



**Universidad Nacional del Nordeste
Facultad de Ciencias Agrarias
Maestría en Producción Vegetal**

***“Estudio ecofisiológico de sorgo granífero en diferentes fechas
de siembra”.***

Tesis presentada como parte de los requisitos para optar al grado académico de MAGISTER EN PRODUCCIÓN VEGETAL de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional del Nordeste.

Tesista: Ing. Agr. López Ramiro Hernán

Director: Ing. Agr. (Dr.) Caviglia Octavio.

Corrientes, Argentina

Año: 2022.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y escuela de posgrado de la Facultad de Ciencias Agrarias (UNNE) por brindarme la oportunidad de esta instancia de capacitación profesional.

A mi Director de tesis Octavio Caviglia por su apoyo incondicional en todo el proceso de formación y por su calidad humana.

A los ingenieros agrónomos María Gabriela Díaz, Walter Daniel Kuttel y Leonardo Esteban Novelli por sus invalables aportes.

A mi familia y amigos por su acompañamiento.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	1
ÍNDICE DE FIGURAS	4
ÍNDICE DE TABLAS	8
ABRAVIATURAS Y SIGLAS	10
RESUMEN	11
ABSTRACT	12
1 INTRODUCCIÓN	13
1.1 El cultivo de sorgo: generalidades	13
1.2 Descripción del problema	15
1.3 Hipótesis	17
1.4 Objetivo General	18
1.5 Objetivos Específicos	18
2 MATERIALES Y MÉTODOS	18
2.1 Material biológico	18
2.2 Diseño experimental	19
2.3 Evaluación fenológica.....	20
2.4 Biomasa.....	21
2.5 Intercepción de radiación.....	22
2.6 Contenido hídrico del suelo	22
2.7 Rendimiento e índice de cosecha	25
2.8 Análisis de datos	25
3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
3.1 CONDICIONES CLIMÁTICAS, CRECIMIENTO Y DESARROLLO.....	25
3.1.1 Condiciones climáticas durante el ciclo del cultivo.....	25
3.1.2 Desarrollo del cultivo	30
3.1.3 Crecimiento del cultivo	38
3.1.4 Generación del rendimiento	40
3.1.5 Relaciones funcionales entre las variables ecofisiológicas evaluadas	45
3.2 CAPTURA Y EFICIENCIA EN EL USO DE LOS RECURSOS	49
3.2.1 Intercepción de Radiación.....	49
3.2.2 Radiación acumulada y eficiencia de uso.....	51
3.2.3 Agua y eficiencia de uso.....	54

3.2.4 Relaciones funcionales entre las variables ecofisiológicas evaluadas	56
4 INTEGRACIÓN DE RESULTADOS	59
5 CONCLUSIONES.....	60
6 CONSIDERACIONES FINALES	61
7 BIBLIOGRAFÍA	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Superficie cosechada del cultivo de sorgo en Argentina y producción en los últimos 10 años. Las columnas negras corresponden a superficie cosechada y la línea naranja a producción.....	14
Figura 2: Ensayo del cultivo de sorgo en año 1 (Campaña 2012/13). Diseño en parcelas divididas, dispuestas en bloques completos al azar.....	20
Figura 3: Medición fenológica, recuento de hojas expandidas en estado vegetativo.....	21
Figura 4: Tubo para medición con sonda de neutrones dispuesto en el entresuelo a profundidad de 1,6 metros.....	24
Figura 5: Precipitaciones mensuales acumuladas (Columnas) y media mensual de radiación solar incidente (Línea continua) durante los meses de septiembre a mayo del año 1 (Sep, septiembre; Oct, octubre; Nov, noviembre; Dic, diciembre; Ene, enero; Feb, febrero; Mar, marzo; Abr, abril; May, mayo). Las líneas horizontales representan el ciclo del cultivo desde siembra a madurez fisiológica del híbrido de ciclo más largo (H3) para F1, F2, F3 y F4. Para F5 representa la duración desde siembra a floración del ciclo más largo (H3). Las flechas verticales de color negro indican la floración promedio de los híbridos para cada fecha de siembra.....	26
Figura 6: Precipitaciones mensuales acumuladas (Columnas) y media mensual de radiación solar incidente (Línea continua) durante los meses de Septiembre a Mayo del año 2 (Sep, septiembre; Oct, octubre; Nov, noviembre; Dic, diciembre; Ene, enero; Feb, febrero; Mar, marzo; Abr, abril; May, mayo). Las líneas horizontales representan el ciclo del cultivo desde siembra a madurez fisiológica del ciclo más largo (H3) para F1, F2, F3 y F4. Para F5 representa la duración desde siembra a floración del ciclo más largo (H3). Las flechas verticales de color negro indican la floración promedio de los híbridos para cada fecha de siembra...	27
Figura 7: Sumatoria térmica desde emergencia a floración y fechas de siembra (día Juliano), en año 1 (Campaña 2012/13) y año 2 (Campaña 2013/14) para los híbridos H1 (Ciclo corto), H2 (Ciclo intermedio) y H3 (Ciclo largo). Se agregaron las fechas de siembra en correspondencia a los días Julianos F1, F2, F3, F4 y F5 (fechas de siembra de fines de septiembre, octubre, noviembre, diciembre y	32

enero, respectivamente).....	
Figura 8: Sumatoria térmica desde floración a madurez fisiológica y fechas de siembra (día Juliano) en año 1 (Campaña 2012/13) y año 2 (Campaña 2013/14) para los híbridos H1 (Ciclo corto), H2 (Ciclo intermedio) y H3 (Ciclo largo). Se agregaron las fechas de siembra en correspondencia a los días Julianos F1, F2, F3 y F4 (fechas de siembra de fines de septiembre, octubre, noviembre y diciembre, respectivamente).....	33
Figura 9: Regresión lineal entre tiempo cronológico desde emergencia a floración y número de hojas totales.....	36
Figura 10: Rendimiento ajustado al 15% de humedad comercial de los tres híbridos H1 (Ciclo corto), H2 (Ciclo intermedio) y H3 (Ciclo largo), en las 4 fechas de siembra F1, F2, F3 y F4 (fechas de siembra de fines de septiembre, octubre, noviembre y diciembre, respectivamente), para año 1 (Campaña 2012/13) y año 2 (Campaña 2013/14). Letras diferentes sobre las columnas indican diferencias significativas según test LSD Fisher ($\alpha=0,05$).....	43
Figura 11: Número de granos por metro cuadrado de las 4 fechas de siembra F1, F2, F3 y F4 (fechas de siembra de fines de septiembre, octubre, noviembre y diciembre, respectivamente), para año 1 (Campaña 2012/13) y año 2 (Campaña 2013/14). Letras diferentes sobre las columnas indican diferencias significativas según test LSD Fisher ($\alpha=0,05$).....	44
Figura 12: Regresión lineal entre número de granos y rendimiento ajustado al 15% de humedad.....	46
Figura 13: Regresión lineal entre número de granos y peso de mil granos en año 1 (Campaña 2012/13) y año 2 (Campaña 2013/14) para F1, F2, F3 y F4 (fechas de siembra de fines de septiembre, octubre, noviembre y diciembre, respectivamente). Los puntos del color rojo corresponden al año 1 y los negros al año 2. Las fechas de siembra se presentan con distinta simbología, F1 (cuadrado relleno), F2 (triángulo vacío), F3 (rombo vacío) y F4 (círculos llenos).....	47
Figura 14: Regresión lineal entre materia seca acumulada a madurez fisiológica y rendimiento ajustado al 15% de humedad (Figura 14a, izquierda) y regresión lineal entre índice de cosecha y rendimiento ajustado al 15% de humedad (Figura 14b, derecha).....	47

Figura 15: Regresión lineal entre tasa de crecimiento del cultivo (TCC) y número de granos.....	48
Figura 16: Regresión lineal entre tasa de crecimiento del cultivo (TCC) y rendimiento ajustado al 15% de humedad en año 1 (Campaña 2012/13) y año 2 (Campaña 2013/14) para F1, F2, F3 y F4 (fechas de siembra de fines de septiembre, octubre, noviembre y diciembre, respectivamente). Los puntos del color rojo corresponden al año 1 y los negros al año 2. Las fechas de siembra se presentan con distinta simbología, F1 (cuadrado relleno), F2 (triángulo vacío), F3 (rombo vacío) y F4 (círculos llenos).....	48
Figura 17: Evolución de la intercepción de radiación en porcentaje respecto del tiempo cronológico en días desde emergencia hasta madurez fisiológica para F1, F2, F3 y F4, mientras que para F5 la intercepción se midió algunos días pasados la floración, de los tres híbridos H1 (Ciclo corto), H2 (Ciclo intermedio) y H3 (Ciclo largo), en las 5 fechas de siembra F1, F2, F3, F4 y F5 (fechas de siembra de fines de septiembre, octubre, noviembre, diciembre y enero, respectivamente), para año 1 (Campaña 2012/13) y año 2 (Campaña 2013/14). En orden descendente las figuras corresponden a H1, H2 y H3, respectivamente. Las figuras de la izquierda corresponden al año 1 para el híbrido analizado y las figuras de la derecha al año 2.....	50
Figura 18: Conductancia aparente del cultivo (gc), para H1 (Ciclo corto) y H3 (Ciclo largo) en fechas de siembra F1 (fines de septiembre) y F3 (fines de noviembre), en año 1 (Campaña 2012/13) y año 2 (Campaña 2013/14).	56
Figura 19: Regresión lineal entre eficiencia de uso de agua (EUA MS) y eficiencia de uso de radiación (EUR MS) de la materia seca total acumulada a madurez fisiológica.....	57
Figura 20: Regresión lineal entre eficiencia de uso de agua de la materia seca total acumulada a madurez fisiológica (EUA MS) y conductancia aparente de la canopia (gc).....	57
Figura 21: Regresión lineal entre eficiencia de uso de agua para grano (EUA Grano) y eficiencia de uso de radiación para grano (EUR Grano).....	58
Figura 22: Regresión lineal entre eficiencia de uso de agua para grano (EUA Grano) y eficiencia de uso de radiación de la materia seca a madurez fisiológica	58

(EUR MS).....

Figura 23: Diagrama de flujo de las principales variables analizadas. Las líneas de color indican la relación de las variables y las líneas punteadas indican las regresiones lineales entre dos variables analizadas..... 59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Fechas de siembra desde fines de septiembre, octubre, noviembre, diciembre y enero (F1, F2, F3, F4 y F5, respectivamente), en año 1 (Campaña 2012/13) y año 2 (Campaña 2013/14).....	19
Tabla 2: Media mensual de las temperaturas del aire durante los meses de septiembre a mayo para el año 1 (Campaña 2012/13) y año 2 (Campaña 2013/14), y valores históricos (Sep, septiembre; Oct, octubre; Nov, noviembre; Dic, diciembre; Ene, enero; Feb, febrero; Mar, marzo; Abr, abril; May, mayo).....	28
Tabla 3: Temperaturas del aire diarias máximas (T° Máx) y mínimas medias (T° Mín) y su mayor y menor valor mensual durante los meses de septiembre a mayo para el año 1 (Campaña 2012/13) y año 2 (Campaña 2013/14), (Sep, septiembre; Oct, octubre; Nov, noviembre; Dic, diciembre; Ene, enero; Feb, febrero; Mar, marzo; Abr, abril; May, mayo).....	29
Tabla 4: Agua útil (AU mm) para H1 (ciclo corto) y H3 (ciclo largo) en F1 (Fecha de fines de Septiembre) y F3 (Fecha de fines de noviembre) en los momentos de siembra, floración y madurez fisiológica en año 1 (Campaña 2012/13) y año 2 (Campaña 2013/14) a una profundidad de 1,6 metros.....	30
Tabla 5: Duración en días y tiempo térmico ($^{\circ}C$ día) en las etapas de siembra a emergencia, emergencia a floración, floración a madurez fisiológica y emergencia a madurez fisiológica de los tres híbridos H1 (Ciclo corto), H2 (Ciclo intermedio) y H3 (Ciclo largo), en las 5 fechas de siembra F1, F2, F3, F4 y F5 (fechas de siembra de fines de septiembre, octubre, noviembre, diciembre y enero, respectivamente), para año 1 (Campaña 2012/13) y año 2 (Campaña 2013/14). Las siglas sd indican que no hay datos relevados para esa variable en estudio.....	34
Tabla 6: Tasa de aparición de hojas (Filocrono) y número de hojas expandidas de los tres híbridos H1 (Ciclo corto), H2 (Ciclo intermedio) y H3 (Ciclo largo), en las 5 fechas de siembra F1, F2, F3, F4 y F5 (fechas de siembra de fines de septiembre, octubre, noviembre, diciembre y enero, respectivamente), para año 1 (Campaña 2012/13) y año 2 (Campaña 2013/14).....	37
Tabla 7: Altura de planta, acumulación de materia seca 20 días antes de floración (Fl -20d), floración (Fl), 15 días posteriores a floración (Fl +15d) y madurez fisiológica (MF) de los tres híbridos H1 (Ciclo corto), H2 (Ciclo	39

intermedio) y H3 (Ciclo largo), en las 5 fechas de siembra F1, F2, F3, F4 y F5 (fechas de siembra de fines de septiembre, octubre, noviembre, diciembre y enero, respectivamente), para año 1 (Campaña 2012/13) y año 2 (Campaña 2013/14). Las siglas sd indican que no hay datos relevados para esa variable en estudio.....

