3. Resultados

#### 3.1 Experimentos a campo

##### 3.1.1 Condiciones climáticas durante el ciclo del cultivo

Las precipitaciones acumuladas durante el ciclo de cultivo (octubre a mayo) fueron de 798 mm y de 1279 mm en el año 1 y 2, respectivamente, mostrando además variación en su distribución (Figura 3.1). El mayor contraste entre años en términos de lluvias fue durante los meses de diciembre, enero y febrero, siendo los mm acumulados 67, 100 y 150 mm durante el año 1, y de 375, 195 y 73 mm para estos meses durante el año 2.



**Figura 3.1:** Media mensual de radiación solar incidente ( $\text{Mj m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ) y precipitaciones mensuales acumuladas (mm) durante los meses de octubre a mayo para el año 1 y año 2 (Oct, octubre; Nov, noviembre; Dic, diciembre; Ene, enero; Feb, febrero; Mar, marzo; Abr, abril; May, mayo). Las líneas horizontales en el gráfico indican el ciclo del cultivo desde siembra a madurez fisiológica del ciclo más largo para las tres fechas de siembra (O, octubre; N, noviembre; D, diciembre).

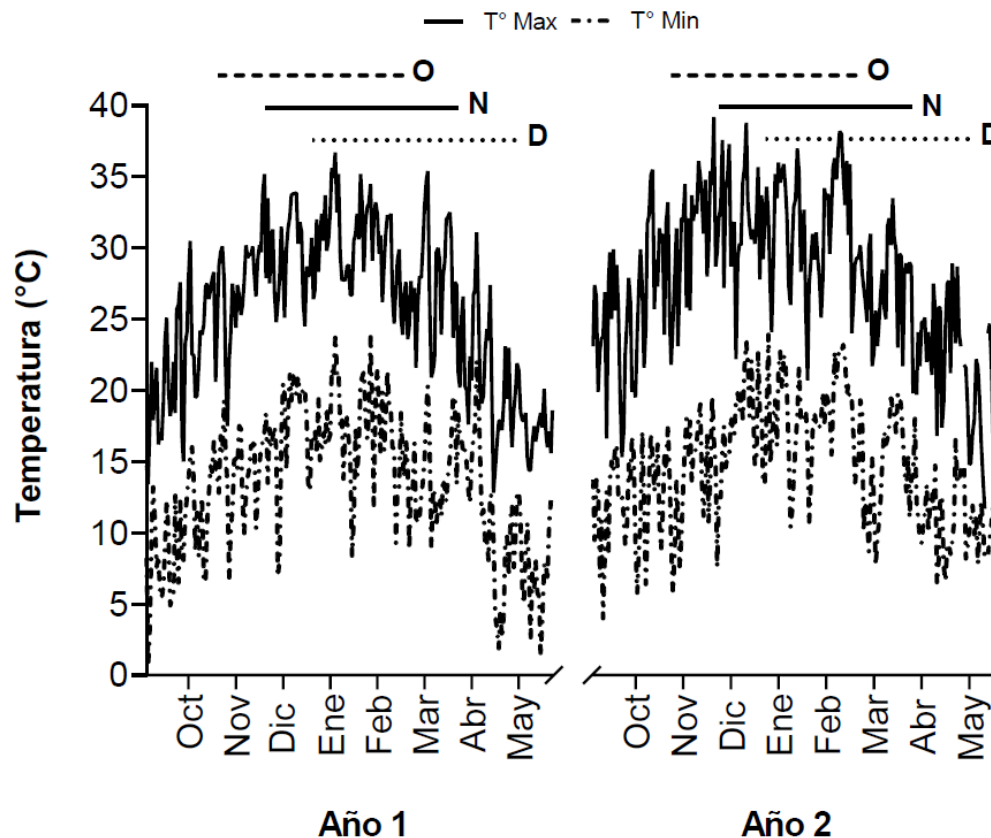
La marcha de la media mensual de radiación solar incidente fue similar entre años, siendo máxima en diciembre (Figura 3.1). La diferencia notable entre años se registró para el mes de febrero, mostrando valores comparables al máximo registrado durante el mes de diciembre en el año 1 y de menor magnitud durante el año 2 (Figura 3.1).

Las temperaturas medias durante los meses de cultivo fueron superiores a la media histórica para esta zona durante ambos años (Cuadro 3.1), particularmente para los meses de diciembre, enero y febrero. Las diferencias fueron más marcadas durante el año 2. La mayor temperatura media también fue evidente durante los meses de octubre y noviembre en el año 2, aunque las diferencias respecto a la histórica fueron menores. Estas diferencias se deben principalmente al aumento de las temperaturas máximas, llegando a superar los 35°C en 25 días durante el año 2 (Figura 3.2).

**Cuadro 3.1:** Media mensual de las temperaturas del aire (°C) durante los meses de octubre a mayo para el año 1 y año 2, y valores históricos (Oct, octubre; Nov, noviembre; Dic, diciembre; Ene, enero; Feb, febrero; Mar, marzo; Abr, abril; May, mayo).

Años	Temperatura media (°C)							
	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May
Año 1	15,1	19,3	23,2	24,0	23,8	20,7	17,3	13,1
Año 2	18,0	21,0	24,4	25,1	25,1	21,6	18,0	14,9
Histórico	14,7	18,8	20,5	22,2	22,4	20,7	18,7	14,4





**Figura 3.2:** Temperaturas del aire diarias (°C) máximas (T° Max) y mínimas (T° Mín) durante los meses de octubre a mayo para el año 1 y año 2 (Oct, octubre; Nov, noviembre; Dic, diciembre; Ene, enero; Feb, febrero; Mar, marzo; Abr, abril; May, mayo). Las líneas horizontales en el gráfico indican el ciclo del cultivo desde siembra a madurez fisiológica del ciclo más largo para las tres fechas de siembra (O, octubre; N, noviembre; D, diciembre).

### 3.1.2 Fenología, rendimiento y componentes numéricos

La fecha de siembra, el genotipo y su interacción explicaron la mayor proporción de la variación de la mayoría de las variables analizadas (Cuadro 3.2). Estos tres efectos en conjunto explicaron más del 60% de la variación en fenología, el 55% de la variación en rendimiento y número de granos  $m^{-2}$ , y más del 80% de la variación en el peso de mil granos.

El efecto año fue de considerable magnitud para la duración de las etapas de siembra a antesis y de antesis a madurez, explicando hasta el 50% de la variación. El año también explicó hasta un 9% de la variación en los rendimientos. La interacción fecha de siembra x año también fue de magnitud para días a antesis y para el número de granos m<sup>-2</sup>, explicando en ambos casos el 9% y 6% de la variación respectivamente. El resto de los efectos explicaron una menor proporción de la variación (<10%) (Cuadro 3.2).

**Cuadro 3.2:** Porcentaje de la suma de cuadrados de cada factor individual y sus interacciones para la duración en días y en tiempo térmico (°Cd) desde siembra (S) a antesis (A), desde antesis (A) a madurez fisiológica (MF), rendimiento por unidad de superficie, número de granos m<sup>-2</sup> y peso de 1000 granos.

Factor	Duración S-A (%)		Duración A-MF (%)		Rendimiento (%)	Número de granos m <sup>-2</sup> (%)	Peso de 1000 granos (%)
	Días	°Cd	Días	°Cd			
Fecha de siembra (FS)	45	2	25	16	12	7	1
Genotipo (G)	37	42	5	20	27	40	80
Año	4	50	32	27	9	7	0
FS*G	2	1	12	11	14	12	2 <sup>NS</sup>
FS*Año	9	1<	5	5	8	6	<1
G*Año	<1	1	3	1 <sup>NS</sup>	7	7	<1 <sup>NS</sup>
FS*G*Año	1	<1	10	6	7	6	3 <sup>NS</sup>
Error	1	2	8	14	16	15	12

NS: no significativo. El resto de los factores fueron significativos (p<0,05).

De los resultados del análisis de varianza se desprende que las interacciones de los tratamientos con el año en general fueron de baja magnitud, y es por este motivo que los resultados se concentran principalmente en los efectos de fecha de siembra, genotipo y su interacción a través de ambos años. Los datos de cada año individual se detallan en el Anexo (Cuadro A.1). El efecto año, de magnitud para algunas variables, se trata con mayor profundidad en la descripción de cada variable puntal.

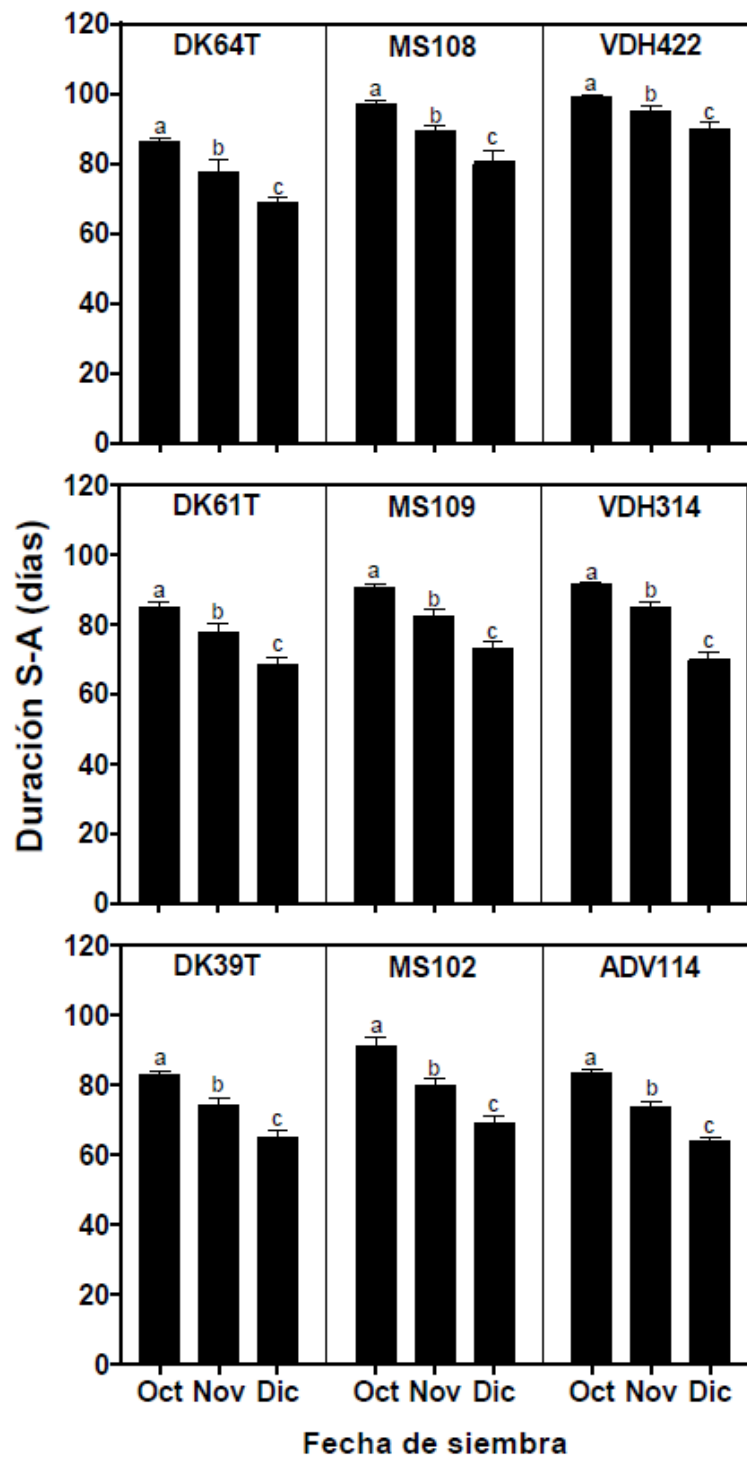
Los días a antesis variaron de 64 a 99 días (promedio de ambos años; Cuadro 3.3), siendo la fecha de siembra y el genotipo las principales causas de estas diferencias (Cuadro 3.2). El atraso de la fecha de siembra de octubre a diciembre produjo una reducción de alrededor de 18 días en los días a antesis, siendo esta reducción similar en todos los genotipos (Figura 3.3). En promedio de las tres fechas de siembra, los ciclos cortos, intermedios y largos mostraron una duración a antesis de 76, 80 y 87 días, respectivamente (Cuadro 3.3).

La fecha de siembra prácticamente no tuvo impacto en la duración en tiempo térmico a antesis en ninguno de los genotipos (2%; Cuadro 3.2). Sólo un material corto (MS102) y uno largo (VDH422) mostraron cambios significativos en la duración en °Cd con el atraso en la fecha de siembra, siendo la duración menor y mayor para el genotipo corto y largo, respectivamente (Cuadro 3.3). Las diferencias, sin embargo, fueron de escasa magnitud (75°Cd y 34°Cd). La duración en tiempo térmico a antesis varió con el genotipo (42%; Cuadro 3.2). Siendo en promedio de 923°Cd para los ciclos cortos, 979°Cd para los intermedios y 1065°Cd para los largos (Cuadro 3.3). Finalmente, el año mostró un efecto importante en la duración de esta etapa, siendo en promedio unos 180°Cd superiores en el año 2 respecto al año 1 (Cuadro A.1 del Anexo).

**Cuadro 3.3:** Duración en días y en tiempo térmico ( $^{\circ}\text{Cd}$ ) desde siembra (S) a antesis (A), desde antesis (A) a madurez fisiológica (MF), rendimiento por unidad de superficie ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), número de granos  $\text{m}^{-2}$  y peso de 1000 granos (g) para nueve genotipos de sorgo de diferente ciclo (Largo; Intermedio; Corto) sembrados en distintas fechas de siembra (Oct, octubre; Nov, noviembre; Dic, diciembre) durante dos años.

Genotipo	Ciclo	Fecha de siembra	Duración S-A		Duración A-MF		Rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ )	Número de granos $\text{m}^{-2}$	Peso de 1000 granos (g)
			Días	$^{\circ}\text{Cd}$	Días	$^{\circ}\text{Cd}$			
DK64T	Largo	Oct	87	950	34	462	5793	22917	25,5
		Nov	78	959	38	474	6317	24388	25,9
		Dic	69	934	48	461	2950	11868	25,0
MS108	Largo	Oct	97	1095	37	481	5732	19330	29,7
		Nov	90	1111	31	367	6249	21621	28,9
		Dic	81	1061	42	372	2075	8051	25,5
VDH422	Largo	Oct	99	1122	34	441	5635	24132	23,7
		Nov	95	1194	32	298	4387	17533	25,6
		Dic	90	1156	36	317	2497	9914	25,2
DK61T	Intermedio	Oct	85	918	37	512	6781	31493	21,7
		Nov	78	959	34	440	8654	44247	19,7
		Dic	68	928	42	418	7213	34136	20,5
MS109	Intermedio	Oct	91	1002	35	477	6692	23443	28,7
		Nov	82	1011	33	420	7795	25585	30,6
		Dic	73	984	40	376	5410	18619	29,2
VDH314	Intermedio	Oct	91	1019	34	458	7002	20953	33,5
		Nov	85	1040	31	397	8465	24795	34,4
		Dic	70	949	49	456	6331	19137	33,1
DK39T	Corto	Oct	83	894	36	500	4933	19943	24,7
		Nov	74	922	37	479	5659	24485	23,6
		Dic	65	886	40	411	4938	22235	22,3
MS102	Corto	Oct	91	1013	35	479	5031	25406	19,7
		Nov	80	988	33	424	6785	35495	19,1
		Dic	69	938	43	420	6453	34724	18,3
ADV114	Corto	Oct	83	898	32	457	5483	18566	29,7
		Nov	74	917	36	465	7303	23796	31,1
		Dic	64	854	37	415	7276	24327	30,0
<b>DMS</b>									
Fecha de Siembra (FS)			1	8	1	13	418	1822	0,8
Genotipo (G)			1	13	2	23	725	3156	1,4
FS*G			2	23	3	39	1256	5466	2,4

DMS: Diferencia mínima significativa.