Tabla 8: Tasa de crecimiento del cultivo (TCC) durante el periodo crítico, rendimiento ajustado al 15% de humedad comercial (Rto), índice de cosecha (IC), número de granos por metro cuadrado (NG m⁻²), peso de mil granos en gramos (P1000) y eficiencia de fijación de granos (EFF) de los tres híbridos H1 (Ciclo corto), H2 (Ciclo intermedio) y H3 (Ciclo largo), en las 4 fechas de siembra F1, F2, F3 y F4 (fechas de siembra de fines de septiembre, octubre, noviembre y diciembre, respectivamente), para año 1 (Campaña 2012/13) y año 2 (Campaña 2013/14)..... 42

Tabla 9: Radiación interceptada acumulada a madurez fisiológica (Rad), eficiencia de uso de la radiación (EUR) para materia seca total y grano, para H1, H2 y H3 en cuatro fechas de siembra (F1, F2, F3 y F4), en ambos años evaluados. 53

Tabla 10: Evapotranspiración (ETP), eficiencia de uso de agua (EUA) para materia seca total y grano y conductancia aparente del cultivo (Gc), para H1 y H3 en fechas de siembra F1 y F3, en ambos años evaluados..... 55

ABRAVIATURAS Y SIGLAS

kg: Kilogramo.

T° Max: Temperatura maxima.

T° Min: Temperatura minima.

TCC: Tasa de crecimiento del cultivo.

Rto: Rendimiento del cultivo.

IC: Indice de cosecha.

NG: número de granos.

Rad: Radiacion.

ETP: Evapotranspiracion.

EUA: Eficiencia de uso del agua.

EUR: Eficiencia de uso de la radiacion.

gc: Conductancia aparente del cultivo.

g: Gramo.

m: Metro.

mm: Milimetro.

ha: Hectarea.

%: Porcentaje.

MJ: Megajoules.

P1000: Peso de mil granos.

°C: Grado centígrado.

MF: Madurez fisiologica.

MS: Materia seca.

N°: Número.

EFF: Eficiencia de fijacion de granos.

Rad Acum: Radiación acumulada.

Rad PAR: Radiacion fotosinteticamente activa.

SC: Suma de cuadrados

RESUMEN

El conocimiento de la interacción entre fecha de siembra y longitud de ciclo sobre variables ecofisiológicas del cultivo de sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench.] son escasos en Entre Ríos. Conocer dicha interacción es clave para facilitar el manejo y la difusión del cultivo. Los objetivos de esta tesis fueron: a) Caracterizar los parámetros de desarrollo del cultivo y variables ambientales a las que se exponen los genotipos durante el periodo vegetativo y reproductivo ante distintas fechas de siembra. b) Determinar el crecimiento, partición, rendimiento y sus componentes numéricos de tres híbridos de diferente ciclo ante atrasos en la fecha de siembra. c) Analizar la captura y eficiencia en el uso de la radiación solar y del agua y sus vínculos en híbridos de sorgo granífero ante el atraso en la fecha de siembra. Durante 2 años consecutivos se realizaron experimentos en Paraná, Entre Ríos ($31^{\circ} 50'S$, $60^{\circ} 31'O$), combinando cinco fechas de siembra (F1, F2, F3, F4 y F5, desde 25 de septiembre en intervalos de aproximadamente 30 días) con tres híbridos de sorgo de longitud de ciclo contrastante (corto, intermedio y largo, H1, H2 y H3). La acumulación de materia seca a madurez fisiológica fue mayor en F1, F2 y F3 (17867 kg ha^{-1} promedio) y menor en F4 (15577 kg ha^{-1}). H3 logró mayor acumulación de materia seca (18430 kg ha^{-1}) que H2 y H1 (16727 kg ha^{-1} promedio). Los mayores rendimientos se obtuvieron en las fechas de siembra intermedias, F2 y F3 (7626 y 10075 kg ha^{-1}). Si bien no hubo diferencias significativas, H1 presentó mayor número de granos y menor peso de 1000 granos que H2 y H3. El número de granos por metro cuadrado, la materia seca a madurez fisiológica y la tasa de crecimiento del cultivo se asociaron positivamente con el rendimiento en grano. La eficiencia de uso de la radiación interceptada en el ciclo para materia seca y grano fue mayor en el año 1 ($2,36 \text{ g MJ}^{-1}$ y $0,96 \text{ g MJ}^{-1}$, respectivamente) que en el año 2 ($1,93 \text{ g MJ}^{-1}$ y $0,74 \text{ g MJ}^{-1}$, respectivamente) con diferencias entre fechas de siembra. La eficiencia de uso del agua evapotranspirada en el ciclo para materia seca se incrementó con el atraso de la fecha de siembra (de $5,3$ a $6,85 \text{ g mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$), principalmente debido a una menor conductancia aparente de canopia (de $0,46$ a $0,35 \text{ mm MJ}^{-1}$) en el año 1. En el año 2, el comportamiento fue opuesto. La eficiencia de uso del agua para grano en el año 1 aumentó ante atrasos en la fecha de siembra (de $2,2$ a $2,91 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$), mientras que en el año 2 no se observaron diferencias entre fechas ($1,74 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$). Los resultados obtenidos indican que las fechas entre fines de octubre y noviembre maximizan la producción de granos independientemente del híbrido sembrado.

Palabras clave: Sorgo granífero, crecimiento, desarrollo, variables ecofisiológicas, eficiencia de uso de recursos.

ABSTRACT

The knowledge of the interaction between sowing date and cycle length on ecophysiological variables of sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench.] is scarce. Knowing this interaction is a key to facilitating the crop's management and further dissemination. The objectives of this thesis were to: a) Characterize crop development parameters and environmental variables to which the genotypes are exposed during the vegetative and reproductive period at different sowing dates. b) Determine growth, its partitioning, grain yield and its numerical components of three hybrids as sowing date is delayed c) Analyse the capture and efficiency in the use of solar radiation and water and their links in grain sorghum hybrids due to the delay in the sowing date. During 2 consecutive years, experiments were carried out in Paraná, Entre Ríos ($31^{\circ} 50'S$, $60^{\circ} 31'W$), combining five sowing dates (F1, F2, F3, F4 and F5, from September 25 at intervals of approximately 30 days) with three sorghum hybrids of contrasting cycle length (short, intermediate and long, H1, H2 and H3). Dry matter accumulation at physiological maturity was higher in F1, F2 and F3 (on average 17867 kg ha^{-1}) and lower in F4 (15577 kg ha^{-1}). H3 achieved a greater accumulation of dry matter (18430 kg ha^{-1}) than H2 and H1 (on average 16727 kg ha^{-1}). The highest yields were obtained in the intermediate sowing dates, F2 and F3 (7626 y 10075 kg ha^{-1} , respectively). Although there were no significant differences, H1 had a higher number of grains per area unit and a lower weight of 1000 grains than H2 and H3. The number of grains per area unit, dry matter at physiological maturity and crop growth rate were all positively associated with grain yield. The radiation use efficiency for dry matter and grain was higher in year 1 ($2,36 \text{ g MJ}^{-1}$ y $0,96 \text{ g MJ}^{-1}$, respectively) than in year 2 ($1,93 \text{ g MJ}^{-1}$ y $0,74 \text{ g MJ}^{-1}$, respectively), with differences among planting dates. Water use efficiency for dry matter increased with the delay of the planting date (from $5,3$ to $6,85 \text{ g mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$), mainly due to a lower crop conductance in year 1 (from $0,46$ to $0,35 \text{ mm MJ}^{-1}$). In year 2, the opposite was true. Water use efficiency for grain in year 1 increased with delays in the planting date (de $2,2$ a $2,91 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$), while in year 2 no differences were observed among sowing dates (on average, $1,74 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$). Collectively, the results indicate that sowing dates from late October to late November maximize grain yield irrespective of cycle length of the hybrid. The obtained results are an important contribution to the knowledge of the interaction between planting date and genotype cycle that will be useful to improve crop management in the study area.

Key words: *Sorghum, growth, development, ecophysiological variables, resource use efficiency.*

1 INTRODUCCIÓN

1.1 El cultivo de sorgo: generalidades

El sorgo granífero [*Sorghum bicolor* (L.) Moench], es un cereal de verano miembro de la familia Poaceae, de origen tropical, de respuesta fotoperiódica de día corto, y sensible a la temperatura. Es una especie C4 de alta eficiencia fotosintética, lo que le confiere un alto potencial para la producción de biomasa (Curt et al., 1995). A pesar de su origen tropical, el cultivo se ha extendido hacia zonas de clima templado.

El sorgo posee características que lo diferencian de los demás cereales, entre las que se destacan su elevado potencial de producción de biomasa y su tolerancia a diversos tipos de estrés. Estos atributos únicos del cultivo lo posicionan como una alternativa favorable por su capacidad para aportar a la sustentabilidad del sistema su elevada producción de biomasa y estabilidad en sus rendimientos bajo condiciones edafoclimáticas limitantes. En este contexto, se espera el sorgo cobre mayor importancia económica para el país, con el consecuente incremento de demanda de conocimientos del cultivo (Scotta et al., 2012).

El cultivo de sorgo es uno de los cereales con mecanismos de resistencia a sequía más sembrado en todo el mundo. Esto se debe a un sistema radical eficiente, capacidad de transpiración relativamente pequeña en relación a la capacidad de absorción de las raíces, capacidad para disminuir la transpiración durante períodos de stress hídrico a través del acartuchamiento de hojas, cobertura cerosa de los tallos y hojas que minimizan la pérdida de agua y capacidad de latencia durante períodos de sequía (Giorda et al., 1997). Debido a estas características sería lógico suponer que existe una mayor asociación entre el rendimiento y parámetros de crecimiento (materia seca acumulada a floración y tasa de crecimiento del cultivo), que con la disponibilidad de agua en el periodo crítico del mismo (20 días antes y 10 días después de floración), debido a las estrategias que posee este cultivo para sortear deficiencias hídricas puntuales.

Estas características lo posicionan como un cereal de importancia mundial y ocupa actualmente el quinto puesto en cuanto a volumen de producción (FAOSTAT, 2020). En el año 2020 su producción fue de 58,7 millones de toneladas, con un promedio en la última década de 60,1 millones de toneladas (FAOSTAT, 2020). En comparación con otros cereales de importancia como el maíz, trigo, arroz y cebada que han presentado un crecimiento en la producción, la producción de sorgo se ha

mantenido estable. En efecto, la producción de maíz ocupó holgadamente el primer puesto y su producción llegó en el año 2020 a 1160 millones de toneladas (promedio decádico 1038 millones de toneladas), seguido por trigo con 761 millones de toneladas (promedio decádico 725 millones de toneladas), arroz con 757 millones de toneladas (promedio decádico 735 millones de toneladas) y en cuarto lugar el cultivo de cebada con 157 millones de toneladas (promedio decádico 159 millones de toneladas), (FAOSTAT, 2020).

A nivel nacional, en los últimos diez años hasta la campaña 2018/19 la superficie cosechada se redujo. A partir de este momento se observó un marcado incremento en superficie cosechada y en producción, principalmente en la última campaña (Figura 1). Esto se debe en parte a la mejora de precio internacional traccionada por la alta demanda de China (Proyecto SIBER, informe campaña 2020/21). El rendimiento en la campaña 2020/21 fue de 4434 kg ha^{-1} , similar al promedio decádico de 4429 kg ha^{-1} (MAGYP, 2021). En consecuencia, los aumentos en producción estuvieron más asociado al incremento en el área cosechada que al rendimiento.

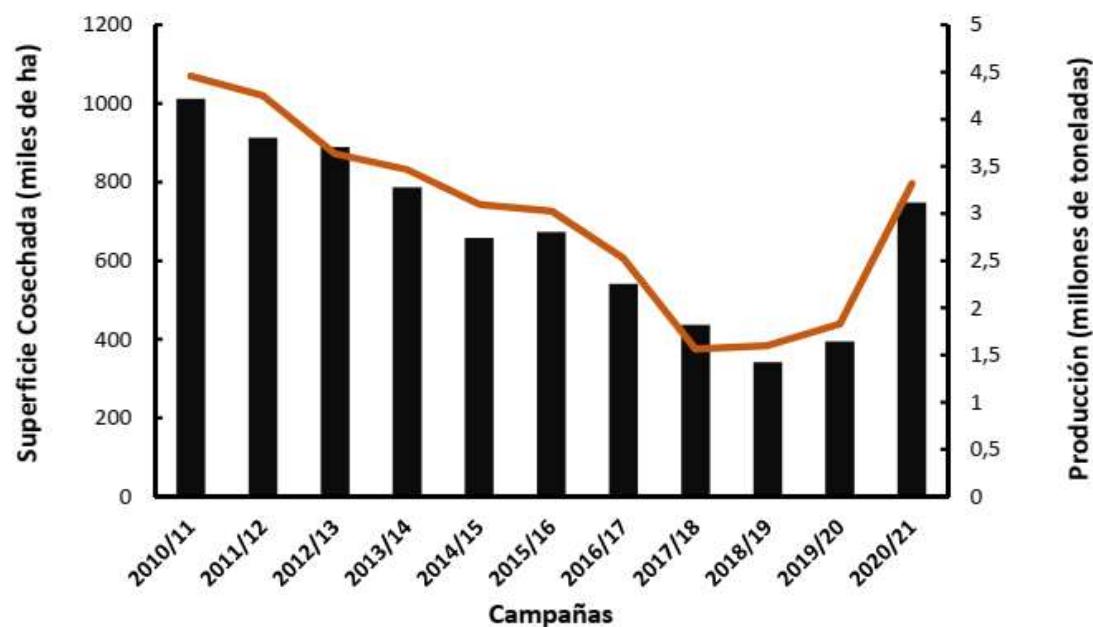


Figura 1: Superficie cosechada del cultivo de sorgo en Argentina y producción en los últimos 10 años. Las columnas negras corresponden a superficie cosechada y la línea naranja a producción.

El informe de campaña 2020/21 del cultivo de sorgo en Entre Ríos, elaborado por el proyecto SIBER (Sistema de información de la Bolsa de Entre Ríos), menciona una producción de 423.160 toneladas. Esta producción surge de 111.000 ha cosechadas con un rendimiento promedio de 3.812 kg ha^{-1} . La superficie sembrada en la provincia de Entre Ríos en los 10 últimos años presentó un promedio de 108.318 ha con un mínimo de 67.600 ha y un máximo de 192.097 ha, el promedio de rendimiento fue de 4457 kg ha^{-1} , similar al promedio decádico nacional.

Argentina dispone de una amplia zona ecológica apta para la siembra del cultivo que se extiende aproximadamente entre los 22° y 40° latitud sur y delimitada hacia el oeste por la isohieta de 500 mm de precipitación anual. El límite austral del cultivo está dado por un periodo libre de heladas de 180 días y la isotermia media anual de 14°C (Giorda et al., 1997).

1.2 Descripción del problema

La amplitud del período libre de heladas, con buena oferta de lluvias, hacen que en la región central de la Mesopotamia sea factible sembrar sorgo desde fines de septiembre hasta principios de enero. Además, en la región se utilizan híbridos de distinta longitud de ciclo que pueden mostrar diferencias de comportamiento en distintas fechas. A nivel regional el comportamiento ecofisiológico de diferentes ciclos de sorgo en esa amplia ventana de siembra aún no ha sido estudiado.

La elección de la fecha de siembra del cultivo es una decisión de manejo frecuentemente condicionada por razones operativas (oportunidad de labranzas, disponibilidad de insumos) o estratégicas (escape a adversidades climáticas o biológicas), por lo que resulta conveniente conocer e interpretar los efectos de la variación del momento de implantación del cultivo sobre su productividad (Andrade et al., 1996).

Esta elección influye fuertemente sobre las condiciones ambientales del cultivo durante su estación de crecimiento, debido a que los niveles de radiación, los registros térmicos y la longitud del día varían marcadamente a lo largo del año. Estos factores pueden influir sobre el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo (Díaz, 2010).

Al atrasar la fecha de siembra, las mayores temperaturas que experimenta el cultivo durante su etapa vegetativa, aceleran su desarrollo. En Balcarce, Argentina, Andrade et al., (1996) demostraron que, al atrasar la fecha de siembra desde septiembre a diciembre en el cultivo de maíz, un cultivo con varios puntos de similitud con el sorgo (principalmente su metabolismo fotosintético C4 y su respuesta al fotoperiodo), se producía una reducción en el ciclo total del cultivo, lo que se debe principalmente al acortamiento del periodo siembra a floración.

Por otra parte, Cirilo et al., (1994) también comprobaron que la temperatura afecta la duración del crecimiento del cultivo de maíz y por consiguiente el tiempo durante el cual la radiación incidente interceptada se transforma en materia seca. La temperatura también modifica la longitud y ancho de las hojas, definiendo así el índice de área foliar del cultivo. Estos factores determinan la proporción de la radiación incidente que es interceptada por el cultivo de maíz.

Al atrasar la fecha de siembra existe un aumento de la radiación incidente sobre el cultivo hasta llegar a un punto en la cual empieza a disminuir, lo que podría afectar a la acumulación de materia seca total. Por lo tanto, existiría una fecha de siembra óptima que permitiría lograr la máxima acumulación de materia seca total. Fechas de siembra anteriores a esta favorecerían el crecimiento reproductivo, resultando en mayores índices de cosecha, mientras que fechas de siembra posteriores a ésta producirían una disminución del mismo, debido a un mayor crecimiento en la etapa vegetativa del cultivo. Híbridos de sorgo de gran porte, asociados a ciclos de madurez más largos sufrirían una mayor disminución del índice de cosecha que híbridos de sorgo de ciclo más corto, ya que se ha documentado que la duración del periodo vegetativo de estos es menos sensible al atraso en la fecha de siembra (Ottman et al., 1998).

El estudio de la eficiencia en el uso del agua y de la radiación se está volviendo cada vez más relevante ante los desafíos que plantea el cambio climático global (Kothari et al., 2020). Recientemente, se ha propuesto que la mejora en la EUA a nivel de canopia puede ser alcanzada ajustando prácticas que reducen el componente de evaporación del suelo de la evapotranspiración a través del manejo de residuos de cosecha (Erbacher et al., 2022), espaciamiento entre hileras o por un mejor acople entre la oferta de precipitaciones (Hatfield y Dold, 2019; Kothari et al., 2020) y la demanda del cultivo ajustando la fecha de siembra.

La eficiencia de uso de agua (EUA, cantidad de materia seca producida por unidad de agua evapotranspirada) es proporcional a la eficiencia de uso de la radiación (EUR, cantidad de materia seca producida por unidad de radiación interceptada) a través de la siguiente ecuación:

$$\text{EUA} = \text{EUR} \times \text{gc}^{-1} \quad [1]$$

donde gc es la evapotranspiración por unidad de radiación interceptada, una medida de la conductancia aparente de los cultivos en los que la evaporación del suelo es un componente menor de evapotranspiración (Caviglia et al., 2001).

Atrasos en la fecha de siembra de sorgo producirían incrementos en la EUA, las cuales se deberían principalmente a una disminución de la conductancia aparente asociada a un menor déficit de presión de vapor, i.e. menor demanda ambiental durante el ciclo del cultivo. Asimismo, Narayanan et al. (2013) han encontrado diferencias genotípicas en la acumulación de materia seca, EUA y EUR de 8 genotipos de sorgo. Estos estudios no utilizaron una aproximación mecanística basada en la ecuación 1 que permita un mejor entendimiento de los componentes ecofisiológicos involucrados. En consecuencia, el estudio de los parámetros ecofisiológicos del cultivo ayudará a diseñar prácticas de manejo para optimizar el rendimiento y por lo tanto el aporte de rastrojo al sistema, contribuyendo de esta manera a la sustentabilidad del mismo.

1.3 Hipótesis

- 1) Los genotipos de sorgo de diferente ciclo modifican diferencialmente los parámetros de crecimiento, desarrollo y rendimiento ante atrasos en la fecha de siembra en el centro-oeste de Entre Ríos.
- 2) El índice de cosecha es mayor en fechas de siembra tempranas y en híbridos de ciclo corto, en comparación con fechas de siembra tardías e híbridos de ciclo largo.
- 3) La EUA se incrementa con el atraso de la fecha de siembra, principalmente debido a una menor conductancia aparente de la canopia (gc).

1.4 Objetivo General

Evaluar el comportamiento ecofisiológico de híbridos de sorgo granífero de ciclo de maduración contrastante ante atrasos en la fecha de siembra en el centro oeste de Entre Ríos.

1.5 Objetivos Específicos

- Caracterizar el desarrollo y las condiciones ambientales durante el periodo vegetativo y reproductivo de tres genotipos, correspondientes a un ciclo corto, uno intermedio y uno largo, en fechas de siembra desde fines de septiembre a mediados de enero en Paraná.
- Describir cómo cambia el crecimiento, partición, rendimiento y sus componentes numéricos de los tres híbridos de sorgo frente al atraso de la fecha de siembra.
- Analizar la captura y eficiencia en el uso de la radiación solar y del agua y sus vínculos de los tres híbridos frente al atraso de la fecha de siembra.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Material biológico

Se evaluaron tres híbridos de sorgo granífero con marcadas diferencias de ciclo entre emergencia a floración: DK 39T de ciclo corto (H1), A-9758 M de ciclo intermedio (H2) y MS 108 de ciclo largo (H3). Todos los híbridos presentaron alto contenido de tanino, un requisito clave para la región como estrategia frente a la problemática del ataque de aves. Los experimentos a campo fueron conducidos durante las campañas 2012/13 (Año 1) y 2013/14 (Año 2), en la Estación Experimental del INTA Paraná ($31^{\circ} 50' S$, $60^{\circ} 31' O$) sobre un suelo Argiudol ácuico (Serie Tezanos Pinto).

La siembra se realizó en secano bajo el sistema de siembra directa sobre rastrojo de soja, sin limitaciones nutricionales. El tamaño de la unidad experimental fue de $50 m^2$ (8 hileras por 12 metros de largo). La densidad de siembra se mantuvo constante

en todas las fechas de siembra, orientada a lograr aproximadamente 180.000 pl ha⁻¹. Las fechas de siembra se presentan en tabla 1.

Tabla 1: Fechas de siembra desde fines de septiembre, octubre, noviembre, diciembre y enero (F1, F2, F3, F4 y F5, respectivamente), en año 1 (Campaña 2012/13) y año 2 (Campaña 2013/14).

Fechas de Siembra	Año 1	Año 2
F1	25/09/2012	26/09/2013
F2	26/10/2012	30/10/2013
F3	21/11/2012	02/12/2013
F4	27/12/2012	27/12/2013
F5	23/01/2013	24/01/2014

2.2 Diseño experimental

Se utilizó un modelo mixto con un diseño en parcelas divididas, considerando al año y a las repeticiones como efectos aleatorios. El resto de los factores fueron considerados como efectos fijos. La parcela principal fue asignada a la fecha de siembra, mientras que la subparcela fue asignada al híbrido.

Los tratamientos fueron 15, surgiendo de la combinación de las 5 fechas de siembra y los 3 híbridos en estudio. Los mismos se ubicaron sobre un diseño en parcelas divididas, dispuestas en bloques completos al azar con tres repeticiones, donde:

- Parcela Principal, incluyó la fecha de siembra (5 niveles): F1, F2, F3, F4, F5.
- Subparcela, incluyó los híbridos (3 niveles): H1, H2, H3.



Figura 2: Ensayo del cultivo de sorgo en año 1 (Campaña 2012/13). Diseño en parcelas divididas, dispuestas en bloques completos al azar.

2.3 Evaluación fenológica

Para las observaciones de fenología se marcaron 10 plantas por parcela. Cada 10 días se registró el número de hojas completamente expandidas con ligula visible y las hojas con síntomas visibles de senescencia (con 50% o más de su lámina con amarillamiento). La floración se determinó en forma visual cuando más del 50% de las plantas en la parcela se encontraron con anteras visibles en el tercio medio de la panoja (R1) según la escala de Vanderlip (1993). Por otra parte, la madurez fisiológica se determinó cuando 5 de cada 10 plantas consecutivas tenían capa de abscisión 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 cronológicos y en tiempo térmico. Para los análisis de tiempo térmico se usaron los modelos descritos por Hammer et al. (1993), y se consideró una temperatura base de 11°C para la etapa vegetativa (Hammer et al., 1993) y de 5,7°C para la etapa reproductiva (Heiniger et al., 1997).

El filocrono (intervalo de tiempo entre la aparición de hojas sucesivas en °C día) se calculó como la pendiente de la regresión lineal entre la aparición de hojas y las sumatoria térmica acumulada en cada periodo.



Figura 3: Medición fenológica, recuento de hojas expandidas en estado vegetativo.

2.4 Biomasa

Se determinó la materia seca del cultivo en cuatro momentos del ciclo del mismo: 20 días previos a R1 (R1-20 días), R1, 15 días posteriores a R1 (R1+15 días) y madurez fisiológica (MF). Para ello se cortaron las plantas de 4 m lineales por tratamiento con una superficie de 2,08 m² y se pesó en fresco. Se tomó una submuestra de 1 m lineal (0,52 m²) para disectar y llevar a estufa a 60°C hasta peso constante. La tasa de crecimiento del cultivo (TCC) se calculó como cociente entre la acumulación de materia seca entre R1-20 días y R1 + 15 días y la sumatoria térmica en °C día de ese periodo considerando las temperaturas bases diferenciales para el periodo vegetativo y reproductivo.

2.5 Intercepción de radiación

El porcentaje de intercepción de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) se midió cada 10 días, aproximadamente desde V6 hasta la senescencia total de las hojas. Para ello se utilizó un sensor cuántico de 1 m de largo (Ceptómetro Cavadevices, Buenos Aires, Argentina). Se tomaron lecturas sobre la canopia (I_o) y debajo del nivel de las hojas verdes del cultivo (I_t) al menos 5 veces por parcela, calculándose el porcentaje de intercepción como $(I_o - I_t)/I_o \times 100$ (Gallo y Daughtry, 1986). La cantidad de RFA interceptada por el cultivo se calculó de la siguiente manera: i) ajustando polinomios ($R^2 > 0.96$) para describir la evolución del porcentaje de intercepción en función del tiempo, ii) estimando el porcentaje de intercepción diario a partir de la función ajustada, iii) multiplicando la RFA incidente por el porcentaje de intercepción diario y iv) acumulando los valores diarios en cada periodo de tiempo considerado. La eficiencia de uso de la radiación (EUR) se estimó como el cociente entre el rendimiento en granos (EUR Grano) o biomasa total a madurez (EUR Materia seca) y la cantidad total de RFA interceptada. La eficiencia de intercepción se estimó como el coeficiente entre radiación acumulada interceptada y radiación PAR acumulada en el ciclo del cultivo.

2.6 Contenido hídrico del suelo

En dos de los tres híbridos (i.e., H1 y H3) y en dos de las cinco fechas (i.e., F1 y F3), se midió cada 15 días el contenido hídrico del suelo usando una sonda de neutrones (Troxler 4300, Troxler Electronic Lab. North Carolina, USA). La medición se realizó en 0,15, 0,3, 0,4, 0,5, 0,6, 0,8, 1, 1,2, 1,4 y 1,6 metros de profundidad y para calibrar los datos se utilizó para 0,15 metros de profundidad la fórmula (Humedad Volumétrica en porcentaje = $x 0,3728 + 0,0262$), mientras que para las demás mediciones (Humedad Volumétrica en porcentaje = $x 0,3056 + 0,0936$). Los tubos de acceso de la sonda fueron ubicados en el entresuelo de las parcelas. La estimación de la evapotranspiración ET (mm) se realizó mediante un balance hídrico a partir de la variación de almacenaje entre muestreros y la precipitación efectiva, sin considerar las pérdidas por percolación profunda. La eficiencia del uso de agua se estimó como el cociente entre el rendimiento en grano (EUA Grano) o biomasa total a madurez (EUA MS) y la ET (mm).