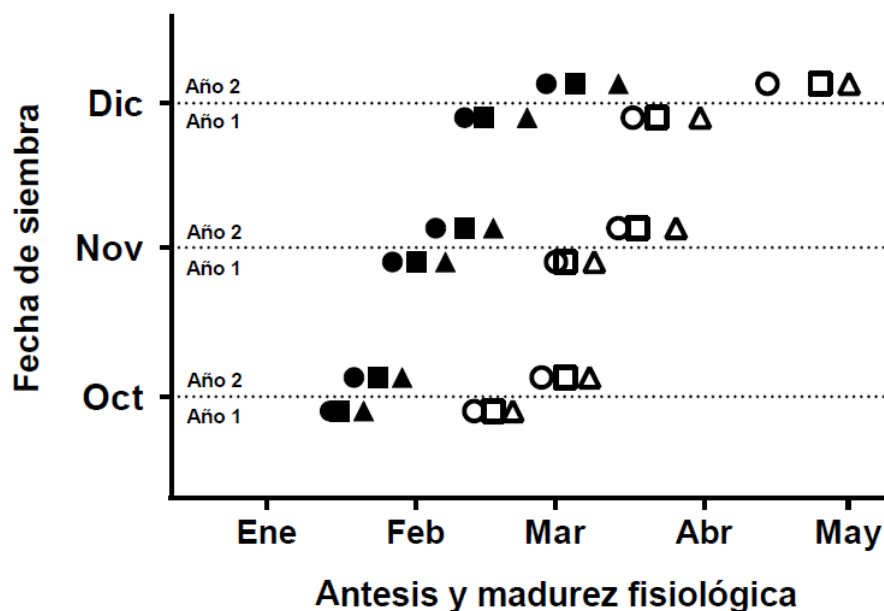
**Figura 3.3:** Días desde siembra (S) a antesis (A) para cada genotipo y fecha de siembra (Oct, octubre; Nov, noviembre; Dic, diciembre). Los genotipos se agrupan en largos (DK64T, MS108, VDH422), intermedios (DK61T, MS109, VDH314) y cortos (DK39T, MS102, ADV114). Las barras indican el error estándar de la media. Letras distintas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) dentro de cada genotipo.

La duración del período de antesis a madurez fisiológica (período de llenado de grano) varió desde 31 a 49 días, siendo las diferencias explicadas en gran parte por la fecha de siembra (25%), el genotipo (5%) y su interacción (12%) (Cuadro 3.2). El atraso en la fecha de siembra provocó un aumento de la duración del llenado en días. En promedio, el llenado fue de 35, 34 y 41 días para la fecha de octubre, noviembre y diciembre, respectivamente (Cuadro 3.3). El aumento en la duración del llenado con el atraso de la fecha de siembra dependió del genotipo, siendo de unos pocos días en algunos materiales (4 días; DK39T) hasta dos semanas en otros (16 días; MS108) (Cuadro 3.3).

La duración del período de antesis a madurez en °Cd varió desde 298 y 512 °Cd, y estuvieron explicadas en gran parte por la fecha de siembra (27%), el genotipo (16%) y su interacción (11%) (Cuadro 3.2). El atraso en la fecha de siembra de octubre a diciembre provocó una reducción en la duración del llenado de unos 70°Cd. Esta reducción varió de acuerdo con el genotipo. Algunos materiales prácticamente no vieron afectada su duración del llenado en °Cd (como DK64T), mientras que en otros materiales la reducción fue importante (como VDH422) (Cuadro 3.3). Finalmente, el año tuvo efecto en la duración de esta etapa tanto en días como en °Cd, siendo en promedio unos 8 días o 77 °Cd superiores en el año 2 respecto al año 1 (Cuadro A.1 del Anexo).

La Figura 3.4 muestra el momento del año donde ocurrió la antesis y la madurez fisiológica en los ciclos cortos, intermedios y largos dependiendo de la fecha de siembra y el año. Las fechas de octubre ubicaron la antesis desde mediados a fin de enero, las fechas de noviembre la ubicaron desde fin de enero y durante febrero, y las fechas de diciembre la ubicaron desde mediados de febrero hasta principios de marzo dependiendo del largo de ciclo y el año (Figura 3.4). Con respecto a la madurez fisiológica, las fechas de octubre la

ubicaron desde mediados de febrero a principios de marzo, las fechas de noviembre durante el mes de marzo y las fechas de diciembre durante el mes de marzo y abril (Figura 3.4).

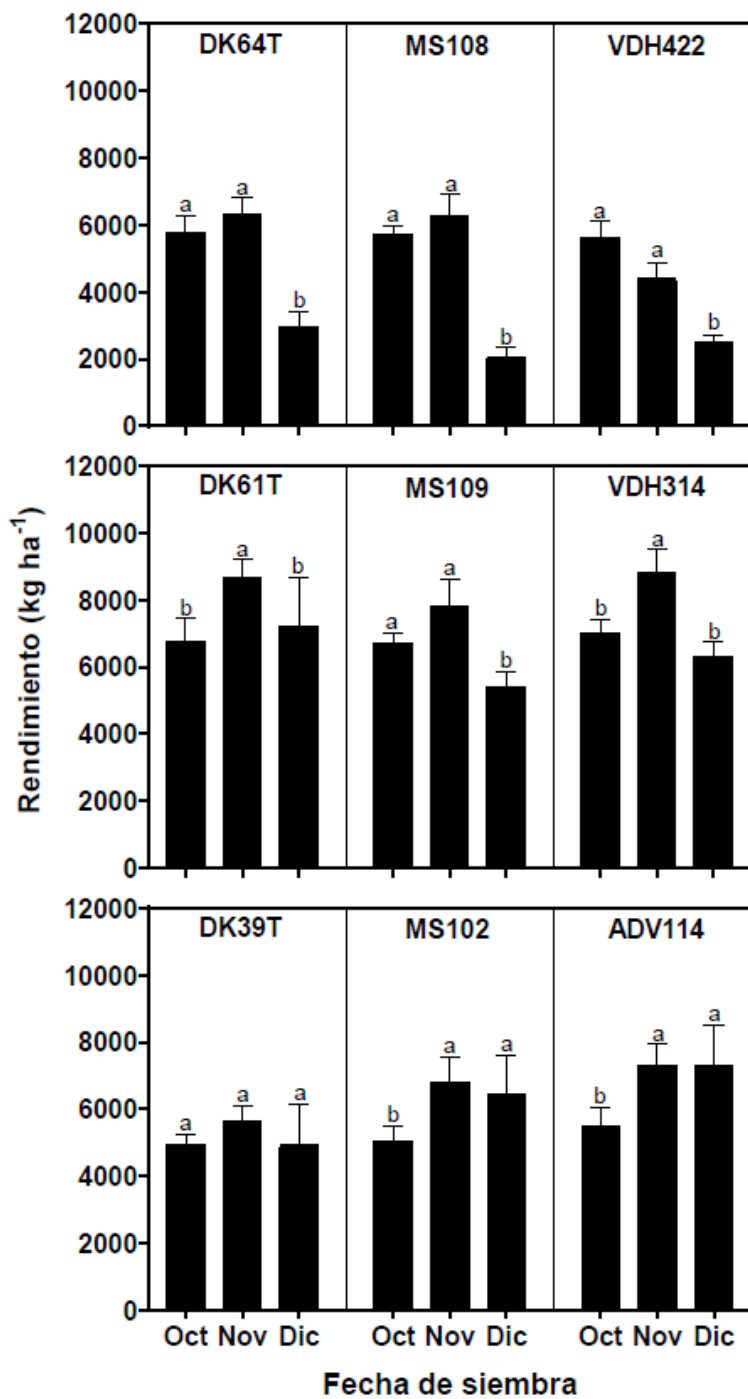


**Figura 3.4:** Momento del año (Ene, enero; Feb, febrero; Mar, marzo; Abr, abril; May, mayo) donde se ubicó la antesis (símbolos llenos) y madurez fisiológica (símbolos vacíos) de los genotipos de diferente ciclo (ciclo largo, triángulo; ciclo intermedio, cuadrado; ciclo corto, círculo) en las tres fechas de siembra (Oct, octubre; Nov, noviembre; Dic, diciembre) para los dos años.

La fecha de siembra afectó significativamente el rendimiento (Cuadro 3.2), siendo en promedio de 5898, 6846 y 5016 kg ha<sup>-1</sup> para la fecha de octubre, noviembre y diciembre, respectivamente. Sin embargo, las diferencias de rendimiento entre genotipos fueron importantes, explicando un 27% de la variación, y mostró interacción con la fecha de siembra (Cuadro 3.2). Los ciclos largos, intermedios y cortos mostraron rendimientos promedios de 4626, 7149 y 5985 kg ha<sup>-1</sup>. Los genotipos de ciclos largos maximizaron el rendimiento promedio en la fecha de octubre (5720 kg ha<sup>-1</sup>) y noviembre (5651 kg ha<sup>-1</sup>), y lo redujeron drásticamente (más de un 55%) en diciembre (2507 kg ha<sup>-1</sup>). Los ciclos

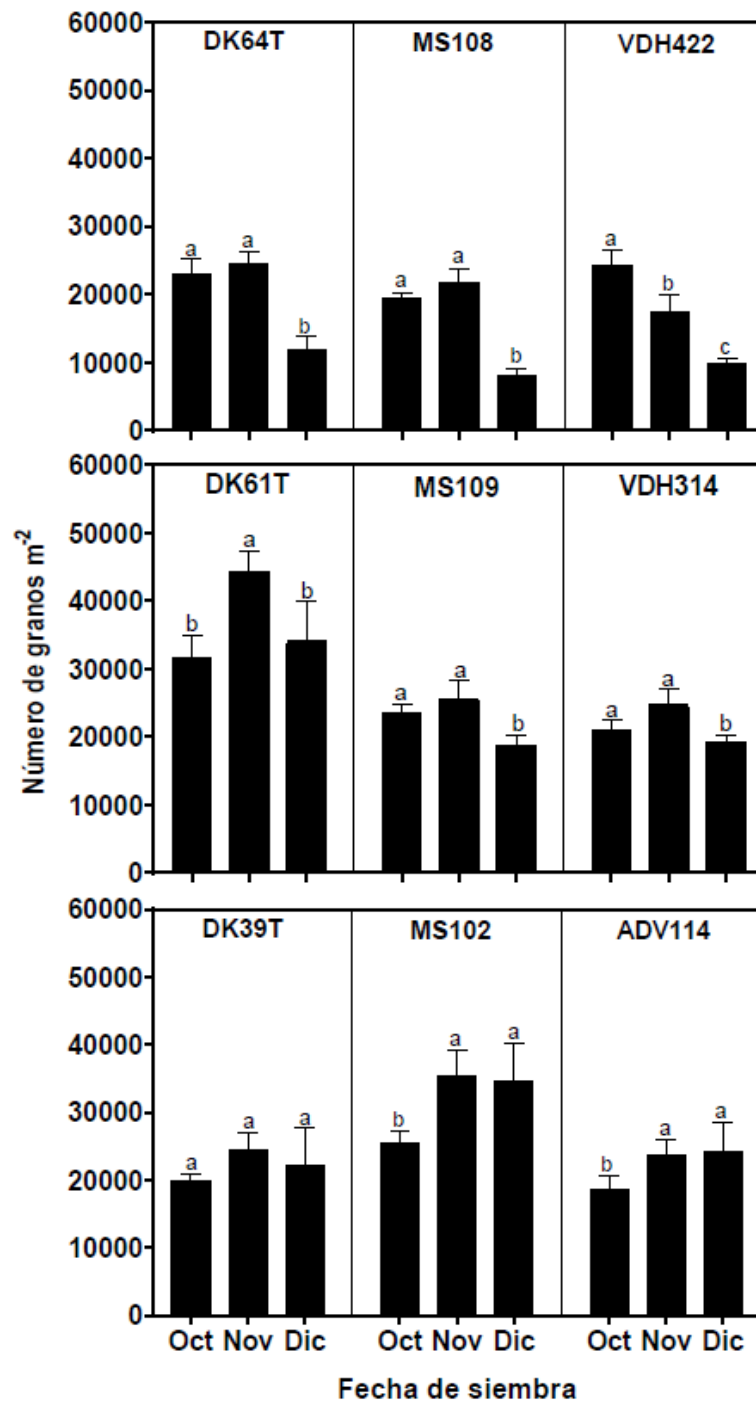
intermedios mostraron en promedio los mayores rendimientos, siendo máximos en la fecha de noviembre ( $8304 \text{ kg ha}^{-1}$ ), superando en un 18% y 24% los rendimientos obtenidos en fechas de siembra de octubre y diciembre, respectivamente. Finalmente, los ciclos cortos tendieron a aumentar sus rendimientos en fechas de siembra de noviembre y diciembre, estando un 27 y 21% respectivamente por encima de la siembra de octubre (Figura 3.5). El año explicó una menor proporción de la variación del rendimiento (9%; Cuadro 3.2). El rendimiento fue superior en el año 1 ( $6594 \text{ kg ha}^{-1}$ ) comparado con el año 2 ( $5246 \text{ kg ha}^{-1}$ ). El efecto año a la vez dependió de la fecha de siembra y el genotipo (Cuadro 3.2). Mientras que el impacto de la fecha de siembra fue similar en ambos años para los ciclos largos o incluso intermedios, el impacto de la fecha fue distinto en los ciclos cortos (Cuadro A.1 del Anexo). El rendimiento en los ciclos cortos fue significativamente superior en diciembre en el año 1, mientras que no hubo diferencias de rendimiento entre las fechas de noviembre y octubre en el año 2.





**Figura 3.5:** Rendimiento (kg ha<sup>-1</sup>) para cada genotipo y fecha de siembra (Oct, octubre; Nov, noviembre; Dic, diciembre). Los genotipos se agrupan en largos (DK64T, MS108, VDH422), intermedios (DK61T, MS109, VDH314) y cortos (DK39T, MS102, ADV114). Las barras indican el error estándar de la media. Letras distintas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) dentro de cada genotipo.

Las variaciones de rendimiento estuvieron explicadas principalmente por variaciones en el número de granos  $m^{-2}$ . La fecha de siembra afectó este componente (7%; Cuadro 3.2), siendo en promedio de 22909, 26883 y 20335 granos  $m^{-2}$  para la fecha de octubre, noviembre y diciembre respectivamente. Las diferencias en número de granos por unidad de superficie entre genotipos fueron muy significativas (40% de la variación), y mostró interacción con la fecha de siembra (Cuadro 3.2). Los ciclos largos, intermedios y cortos mostraron promedios de 17750, 26934 y 25442 granos  $m^{-2}$ . Los genotipos de ciclos largos maximizaron el número de granos en la fecha de octubre (22126 granos  $m^{-2}$ ) y noviembre (21180 granos  $m^{-2}$ ), y lo redujeron drásticamente (más de un 50%) en diciembre (9944 granos  $m^{-2}$ ). Los ciclos intermedios maximizaron este componente en la fecha de noviembre (31542 granos  $m^{-2}$ ). Finalmente, los ciclos cortos tendieron a aumentar el número de granos fijados en fechas de siembra de noviembre y diciembre, estando por encima de un 27% respecto de la siembra de octubre (Figura 3.6). El año explicó una menor proporción de la variación en el número de granos  $m^{-2}$  (7%, Cuadro 3.2). De manera similar al rendimiento, el número de granos fue superior en el año 1 (26049 granos  $m^{-2}$ ) comparado con el año 2 (20702 granos  $m^{-2}$ ). El efecto año a la vez dependió de la fecha de siembra y el genotipo (Cuadro 3.2). Mientras que el impacto de la fecha de siembra fue similar en ambos años para los ciclos largos o incluso intermedios, el impacto de la fecha fue distinto en los ciclos cortos (Cuadro A.1 del Anexo). El número de granos en los ciclos cortos fue significativamente superior en diciembre en el año 1 con respecto al año 2.



**Figura 3.6:** Número de granos por m<sup>2</sup> para cada genotipo y fecha de siembra (Oct, octubre; Nov, noviembre; Dic, diciembre). Los genotipos se agrupan en largos (DK64T, MS108, VDH422), intermedios (DK61T, MS109, VDH314) y cortos (DK39T, MS102, ADV114). Las barras indican el error estándar de la media. Letras distintas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) dentro de cada genotipo.

El peso de mil granos varió principalmente con el genotipo, el cual explicó más del 80% de la variación en este atributo (Cuadro 3.2). Una muy baja proporción de la variación estuvo explicada por la fecha de siembra, siendo el peso de mil granos significativamente menor en la fecha de diciembre (25 g en promedio en diciembre respecto a 27 g en promedio en la fecha de octubre y noviembre). Esta caída en el peso de mil granos ante el atraso de la fecha de siembra varió con el año. Mientras que en el año 1 no se observaron caídas significativas en el peso de mil granos con el atraso en la fecha, en el año 2 la caída en el peso de mil granos fue significativa. De todas maneras, la misma fue de poca magnitud (6%) (Cuadro 3.3). Las variaciones en el rendimiento del conjunto de datos estuvieron explicadas principalmente por el número de granos  $m^{-2}$  ( $r^2$ : 0,60;  $p < 0,001$ ;  $n$ : 27) que a variaciones en el peso de mil granos ( $r^2$ : 0,04;  $p$ : 0,33;  $n$ : 27).