La precipitación efectiva (PE) se estimó como:

$$PE = PPo - Esc \quad [2]$$

Donde:

PPo es la precipitación del día para el que se calcula el balance hídrico.

Esc es el escurrimiento superficial.

Los valores de PE y Esc se expresaron en milímetros (mm).

El escurrimiento superficial se estimó según el método del índice de precipitación antecedente (IPA, Shaw, 1994) como:

$$IPA = PPo/2 + PP1/2 + PP2/2 + PP3/3 + PP4/4 + PP5/5 + PP6/6 \quad [3]$$

Donde:

PP1 a PP6, precipitación correspondiente al día -1 (anterior a la fecha actual) al día -6 (6 días antes a la fecha actual).

Cuando PPo fue menor a 25.4 mm, no se realizó el cálculo, considerando como efectiva a toda la precipitación diaria.

Funciones de escurrimiento (Esc) por rango de IPA:

Si la precipitación del día (PPo) es menor a 12.5 mm, entonces el escurrimiento es cero (0)

Para valores de PPo iguales o mayores a 12.5 mm se aplican las siguientes ecuaciones:

$$\text{Si } IPA > 69.8, \text{ entonces } Esc = -4.21 + 0.438 * PPo + 0.0018 * PPo^2 \quad [4]$$

$$\text{Si } IPA > 57.1, \text{ entonces } Esc = -3.17 + 0.32 * PPo + 0.0024 * PPo^2 \quad [5]$$

$$\text{Si } IPA > 44.4, \text{ entonces } Esc = -2.78 + 0.25 * PPo + 0.0026 * PPo^2 \quad [6]$$

$$\text{Si } IPA > 31.7, \text{ entonces } Esc = -2.36 + 0.19 * PPo + 0.0026 * PPo^2 \quad [7]$$

$$\text{Si } IPA > 19.0, \text{ entonces } Esc = -2.34 + 0.12 * PPo + 0.0026 * PPo^2 \quad [8]$$

$$\text{Si } IPA > 6.3, \text{ entonces } Esc = -1.14 + 0.042 * PPo + 0.0026 * PPo^2 \quad [9]$$

$$\text{Si } IPA \leq 6.3, \text{ entonces } Esc = 0.858 - 0.0895 * PPo + 0.0028 * PPo^2 \quad [10]$$

Para el caso de que algunas de estas ecuaciones resulten en valores negativos, el escurrimiento se considera igual a cero (0) (INIA, Cálculo del escurrimiento superficial y la precipitación efectiva).



Figura 4: Tubo para medición con sonda de neutrones dispuesto en el entresuelo a profundidad de 1,6 metros.

La métrica de conductancia aparente que se presenta y analiza es la de conductancia del canopeo (gc), que ha sido definida como la ET por unidad de radiación interceptada (Matthews et al., 1988), cuando la Es (evaporación del suelo sin cultivar) es un componente menor de la ET; y ha sido utilizada en trabajos anteriores en maní (Matthews et al., 1988), girasol (Sadras et al., 1991) y trigo (Caviglia and Sadras, 2001). La misma se calculó como cociente entre la ET (mm) y la radiación total interceptada acumulada en el ciclo.

Debido a la falta de métodos validados localmente, no se hicieron intentos de estimar la T (Transpiración) de los cultivos. Se lograron altos niveles de intercepción de radiación en todos los tratamientos, por lo que se puede asumir que la Es fue un componente menor de la ET (Cooper et al. (1983)). El agua útil (AU mm), se estimó a una profundidad de 1,6 metros como la diferencia entre el agua total (calcula a través de la sonda de neutrones) y el límite mínimo de extracción de agua por los cultivos

(Punto de marchitez permanente) considerando el valor de PMP y la densidad aparente para cada estrato.

2.7 Rendimiento e índice de cosecha

Se estimó el rendimiento en grano y sus componentes (número y peso de grano) sobre 8 m² por unidad experimental. El índice de cosecha se calculó como el cociente entre el rendimiento en grano y la materia seca total a madurez fisiológica estimada sobre una superficie de 2,08 m². La eficiencia de fijación de grano (EFF) se calculó como el cociente entre el número de granos por metro cuadrado y la tasa de crecimiento del cultivo (TCC) para el periodo entre 20 días antes de floración y 15 días después de la misma.

2.8 Análisis de datos

Las variables evaluadas fueron sometidas a un análisis de varianza y las medias se compararon con el test de Fisher ($\alpha=0,05$). Las relaciones entre variables fueron evaluadas mediante regresión lineal y análisis de correlación. Todos los análisis fueron realizados utilizando el paquete estadístico INFOSTAT (Di Rienzo et al., 2011).

Los resultados reportados para todas las variables de esta tesis no incluyen las evaluaciones hasta madurez fisiológica de la F5 para ambos años, debido a que los cultivos no lograron completar su ciclo por la ocurrencia de heladas y enfermedades. En el año 1 el factor principal fue heladas tempranas y en el año 2 enfermedades, podredumbre basal y mildiu del sorgo (*Fusaruim spp* y *Peronosclerospora sorghi*, respectivamente).

3 RESULTADOS Y DISCUSION

3.1 CONDICIONES CLIMATICAS, CRECIMIENTO Y DESARROLLO

3.1.1 Condiciones climáticas durante el ciclo del cultivo

Las precipitaciones acumuladas en el periodo septiembre-mayo fueron de 1081 mm y 1026,5 mm, para el año 1 y 2, respectivamente. Ambas fueron superiores a la media histórica (1934-2014) de 927 mm para el mismo periodo. Si bien los acumulados en los dos años para el periodo analizado fueron similares, hubo diferencias muy marcadas en la distribución mensual de las precipitaciones (Figuras 5

y 6). En los meses de octubre, noviembre y diciembre del año 1 se registró un acumulado de 587,3 mm (235,5, 94,9 y 256,9 mm para octubre, noviembre y diciembre, respectivamente), mientras que en el año 2 el acumulado fue de 377,1 mm (73, 202,1 y 102 mm para octubre, noviembre y diciembre, respectivamente). En los meses febrero, marzo y abril del año 1 se registraron 297,3 mm (81,6, 78 y 137,7 mm para febrero, marzo y abril, respectivamente), mientras que en el año 2 el acumulado fue de 534,9 mm (147,8, 164,4 y 222,7 para febrero, marzo y abril, respectivamente). En el año 1, las precipitaciones fueron más abundantes en primavera, mientras que en el año 2 lo fueron en verano, con un pico elevado en abril.

La radiación solar incidente mensual varió entre ambos años. Para el año 1, se observó una caída en los meses de octubre y diciembre respecto al año 2, que estuvo asociada, en parte, a las mayores precipitaciones ocurridas en esos meses (Figura 5 y 6). Esto ocasionó que el pico de radiación ocurriera recién en enero en el año 1, mientras que el mismo ocurrió en diciembre en el año 2.

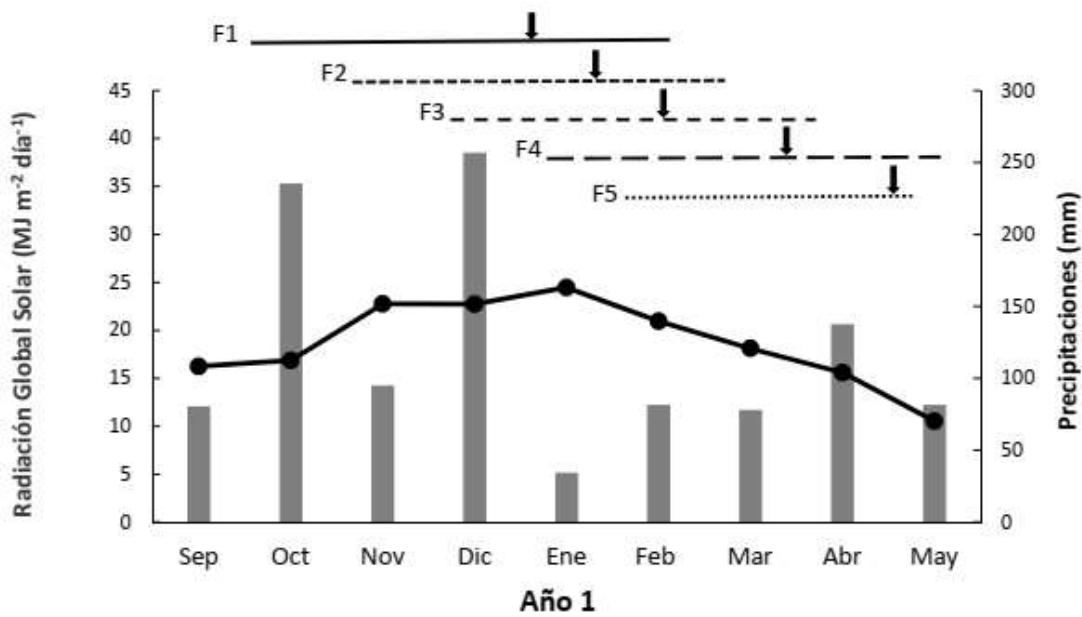
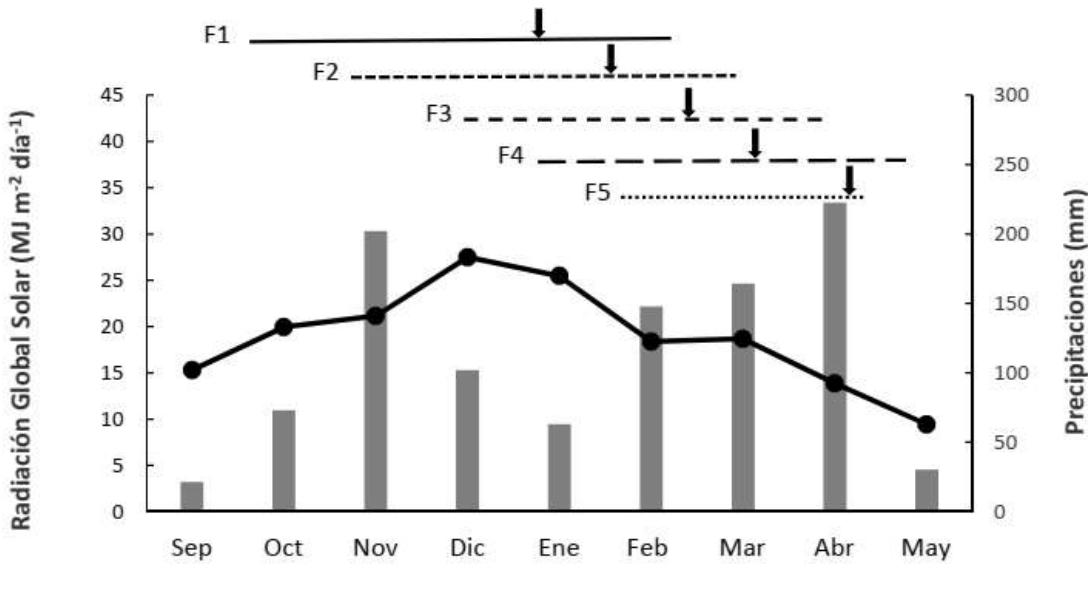


Figura 5: Precipitaciones mensuales acumuladas (columnas) y media mensual de radiación solar incidente (línea continua), durante los meses de septiembre a mayo del año 1 (Sep, septiembre; Oct, octubre; Nov, noviembre; Dic, diciembre; Ene, enero; Feb, febrero; Mar, marzo; Abr, abril; May, mayo). Las líneas horizontales representan el ciclo del cultivo desde siembra a madurez fisiológica del híbrido de ciclo más largo (H3) para F1, F2, F3 y F4. Para F5 representa la duración desde siembra a floración del ciclo más largo (H3). Las flechas verticales de color negro indican la floración promedio de los híbridos para cada fecha de siembra.



Año 2

Figura 6: Precipitaciones mensuales acumuladas (columnas) y media mensual de radiación solar incidente (línea continua), durante los meses de Septiembre a Mayo del año 2 (Sep, septiembre; Oct, octubre; Nov, noviembre; Dic, diciembre; Ene, enero; Feb, febrero; Mar, marzo; Abr, abril; May, mayo). Las líneas horizontales representan el ciclo del cultivo desde siembra a madurez fisiológica del ciclo más largo (H3) para F1, F2, F3 y F4. Para F5 representa la duración desde siembra a floración del ciclo más largo (H3). Las flechas verticales de color negro indican la floración promedio de los híbridos para cada fecha de siembra.

La evolución de la temperatura media mensual en los meses de septiembre, octubre, noviembre, diciembre, enero, abril y mayo fueron superiores a la media histórica (Tabla 2). En ambos años la temperatura media mensual tuvo pequeñas variaciones, excepto para el mes de diciembre en el cual fue mayor.

Tabla 2: Media mensual de las temperaturas del aire durante los meses de septiembre a mayo para el año 1 (Campaña 2012/13) y año 2 (Campaña 2013/14), y valores históricos (Sep, septiembre; Oct, octubre; Nov, noviembre; Dic, diciembre; Ene, enero; Feb, febrero; Mar, marzo; Abr, abril; May, mayo).