### **3.1.3 Producción de biomasa e índice de cosecha**

La tasa de crecimiento del cultivo (TCC) alrededor de floración ( $g\ m^{-2}\ día^{-1}$ ) durante el año 2 varió con la fecha de siembra (6%) y el genotipo (24%), aunque la interacción entre ambos explicó la mayor proporción de la variación del rendimiento en este atributo (41%; Cuadro 3.4). Para la mayoría de los genotipos no se detectaron diferencias significativas en la TCC alrededor de floración con el atraso en la fecha de siembra (Cuadro 3.5). Las diferencias sólo fueron significativas para el genotipo corto ADV114, intermedio MS109 y largo VDH422, donde la TCC fue mayor en la fecha de diciembre para el genotipo corto ( $83\ g\ m^{-2}\ día^{-1}$ ) e intermedio ( $54,8\ g\ m^{-2}\ día^{-1}$ ) y en la fecha de noviembre para el genotipo largo ( $62,4\ g\ m^{-2}\ día^{-1}$ ) (Cuadro 3.5).

**Cuadro 3.4:** Porcentaje de la suma de cuadrados de cada factor individual (FS, fecha de siembra; G, genotipo) y su interacción para tasa de crecimiento del cultivo en el período crítico (TCC en PC) biomasa acumulada a madurez fisiológica (MF) e índice de cosecha.

<b>Factor</b>	<b>TCC en PC (%)</b>	<b>Biomasa a MF (%)</b>	<b>Índice de cosecha (%)</b>
Fecha de siembra (FS)	6	15	17
Genotipo (G)	24	40	27
FS*G	41	22	17 <sup>NS</sup>
Error	29	23	39

NS: no significativo. El resto de los factores de interés fueron significativos ( $p < 0,05$ ).

La biomasa a madurez fisiológica también se afectó con la fecha de siembra (15%) y el genotipo (40%), aunque la interacción entre ambos también fue significativa (22%) (Cuadro 3.4). La fecha de octubre y noviembre alcanzaron en promedio la mayor producción de biomasa a madurez (2671 y 2997 g m<sup>-2</sup> respectivamente; Cuadro 3.5). Los genotipos largos en promedio mostraron mayor producción de biomasa que los materiales intermedios y cortos (2928, 2852 y 2255 g m<sup>-2</sup> para genotipos largos, intermedios y cortos, respectivamente), aunque se detectaron materiales de ciclo corto con alta producción de biomasa (como ADV114) o de ciclo largo con relativa menor producción de biomasa (como DK64T) (Cuadro 3.5). Con respecto a la interacción, mientras que algunos materiales mantuvieron estable su producción de biomasa ante el atraso en la fecha de siembra (como VDH341, MS109 y MS108; Cuadro 3.5), la mayoría vieron reducida su biomasa con el atraso en la fecha de siembra. Esta reducción no estuvo claramente asociada al ciclo del genotipo (Cuadro 3.5).

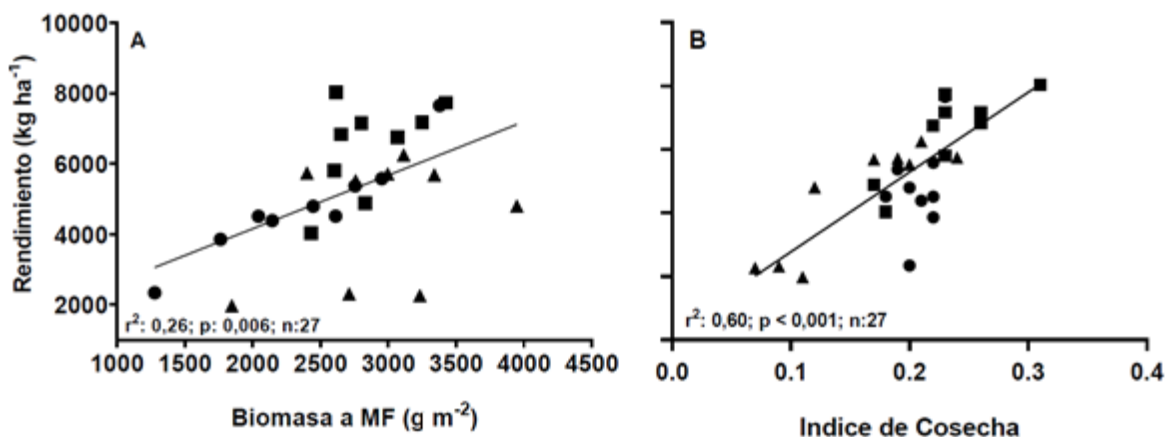
**Cuadro 3.5:** Media  $\pm$  error estándar de la tasa de crecimiento del cultivo en período crítico (TCC en PC) ( $\text{g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ), biomasa a madurez fisiológica (MF) ( $\text{g m}^{-2}$ ) e índice de cosecha para nueve genotipos de sorgo de diferente ciclo (Largo; Intermedio; Corto) sembrados en distintas fechas de siembra (Oct, octubre; Nov, noviembre; Dic, diciembre) durante el año 2.

Genotipo	Ciclo	Fecha de siembra	TCC en PC ( $\text{g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ )	Biomasa a MF ( $\text{g m}^{-2}$ )	Índice de cosecha
DK64T	Largo	Oct	39,3 $\pm$ 3 <sup>cdefg</sup>	2401 $\pm$ 237 <sup>hijkl</sup>	0,24 $\pm$ 0,05 <sup>abc</sup>
		Nov	29,7 $\pm$ 1 <sup>efgh</sup>	2759 $\pm$ 182 <sup>cdefghi</sup>	0,20 $\pm$ 0,03 <sup>cd</sup>
		Dic	36,1 $\pm$ 6 <sup>defgh</sup>	1847 $\pm$ 237 <sup>klm</sup>	0,11 $\pm$ 0,01 <sup>efg</sup>
MS108	Largo	Oct	46,9 $\pm$ 2 <sup>bcd</sup>	3340 $\pm$ 242 <sup>abcd</sup>	0,17 $\pm$ 0,01 <sup>cdef</sup>
		Nov	61,6 $\pm$ 6 <sup>b</sup>	2997 $\pm$ 155 <sup>bcdefgh</sup>	0,19 $\pm$ 0,02 <sup>cde</sup>
		Dic	40,6 $\pm$ 4 <sup>cdefg</sup>	3234 $\pm$ 141 <sup>bcdef</sup>	0,07 $\pm$ 0,01 <sup>g</sup>
VDH422	Largo	Oct	40,1 $\pm$ 3 <sup>cdefg</sup>	3114 $\pm$ 365 <sup>bcdef</sup>	0,21 $\pm$ 0,05 <sup>cd</sup>
		Nov	62,4 $\pm$ 8 <sup>b</sup>	3949 $\pm$ 277 <sup>a</sup>	0,12 $\pm$ 0,02 <sup>defg</sup>
		Dic	38,5 $\pm$ 13 <sup>cdefg</sup>	2712 $\pm$ 265 <sup>defghij</sup>	0,09 $\pm$ 0,02 <sup>fg</sup>
DK61T	Intermedio	Oct	38,2 $\pm$ 6 <sup>cdefgh</sup>	3249 $\pm$ 248 <sup>bcde</sup>	0,23 $\pm$ 0,05 <sup>abc</sup>
		Nov	25,0 $\pm$ 7 <sup>fgh</sup>	3423 $\pm$ 241 <sup>ab</sup>	0,23 $\pm$ 0,03 <sup>abc</sup>
		Dic	50,1 $\pm$ 4 <sup>bcd</sup>	2433 $\pm$ 461 <sup>ghijk</sup>	0,18 $\pm$ 0,03 <sup>cde</sup>
MS109	Intermedio	Oct	37,9 $\pm$ 7 <sup>cdefg</sup>	2801 $\pm$ 263 <sup>bcdefghi</sup>	0,26 $\pm$ 0,02 <sup>abc</sup>
		Nov	30,5 $\pm$ 5 <sup>efgh</sup>	2652 $\pm$ 35 <sup>efghij</sup>	0,26 $\pm$ 0,01 <sup>abc</sup>
		Dic	54,8 $\pm$ 9 <sup>bc</sup>	2828 $\pm$ 246 <sup>bcdefgh</sup>	0,17 $\pm$ 0,02 <sup>cde</sup>
VDH314	Intermedio	Oct	44,9 $\pm$ 3 <sup>bcdef</sup>	3068 $\pm$ 158 <sup>bcdefg</sup>	0,22 $\pm$ 0,01 <sup>abc</sup>
		Nov	29,4 $\pm$ 3 <sup>efgh</sup>	2614 $\pm$ 119 <sup>efghij</sup>	0,31 $\pm$ 0,04 <sup>a</sup>
		Dic	41,8 $\pm$ 8 <sup>cdefg</sup>	2604 $\pm$ 398 <sup>efghij</sup>	0,23 $\pm$ 0,03 <sup>abc</sup>
DK39T	Corto	Oct	32,4 $\pm$ 5 <sup>defgh</sup>	2145 $\pm$ 227 <sup>ijkl</sup>	0,21 $\pm$ 0,03 <sup>cd</sup>
		Nov	26,9 $\pm$ 6 <sup>fgh</sup>	2447 $\pm$ 28 <sup>ghijk</sup>	0,20 $\pm$ 0,01 <sup>cd</sup>
		Dic	26,0 $\pm$ 2 <sup>gh</sup>	1278 $\pm$ 239 <sup>m</sup>	0,20 $\pm$ 0,06 <sup>cd</sup>
MS102	Corto	Oct	38,0 $\pm$ 0 <sup>cdefg</sup>	2043 $\pm$ 39 <sup>ijkl</sup>	0,22 $\pm$ 0,03 <sup>bcd</sup>
		Nov	20,1 $\pm$ 4 <sup>h</sup>	2755 $\pm$ 110 <sup>cdefghi</sup>	0,19 $\pm$ 0,03 <sup>cde</sup>
		Dic	33,2 $\pm$ 3 <sup>defgh</sup>	1763 $\pm$ 170 <sup>lm</sup>	0,22 $\pm$ 0,03 <sup>abc</sup>
ADV114	Corto	Oct	42,6 $\pm$ 5 <sup>cdefg</sup>	1877 $\pm$ 151 <sup>klm</sup>	0,30 $\pm$ 0,06 <sup>ab</sup>
		Nov	28,1 $\pm$ 3 <sup>fgh</sup>	3379 $\pm$ 115 <sup>abc</sup>	0,23 $\pm$ 0,04 <sup>abc</sup>
		Dic	83,0 $\pm$ 16 <sup>a</sup>	2612 $\pm$ 232 <sup>efghij</sup>	0,18 $\pm$ 0,02 <sup>cdef</sup>
<b>DMS</b>					
Fecha de Siembra (FS)			5,9	219	0,03
Genotipo (G)			10,2	379	0,05
G*FS			18	657	NS

DMS: Diferencia mínima significativa.

El índice de cosecha también se modificó con la fecha de siembra (17%) y el genotipo (27%), siendo no significativa la interacción entre ambos (Cuadro 3.4). El índice de cosecha se redujo significativamente en la fecha de siembra de diciembre (0,16 comparado con 0,23 y 0,21 para las fechas de octubre y noviembre, respectivamente; Cuadro 3.5). Los genotipos intermedios mostraron mayores índices de cosecha (0,23 como promedio de los genotipos), los cortos mostraron valores intermedios (0,22) y los largos presentaron los menores índices de cosecha (0,16) (Cuadro 3.5).

Cuando se consideraron todos los datos en su conjunto, las variaciones de rendimiento en el año 2 estuvieron principalmente asociadas con variaciones en el índice de cosecha ( $r^2$ : 0,60;  $p < 0,001$ ;  $n$ : 27), mientras que estuvieron relacionadas en menor magnitud con la biomasa acumulada a madurez fisiológica ( $r^2$ : 0,26;  $p$ : 0,006;  $n$ : 27) (Figura 3.7).



**Figura 3.7:** Relación entre el rendimiento (kg ha<sup>-1</sup>) y la biomasa acumulada a madurez fisiológica (MF) (g m<sup>-2</sup>) (A) y el índice de cosecha (B) para el conjunto de fechas de siembra y genotipos evaluados durante el año 2. Los genotipos se identificaron como ciclo largo (triángulo), ciclo intermedio (cuadrado) y ciclo corto (círculo).

## 3.2 Experimentos simulados

### 3.2.1 Correspondencia entre datos observados y simulados a nivel local

El modelo predijo de manera adecuada los datos observados a campo (Cuadro 3.6). Los valores de RECM para las diferentes variables consideradas fueron similares a las reportadas por Carcedo y Gambin (2019), lo que permite confiar en las predicciones del modelo para la zona de interés. Los RECM para el año 1 y el año 2 fueron de 4 y 3 días respectivamente para días a antesis, de 8 y 5 días para duración del llenado de grano, de 817 y 610 ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) para rendimiento, y de 380 ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) para biomasa a madurez fisiológica en el año 2.

**Cuadro 3.6:** Raíz del error cuadrático medio (RECM) de valores observados para cada año de experimentación versus los valores predichos para días desde siembra (S) a antesis (A), días desde antesis (A) a madurez fisiológica (MF), rendimiento por unidad de superficie ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) y biomasa a MF ( $\text{kg ha}^{-1}$ ).

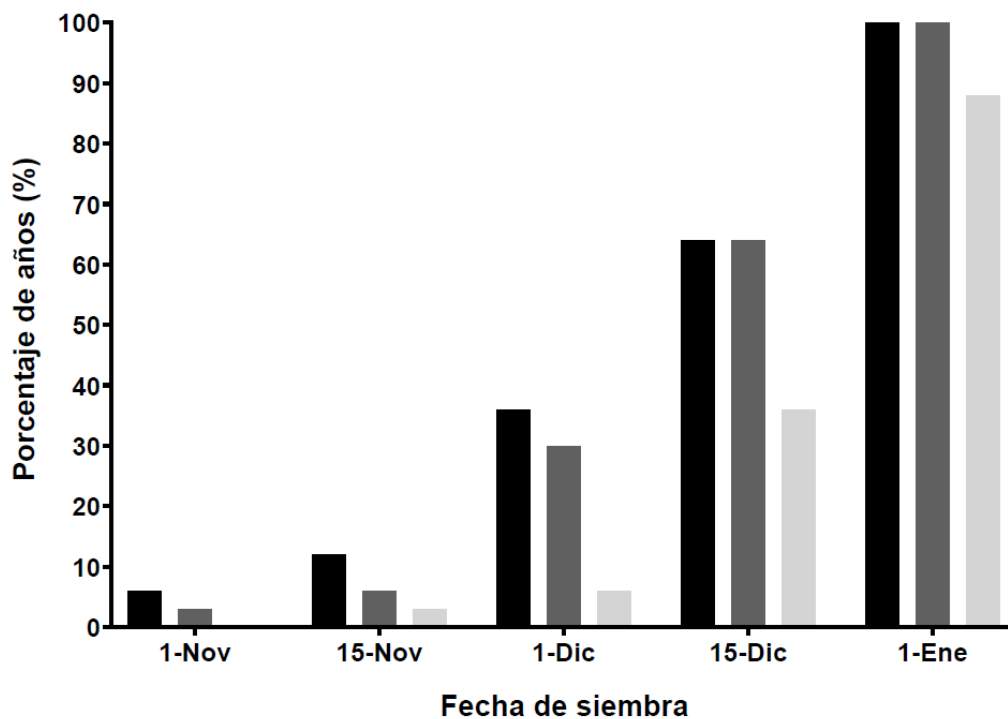
Año	Días S-A (Días)	Días A-MF (Días)	Rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ )	Biomasa a MF ( $\text{kg ha}^{-1}$ )
Año 1	4	8	817	-
Año 2	3	5	610	380

### 3.2.2 Fenología

Debido al amplio rango de fechas de siembra y ciclos explorados, un primer análisis involucró examinar si el cultivo alcanzó el estado de antesis y madurez fisiológica (fin de



llenado según la salida del modelo) en cada una de las combinaciones de fecha de siembra y ciclo explorado a través de los años. Este análisis indicó un porcentaje de años donde el cultivo no llega a completar su ciclo. El porcentaje de años donde un ciclo determinado no alcanza un llenado de granos completo (madurez fisiológica) aumenta con el atraso de la fecha de siembra, siendo este patrón a la vez mayor en el ciclo más largo (Figura 3.8). A partir de la fecha de principios de diciembre (1-Dic), el porcentaje de años donde el cultivo no llega a completar su ciclo, resultó ser mayor en el ciclo largo e intermedio (36 y 30% de años, respectivamente) en comparación con el ciclo corto (<10%). Para la siembra de mediados de diciembre, este porcentaje se incrementó a 64% para el ciclo largo e intermedio y a 34% para el ciclo corto. Finalmente, para la fecha de principios de enero, este porcentaje es del 100% para el ciclo largo e intermedio y del 88% para el ciclo corto (Figura 3.8). Por su parte, todos los cultivos alcanzan el estado de antesis, a excepción del genotipo de ciclo largo (VDH422) sembrado en la última fecha simulada del 1 de enero, donde el 12% de los años no alcanzaría tal estado (datos no mostrados).



**Figura 3.8:** Porcentaje de años donde cada genotipo (ciclo largo; barra gris oscuro; ciclo intermedio, barra gris; ciclo corto, barra gris clara) no alcanzan un llenado de granos completo, en función de las fechas de siembra exploradas (1-Nov; 15-Nov; 1-Dic; 15-Dic; 1-Ene).

**Cuadro 3.7:** Porcentaje de la suma de cuadrados de cada factor individual (FS, fecha de siembra; G, genotipo; TA, tipo de año) y sus interacciones para la duración en días desde siembra (S) a antesis (A) y para la duración del llenado.

Factor	Duración S-A (%) (Días)	Duración del llenado (%) (Días)
Fecha de siembra (FS)	51	68
Genotipo (G)	45	15
Tipo de año (TA)	<1	0 <sup>NS</sup>
FS*G	<1 <sup>NS</sup>	13
FS*TA	2	3 <sup>NS</sup>
G*TA	0 <sup>NS</sup>	0 <sup>NS</sup>
FS*G*TA	0 <sup>NS</sup>	<1 <sup>NS</sup>

NS: no significativo. El resto de los factores fueron significativos ( $p < 0,05$ ).

La fecha de siembra y el genotipo explicaron la mayor proporción de la variación en la duración a antesis (97% sumando ambos efectos), aunque también se detectó efecto tipo de año e interacción fecha de siembra x tipo de año para esta variable (Cuadro 3.7). La duración de siembra a antesis varió en promedio de los años de 80 a 116 días (Cuadro A.2 del Anexo). La duración de esta etapa se redujo al atrasar la fecha de siembra de octubre a diciembre, mientras que se incrementó en la fecha de enero (Figura 3.9A). La antesis tuvo lugar en promedio a los 103, 96 y 87 días en el ciclo largo, intermedio y corto (Cuadro 3.8), y el impacto de la fecha de siembra en la duración de esta etapa fue similar en todos los genotipos (interacción fecha de siembra x genotipo no significativa; Cuadro 3.7). Los años clasificados como Niño alcanzaron la antesis en promedio 2 días antes que los años clasificados como Niña y Neutro. Esta diferencia a la vez fue mayor en fechas tempranas (4-5 días entre tipo de año) y se redujo al atrasar la fecha de siembra (Cuadro A.2 del Anexo).

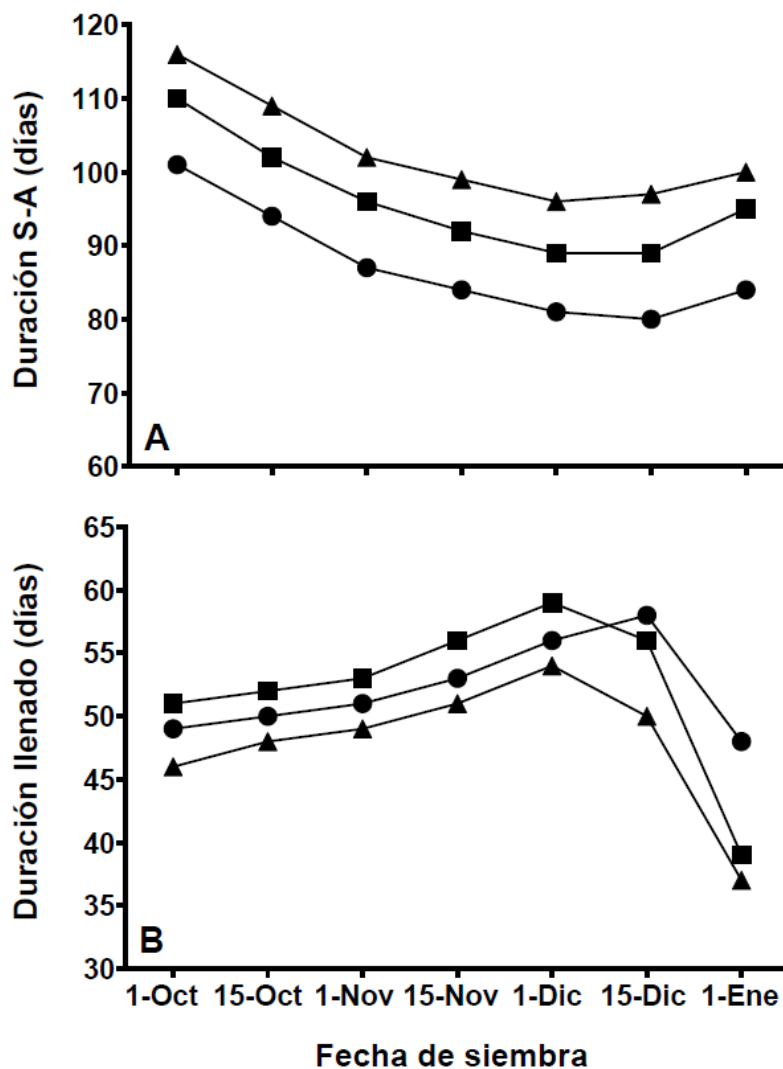
La fecha de siembra explicó cerca del 70% de las variaciones en la duración del llenado (Cuadro 3.7), seguida por el efecto genotipo (15%) y la interacción fecha de siembra x genotipo (13%). El resto de los efectos no fueron significativos para esta variable (Cuadro 3.7). La duración del llenado aumentó al atrasar la fecha de siembra hasta el 1 de diciembre, siendo en promedio de 49 días en la fecha del 1 de octubre y de 56 días para la fecha del 1 de diciembre (Cuadro 3.8). La duración del llenado fue de 52 días para los ciclos corto e intermedio y de 48 días para el ciclo largo. Sin embargo, las siembras más tardías de mediados de diciembre y principios de enero modificaron drásticamente la duración de esta etapa dependiendo del genotipo. En el ciclo intermedio y largo, el llenado se redujo en ambas fechas, siendo importante la reducción en la fecha de enero. Para el

ciclo corto, la duración del llenado fue máxima en diciembre y se redujo en enero, aunque en menor medida que los otros ciclos (Figura 3.9; Cuadro A.2 del Anexo).

**Cuadro 3.8:** Media y desvío estándar de la duración de siembra (S) a antesis (A) y duración del llenado de granos para las distintas fechas de siembra (1-Oct y 15-Oct, octubre; 1-Nov y 15-Nov, noviembre; 1-Dic y 15-Dic, diciembre; 1-Ene, enero) (FS), genotipos de diferente ciclo (ciclo largo, intermedio y corto) (G) y tipo de años categorizados en fases ENSO (Niño, Neutro, Niña) (TA).

<b>Factor</b>	<b>Duración S-A (Días)</b>	<b>Duración del llenado (Días)</b>
<i>Fecha de siembra</i>		
1-Oct	109±11	49±3
15-Oct	102±9	50±3
1-Nov	95±9	51±3
15-Nov	91±8	53±4
1-Dic	89±8	56±8
15-Dic	89±8	55±15
1-Ene	92±14	42±20
<i>Genotipo</i>		
Ciclo Largo	103±12	48±11
Ciclo Intermedio	96±9	52±12
Ciclo Corto	87±9	52±9
<i>Tipo de año</i>		
Niño	94±12	51±11
Neutro	96±12	51±11
Niña	96±11	51±12
<b>DMS</b>		
Fecha de siembra (FS)	2	3
Genotipo (G)	1	2
Tipo de año (TA)	1	NS

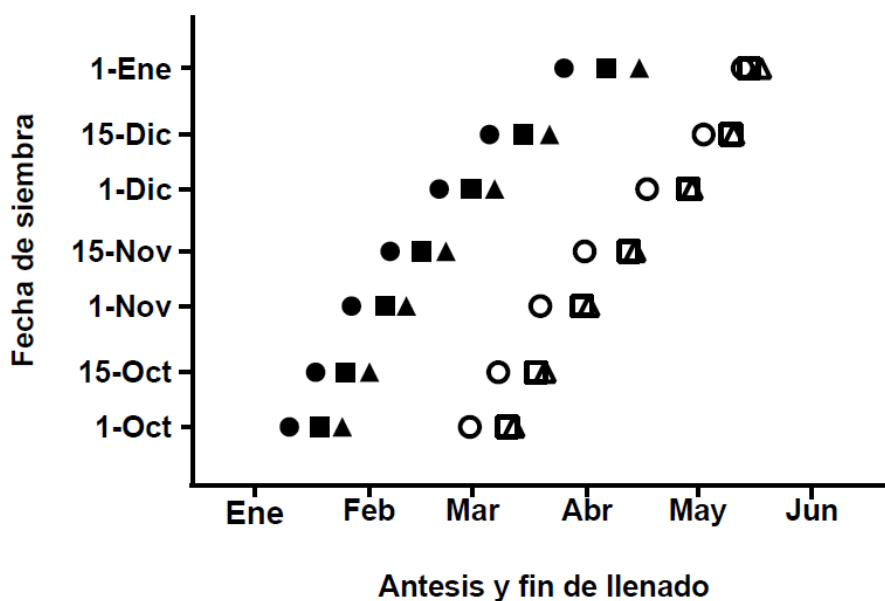
DMS: Diferencia mínima significativa.



**Figura 3.9:** Duración en días desde siembra (S) a antesis (A) (A) y duración del llenado (B) para el genotipo de ciclo largo (triángulo), ciclo intermedio (cuadrado) y ciclo corto (círculo) en función de la fecha de siembra (1-Oct y 15-Oct, octubre; 1-Nov y 15-Nov, noviembre; 1-Dic y 15-Dic, diciembre; 1-Ene, enero).

La Figura 3.10 muestra el momento del año donde tuvo lugar la antesis y el final del período de llenado para cada ciclo y fecha de siembra explorada. La antesis se ubicó en enero para las primeras fechas de siembra de octubre, en febrero para las fechas de noviembre y 1 de diciembre, y hacia marzo y abril para las fechas más tardías de mediados

de diciembre y principios de enero (Figura 3.10). Por otra parte, el fin de ciclo tuvo lugar desde fin de febrero hasta mediados de mayo, postergándose a medida que se retrasó la siembra (Figura 3.10). El ciclo intermedio y largo explorado en esta tesis ubicaron su llenado en momentos del año muy similares para todas las fechas de siembra exploradas. Tanto la antesis como el final del período de llenado, presentaron una menor variabilidad entre genotipos de diferente ciclo comparado con los datos de campo (Figura 3.4).



**Figura 3.10:** Momento del año (Ene, enero; Feb, febrero; Mar, marzo; Abr, abril; May, mayo; Jun, junio) donde se ubicaría la antesis (símbolos llenos) y fin del llenado del grano (símbolos vacíos) de los genotipos de diferente ciclo (ciclo largo, triángulo; ciclo intermedio, cuadrado; ciclo corto, círculo) en las siete fechas de siembra exploradas (1-Oct y 15-Oct, octubre; 1-Nov y 15-Nov, noviembre; 1-Dic y 15-Dic, diciembre; 1-Ene, enero).

### 3.2.3 Rendimiento y producción de biomasa

La fecha de siembra explicó la mayor proporción de la variación de los rendimientos (80%; Cuadro 3.9). Le siguieron el efecto genotipo (6%), la interacción entre la fecha de siembra y el genotipo (6%) y la interacción entre la fecha de siembra y el tipo de año (5%) (Cuadro 3.9). El resto de los efectos no evidenciaron diferencias significativas.

**Cuadro 3.9:** Porcentaje de la suma de cuadrados de cada factor individual (FS, fecha de siembra; G, genotipo; TA, tipo de año) y sus interacciones para el rendimiento por unidad de superficie, la biomasa final acumulada y el índice de cosecha.

<b>Factor</b>	<b>Rendimiento (%)</b>	<b>Biomasa final acumulada (%)</b>	<b>Índice de cosecha (%)</b>
Fecha de siembra (FS)	80	54	55
Genotipo (G)	6	33	36
Tipo de año (TA)	1 <sup>NS</sup>	3	<1 <sup>NS</sup>
FS*G	6	5 <sup>NS</sup>	4
FS*TA	5	5 <sup>NS</sup>	3 <sup>NS</sup>
G*TA	<1 <sup>NS</sup>	0 <sup>NS</sup>	0 <sup>NS</sup>
FS*G*TA	<1 <sup>NS</sup>	0 <sup>NS</sup>	<1 <sup>NS</sup>

NS: no significativo. El resto de los factores fueron significativos ( $p < 0,05$ ).

Los rendimientos se maximizaron en las fechas de mediados de octubre (8027 kg ha<sup>-1</sup>), principios y mediados de noviembre (8524 kg ha<sup>-1</sup> y 8357 kg ha<sup>-1</sup>) y principios de diciembre (8191 kg ha<sup>-1</sup>), sin diferencias significativas entre ellas (Cuadro 3.10). La fecha más temprana mostró menores rendimientos (7947 kg ha<sup>-1</sup>), aunque el mismo fue significativamente menor sólo respecto a la fecha del 1 de noviembre (Cuadro 3.10). Fechas más tardías implicaron caídas importantes de los rendimientos, siendo en promedio de 7118 y 4346 kg ha<sup>-1</sup> para la fecha del 15 de diciembre y 1 de enero, respectivamente (Cuadro 3.10).

**Cuadro 3.10:** Media y desvío estándar de rendimiento por unidad de superficie ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), biomasa a madurez fisiológica ( $\text{g m}^{-2}$ ) e índice de cosecha para las distintas fechas de siembra (1-Oct y 15-Oct, octubre; 1-Nov y 15-Nov, noviembre; 1-Dic y 15-Dic, diciembre; 1-Ene, enero) (FS), genotipos de diferente ciclo (ciclo largo, ciclo intermedio y ciclo corto) (G) y tipo de años categorizados en fases ENSO (Niño, Neutro, Niña) (TA).