	Temperatura Media (°C)									
	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	
Año 1	16,7	19,1	22,9	24,2	25,0	23,5	20,3	19,8	15,5	
Año 2	15,8	20,2	21,7	26,9	26,0	23,6	20,4	19,1	15,7	
Historica (1934 - 2014)	15,3	18,2	20,9	23,5	24,9	23,8	21,8	18,2	15,4	

En el Tabla 3 se resume la evolución de las temperaturas máximas y mínimas del aire y sus valores extremos diarios observados en ambos años. La evolución de la temperatura media máxima y mínima promedio en los meses evaluados tuvo similares valores en ambos años, aunque se reportaron algunas diferencias. La temperatura máxima promedio fue superior en octubre, diciembre y enero del año 2, en los restantes meses analizados fue mayor en año 1. La temperatura mínima promedio fue levemente mayor en octubre, noviembre y diciembre del año 1, en los restantes meses evaluados el año 2 presentó los mayores valores.

Tabla 3: Temperaturas del aire diarias máximas (T° MÁX) y mínimas medias (T° MÍN) y su mayor y menor valor mensual durante los meses de septiembre a mayo para el año 1 (Campaña 2012/13) y año 2 (Campaña 2013/14), (Sep, septiembre; Oct, octubre; Nov, noviembre; Dic, diciembre; Ene, enero; Feb, febrero; Mar, marzo; Abr, abril; May, mayo).

	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May
Año 1									
Temp MÁX Promedio	22,3	23,8	29,0	30,2	31,2	29,0	25,9	25,7	20,3
Mayor Valor	31,2	32,4	33,9	37,2	36,1	37,0	31,4	29,1	26,9
Menor Valor	13,7	16,9	19,3	24,6	22,5	19,6	17,7	20,2	12,2
Año 2									
Temp MÍN Promedio	11,2	14,4	16,8	18,3	18,7	17,5	14,8	13,8	10,7
Mayor Valor	18,5	20,5	21,4	25,6	23,0	22,3	21,6	19,4	19,5
Menor Valor	2,4	8,0	11,8	13,7	12,3	10,1	9,8	5,3	2,2
Temp MÁX Promedio	21,6	26,5	26,8	33,3	31,9	28,2	25,9	24,3	20,0
Mayor Valor	37,6	32,1	32,2	39,7	37,9	36,0	31,1	31,6	27,6
Menor Valor	10,6	17,2	19,2	27,1	19,7	21,2	21,2	17,3	12,1
Temp MÍN Promedio	10,0	14,0	16,6	20,6	20,2	18,9	15,0	13,9	11,5
Mayor Valor	25,4	21,5	21,0	25,4	28,8	25,3	20,1	21,2	17,0
Menor Valor	2,2	6,5	11,5	15,5	11,2	10,4	7,4	7,0	5,0

El contenido de agua útil (AU mm) a la siembra no presentó mayores diferencias en ambos años para F1 y F3 en ambos híbridos (Tabla 4). En el momento de floración en el año 1 se observaron diferencias marcadas en el contenido de AU (mm) en F3 respecto de F1, asociados a las escasas precipitaciones del mes de enero del año 1). En F1, H3 presentó menor contenido que H1, en el año 2 no hubo grandes diferencias entre fechas e híbridos. En madurez fisiológica del año 1, el AU presentó menores valores que en el año 2 en ambas fechas, aunque sin diferencias marcadas entre híbridos para ambas fechas e híbridos.

Tabla 4: Agua útil (AU mm) para H1 (ciclo corto) y H3 (ciclo largo) en F1 (Fecha de fines de Septiembre) y F3 (Fecha de fines de noviembre) en los momentos de siembra, floración y madurez fisiológica en año 1 (Campaña 2012/13) y año 2 (Campaña 2013/14) a una profundidad de 1,6 metros.

Año	Fecha	Híbrido	AU (mm)		
			Siembra	Floración	Madurez Fisiológica
Año 1	F1	H1	188	210	122
		H3	187	154	114
	F3	H1	183	87	126
		H3	177	78	113
Año 2	F1	H1	182	150	212
		H3	179	166	192
	F3	H1	204	171	177
		H3	203	169	189

3.1.2 Desarrollo del cultivo

La etapa siembra-emergencia tuvo una duración variable entre fechas y años, en días y en tiempo térmico, y fue igual para los tres genotipos (Tabla 5). Los días desde siembra a emergencia fueron máximos en F1 en ambos años (15 y 19 días para el año 1 y 2, respectivamente). La duración de esa etapa fue disminuyendo ante atrasos en la fecha de siembra hasta F4, en F5 el valor volvió a aumentar levemente (9 y 8 días para el año 1 y 2, respectivamente).

El tiempo térmico en esta etapa fue variable con un promedio en ambos años de 114, 122, 102, 102 y 132 °C días para las fechas F1, F2, F3, F4 y F5, respectivamente. El valor promedio de todas las fechas de siembra fue de 101 y 128 °C días para el año 1 y 2, respectivamente. Estos resultados estuvieron posiblemente condicionados por la profundidad de siembra, la temperatura y humedad del suelo. En relación con esto, Anda et al. (1994) encontraron respuestas diferenciales en el porcentaje de germinación de la semilla de sorgo en distinta situación de humedad del suelo ante aumentos en la temperatura del suelo.

La etapa emergencia-floración fue la porción del ciclo de los cultivos que mostró la mayor variabilidad en días y tiempo térmico entre genotipos y fechas de siembra (Tabla 5). Los días desde emergencia a floración variaron por efecto año, fechas de siembra e híbridos, también hubo interacción significativa año x fecha y

fecha x híbrido, tabla 5. En el año 1, la F1 requirió la mayor cantidad de días para llegar a floración, seguido por F5 (78 y 77 días, respectivamente), luego se diferenció F2 con 70 días y, por último, no hubo diferencias entre F3 y F4 con 67 días cada una. En el año 2, F1 también fue la fecha con más días requeridos, seguida de F2 (77 y 73 días, respectivamente), luego con 68 días para ambas siguieron F3 y F5. La última fecha con 64 días fue F4. Para F1, F2, F3 y F4, los días desde emergencia a floración siguieron el patrón H1<H2<H3. Para F5, H2 y H3 no se diferenciaron entre sí y requirieron más días que H1. En síntesis, los atrasos en la fecha de siembra disminuyeron los días de emergencia a floración y hubo un efecto diferencial de la misma sobre los híbridos.

La suma térmica acumulada a floración tuvo efecto significativo ($P<0,05$) de año, fecha de siembra e híbrido, además presentó interacción significativa año x fecha y fecha x híbrido (Tabla 5). En el año 1, F3 y F2 presentaron la mayor acumulación de °C días (920 y 904 °C días, respectivamente), seguido de F1 la cual no se diferenció de F2. Los menores valores fueron para F4 y F5, con diferencias significativa entre ellos (872 y 794 °C días, respectivamente). En el año 2, se observó una tendencia similar, F3 y F2 lograron los mayores valores sin diferencias entre ellos (1056 y 1068 °C días, respectivamente), seguido de F1. Los menores valores fueron para F4 y F5, con diferencias significativas entre ellos (866 y 788 °C días, respectivamente). Para F1, F2, F3 y F4 la acumulación de °C días desde emergencia a floración siguió el patrón H1<H2<H3. Para F5, H2 y H3 no se diferenciaron entre sí y acumularon más °C días que H1.

En la Figura 7 se observa la evolución de la acumulación de °C día desde emergencia a floración ante atrasos en la fecha de siembra de los híbridos (día juliano) en ambos años. En la misma se observa que el año 2 presentó mayores valores que el año 1 en F1, F2 y F3 mientras que en F4 y F5 no hubo diferencias entre años. Esta mayor duración estuvo más asociada con aumentos en el filocrono que a cambios en el número de hojas. Estas diferencias entre años podrían deberse, en parte, a un potencial fenómeno de latencia del cultivo no muy bien descripto por la bibliografía (Whiteman and Wilson, 1965; Giorda et al., 1997), ya que en el año 2 las precipitaciones en diciembre y enero fueron marcadamente menores, lo que pudo alargar el filocrono. Este proceso presenta un componente genético y podría tener una cierta asociación con el ciclo del cultivo (los ciclos más largos manifestarían mayor latencia que los ciclos cortos, Giorda et al., 1997). Si bien no se logró documentar en

este trabajo la existencia de dicho mecanismo, se deberían profundizar los estudios al respecto, sobre todo en fechas tardías y/o en mayores latitudes ya que podría incrementar aún más la longitud del periodo vegetativo en algunos híbridos.

En ambos años, F2 y F3 presentaron los mayores valores de acumulación. Esto se podría atribuir a la respuesta fotoperiódica de día corto del cultivo de sorgo, cuyo umbral fotoperiódico ha sido reportado de 13,2 horas de duración del día (Hammer et al., 1989). Solo en la F5 la duración del día fue menor al umbral (12,9 hs, 20 días después de la siembra), por lo que la respuesta en la acumulación de °C día en esta última fecha de siembra solo se debería a la precocidad intrínseca de los híbridos, la cual fue claramente mayor en los híbridos más largos (Figura 7). Regresiones lineales entre duración del fotoperiodo 20 días después de la siembra y acumulación de °C días muestran en el año 1 las siguientes ecuaciones (H1 $y = 56,7x + 37,8$; $R^2 0,84$), (H2 $y = 90,3x - 337,1$; $R^2 0,64$) y (H3 $y = 114,5x - 616,2$; $R^2 0,56$), lo que evidencia la mayor sensibilidad fotoperiódica a medida que los ciclos se alargan, la misma tendencia se observó en el año 2 pero con mayores valores (H1 $y = 185,7x - 1651,5$; $R^2 0,71$), (H2 $y = 224,5x - 2080,1$; $R^2 0,66$) y (H3 $y = 258,3x - 2509,2$; $R^2 0,64$).

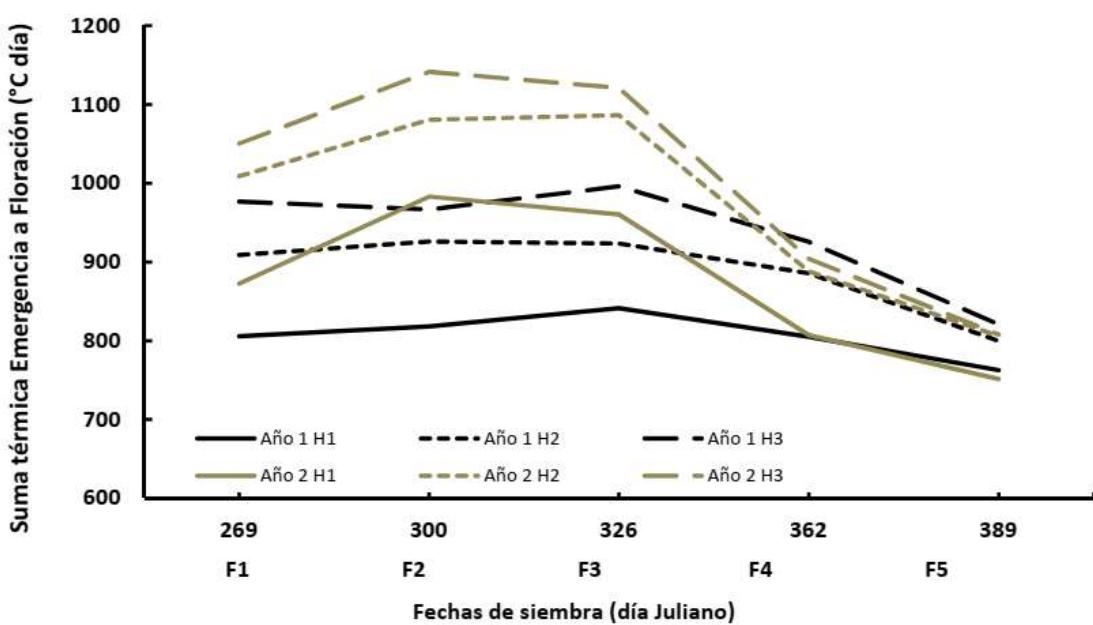


Figura 7: Sumatoria térmica desde emergencia a floración y fechas de siembra (día Juliano), en año 1 (Campaña 2012/13) y año 2 (Campaña 2013/14) para los híbridos H1 (Ciclo corto), H2 (Ciclo intermedio) y H3 (Ciclo largo). Se agregaron las fechas de siembra en correspondencia a los días Julianos F1, F2, F3, F4 y F5 (fechas de siembra de fines de septiembre, octubre, noviembre, diciembre y enero, respectivamente).

La fecha de siembra y el año tuvieron un importante efecto en la duración en días de la etapa floración-madurez, pero en tiempo térmico las diferencias fueron bajas, y los híbridos no tuvieron efectos consistentes en la duración de la etapa (tabla 5) y Figura 8.