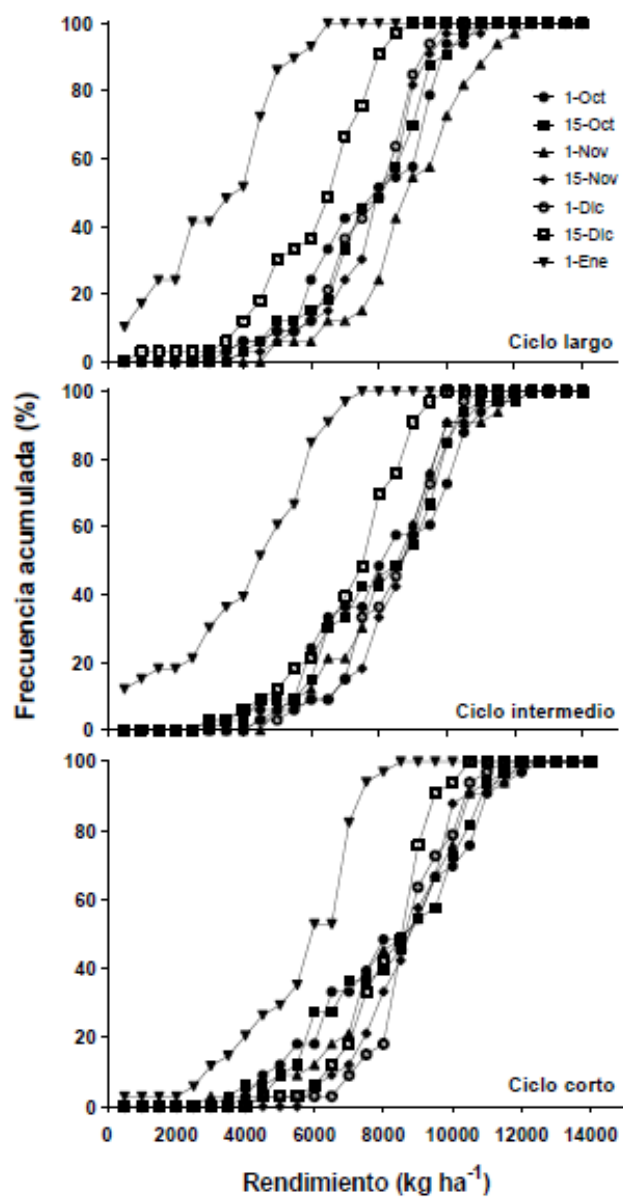
<b>Factor</b>	<b>Rendimiento (<math>\text{kg ha}^{-1}</math>)</b>	<b>Biomasa final acumulada (<math>\text{g m}^{-2}</math>)</b>	<b>Índice de Cosecha</b>
<i>Fecha de siembra</i>			
1-oct	7947±2253 <sup>b</sup>	2093±382 <sup>a</sup>	0,38±0,07 <sup>b</sup>
15-oct	8027±2089 <sup>ab</sup>	2054±375 <sup>ab</sup>	0,39±0,07 <sup>b</sup>
1-nov	8524±1918 <sup>a</sup>	2044±378 <sup>ab</sup>	0,42±0,06 <sup>a</sup>
15-nov	8357±1593 <sup>ab</sup>	1992±280 <sup>bc</sup>	0,42±0,08 <sup>a</sup>
1-dic	8191±1572 <sup>ab</sup>	1961±246 <sup>cd</sup>	0,42±0,08 <sup>a</sup>
15-dic	7118±1781 <sup>c</sup>	1885±212 <sup>d</sup>	0,38±0,09 <sup>b</sup>
1-ene	4346±2155 <sup>d</sup>	1638±179 <sup>e</sup>	0,26±0,12 <sup>c</sup>
<i>Genotipo</i>			
Ciclo Largo	7083±2436 <sup>c</sup>	2094±346 <sup>a</sup>	0,33±0,09 <sup>c</sup>
Ciclo Intermedio	7510±2389 <sup>b</sup>	1959±307 <sup>b</sup>	0,38±0,09 <sup>b</sup>
Ciclo Corto	7943±2111 <sup>a</sup>	1811±288 <sup>c</sup>	0,43±0,08 <sup>a</sup>
<i>Tipo de Año</i>			
Niño	7315±2326 <sup>b</sup>	1951±339 <sup>ab</sup>	0,37±0,10 <sup>b</sup>
Neutro	7493±2248 <sup>ab</sup>	1916±308 <sup>b</sup>	0,39±0,10 <sup>a</sup>
Niña	7721±2438 <sup>a</sup>	1997±309 <sup>a</sup>	0,38±0,10 <sup>ab</sup>
<b>DMS</b>			
Fecha de siembra (FS)	525	80	0,02
Genotipo (G)	344	52	0,01
Tipo de año (TA)	NS	52	NS

DMS: Diferencia mínima significativa.

El rendimiento fue mayor en el ciclo corto ( $7943 \text{ kg ha}^{-1}$ ), seguido por el ciclo intermedio ( $7510 \text{ kg ha}^{-1}$ ) y el ciclo largo ( $7083 \text{ kg ha}^{-1}$ ) (Cuadro 3.10). La variabilidad del rendimiento al considerar toda la serie histórica fue mayor en los ciclos largos y menor en los ciclos cortos, y fue mayor en las fechas más tempranas (1 y 15 de octubre) y más tardía

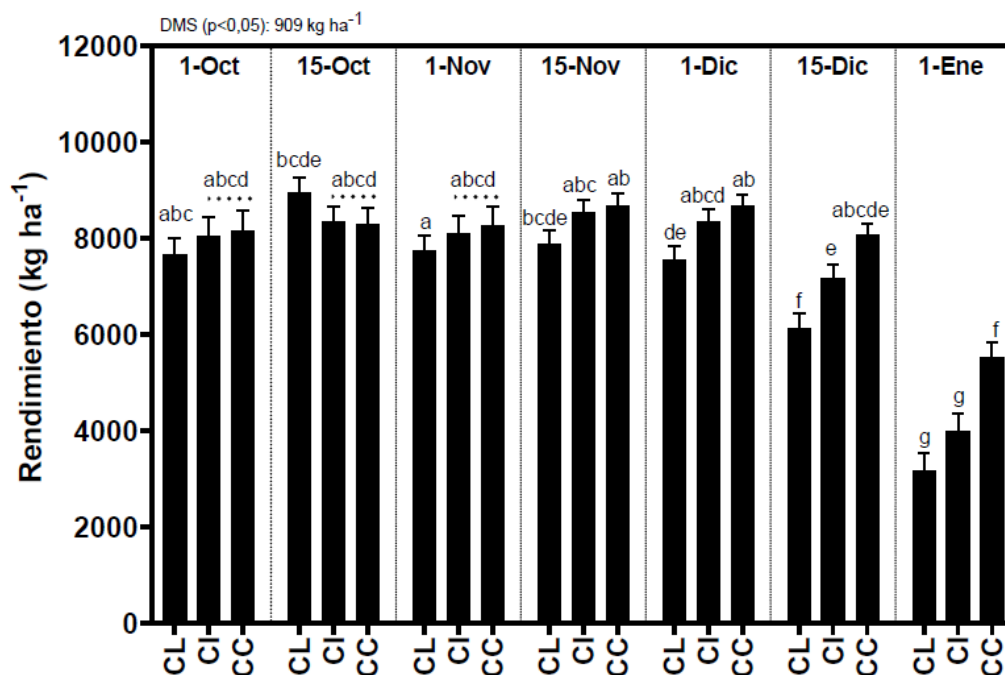


(1 de enero) (Cuadro 3.10; Figura 3.11). El rendimiento varió de 4000 a 8000 kg ha<sup>-1</sup> en el 50% de los años en el ciclo largo, mientras que esta variación fue de 4500 a 9000 kg ha<sup>-1</sup> para el ciclo intermedio, y entre 6000 a 9000 kg ha<sup>-1</sup> para el ciclo corto (Figura 3.11).



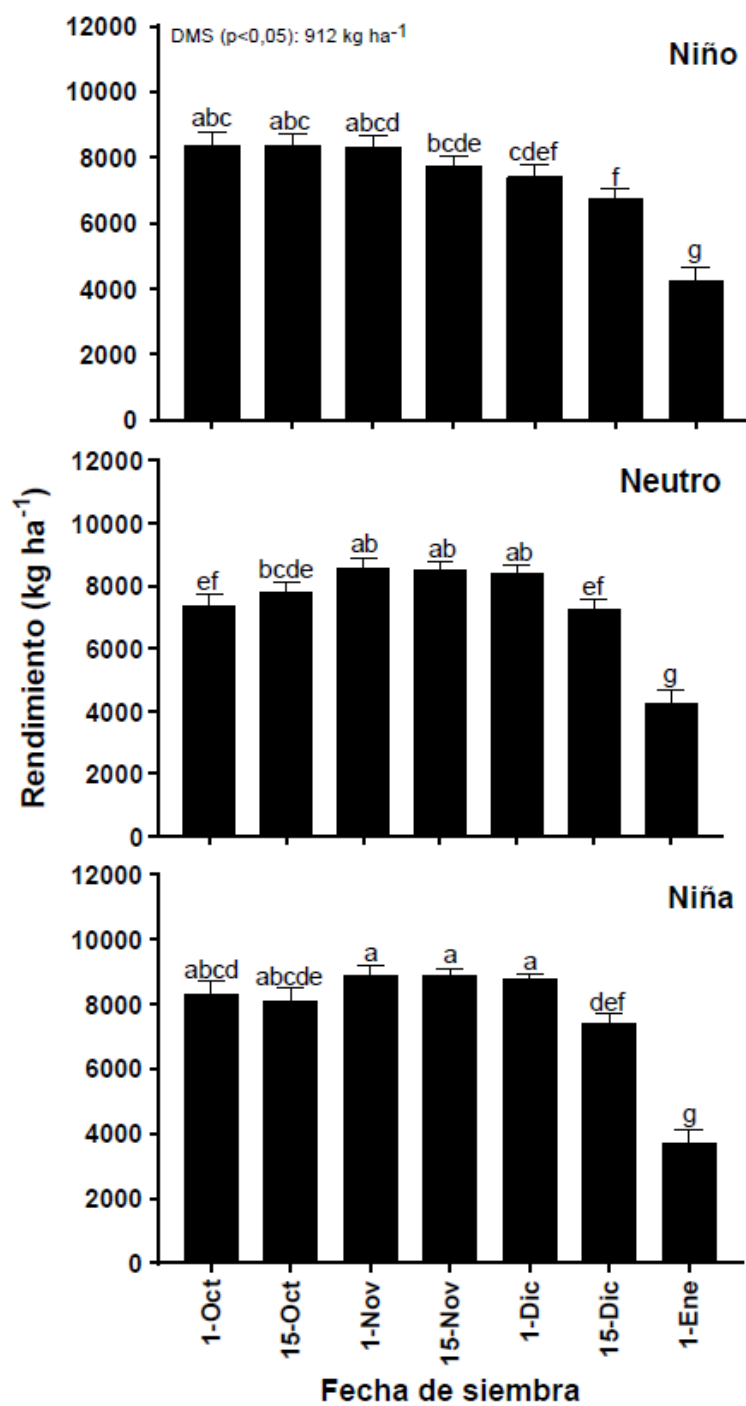
**Figura 3.11:** Frecuencia acumulada de rendimiento (kg ha<sup>-1</sup>) para el genotipo de ciclo largo, ciclo intermedio y ciclo corto en cada fecha de siembra (1-Oct y 15-Oct, octubre; 1-Nov y 15-Nov, noviembre; 1-Dic y 15-Dic, diciembre; 1-Ene, enero).

La interacción fecha de siembra x genotipo se muestra en la Figura 3.12. Para un amplio rango de fechas de siembra (desde 1 de octubre al 15 de noviembre), todos los genotipos mostraron rendimientos similares independientemente del largo de ciclo. Para la fecha de siembra del 1 de diciembre, el rendimiento del ciclo largo se redujo significativamente, mientras que el mismo fue similar a las fechas anteriores en el genotipo de ciclo intermedio y corto (Figura 3.12). Para la fecha de siembra del 15 de diciembre, los rendimientos se redujeron aún más en el ciclo largo y cayeron significativamente respecto a fechas anteriores en el ciclo intermedio, pero continuaron siendo altos rendimientos en el ciclo corto (Figura 3.12). Finalmente, las fechas de enero redujeron drásticamente los rendimientos en todos los ciclos, aunque en menor medida en el ciclo corto (Figura 3.12).



**Figura 3.12:** Rendimiento (kg ha<sup>-1</sup>) para el genotipo de ciclo largo (CL), intermedio (CI) y corto (CC) en cada fecha de siembra explorada (1-Oct y 15-Oct, octubre; 1-Nov y 15-Nov, noviembre; 1-Dic y 15-Dic, diciembre; 1-Ene, enero). Las barras indican el error estándar de la media. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas al  $p < 0,05$ , siendo la diferencia mínima significativa (DMS) de 909 kg ha<sup>-1</sup>.

Los años clasificados como Niña tendieron a mayores rendimientos comparado con años Niño y Neutro (Cuadro 3.10), aunque las diferencias no serían estadísticamente significativas ( $p: 0,079$ ). El tipo de año mostró interacción con la fecha de siembra (Cuadro 3.9), donde los años Niño tendieron a maximizar los rendimientos en fechas tempranas (principios de octubre a principios de noviembre), mientras que los rendimientos se maximizaron en fechas más tardías en los años Niña y Neutro (principios de noviembre a principios de diciembre) (Figura 3.13). Independientemente del tipo de año, siembras de mediados de diciembre y principios de enero implicaron reducciones significativas de los rendimientos (Figura 3.13).



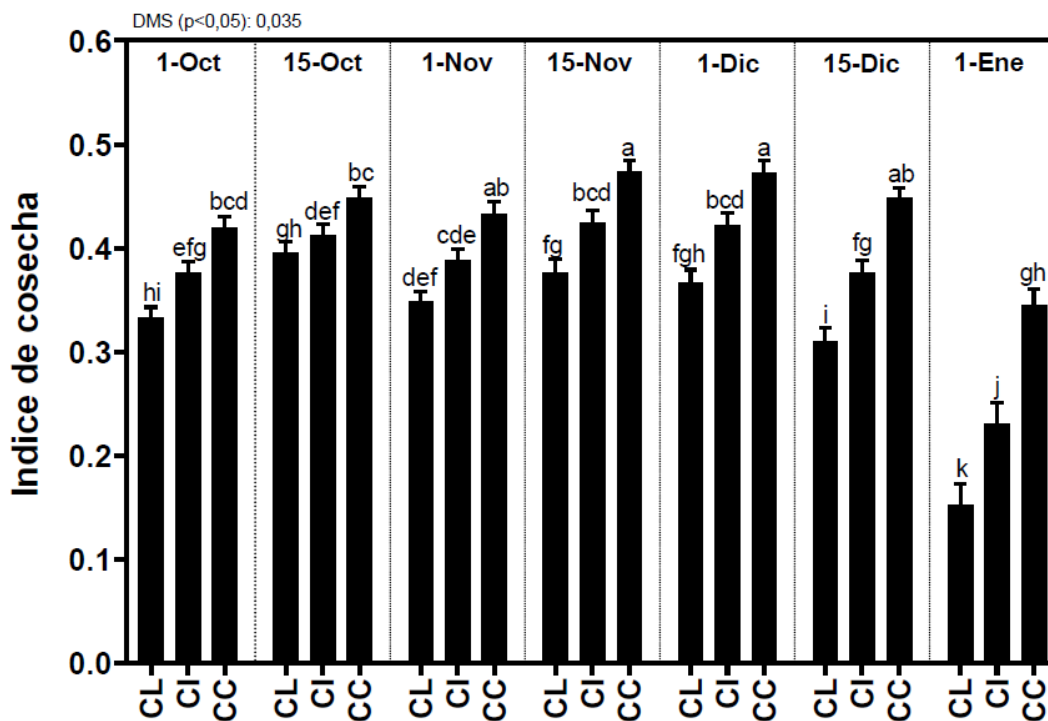
**Figura 3.13:** Rendimiento (kg ha<sup>-1</sup>) para años clasificados como Niño, Neutro y Niña en cada fecha de siembra explorada (1-Oct y 15-Oct, octubre; 1-Nov y 15-Nov, noviembre; 1-Dic y 15-Dic, diciembre; 1-Ene, enero). Las barras indican el error estándar de la media. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas al  $p < 0,05$  siendo la diferencia mínima significativa (DMS) de 912 kg ha<sup>-1</sup>.

La fecha de siembra también impactó significativamente sobre la biomasa acumulada al final del ciclo y sobre el índice de cosecha, explicando poco más del 50% de la variación en ambos atributos (Cuadro 3.9). Le siguió el efecto genotípico, con poco más del 30% de la variación explicada para ambos atributos (Cuadro 3.9). El tipo de año impactó sobre la biomasa final acumulada, y la única interacción significativa se detectó entre la fecha de siembra y el genotipo para índice de cosecha (Cuadro 3.9). En estos dos últimos casos, la variación explicada fue baja (3 y 4%, respectivamente; Cuadro 3.9).

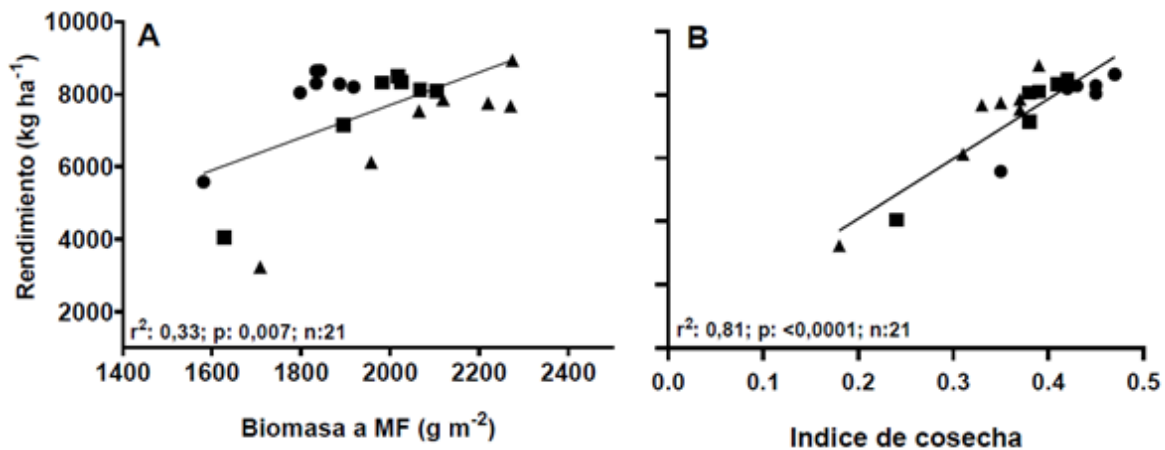
La biomasa acumulada fue mayor en las fechas tempranas y se redujo al atrasar la fecha de siembra, principalmente a partir del 1 de diciembre (Cuadro 3.10). El índice de cosecha, por su parte, fue máximo en fechas intermedias de noviembre y 1 de diciembre, reduciéndose en fechas más tempranas y tardías, principalmente en la fecha del 1 de enero (Cuadro 3.10). La biomasa acumulada fue significativamente mayor en el ciclo largo, intermedia en el ciclo intermedio y menor en el ciclo corto, y lo contrario se observó para el índice de cosecha (Cuadro 3.10). Los años clasificados como Niña y Niño mostraron mayor producción de biomasa comparado con los años Neutro, aunque la diferencia entre los años Niño y Neutro no fueron significativas (Cuadro 3.10). El IC fue mayor en años Neutro y Niña, y menor en años Niño (Cuadro 3.10).

La interacción fecha de siembra x genotipo detectada para el índice de cosecha se muestra en la Figura 3.14, y estuvo dada por una mayor estabilidad en el índice de cosecha ante cambios en la fecha de siembra en el genotipo de ciclo corto. El índice de cosecha se redujo de manera importante en el genotipo de ciclo intermedio y principalmente en el ciclo largo a partir de la fecha de mediados de diciembre (Figura 3.14). Las variaciones de rendimiento estuvieron mayormente asociadas a variaciones en el índice de cosecha ( $r^2$ :

0,81;  $p < 0,001$ ;  $n: 21$ ) respecto a variaciones en la biomasa final acumulada ( $r^2: 0,33$ ;  $p < 0,007$ ;  $n: 21$ ) (Figura 3.15).



**Figura 3.14:** Índice de cosecha para el genotipo de ciclo largo (CL), intermedio (CI) y corto (CC) en cada fecha de siembra explorada (1-Oct y 15-Oct, octubre; 1-Nov y 15-Nov, noviembre; 1-Dic y 15-Dic, diciembre; 1-Ene, enero). Las barras indican el error estándar de la media. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas al  $p < 0,05$ , siendo la diferencia mínima significativa (DMS) de 0,035.



**Figura 3.15:** Relación entre el rendimiento (kg ha<sup>-1</sup>) y la biomasa acumulada a madurez fisiológica (g m<sup>-2</sup>) (MF) (A) y el índice de cosecha (B) para el conjunto de fechas de siembra y genotipos. Los genotipos se identificaron como ciclo largo (triángulo), ciclo intermedio (cuadrado) ciclo corto (círculo).

**CAPÍTULO 4**  
**DISCUSIÓN**



#### **4. Discusión general**

A pesar de la importancia local del cultivo de sorgo, el conocimiento sobre prácticas de manejo que permiten optimizar los rendimientos es limitado. En este contexto, la producción de sorgo en general se realiza con un bajo nivel de tecnología, especialmente cuando se lo compara con otros cultivos (Brihet, 2017). Esta particularidad de la producción de sorgo se extiende también a otras partes del mundo (Fischer et al., 2014). La fecha de siembra es una práctica de manejo clave (Rodríguez et al., 2018; Hammer et al., 2014) y la presente tesis evaluó el impacto de la misma en combinación con genotipos de diferente largo de ciclo.

Los resultados de la presente tesis mostraron que la fecha de siembra tiene que ser definida junto con el largo de ciclo del genotipo, ya que existe una importante interacción entre ambos. Los experimentos a campo mostraron que los genotipos de ciclo largo maximizaron su rendimiento en fechas de siembra tempranas (mediados de octubre y noviembre), los intermedios en fechas intermedias (mediados de noviembre) y los genotipos cortos en siembras tardías (mediados de diciembre). Los resultados de las simulaciones en un rango mayor de fechas y condiciones ambientales fueron consistentes con estos resultados, y a la vez demostraron que existe una amplia ventana de siembra (desde el 1 de octubre al 15 de noviembre) donde es posible obtener altos rendimientos independientemente del largo de ciclo. A partir de esta fecha (15 de noviembre), se hace necesario elegir genotipos de ciclo más corto. Es importante mencionar que el amplio rango de fecha de siembra temprana no considera las limitaciones por bajas temperaturas durante las primeras etapas del ciclo (Anda y Pinter, 1994; Yu et al., 2004), algo que actualmente limita sembrar sorgo en fechas de principios de octubre. La caída del rendimiento con el

atraso en la fecha de siembra es similar a lo observado en otros cultivos como maíz (Cirilo y Andrade, 1994) y soja (Di Mauro et al., 2018). Las fechas de principios de enero reducen drásticamente el rendimiento, principalmente por una interrupción del ciclo del cultivo por bajas temperaturas, lo cual limita el crecimiento de los granos (Cirilo y Andrade, 1994).

El atraso en la fecha de siembra acortó el ciclo del cultivo en todos los genotipos, de manera similar a lo observado en otros cultivos de similar respuesta al desarrollo como maíz (Cirilo y Andrade, 1994). Esta reducción se debió a un acortamiento de los días a antesis, que fue similar en todos los genotipos. La duración en tiempo térmico a antesis no se modificó con la fecha de siembra, lo que indica que los materiales evaluados son prácticamente insensibles al fotoperíodo. Aunque el sorgo por su zona de origen es una planta de día corto y con importante sensibilidad al fotoperíodo hasta cambio de ápice (Doggett, 1988), el mejoramiento ha reducido drásticamente esta sensibilidad para adaptar el cultivo a ambientes templados (Stephens et al., 1967; Rooney, 2004). De esta manera, las diferencias en el tiempo a antesis observadas en la presente tesis se deben principalmente al efecto de la temperatura.

Ninguna fecha de siembra y ciclo exploró fechas de antesis durante el mes de diciembre. Las fechas de octubre en general florecieron en enero, las fechas de noviembre florecieron a principios de febrero y las fechas de diciembre florecieron a fin de febrero. Esto es diferente a lo que ocurre en maíz, donde fechas de principios de octubre en la zona núcleo de producción del país logran floraciones en diciembre. Por el contrario, las fechas de diciembre logran floraciones en febrero en ambos cultivos. Estas diferencias podrían estar asociadas a diferencias en temperatura base (mayor en sorgo que en maíz; Hammer et al., 1993; Ritchie y NeSmith, 1991) que limitan el desarrollo en mayor medida en sorgo ante bajas temperaturas en fechas tempranas. Por el contrario, en fechas más tardías, la

ausencia de respuesta al fotoperíodo en sorgo aceleraría su desarrollo en mayor medida respecto a maíz, especie que presenta cierta sensibilidad al fotoperíodo hasta su cambio de ápice (Otegui et al., 1996). Los rendimientos se maximizaron cuando la antesis del cultivo tuvo lugar en algún momento durante febrero, lo que es consistente con el criterio de evitar la coincidencia del período crítico durante el mes de enero, momento del año con alta demanda ambiental y probabilidad de estrés hídrico (Maddonni, 2012).

Las variaciones en el rendimiento estuvieron principalmente asociadas a variaciones en el número de granos por unidad de superficie, de manera similar a lo observado en maíz ante atrasos en la fecha de siembra (Cirilo y Andrade, 1994). Como se ha observado en otros cultivos (Fischer, 1985; Andrade et al., 1999), el número de granos por unidad de superficie en sorgo está fuertemente asociado con la tasa de crecimiento del cultivo alrededor de floración (van Oosterom y Hammer, 2008). Sin embargo, en la presente tesis no se observó relación entre el número de granos fijados y la tasa de crecimiento del cultivo alrededor de floración cuando se consideró la totalidad de los tratamientos. La fecha de siembra no tuvo impacto en este atributo en la mayoría de los genotipos estudiados, probablemente porque el atraso en la misma expone gran parte del período crítico (pre-antesis) a mayor temperatura y radiación incidente, similar a lo observado en maíz (Cirilo y Andrade, 1994). La tasa de crecimiento del cultivo en el período crítico se midió únicamente durante un año experimental, lo que también limita la consistencia de los resultados. Sí sugieren que pudo haber una importante proporción de granos abortados durante la primera etapa del llenado de grano (Prasad et al., 2015). En este caso, futuros estudios que consideren por separado el crecimiento durante pre- y post-antesis podrían ser de utilidad.

El peso de mil granos y la duración del llenado mostró una fuerte componente genotípica, como ya se ha observado en esta y otras especies (Egli, 1990; Heiniger et al., 1993; Gambin y Borrás, 2005). Como consecuencia de la exposición a menores temperaturas promedio durante el llenado de grano, la duración en días aumentó con el atraso en la fecha de siembra desde octubre a diciembre. Fechas más tardías, sin embargo, pueden provocar una interrupción del llenado de grano, como se observó en las simulaciones para fechas extremas de mediados de diciembre y enero. Este efecto, sin embargo, dependió del largo de ciclo y se atribuye a las bajas temperaturas durante el fin del llenado. Por debajo de una temperatura de 6°C durante al menos 1 día, el modelo simula una reducción lineal en el índice de área foliar. La duración del llenado cesa cuando el índice de área foliar alcanza un valor de cero (Hammer et al., 2010). Los resultados de esta tesis mostraron que las bajas temperaturas durante el llenado pueden limitar el crecimiento de los granos en una proporción creciente de años al atrasar la fecha de siembra y/o incrementar el largo de ciclo del genotipo. A la vez, permitió explorar el límite de fecha de siembra para este cultivo.

El rendimiento puede ser definido como el producto entre la biomasa acumulada al fin de ciclo del cultivo y el índice de cosecha. Un estudio reciente sobre la ganancia genética de sorgo en Argentina mostró que ambas estrategias, ya sea una mayor producción de biomasa o un mayor índice de cosecha, son factibles de encontrar en materiales de alto rendimiento (Gizzi y Gambin, 2016), de manera similar a lo encontrado en estudios en otros ambientes (Hammer y Broad, 2003; Prihar y Stewart, 1991). Para una misma fecha de siembra, los materiales de ciclo largo tienden a producir mayor biomasa con menor índice de cosecha, mientras que lo contrario se observa en materiales de ciclo más corto (Hammer

y Broad, 2003). Similares resultados se observaron en la presente tesis. Materiales de ciclo intermedio logran optimizar ambos atributos, y con ello el rendimiento.

Parte de las variaciones de rendimiento estuvieron asociadas con variaciones en la biomasa final acumulada. La biomasa acumulada a madurez fue mayor en genotipos de ciclo largo y en fechas de siembra tempranas. Esto posiblemente sea consecuencia de una mayor duración del ciclo del cultivo, que permite alcanzar una mayor radiación incidente interceptada y acumulada, esto explicaría la reducción del índice de cosecha, similar a lo encontrado en maíz ante cambios en la fecha de siembra (Cirilo y Andrade, 1994). Fechas de siembra tardías (a partir de diciembre), sin embargo, posiblemente reduzcan la radiación incidente e interceptada acumulada durante todo el ciclo del cultivo, con la consecuente reducción del rendimiento. De esta manera los genotipos de ciclo corto reducen en mayor proporción la biomasa generada a madurez en comparación con los ciclos más largos. Las variaciones en el rendimiento también estuvieron asociadas con variaciones en el índice de cosecha. El índice de cosecha se redujo significativamente en la fecha de mediados de diciembre en los experimentos a campo en todos los materiales, de manera similar a lo observado en girasol (de la Vega y Hall, 2002). Al analizar un mayor rango de fechas de siembra con las simulaciones, el índice de cosecha mostró ser máximo en las fechas intermedias de noviembre y principios de diciembre, reduciéndose en fechas más tempranas y tardías, principalmente en la fecha del 1 de enero. Esta respuesta a la vez dependió del genotipo, siendo mayor la caída con el largo de ciclo del genotipo. El impacto de las bajas temperaturas durante el llenado probablemente explique esta caída en los índices de cosecha en fecha más tardías (Bange et al., 1998).

El índice de cosecha mostró ser llamativamente bajo en el experimento a campo, mientras que los datos simulados muestran valores comparables a los obtenidos

experimentalmente por otros autores (Prihar y Stewart 1991; Carcedo et al., 2017). Esto podría deberse a limitaciones hídricas durante la pre-floración del cultivo, que fueron evidentes observando los datos de fenología, donde la antesis se atrasó. En sorgo, limitaciones hídricas durante la pre-floración en el cultivo provocan un atraso en el tiempo a antesis (Wright et al., 1983; Craufurd y Peacock, 1993), atributo que es conocido localmente como “latencia”. Este atraso se detecta tanto en días como en tiempo térmico. El año 2 de experimentación mostró un atraso generalizado en la floración de unos 180 °Cd (alrededor de 10 días), que podría explicar en parte el bajo índice de cosecha registrado en este experimento. La presencia de limitaciones hídricas alrededor de floración impacta en el número final de granos, dada una menor acumulación de materia seca en la panoja, que permitiría el aborto de las flores (van Oosterom y Hammer, 2008). Las diferencias en el tiempo a antesis también se observaron en los datos simulados, donde los años clasificados como Niño florecieron con anticipación (2 días antes) que aquellos años clasificados como Niña o Neutro. La latencia es un fenómeno poco estudiado, pero existen evidencias de que se expresa frecuentemente en nuestros sistemas productivos, caracterizados por tener alta ocurrencia de estrés hídrico en pre-floración (Carcedo y Gambin, 2019). 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. En este sentido, es importante destacar que la simulación de la latencia en el modelo ASPIM es actualmente limitada, por lo que los rendimientos en fechas tardías podrían ser significativamente menores a las simulados, sobre todo en genotipos de ciclo largo e intermedio donde la latencia se expresa de manera significativa (Pardo y Gambin, 2014).

El fenómeno ENSO influencia el régimen de temperaturas y precipitaciones en la región pampeana (Podestá et al., 1999), impactando sobre el rendimiento de varios cultivos

(Garnett y Khandekar, 1992). La elección de la fecha de siembra pretende ubicar los períodos más críticos del cultivo bajo condiciones de crecimiento óptimas, entre las que se incluye la condición hídrica (Otegui y López Pereira, 2003). En Argentina, se encontraron asociaciones entre altos rendimientos de maíz y sorgo en años Niño, probablemente por una mayor abundancia de precipitaciones entre los meses de octubre y febrero (Podestá et al., 1999). Los resultados de la presente tesis mostraron que los rendimientos se maximizaron en fechas de siembra tempranas (1 de octubre al 1 de noviembre) en años Niño, mientras que lo hicieron en fechas más tardías (de noviembre al 1 de diciembre) en años Niña o Neutro. Esta respuesta fue independiente del largo de ciclo del cultivo explorado, y sugiere que la fecha de siembra óptima varía con el ambiente hídrico explorado.

Llamativamente, los años Niño no mostraron rendimientos promedio superiores a los años Niña o Neutro a través de las fechas de siembra y genotipos explorados. Esto concuerda con trabajos previos en el tema, donde la asociación entre el rendimiento y el fenómeno ENSO ha sido menor en sorgo que en maíz (Podestá et al., 1999). El sorgo es una especie tolerante a estrés hídrico, sobre todo cuando se la compara con maíz (Doggett, 1988; Camargo y Hubbard, 1999). Su tolerancia a la sequía se debe a un conjunto de características, como un sistema radical denso y prolífico capaz de extraer agua en profundidad (Wright et al., 1983; Singh y Singh, 1995), su habilidad de mantener los estomas abiertos a bajo potencial agua a través de ajuste osmótico (Ludlow y Muchow, 1990) y su habilidad de atrasar el desarrollo a través de la latencia (Wright et al., 1983). La estabilidad del rendimiento de sorgo ha sido y es comparativamente mayor a la de maíz (Parra et al., 2020), lo que también podría explicar la falta de asociación entre los rendimientos y el tipo de año.