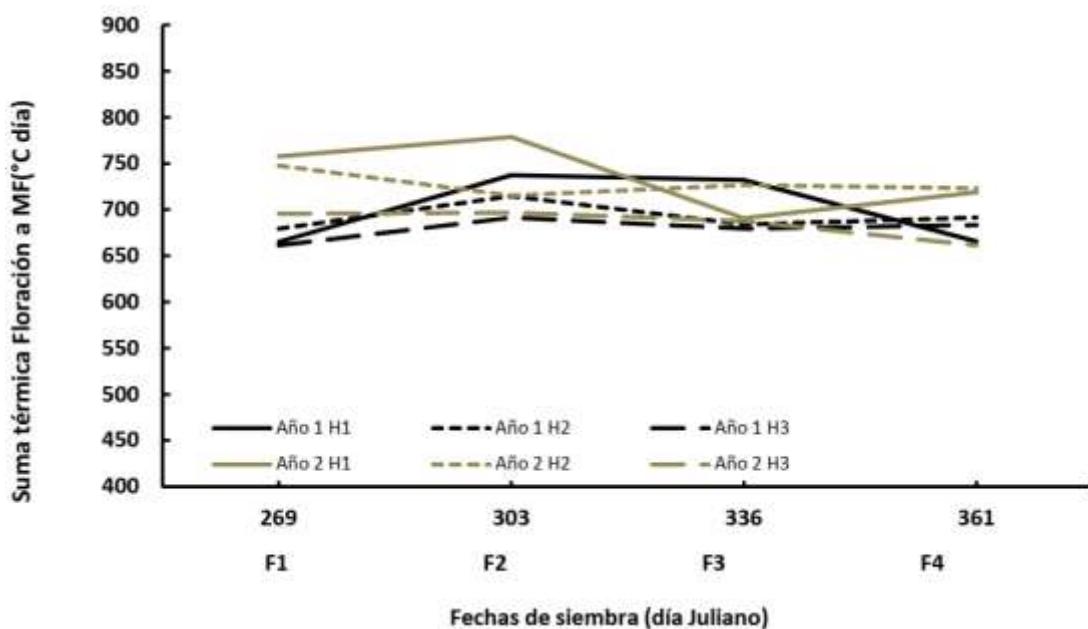


Figura 8: Sumatoria térmica desde floración a madurez fisiológica y fechas de siembra (día Juliano) en año 1 (Campaña 2012/13) y año 2 (Campaña 2013/14) para los híbridos H1 (Ciclo corto), H2 (Ciclo intermedio) y H3 (Ciclo largo). Se agregaron las fechas de siembra en correspondencia a los días Julianos F1, F2, F3 y F4 (fechas de siembra de fines de septiembre, octubre, noviembre y diciembre, respectivamente).

Los días desde floración a madurez fisiológica presentaron efecto significativo de año, fecha de siembra e híbrido, año x fecha, año x híbrido, fecha x híbrido e interacción triple año x fecha x híbrido. El mayor valor, con 52 días, fue para H2 en F4 en el año 2. Le siguieron en orden descendente todos los híbridos en F4 en los dos años.

El menor número de días de floración a madurez fisiológica fue de 34 días para H3 en F1 en ambos años. Del análisis de los datos presentados en Tabla 5, se deduce que al atrasar la fecha de siembra aumentaron los días desde floración a madurez fisiológica y que las variaciones entre los híbridos fueron menores. Aunque la suma térmica tuvo efecto significativo de año, fecha de siembra e híbrido, año x fecha, año x híbrido, fecha x híbrido e interacción triple año x fecha x híbrido, las diferencias fueron bajas y con un patrón inconsistente (Tabla 5) y Figura 8. La diferencia extrema de acumulación fue de 118°C día.

Tabla 5: Duración en días y tiempo térmico ($^{\circ}\text{C}$ día) en las etapas de siembra a emergencia, emergencia a floración, floración a madurez fisiológica y emergencia a madurez fisiológica de los tres híbridos H1 (Ciclo corto), H2 (Ciclo intermedio) y H3 (Ciclo largo), en las 5 fechas de siembra F1, F2, F3, F4 y F5 (fechas de siembra de fines de septiembre, octubre, noviembre, diciembre y enero, respectivamente), para año 1 (Campaña 2012/13) y año 2 (Campaña 2013/14). Las siglas sd indican que no hay datos relevados para esa variable en estudio.

Año	Fecha	Híbrido	Siembra -Em		Emergencia - Floración		Floración - Madurez		Emergencia - Madurez		
			Días	$^{\circ}\text{C}$ día	Días	$^{\circ}\text{C}$ día	Días	$^{\circ}\text{C}$ día	Días	$^{\circ}\text{C}$ día	
Año 1	F1	H1	15	90	71	806	35	665	106	1471	
		H2	15	90	79	909	35	679	114	1588	
		H3	15	90	85	977	34	661	119	1638	
	F2	H1	8	106	64	818	37	737	101	1555	
		H2	8	106	71	926	37	715	108	1641	
		H3	8	106	75	967	37	691	112	1658	
	F3	H1	6	84	61	841	41	732	102	1573	
		H2	6	84	66	923	41	684	107	1607	
		H3	6	84	72	996	43	679	115	1675	
	F4	H1	6	77	60	805	47	666	107	1471	
		H2	6	77	67	886	49	691	116	1577	
		H3	6	77	73	925	48	683	121	1608	
	F5	H1	9	148	74	763	sd	sd	sd	sd	
		H2	9	148	78	800	sd	sd	sd	sd	
		H3	9	148	80	821	sd	sd	sd	sd	
Año 2	F1	H1	19	138	70	872	36	758	106	1630	
		H2	19	138	78	1009	37	748	115	1757	
		H3	19	138	81	1050	34	696	115	1746	
	F2	H1	13	138	67	983	40	779	107	1762	
		H2	13	138	73	1080	39	715	112	1795	
		H3	13	138	78	1141	39	697	117	1838	
	F3	H1	8	119	61	960	42	691	103	1651	
		H2	8	119	70	1086	46	727	116	1813	
		H3	8	119	73	1121	44	688	117	1809	
	F4	H1	7	127	58	807	49	719	107	1526	
		H2	7	127	66	888	52	723	118	1611	
		H3	7	127	68	904	47	661	115	1565	
	F5	H1	8	117	63	751	sd	sd	sd	sd	
		H2	8	117	70	806	sd	sd	sd	sd	
		H3	8	117	71	808	sd	sd	sd	sd	

variación absoluta entre los tratamientos fue de 20 días. H1 siempre presentó los menores valores de ciclo respecto de H2 y H3 considerando la misma fecha. Los valores promedio en años y fechas fueron 105, 113 y 116 días para H1, H2 y H3 respectivamente. Las variaciones en la duración del ciclo ontogénico no fueron tan marcadas ante atrasos en la fecha de siembra debido a que la disminución de los días en la etapa vegetativa fueron compensados en parte por el aumento de días en la etapa reproductiva (Tabla 5). La duración de las etapas entre emergencia a floración, se asoció estrechamente con la duración total del ciclo, (ambas expresadas como sumatoria de ($^{\circ}\text{C}$ día) ($P<0.0001$; $R^2 =0,88$), lo que demuestra que las diferencias del ciclo total en los híbridos fueron influenciadas principalmente por la duración de la etapa vegetativa.

El número de hojas del cultivo guardó una estrecha relación con la duración en tiempo térmico entre emergencia y floración y no se detectaron diferencias importantes en el filocrono de los genotipos evaluados. El número de hojas totales tuvo efecto significativo de año, fecha de siembra, híbridos e interacción año x fecha (Tabla 6). El año 1, F2 logró el mayor número con 19,1 hojas, seguido por F3 y F4 (18,6 y 18,5, respectivamente), sin diferencias significativas entre ellas. Luego le siguieron F1 y F5 (18 y 16,3, respectivamente), con diferencias entre ellas. En el año 2, F1, F2, F3 y F4 se comportaron de la misma manera y promediaron 19,2 hojas diferenciándose de F5 con 15,8 hojas. Respecto a los híbridos H1 presentó el menor valor con mientras que H2 y H3 se comportaron de igual manera obteniendo 18,8 hojas de promedio en ambos años. Esta variable estuvo positivamente asociada ($P<0.0001$; $R^2=0,39$) con la suma térmica desde emergencia a floración (Figura 9). El valor de la pendiente de dicha regresión [$y=59,7$ (hojas $^{\circ}\text{C}^{-1}$ día $^{-1}$) x -182,2, siendo x el número de hojas] representa una estimación del filocrono esperable promedio para el tipo de material vegetal y las condiciones ambientales exploradas, que resulta en una contribución relevante para el manejo del cultivo de sorgo en el área de estudio.

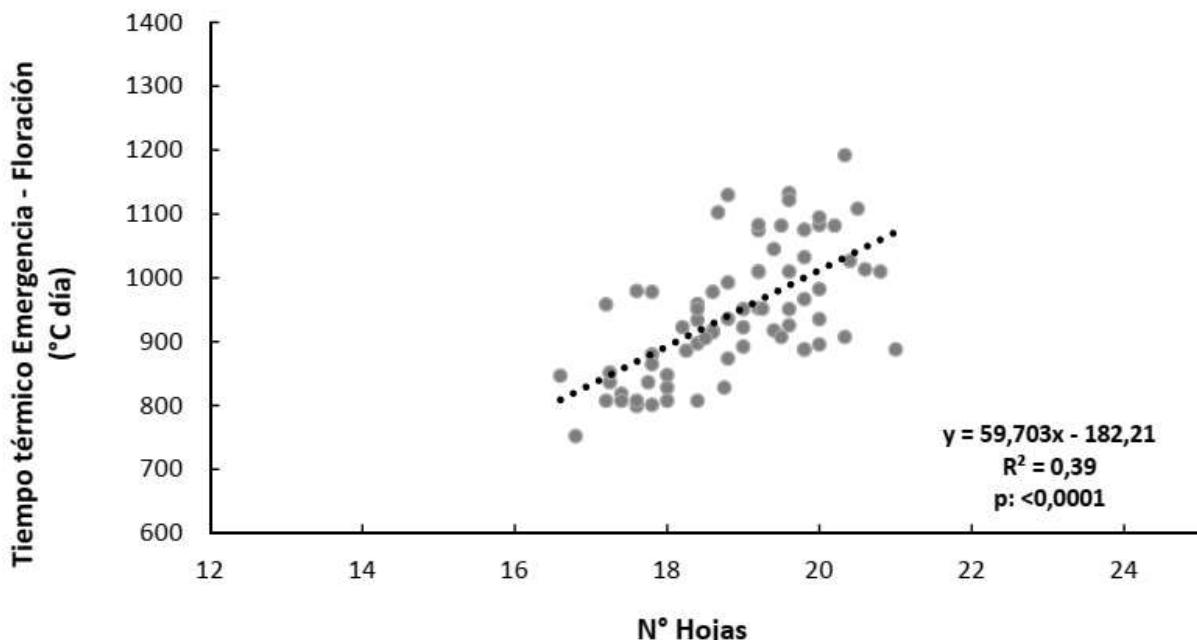


Figura 9: Regresión lineal entre tiempo cronológico desde emergencia a floración y número de hojas totales.

Aunque el filocrono presentó efecto de año, fecha de siembra e híbrido y tuvo interacción significativa año x fecha, año x híbrido, fecha x híbrido e interacción triple año x fecha x híbrido, los efectos no mostraron un valor consistente (Tabla 6). H3 en F2 del año 2 presentó el mayor valor, 66,1 °C día, seguido por el mismo híbrido en F1 del año 2, 61 °C día. El menor valor, con 45,9 °C día, fue para H2 en F4 del año 1. Esta variación es similar al rango entre 45 y 57 ° C día encontrados en un sorgo de guinea por Vaksman., et al (1998) y es posible que las duraciones más largas respondan a diferencias en el crecimiento producto de las menores lluvias al comiendo del segundo año. Los tres ciclos de sorgo tuvieron filocronos muy similares entre sí (52,4; 50,5 y 54,1 para H1, H2 y H3, respectivamente) en contraste con lo que se observó en el cultivo de maíz donde para un amplio rango de genotipos (16 híbridos de maíz de distinto origen) los filocronos variaron entre 48,6 y 65,5 °C día (Padilla et al., 2005).

Tabla 6: Tasa de aparición de hojas (Filocrono) y número de hojas expandidas de los tres híbridos H1 (Ciclo corto), H2 (Ciclo intermedio) y H3 (Ciclo largo), en las 5 fechas de siembra F1, F2, F3, F4 y F5 (fechas de siembra de fines de septiembre, octubre, noviembre, diciembre y enero, respectivamente), para año 1 (Campaña 2012/13) y año 2 (Campaña 2013/14).

Año	Fecha	Híbrido	Filocrono (°C día)	Nº de Hojas
Año 1	F1	H1	50,5	16,9
		H2	49,8	18,3
		H3	57,0	18,6
	F2	H1	50,2	18,1
		H2	50,9	19,5
		H3	49,9	19,6
	F3	H1	54,9	17,4
		H2	48,5	18,8
		H3	52,2	19,6
Año 2	F4	H1	49,7	17,9
		H2	45,9	18,5
		H3	48,2	19,0
	F5	H1	51,2	15,5
		H2	46,4	16,9
		H3	49,4	16,6
	F1	H1	52,4	18,1
		H2	55,3	19,9
		H3	61,2	19,5
Año 2	F2	H1	55,0	18,5
		H2	57,6	19,7
		H3	66,1	19,3
	F3	H1	52,1	18,4
		H2	52,5	19,9
		H3	55,6	19,9
	F4	H1	55,7	17,5
		H2	49,5	20,2
		H3	52,0	19,9
Año	F5	H1	52,6	15,5
		H2	49,0	16,2
		H3	49,4	15,8
			Valor p	SC
			<0,0001	377
		Valor p	SC	
		0,0007	5	

Fecha	<0,0001	411	<0,0001	116
Híbrido	<0,0001	193	<0,0001	38
Año*Fecha	<0,0001	183	0,0007	8
Año*Híbrido	0,0064	42	0,1884	1
Fecha*Híbrido	<0,0001	278	0,4476	3
Año*Fecha*Híbrido	0,0003	135	0,227	4
Error		221		21

3.1.3 Crecimiento del cultivo

La altura a floración de los cultivos aumentó con la longitud del ciclo y se redujo con el atraso de la siembra con una reducción de la altura en los períodos con bajas lluvias, en las tres últimas FS del primer año y las dos primeras del segundo. La altura de cultivo medida en floración presentó efecto de los factores año, fechas de siembra e híbridos, también interacción año x fecha, año x híbrido y fecha x híbrido (Tabla 7). En ambos años y en todas las fechas, la altura siguió el siguiente patrón: H1 < H2 < H3 (Tabla 7). En el año 1, H3 logró la mayor altura en F2 y F4, seguido de F1 y F3. En año 2, H3 logró la mayor altura en F3 y F4. La altura de todos los híbridos aumentó de manera progresiva hasta F4, este patrón no se detectó en el año 1. La magnitud de las diferencias de altura entre H1 y H3 fue mayor en el año 1 en F1, F4 y F5, respecto del año 2. Las diferencias entre H1 y H2 fueron mayores en año 1 para todas las fechas de siembra.