#### 4.1. Contraste de las hipótesis

La primera hipótesis planteada en la tesis indicaba que *“Los ciclos largos o intermedios maximizan el rendimiento en fechas tempranas (octubre) debido a una mayor producción de biomasa a madurez, mientras que los ciclos cortos lo hacen en fechas tardías (diciembre) dado por un mayor índice de cosecha. Las fechas de siembra de noviembre no son las óptimas para ningún largo de ciclo del cultivo”*.

Esta hipótesis se acepta parcialmente, ya que se demostró una interacción entre la fecha de siembra y el largo de ciclo. Los ciclos largos maximizaron el rendimiento en fechas más tempranas (octubre) a causa de una mayor producción de biomasa y los ciclos cortos en fechas más tardías (principios de diciembre), debido a una menor caída en el índice de cosecha, aunque los ciclos intermedios lo hicieron en fechas de siembra intermedias (noviembre). De hecho, son las fechas de noviembre las que permiten maximizar el rendimiento a través de optimizar la biomasa acumulada y el índice de cosecha. Las fechas de noviembre ubican el período crítico del cultivo durante el mes de febrero, con posterioridad al mes de mayor demanda ambiental y menor probabilidad de estrés hídrico.

La segunda hipótesis planteada indicaba que *“en años con buena disponibilidad hídrica en etapas tempranas del cultivo o clasificados como Niño o Neutro, los máximos rendimientos se alcanzarán con ciclos largos en fechas de siembra temprana (octubre), mientras que, en años con disponibilidad hídrica deficiente, los máximos rendimientos se alcanzarán con ciclos cortos en fechas de siembra tardías (diciembre)”*.



Esta hipótesis también se acepta parcialmente, ya que existió interacción entre la fecha de siembra con el tipo de año. Los rendimientos son máximos en fechas tempranas (1 de octubre al 1 de noviembre) en años Niño, mientras que esto ocurre en fechas intermedias-tardías en años Niña o Neutro (1 de noviembre al 1 de diciembre). Sin embargo, esto fue independiente del largo de ciclo explorado.

## **4.2. Futuras líneas de investigación**

En base a la discusión previa, las líneas de interés para futuras investigaciones derivadas de esta tesis son las siguientes:

**4.2.1. *Impacto de las bajas temperaturas en etapas del cultivo:*** las fechas de siembra de principios y mediados de octubre han mostrado ser una alternativa de altos rendimientos, particularmente en ciclos largos. La principal limitación en estas fechas son las bajas temperaturas en etapas tempranas del cultivo. Explorar la variabilidad genotípica en este aspecto puede ser importante en este sentido. La información sería relevante también para zonas de producción de sorgo ubicadas a mayores latitudes. A su vez estudiar la variabilidad genotípica a la sensibilidad a bajas temperaturas en etapas avanzadas del ciclo también sería interesante, las bajas temperaturas durante etapas avanzadas del ciclo han mostrado ser un problema en fechas tardías, por lo que explorar si existe distinta sensibilidad entre los genotipos a bajas temperaturas podría ser un aspecto interesante para explorar.

**4.2.2. Respuesta de los genotipos comerciales al fotoperíodo:** actualmente no existe una caracterización clara de cómo responden los materiales comerciales al fotoperíodo. Esto puede ser un problema para recomendar genotipos ante atrasos en la fecha de siembra, donde genotipos con respuesta al fotoperíodo implicarían un atraso importante en la floración, con la consecuente reducción de los rendimientos. Esta caracterización sería importante, no sólo para recomendar materiales sino también como información fundamental a la hora de usar un modelo de simulación.

**4.2.3. Materiales ultra-cortos como opción en fechas muy tempranas o muy tardías:** explorar un rango mayor de variabilidad en largo de ciclo que lo explorado en la presente tesis puede ser un aspecto interesante en fechas muy tempranas o muy tardías. En el primero caso podrían implicar floraciones de diciembre, cuando las condiciones ambientales en general son más favorables durante el período crítico del cultivo. En el segundo caso, como opción ante fechas extremas de siembra. En cualquier caso, sería importante mediciones más exhaustivas de interceptación de radiación y producción de biomasa, a fin de entender el impacto sobre el rendimiento.

**4.2.4. Experimentos detallados bajo riego:** la presente tesis evaluó diversidad de ambientes, ya que ambos experimentos se realizaron en secano y las simulaciones implicaron años con diferente nivel de precipitaciones. Sin embargo, experimentos bajo riego permitirían un mejor entendimiento de las bases mecánicas de la interacción fecha de siembra x largo de ciclo, al remover el impacto que puede tener un estrés hídrico en la fenología o crecimiento y rendimiento del cultivo. En este sentido, mediciones detalladas de interceptación de

radiación y producción de biomasa son relevantes para entender el impacto de la fecha de siembra en la generación del rendimiento.

**4.2.5.** *Latencia y su interacción con la fecha de siembra:* como fuera discutido previamente, este es un aspecto relevante y aún poco estudiado. Es importante caracterizar los materiales en términos de latencia, ya que materiales con latencia podrían no ser recomendados ante atrasos en la fecha de siembra. Los modelos de simulación tampoco parecen simular adecuadamente este aspecto, por lo que mejoras en este sentido serían muy importante en ambientes templados donde la latencia se expresa de manera frecuente.

**4.2.6.** *Uso de modelo APSIM como herramienta para explorar distintas opciones de manejo e interacciones genotipo x ambiente:* ante un cultivo donde la inversión en investigación es muy baja comparada con otros cultivos, disponer de un modelo de simulación que permita explorar virtualmente opciones de genotipo x ambiente x manejo es muy positivo. El uso de esta herramienta debería aumentar, lo que debería además repercutir en mejoras de la misma (ejemplo, más cantidad de ambientes o condiciones validadas).

**CAPÍTULO 5**  
**CONCLUSIONES**

## 5. Conclusiones

En la presente tesis se evaluó el impacto de un amplio rango de fechas de siembra y genotipos de diferente ciclo sobre el rendimiento y otros atributos del cultivo de sorgo, generando información básica y clave para el manejo del cultivo, actualmente limitada para nuestros sistemas productivos. Los resultados mostraron una importante interacción entre la fecha de siembra y el largo del ciclo del genotipo, por lo que la fecha de siembra tiene que ser definida junto con el genotipo, considerando los pronósticos de lluvias para la campaña. A pesar de esto, fue posible definir una amplia ventana de siembra con altos rendimientos independientemente del ciclo, lo que también simplifica el manejo del cultivo. Ante pronósticos de lluvias favorables, siembras tempranas durante el mes de octubre serían la mejor alternativa. Por el contrario, ante pronósticos menos beneficiosos, siembras durante el mes de noviembre y principios de diciembre lograrían los máximos rendimientos. Fechas de principios de enero no serían recomendadas para la zona.

Este avance en el conocimiento de sorgo contribuye a la toma de decisiones de manejo en la región central de Argentina, sobre todo cuando se tienen en cuenta que la fecha de siembra y el genotipo son prácticas de manejo claves en cualquier cultivo. La correcta elección de la fecha de siembra y el largo de ciclo contribuyen a reducir la brecha entre el rendimiento potencial y el alcanzable por el productor. A su vez, los resultados de esta tesis tienen implicancias útiles en el mejoramiento genético del cultivo, como la selección de materiales tolerantes a bajas temperaturas en etapas iniciales o finales logrando rendimientos económicamente viables. También tiene implicancias en la mejora del modelo de simulación, por ejemplo, a través de la mejora en la predicción de la fenología (incorporando el rasgo de latencia) ante limitaciones hídricas.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez, R., Lavado, R.S. 1998. Climate, organic matter and clay content relationships in the Pampa and Chaco soils, Argentina. *Geoderma*, 83:127-141.
- Anda, A., Pinter, L. 1994. Sorghum germination and development as influenced by soil temperature and water content. *Agron. J.*, 86:621–624.
- Andrade, F.H., Vega, C., Uhart, S., Cirilo, A., Cantarero, M., Valentinuz, O. 1999. Kernel number determination in maize. *Crop Sci.*, 39:453–459.
- Assefa, Y., Staggenborg, S.A. 2010. Grain sorghum yield with hybrid advancement and changes in agronomic practices from 1957 through 2008. *Agron. J.*, 102:703–706.
- Bange, M.P., Hammer, G.L., Rickert, K.G. 1998. Temperature and sowing date affect the linear increase of sunflower harvest index. *Agron. J.*, 90:324-328.
- Boote, K.J., Jones, J.W., Pickering, N.B. 1996. Potential uses and limitations of crop models. *Agron. J.*, 88:704-716.
- Blum A. 1970. Effect of Planting Density and Growth Duration on Grain Sorghum Yield under Limited Water Supply. *Agron. J.*, 62:333-336.
- Brihet, J., Gayo, S. 2016. Simposio Sorgo AIANBA. Bolsa de cereales. Disponible en URL: [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 campana gruesa 2017-2018. Departamento de Investigación y Prospectiva. Bolsa de Cereales. Disponible en URL: [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).

- Camargo, M.B.P., Hubbard, K.G. 1999. Drought sensitivity indices for sorghum crop. *J. Prod. Agric.*, 12:312–316.
- Carcedo, A.J.P., Pardo, P.A., Gambin, B.L. 2017. Secondary traits explaining sorghum genotype by environment interactions for grain yield. *Crop Pasture Sci.*, 68:599–608.
- Carcedo, A.J.P., Gambin, B.L. 2019. Sorghum drought and heat stress patterns across the Argentina temperate central region. *Field Crops Res.* 241:1-12.
- Cárcova, J., Abeledo, L.G., López Pereira, M. 2003. Análisis de la generación del rendimiento: crecimiento, partición y componentes. En Satorre, E.H., Benech Arnold, R.L., Slafer, G.A., de la Fuente, E.B., Miralles, D.J., Otegui, M.E., Savin, R. *Producción de Granos Bases funcionales para su manejo* (pp. 74-98). Editorial Facultad de Agronomía.
- Carrasco N., Zamora M., Melin A., Bolleta A., Marinissen J., Gigón R., Forján H., Lagrange S., Campos P., Manso L., Cicchino M. 2011. *Manual de sorgo*. Capítulo: *Implantación* (pp. 29). Editorial INTA 2011.
- Chapman, S., Cooper, M., Podlich, D., Hammer, G.L. 2003. Evaluating plant breeding strategies by simulating gene action and dryland environment effects. *Agron. J.*, 95:99-113.
- Cirilo, A.G., Andrade, F.H. 1994. Sowing Date and Maize Productivity: I. Crop Growth and Dry Matter Partitioning. *Crop Sci.*, 34:1039-1043.
- Craufurd, P.Q., Peacock, J.M. 1993. Effect of heat and drought stress on sorghum (*Sorghum bicolor*). II. Grain yield. *Exp. Agric.*, 29:77–86.
- de la Vega, A.J., Hall, J.A. 2002. Effects of Planting Date, Genotype, and Their Interactions on Sunflower Yield: I. Determinants of Oil-Corrected Grain Yield. *Crop Sci.*, 46:1191-1201.

- de la Veja, A.J. y de la Fuente, E.B. 2003. Elección de genotipo. En Satorre, E.H., Benech Arnold, R.L., Slafer, G.A., de la Fuente, E.B., Miralles, D.J., Otegui, M.E., Savin, R. Producción de Granos Bases funcionales para su manejo (pp. 319-349). Editorial Facultad de Agronomía.
- Di Mauro, G., Cipriotti, P. A., Gallo, S., Rotundo, J.L. 2018. Environmental and management variables explain soybean yield gap variability in Central Argentina. *Eur. J. Agron.*, 99:186–194.
- Dirección de Biotecnología, Secretaría de Valor Agregado, Secretaría de Agroindustria de la República Argentina. 2018. Disponible en URL: <http://www.minagri.gob.ar/sitio/areas/biotecnologia/ogm/>.
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L.A., Tablada E.M., Robledo C.W. 2008. Infostat, Manual del usuario. Supuestos del ANAVA (pp. 113).
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L.A., Tablada E.M., Robledo C.W. Versión 2017. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Doggett, H. 1988. Sorghum. Tropical Agricultural Series, Second edition. Longman Group UK Limited.
- Egli, D.B. 1990. Seed water relations and the regulation of the duration of seed growth in soybean. *J. Exp. Bot.*,41:243-248.
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2016. El estado mundial de la agricultura y la alimentación.
- FAOSTAT, Food and Agricultural Organization of the United Nations Statistics. 2016. Disponible en URL: <http://faostat3.fao.org/home/E>.
- FAOSTAT, Food and Agricultural Organization of the United Nations Statistics. 2019. Disponible en URL: <http://faostat3.fao.org/home/E>.



- Fischer, R.A. 1985. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar irradiation and temperature. *J. Agrc. Sci. (Cambridge)*, 105:447-461.
- Fischer, R. A., Byerlee, D., Edmeades, G. 2014. Crop yields and global food security: will yield increase continue to feed the world? ACIAR Monograph No. 158. Australian Centre for International Agricultural Research, Canberra.
- Flores, F., Parodi, B. 2011. Maíces Bt: manejo de la resistencia de los insectos blanco y nuevos eventos disponibles. EEA INTA Marcos Juárez, Argentina.
- Foley, J.A., 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, P., 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. y Belotti, L. 2008. Agromercado: Aspectos de manejo y fertilización nitrogenada para el sorgo granífero. Cuadernillo clásico de sorgo N° 148.
- Gambin, B.L., Borrás, L. 2005. Sorghum kernel weight: growth patterns from different positions within the panicle. *Crop Sci.*, 45:553-561.
- Gambin, B.L., & Borrás, L. 2007. Plasticity of sorghum kernel weight to increased assimilate availability. *Field Crops Res.*, 100:272-284.
- Gambin, B.L., Magg, C., Vellaz, O. 2013. Efecto de cambios en la densidad y espaciamento sobre el rendimiento de sorgo. *Revista Técnica en Siembra Directa Maíz y Sorgo*. AAPRESID.
- Gambin, B.L. 2015. Explorando brechas de rendimiento en sorgo. *Revista Técnica*. AAPRESID.

- Garnett, E.R., Khandekar, M.L. 1992. The impact of large-scale atmospheric circulations and anomalies on Indian monsoon droughts and floods and on world grain yields—A statistical analysis. *Agric. For. Meteor.*, 61:113–128.
- Gizzi, G., Gambin, B.L. 2016. Eco-physiological changes in sorghum hybrids released in Argentina over the last 30 years. *Field Crops Res.*, 188:41-49.
- Global Yield Gap Atlas. 2020. Disponible en URL: <http://www.yieldgap.org/>.
- Hammer, G.L., Carberry, P.S., Muchow, R.C. 1993. Modelling genotypic and environmental control of leaf area dynamics in grain sorghum. *Field Crops Res.*, 33:293-310.
- Hammer, G.L., Hansen, J.W., Phillips, J.G., Mjelde, J.W., Hill, H., Love, A., Potgieter, A. 2001. Advances in application of climate prediction in Agricultura. *Agric. Syst.*, 70:515–553.
- Hammer, G.L., Broad, I.J. 2003. Genotype and environmental effects on dynamic of harvest index during grain filling in sorghum. *Agron. J.*, 95:199-206.
- Hammer, G.L., Jordan, D.R. 2007. An integrated systems approach to crop improvement. In: Spiertz, J.H.J., Struik, P.C., van Laar, H.H., eds. *Scale and complexity in plant systems research: gene–plant–crop relations*. Wageningen UR–Frontis Series No. 21. Dordrecht, The Netherlands Springer, 45–61.
- 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 Sci.*, 65:614–626.
- Heiniger, R.w., Vanderlip, R.L., Kofoid K.D. 1993a. Caryopsis weight patterns within the sorghum panicle. *Crop Sci.*, 33:543-549.
- INTA. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. 2017. Sistema de información y gestión agrometeorológica. (EEA) INTA Pergamino. Disponible en URL: <https://siga2.inta.gov.ar/>.
- INTA. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. 2018. GeoInta: Infraestructura de datos especiales de INTA. Disponible en URL: <https://geointa.inta.gov.ar/>.
- Jones, J.W., Keating, B.A., Porter, C.H. 2001. Approaches to modular model development. *Agric. Syst.*, 70:421-443.
- Jourdan, M.B., Schwartz, R., McInees, K.J., Howell, T., Morgan, C.L.S. 2018. Deficit irrigation effects on yield and yield components of grain sorghum. *Agricultural Water Management*, 203:289-296.
- Kumar, S.R., Hammer, G.L., Broad, I. Harland, P., Mc Lean, G. 2009. Modelling environmental effects on phenology and canopy development of diverse sorghum genotypes. *Field Crops Res.*, 111:157-165.
- Ludlow, M.M., Muchow, R.C. 1990. A Critical evaluation of traits for improving crop yields in water-limited environments. *Adv. Agron.*, 43:107-153.
- Maddonni, G.A. 2012. Analysis of the climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina—a probabilistic approach. *Theor. Appl. Climatol.* 107:325–345.