La materia seca acumulada desde siembra a 20 días antes de floración (FI – 20d) presentó efecto año, fecha de siembra e híbrido, además hubo interacción triple año x fecha x híbrido (Tabla 7). H3 en F4 del año 2 presentó la mayor acumulación de materia seca, los menores valores fueron para H1 en F5 en ambos años. Consistentemente en todas las fechas de siembra H1 presentó menos materia seca que los otros híbridos.

Tabla 7: Altura de planta, acumulación de materia seca 20 días antes de floración (Fl -20d), floración (Fl), 15 días posteriores a floración (Fl +15d) y madurez fisiológica (MF) de los tres híbridos H1 (Ciclo corto), H2 (Ciclo intermedio) y H3 (Ciclo largo), en las 5 fechas de siembra F1, F2, F3, F4 y F5 (fechas de siembra de fines de septiembre, octubre, noviembre, diciembre y enero, respectivamente), para año 1 (Campaña 2012/13) y año 2 (Campaña 2013/14). Las siglas sd indican que no hay datos relevados para esa variable en estudio.

Año	Fecha	Híbrido	Altura (m)	Materia Seca (kg ha ⁻¹)							
				Fl - 20d	Fl	Fl + 15d	MF				
Año 1	F1	H1	1,34	4133	9385	11393	17055				
		H2	1,55	4584	11375	13960	20571				
		H3	1,85	5332	12368	15305	20026				
	F2	H1	1,44	4615	10294	14249	19557				
		H2	1,60	5208	12688	15565	18230				
		H3	1,94	6485	15531	16567	20158				
	F3	H1	1,35	3704	10358	13715	18164				
		H2	1,54	5744	10713	15901	19074				
		H3	1,76	5601	12976	15991	19843				
Año 2	F4	H1	1,38	3719	9673	11870	15094				
		H2	1,68	4552	10684	12076	16587				
		H3	1,94	5025	11978	13579	17302				
	F5	H1	1,26	2537	7444	8417	sd				
		H2	1,45	3674	9524	9442	sd				
		H3	1,69	3803	8796	9531	sd				
	F1	H1	1,19	3912	7521	10104	15751				
		H2	1,27	5815	9539	12155	15703				
		H3	1,56	5795	9939	13019	16853				
Año 2	F2	H1	1,32	5319	9703	11716	15569				
		H2	1,46	5590	10256	13774	16972				
		H3	1,78	6774	12857	17157	20082				
	F3	H1	1,48	5544	9084	14164	15600				
		H2	1,63	5889	9832	13747	15429				
		H3	1,94	5389	10920	14003	16972				
	F4	H1	1,55	3899	8769	12242	13635				
		H2	1,76	6558	9760	11926	14643				
		H3	2,00	7212	9937	13427	16203				
Año 2	F5	H1	1,55	2956	7877	8684	sd				
		H2	1,68	5648	9139	8855	sd				
		H3	1,85	5418	8972	8063	sd				
		Valor p	SC	Valor p	SC	Valor p	SC	Valor p	SC		
Año		0,0097	0,01	<0,0001	16909535	<0,0001	49531105	0,0003	21100468	<0,0001	99743688
Fecha		<0,0001	0,64	<0,0001	28030777	<0,0001	39472694	<0,0001	416253606	<0,0001	79469969
Híbrido		<0,0001	2,94	<0,0001	45198453	<0,0001	88601059	<0,0001	60653892	<0,0001	55016986
Año*Fecha		<0,0001	0,67	0,0993	4289625	0,6981	1829375	0,2012	8766229	0,2402	9434997
Año*Híbrido		0,0024	0,02	0,3282	1188947	0,2114	4088652	0,4634	2210482	0,4233	3796877
Fecha*Híbrido		0,0001	0,06	0,0848	7773356	0,0986	14606661	0,006	34806942	0,6003	9962409
Año*Fecha*Híbrido		0,0743	0,02	0,0293	9825029	0,9201	2484931	0,2333	15430731	0,2051	19286406
Error			0,08		30353774		58493041		82252861		99691496

La materia seca acumulada hasta floración tuvo efecto significativo de año, fecha de siembra e híbrido. El año 1 presentó mayor acumulación que el año 2 (11502 y 9843 kg ha⁻¹, respectivamente. En relación a las fechas de siembra, F2 presentó la mayor acumulación (11888 kg ha⁻¹), mientras que las demás fechas de siembra no presentaron diferencias significativas entre sí. Los híbridos para este periodo

aumentaron la acumulación en relación a mayor ciclo y presentaron valores promedios de 9348, 10606 y 12063 kg ha⁻¹ para H1, H2 y H3, respectivamente (Tabla 7).

La acumulación de materia seca 15 días después de floración tuvo efectos significativos de año, fecha de siembra e híbrido, además presentó interacción fecha x híbrido. En el año 1 se acumuló más materia seca que en el año 2 (13171 y 12202 kg ha⁻¹, respectivamente). En las distintas fechas de siembra los híbridos se comportaron de manera diferente. En F1, H2 y H3 lograron mayor acumulación de materia seca sin diferencias entre ellos (13058 y 14162 kg ha⁻¹, respectivamente), mientras que H1 logró acumular solo 10749 kg ha⁻¹. En F2, H3 logró la máxima acumulación con 16862 kg ha⁻¹, seguido de H2 y H1 (sin diferencia entre ellos), este mismo comportamiento de los híbridos se observó en F4, mientras que en F3 y F5 los híbridos no mostraron diferencias significativas entre ellos.

La acumulación de materia seca a madurez fisiológica presentó diferencias por efecto del año, fecha de siembra e híbrido. En el año 1 se acumuló un 15% más de materia seca que en el año 2 (18472 y 16118 kg ha⁻¹, respectivamente). F1, F2 y F3 presentaron la máxima acumulación sin diferencias significativas entre ellas (17660, 18428 y 17514 kg ha⁻¹, respectivamente), mientras que F4 acumuló solo 15577 kg ha⁻¹. Las diferencias encontradas en entre fechas de siembra y año pueden deberse a las mayores precipitaciones del año 1, principalmente en el mes de diciembre donde se registraron 257 mm (Figura 5), por lo que pudo haber una recarga del perfil de suelo importante para suplir menores precipitaciones en enero y parte de febrero y permitió que los híbridos implantados lograran mayores valores de acumulación de materia seca en F1, F2 y F3, respecto de las mismas fechas en el año 2, las caídas en materia seca en F4 para ambos años pudieron estar asociadas a la caída de radiación en la etapa reproductiva. Respecto al comportamiento de los híbridos, H3 logró mayor acumulación de materia seca (18430 kg ha⁻¹) que H2 y H1 (17151 y 16303 kg ha⁻¹, respectivamente), los que no presentaron diferencias entre sí.

3.1.4 Generación del rendimiento

La tasa de crecimiento del cultivo durante la fase crítica para el número de granos tuvo efecto significativo de año y fecha de siembra (Tabla 8). El año 1 presentó un 43% de incremento con respecto al año 2 (18 vs. 12,55 kg ha⁻¹ °C días⁻¹, respectivamente). Respecto a las fechas de siembra, F2, F3 y F4 tuvieron la mayor

tasa de crecimiento, sin diferencia entre ellas, mientras que F1 obtuvo el menor valor, esté sin diferencias con F2. No se detectaron diferencias significativas entre híbridos. En esta variable se evidencio un fuerte efecto del año y a pesar de no presentar interacción año x fecha, se observó que las mayores tasas en F3 y F4 del año 2 pudieron estar relacionadas con las precipitaciones de febrero y marzo de ese año (312, 3 mm acumulados en ambos meses, Figura 6), alrededor del periodo crítico.

El rendimiento presentó efecto significativo de los factores año y fecha de siembra, además interacción año x fecha, con un efecto marginal del ciclo (Tabla 8). En ambas campañas las heladas no permitieron evaluar el rendimiento y componentes de la siembra de fin de enero. Los mayores rendimientos se obtuvieron en las fechas de siembra intermedias, F2 y F3, con diferencias más marcadas en la segunda campaña, la cual tuvo rendimientos inferiores (Figura 10). La interacción año x fecha (Figura 10), se debe a que en el año 1 F1 fue presentó mayor rendimiento que F4 (con variación menor entre estas), mientras que en el año 2 la respuesta fue inversa y con mayor variación.

Tabla N° 8: Tasa de crecimiento del cultivo (TCC) durante el periodo crítico, rendimiento ajustado al 15% de humedad comercial (Rto), índice de cosecha (IC), número de granos por metro cuadrado (NG m⁻²), peso de mil granos en gramos (P1000) y eficiencia de fijación de granos (EFF) de los tres híbridos H1 (Ciclo corto), H2 (Ciclo intermedio) y H3 (Ciclo largo), en las 4 fechas de siembra F1, F2, F3 y F4 (fechas de siembra de fines de septiembre, octubre, noviembre y diciembre, respectivamente), para año 1 (Campaña 2012/13) y año 2 (Campaña 2013/14).

Año	Fecha	Híbrido	TCC (kg ha ⁻¹ °C dia ⁻¹)	Rto (kg ha ⁻¹)	IC (%)	Nº granos (m ⁻²)	P 1000 (g)	EFF (Nº granos °C dia g ⁻¹)	
Año 1	F1	H1	14,9	9032	44,2	32343	25,6	217	
		H2	17,6	8242	34,0	26193	29,9	148	
		H3	17,8	9143	38,1	29009	29,4	167	
	F2	H1	19,0	9463	40,5	35714	25,2	188	
		H2	16,9	8513	38,8	28363	28,8	170	
		H3	19,5	9695	40,0	31288	29,8	162	
	F3	H1	17,8	9321	42,7	42640	21,0	240	
		H2	18,2	9593	41,8	33861	27,3	185	
		H3	17,7	10075	42,2	36139	26,7	206	
	F4	H1	19,1	8545	47,8	40266	19,6	213	
		H2	19,2	8487	43,1	36912	21,6	192	
		H3	18,3	7921	38,6	35957	20,1	197	
Año 2	F1	H1	10,2	6535	35,7	24181	24,7	242	
		H2	9,4	5481	29,7	17249	28,3	183	
		H3	12,5	6158	30,9	20586	27,7	181	
	F2	H1	10,3	7629	41,7	31248	22,3	319	
		H2	12,5	7675	38,6	24690	28,7	201	
		H3	12,8	7903	33,4	26068	28,0	204	
	F3	H1	12,8	8529	46,5	32930	23,7	263	
		H2	13,8	8244	45,4	28129	27,0	216	
		H3	15,5	7626	38,4	25302	27,7	164	
	F4	H1	15,2	6786	42,6	32029	19,0	210	
		H2	11,7	6753	39,4	24683	24,3	212	
		H3	13,8	7296	38,7	25880	25,3	199	
Año		Valor p	SC	Valor p	SC	Valor p	SC	Valor p	SC
Fecha		<0,0001	536	<0,0001	57311002	0,0103	120	<0,0001	1140301849
Híbrido		0,0121	68	<0,0001	26038886	<0,0001	593	<0,0001	0,6175
Año*Fecha		0,2087	18	0,1438	2018396	0,0002	348	<0,0001	0,4
Año*Híbrido		0,3421	19	0,017	5623259	0,0471	144	0,0151	0,0066
Fecha*Híbrido		0,5384	7	0,7464	293711	0,395	32	0,7443	11744
Año*Fecha*Híbrido		0,626	24	0,5426	2526490	0,4032	106	0,6141	4947
Error		0,3866	36	0,2301	4228951	0,374	112	0,5777	8886
		256		22944756		774		322673977	9604
								63,2	66852

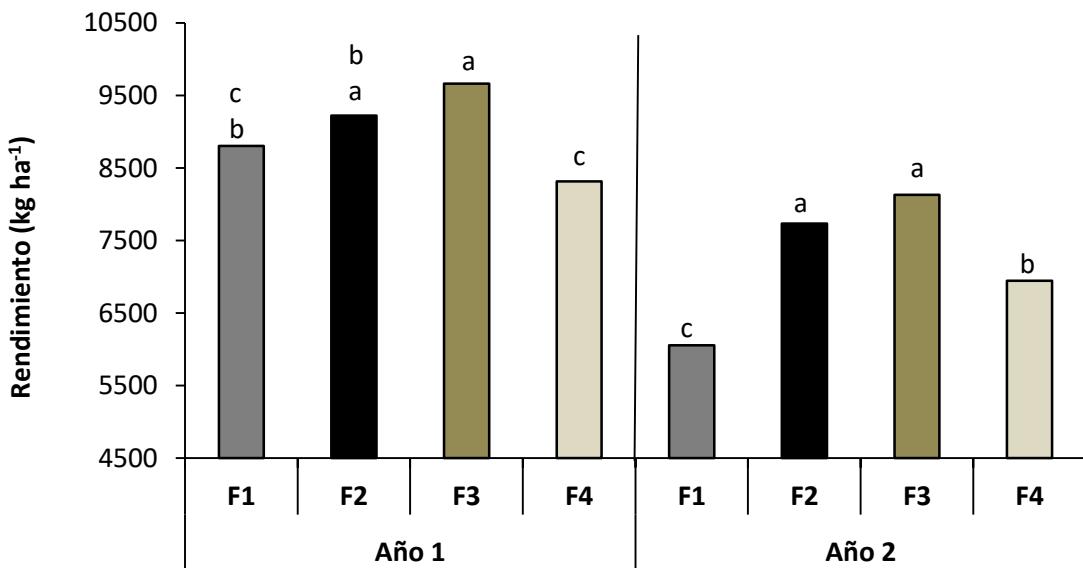


Figura 10: Rendimiento ajustado al 15% de humedad comercial de los tres híbridos H1 (Ciclo corto), H2 (Ciclo intermedio) y H3 (Ciclo largo), en las 4 fechas de siembra F1, F2, F3 y F4 (fechas de siembra de fines de septiembre, octubre, noviembre y diciembre, respectivamente), para año 1 (Campaña 2012/13) y año 2 (Campaña 2013/14). Los años fueron analizados de manera separada. Letras diferentes sobre las columnas indican diferencias significativas según test LSD Fisher ($\alpha=0,05$).