- Meinke, H., Baethgen, W.E., Carberry, P.S., Donatelli, M., Hammer, G.L., Selvaraju, R., Stockle, C.O. 2001. Increasing profits and reducing risks in crop production using participatory systems simulation approaches. *Agric. Syst.*, 70:493-513.
- McCown, R.L., Hammer, G.L., Hargraves, J.N.G., Holzworth, D.P., Freebairn, D.M. 1996. APSIM: a novel software system for model development, model testing, and simulation in agricultural systems research. *Agric. Syst.*, 50:255-271.
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. 2016. Disponible en URL: <http://www.siaa.gov.ar/>.
- Mohammad, S., and Francis, C.A. 1983. Yield Stability in Relation to Maturity in Grain Sorghum. Paper N°. 6924, Journal Series, Nebraska Agric.
- Mohammad, S., Francis, C.A. and Rajewski, J.F. 1984. Maturity Effects on Genotypes X Environment Interactions in Grain Sorghum. *Agron. J.*, 76:55-58.
- Monzón, J.P., Sadras, V.O., Andrade, F.H. 2012. Modelled yield and water use efficiency of maize in response to crop management and Southern Oscillation Index in a soil-climate transect in Argentina. *Field Crops Res.*, 130:8-18.
- NASA, 2017. Prediction of Worldwide Energy Resource. Disponible en URL: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>.
- National Centers for environmental information. 2019. Disponible en URL: <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/soi/>.
- Otegui, M. E., Ruiz, R. A., Petruzzini, D. 1996. Modeling hybrid and sowing date effects on potential grain yield of maize in a humid temperate region. *Field Crops Res.*, 47:167-174.

- Otegui, M.E., López Pereira, M. 2003. Fecha de siembra. En Satorre, E.H., Benech Arnold, R.L., Slafer, G.A., de la Fuente, E.B., Miralles, D.J., Otegui, M.E., Savin, R. Producción de Granos Bases funcionales para su manejo (pp. 259-275). Editorial Facultad de Agronomía.
- Pardo, P.A., Gambin, B.L. Diferencias entre híbridos de sorgo en latencia. Revista Técnica en Siembra Directa Maíz y Sorgo 2014. AAPRESID. Pág. 35-42.
- Parra, G., Borrás, L., Gambin, G.L. 2020. Maize long-term genetic progress explains current dominance to sorghum in Argentina. Eur. J. Agron., en revisión: EURAGR8880.
- PAS. Panorama Agrícola Semanal, 2015. Bolsa de Cereales, Argentina. Disponible en URL: <http://www.bolsadecereales.org/>.
- Passioura, J.B. 1996. Simulation models: science, snake oil, education, or engineering? Agron. J., 88:690-694.
- Pepper, G.E., Prine, G.M. 1972. Low light intensity effects on grain sorghum at different stages of growth. Crop Sci., 12:590-593.
- Pfeiffer, B.K., Pietsch, D., Schnell, R.W., Rooney, W.L. 2019. Long-term selection in hybrid sorghum breeding programs. Crop Sci., 59:150-164.
- Podestá, G.P., Messina, C.D., Grondona, M.O., Magrin, G.O. 1999. Associations between grain crop yields in central-eastern Argentina and El Niño-Southern oscillation. American Meteorological Society, 38:1488-1498.
- Prasad, P.V.V., Manduraimuthu, D., Ramasamy, P., Ciampitti, I. 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 Sci., 6:1-11.

- Prihar, S.S., Stewart, B.A. 1991. Sorghum Harvest Index in Relation to Plant Size, Environment, and Cultivar. *Agron. J.*, 83:603-608.
- Reboratti, C. 2010. Un mar de soja: la nueva agricultura en Argentina y sus consecuencias. *Rev. geogr. Norte Gd.*, 45:63-76.
- Reddy, B.V., Ashok Kumar, A., Sharma, H.C., Srinivasa Rao, P., Blummel, M., Ravinder Reddy, C., Sharma, R., Deshpande, S., Saikat, D., Dinakaran, E. 2012. Sorghum improvement (1980–2010): Status and way forward. *Journal of SAT Agric. Res.*, 10:1-14.
- Ritchie, J.T., NeSmith, D.S. 1991. Temperature and crop development. In: Hanks, J., Ritchie, J.T. (Eds.), *Modelling Plant and Soil Systems*. Agronomy Monogram, 31.ASA, CSSA, an SSSA, Madison, WI, pp. 5–29.
- Rodriguez, 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. *Sci. Rep.*, 8:2231.
- Rooney, W.L. 2004. Sorghum improvement integrating traditional and new technology to produce improved genotypes. Department of Soil and Crop Science, Texas A & M University, USA. *Advances in Agron.*, Volume 83.
- Sadras, V.O., Fereres, E., Borrás, L., Garzo, E., Moreno, A., Araus, J.L., & Fereres, A. 2020. Aphid Resistance: An Overlooked Ecological Dimension of Nonstructural Carbohydrates in Cereals. *Frontiers in Plant Sci.*, 11:937.
- Singh, B.R., Singh, D.P. 1995. Agronomic and physiological responses of sorghum, maize and pearl millet to irrigation. *Field Crops Res.*, 42:57-67.
- Soil Survey Staff, 1994. *Keys to Soil Taxonomy*. 6th ed. U.S. Government Printing Office. Washington. D.C. 306 pp.

- Stephens, J. C., Miller, F. R., and Rosenow, D. T. 1967. Conversion of alien sorghum to early combine types. *Crop Sci.*, 7:396.
- Taylor, J.R.N. 2003. Overview: Importance of sorghum in Africa in P.S. Belton and J.R.N.Taylor, eds. Disponible en URL: <http://www.afripro.org.uk/papers/paper01Taylor.pdf>.
- Trucillo V., Ortiz D. 2012. Criterios para la elección de híbridos, fecha de siembra, densidad y distanciamiento entre hileras. *Revista CREA Sorgo*, pág. 19.
- van Oosterom, E.J., Hammer, G.L. 2008. Determination of grain number in sorghum. *Field Crops Res.*, 108:259-268.
- Vanderlip, R.L., Reeves, H.E. 1972. Growth stages of sorghum [*Sorghum bicolor*, (L.) Moench]. *Agron. J.*, 64:13-16.
- Williams, W.P., Sagers, J.B., Hanten, J.A., Davis, FM., Buckley, P.M. 1997. Transgenic corn evaluated for resistance to fall armyworm and southwestern corn borer. *Crop Sci.*, 37:957–962.
- Woli, P., Paz, J.O., Hoogenboom, G., Garcia, A., Fraisse, C.W. 2013. The ENSO effect on peanut yield as influenced by planting date and soil type. *Agric. Syst.*, 121:1-8.
- Wright, G.C., Smith, R.C.G., McWilliam, J.R. 1983. Differences between two grain sorghum genotypes in adaptation to drought stress. I. Crop growth and yield responses. *Aust. J. Agric. Res.*, 34:615-626.
- 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 Crops Res.*, 85:21-30.
- 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

**Cuadro A.1:** Días de siembra a antesis (S-A), días de antesis a madurez fisiológica (A-MF), Tiempo térmico de siembra a antesis ( $^{\circ}\text{Cd}$ ) (TT S-A), tiempo térmico de antesis a madurez fisiológica ( $^{\circ}\text{Cd}$ ) (TT A-MF), rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), número de granos  $\text{m}^{-2}$  y peso de 1000 granos (g) para 9 híbridos de sorgo de diferente ciclo (Largo; Inter, intermedio;Corto) (G) sembrados en distintas fechas de siembra (Oct, octubre; Nov, noviembre; Dic, diciembre) (FS) durante dos años (año 1: 2015-16; año 2: 2016-17).

Genotipo	Ciclo	FS	Duración S-A		Duración A-MF		Rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ )		Número de granos $\text{m}^{-2}$		Peso de 1000 granos (g)					
			Días	$^{\circ}\text{Cd}$	Días	$^{\circ}\text{Cd}$	1	2	1	2	1	2				
												Año				
			1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2		
DK64T	Largo	Oct	88	85	854	1046	29	38	388	536	5848	5738	23618	22215	24,9	26,2
		Nov	70	85	829	1090	39	37	483	465	7114	5521	27082	21694	26,3	25,6
		Dic	65	72	846	1022	43	52	452	470	3928	1973	16009	7728	24,5	25,5
MS108	Largo	Oct	99	95	1015	1174	35	38	447	514	5780	5684	18971	19690	30,6	28,8
		Nov	87	92	1039	1184	29	34	327	407	6785	5713	23565	19678	28,7	29,0
		Dic	74	87	961	1161	34	49	333	412	1892	2258	7456	8647	24,9	26,1
VDH422	Largo	Oct	100	98	1033	1212	29	38	378	504	5020	6249	21896	26368	23,1	24,2
		Nov	91	99	1095	1293	24	41	267	329	3975	4799	15868	19199	25,6	25,7
		Dic	85	95	1075	1237	31	41	299	335	2686	2308	10457	9370	25,6	24,8
DK61T	Inter	Oct	88	81	855	982	34	40	461	563	6382	7180	30800	32186	20,7	22,6
		Nov	72	83	855	1064	33	35	414	467	9577	7732	47427	41067	20,4	18,9
		Dic	64	73	823	1033	38	45	412	423	10393	4033	46488	21784	22,4	18,7
MS109	Inter	Oct	92	89	906	1097	29	41	390	563	6223	7161	21274	25613	29,3	28,1
		Nov	77	87	907	1114	29	37	377	464	8761	6830	29140	22029	30,0	31,1
		Dic	68	78	878	1089	33	46	348	403	5940	4881	19373	17865	31,0	27,4
VDH314	Inter	Oct	92	90	911	1127	34	33	456	461	7251	6752	22131	19774	32,8	34,2
		Nov	81	88	959	1121	31	32	376	418	8902	8029	26666	22925	33,8	35,1
		Dic	66	74	855	1043	36	62	382	530	6853	5808	19288	18985	35,5	30,7
DK39T	Corto	Oct	86	80	826	961	31	41	412	589	5480	4385	21305	18581	25,7	23,6
		Nov	69	79	819	1024	36	39	451	507	6523	4795	28680	20289	23,0	24,1
		Dic	61	69	783	990	34	45	383	439	7538	2338	34172	10299	22,1	22,6
MS102	Corto	Oct	97	85	980	1046	30	40	400	558	5554	4509	27363	23448	20,2	19,2
		Nov	76	84	896	1081	32	34	399	449	8202	5368	41579	29411	19,8	18,4
		Dic	65	74	837	1040	36	50	387	453	9051	3855	46946	22502	19,3	17,3
ADV114	Corto	Oct	86	80	830	967	29	35	388	526	5389	5578	17618	19514	30,7	28,7
		Nov	70	78	825	1010	34	37	436	494	6955	7651	24637	22955	28,6	33,6
		Dic	61	66	783	926	35	39	394	436	10037	4514	33524	15130	30,0	29,9

**DMS**

Genotipo (G)	1	13	2	23	725	3156	1,4
--------------	---	----	---	----	-----	------	-----



Fecha de Siembra (FS)	1	8	1	13	418	1822	0,8
Año	1	6	1	11	341	1487	-
Gen*Año	2	22	2	36	1225	5184	-
FS*Año	2	19	4	51	851	5670	-
G*FS	2	23	3	39	1256	5466	2,4
G*FS*Año	3	33	4	55	1777	7730	3,4

DMS: Diferencia mínima significativa.

**Cuadro A.2:** Valores máximos (Máx), media y mínimos (Mín) de duración desde siembra a antesis (S-A) y duración del llenado para tres genotipos de sorgo de diferente ciclo (CL, ciclo largo, CI, ciclo intermedio; CC, ciclo corto) sembrados en distintas fechas de siembra (1-Oct y 15-Oct, octubre; 1-Nov y 15-Nov, noviembre; 1-Dic y 15-Dic, diciembre; 1-Ene, enero).

Fecha de siembra		Duración S-A (Días)			Duración del llenado (Días)		
		CL	CI	CC	CL	CI	CC
1-Oct	Máx	143	136	127	53	56	54
	Media	116	110	101	46	51	49
	Mín	104	98	89	43	47	46
15-Oct	Máx	133	125	115	53	57	54
	Media	109	102	94	48	52	50
	Mín	100	91	83	43	47	46
1-Nov	Máx	123	115	98	57	61	57
	Media	102	96	87	49	53	51
	Mín	91	87	78	41	49	47
15-Nov	Máx	113	105	94	61	65	59
	Media	99	92	84	51	56	53
	Mín	87	83	76	37	45	49
1-Dic	Máx	114	100	89	68	73	66
	Media	96	89	81	54	59	56
	Mín	87	82	74	28	39	50
15-Dic	Máx	113	103	91	74	80	76
	Media	97	89	80	50	56	58
	Mín	89	81	75	13	21	36
1-Ene	Máx	126	112	99	95	76	82
	Media	100	95	84	37	39	48
	Mín	0	84	75	7	7	11

**Cuadro A.3:** Valores máximos (Máx), media y mínimos (Mín) de rendimiento por unidad de superficie ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), biomasa final acumulada ( $\text{g m}^{-2}$ ) e índice de cosecha para tres genotipos de sorgo de diferente ciclo (CL, ciclo largo; CI, ciclo intermedio; CC, ciclo corto) sembrados en distintas fechas de siembra (1-Oct y 15-Oct, octubre; 1-Nov y 15-Nov, noviembre; 1-Dic y 15-Dic, diciembre; 1-Ene, enero).

Fecha de siembra		Rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ )			Biomasa final acumulada ( $\text{g m}^{-2}$ )			Índice de Cosecha		
		CL	CI	CC	CL	CI	CC	CL	CI	CC
1-Oct	Máx	10861	11708	12093	2830	2651	2518	0,46	0,51	0,55
	Media	7645	8041	8154	2267	2100	1912	0,33	0,38	0,42
	Mín	2849	2853	3668	1531	1448	1063	0,17	0,18	0,27
15-Oct	Máx	10834	12066	11921	2777	2600	2445	0,48	0,54	0,58
	Media	7741	8089	8250	2217	2064	1881	0,35	0,39	0,43
	Mín	3796	3459	3035	1475	1373	1148	0,23	0,23	0,23
1-Nov	Máx	12356	11991	11617	2886	2554	2370	0,52	0,53	0,58
	Media	8941	8347	8284	2274	2025	1832	0,39	0,41	0,45
	Mín	4557	4731	2855	1615	1385	1091	0,24	0,30	0,26
15-Nov	Máx	11428	12253	12006	2612	2456	2258	0,53	0,57	0,61
	Media	7883	8527	8660	2118	2016	1841	0,37	0,42	0,47
	Mín	3586	4159	5590	1635	1581	1445	0,19	0,24	0,34
1-Dic	Máx	9704	10547	11469	2569	2384	2308	0,51	0,55	0,60
	Media	7552	8345	8676	2066	1983	1835	0,37	0,42	0,47
	Mín	3445	4052	4343	1557	1541	1458	0,20	0,24	0,28
15-Dic	Máx	8686	9747	10388	2459	2290	2187	0,42	0,51	0,55
	Media	6126	7167	8061	1959	1897	1800	0,31	0,38	0,45
	Mín	767	2659	4411	1478	1473	1468	0,05	0,17	0,28
1-Ene	Máx	6303	7194	8234	2055	1990	1936	0,32	0,39	0,45
	Media	3228	4051	5585	1709	1631	1584	0,18	0,24	0,35
	Mín	0	138	482	1376	1214	1188	0,00	0,01	0,04