El índice de cosecha tuvo diferencias significativas por efecto año, fecha de siembra e híbridos, además interacción año x fecha (Tabla 8). La variación del índice de cosecha fue entre 29,7 y 47,8%, similares valores (28 al 45%) fueron encontrados por Parra et al. (2021) en el cultivo de sorgo en estudios comparativos con maíz en diferentes ambientes de la región central de Argentina, en híbridos comerciales y con variaciones de fechas de siembra y fertilización nitrogenada. En el año 1, F4, F3 y F2 presentaron los mayores índices de cosecha (43,2, 42,2 y 39,8 %, respectivamente). F1 tuvo el menor índice de cosecha (38,8%) y no presentó diferencias significativas con F2. En el año 2, F3 y F4 presentaron los mayores valores (43,5 y 40,2%, respectivamente) sin diferencias entre ellos, con 37,9% le siguió F2 (sin diferencias con F4) y al igual que el año 1, la F1 tuvo el con 32,1%. H1 presentó el mayor valor con 42,7% y H3 el menor con 37,5%, contrastando de manera significativa, mientras que H2 tomó valores intermedios con 38,8%. La hipótesis 2 planteada respecto a que el índice de cosecha es mayor en fechas de siembra tempranas y en híbridos de ciclo corto, en comparación con fechas de siembra tardías e híbridos de ciclo largo, se rechaza parcialmente. Esto se debe a que por un lado en ambos años las fechas más tardías (F3 y F4), obtuvieron los mayores valores de índice de cosecha y por el otro,

los híbridos de ciclo más corto (H1 y H2), presentaron mayor partición a grano, relacionado a una menor acumulación de materia seca respecto de H3. En F3 el mayor índice estuvo relacionado a un mayor rendimiento en grano y en F4 a una menor acumulación de materia seca a madurez fisiológica.

El número de granos por metro cuadrado tuvo efecto significativo de año, fecha de siembra e híbrido, además presentó interacción año x fecha (Tabla 8). En el año 1 se obtuvo un 30% más de granos que en el año 2 (34.040 y 26.081 granos m^{-2} para año 1 y 2, respectivamente). Hubo diferencias marcadas en el número de granos para las fechas de siembra en ambos años (Figura 11). En el año 1, F3 y F4 presentaron los mayores números de granos, seguidos de F2 y F1 (con diferencias entre ellas). Para el año 2, F2, F3 y F4 tuvieron un mismo comportamiento, superior a F1. Los híbridos en ambos años presentaron la misma tendencia, en la cual H1 superó en número de granos a H2 y H3 (sin diferencias entre ambos).

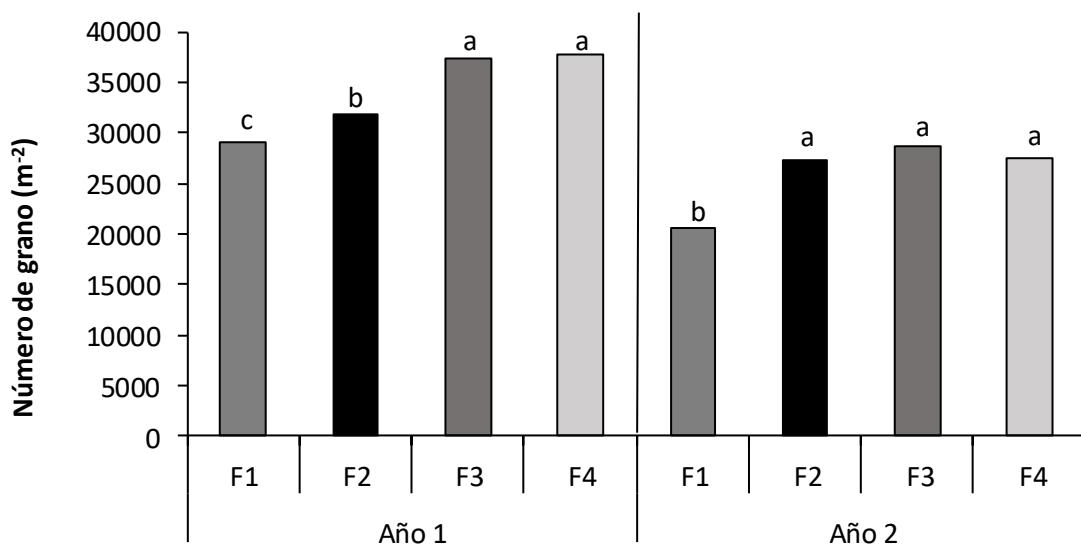


Figura 11: Número de granos por metro cuadrado de las 4 fechas de siembra F1, F2, F3 y F4 (fechas de siembra de fines de septiembre, octubre, noviembre y diciembre, respectivamente), para año 1 (Campaña 2012/13) y año 2 (Campaña 2013/14). Letras diferentes sobre las columnas indican diferencias significativas según test LSD Fisher ($\alpha=0,05$).

El peso de mil granos tuvo efecto significativo fecha de siembra e híbrido, además presentó interacción doble año x fecha e interacción triple año x fecha x híbrido y varió entre 19 a 29,9 g (Tabla 8). H1 siempre tuvo menor peso que H2 y H3 (los que se comportaron de manera similar). F4 obtuvo los menores valores de peso de 1000 granos para todos los híbridos en cada año. Se observó que atrasos en la

fecha de siembra desde F2 en adelante causó una disminución en el peso de los granos. Estas caídas se podrían explicar, en parte, al mayor número de granos logrado en las fechas tardías (menor disponibilidad de asimilados por grano, i.e. una reducción en la relación fuente/destino), asociado principalmente a los menores valores de radiación incidente durante el llenado de los mismos y en menor medida a una caída de la intercepción de radiación observada en las fechas de siembra más tardías (F4 principalmente, Figura 17).

La eficiencia de fijación de grano (EFF) presentó efecto significativo de los factores año e híbrido (Tabla 8). El año 2 presentó un 13% más de EFF que el año 1, 216,2 y 190,6 número de granos °C día g⁻¹, respectivamente. En cuanto al comportamiento de los híbridos, H1 presentó el mayor número con 236,6 número de granos °C día g⁻¹, y se diferenció de H2 y H3, los cuales presentaron similares valores (188,6 y 185 número de granos °C día g⁻¹, respectivamente). El efecto híbrido fue más importante que el efecto año. La mayor EFF de H1 en comparación con los otros dos híbridos podría atribuirse a una ventaja intrínseca del genotipo y no a la longitud de su ciclo, seguramente asociado al mejoramiento genético. Es importante destacar que los tres genotipos evaluados provienen de diferentes programas de mejoramiento.

Los resultados presentados hasta el momento en esta tesis avalan la hipótesis 1, que postula que los genotipos de sorgo de diferente ciclo modifican diferencialmente los parámetros de desarrollo, crecimiento y rendimiento ante atrasos en la fecha de siembra.

3.1.5 Relaciones funcionales entre las variables ecofisiológicas evaluadas

El 56% de las variaciones en el rendimiento en grano fue explicado, positivamente, por las variaciones en el número de granos por metro cuadrado (Figura 12).

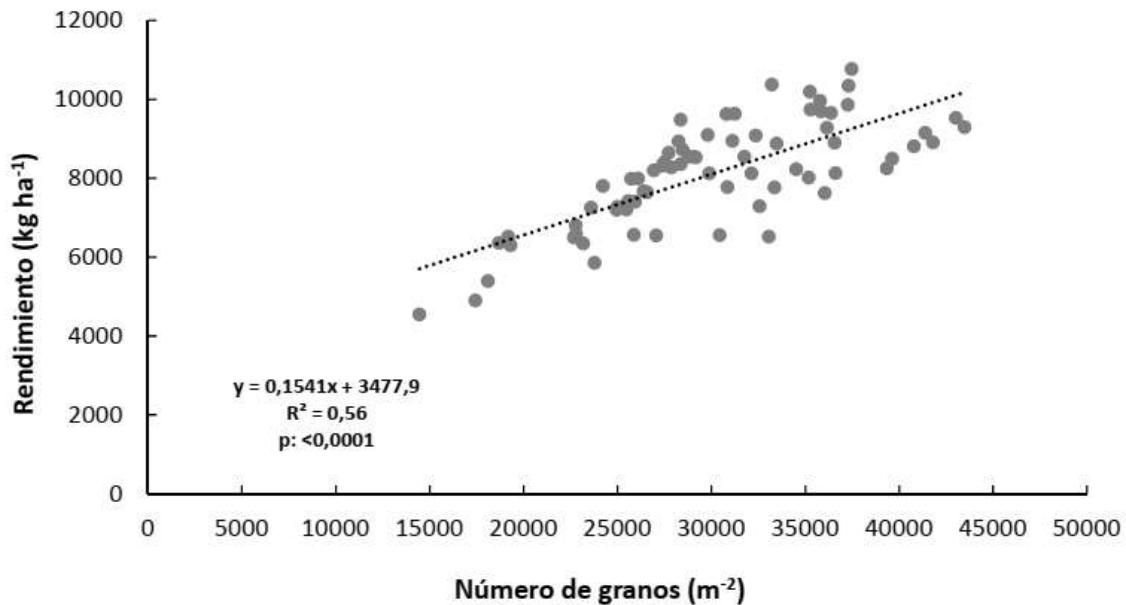


Figura 12: Regresión lineal entre número de granos y rendimiento ajustado al 15% de humedad.

Por otra parte, el peso de los granos se asoció negativamente con el número de granos por metro cuadrado (Figura 13). En relación con esto, Gambín et al., (2007), observaron que el peso del grano fue sensible al aumento de fotoasimilados por grano (asociado a la TCC durante el llenado de granos), lo que sugiere que el cultivo estuvo predominantemente limitado por fuente. Este hallazgo es consistente con los resultados encontrados en esta tesis, i.e. una relación negativa entre estos dos componentes de rendimiento.

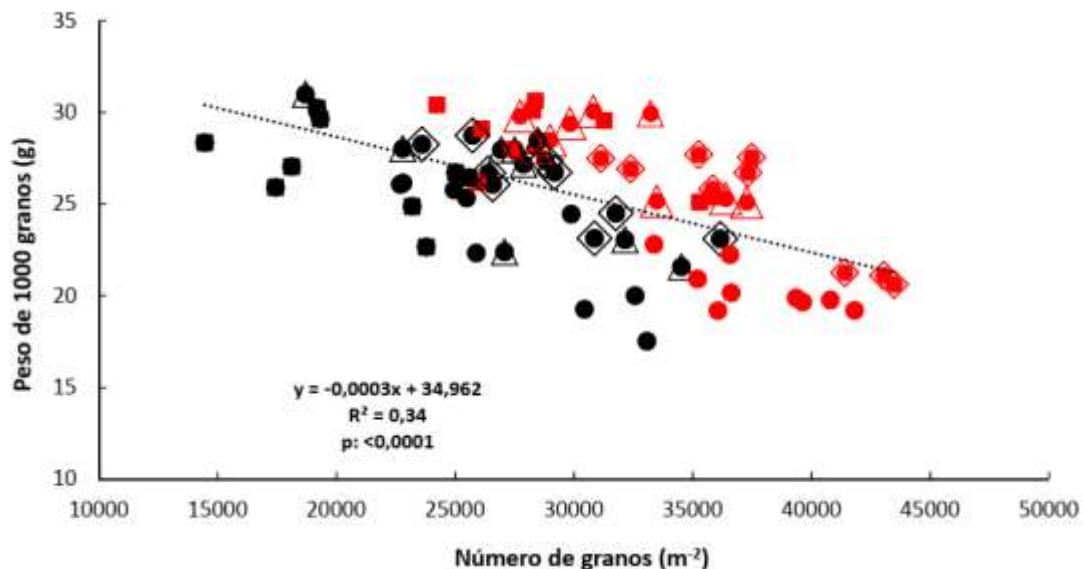


Figura 13: Regresión lineal entre número de granos y peso de mil granos en año 1 (Campaña 2012/13) y año 2 (Campaña 201/14) para F1, F2, F3 y F4 (fechas de siembra de fines de septiembre, octubre, noviembre y diciembre, respectivamente). Los puntos del color rojo corresponden al año 1 y los negros al año 2. Las fechas de siembra se presentan con distinta simbología, F1 (cuadrado relleno), F2 (triángulo vacío), F3 (rombo vacío) y F4 (círculos llenos).

Las variaciones en el rendimiento en granos fueron explicadas entre un 31-32 % por las variaciones en la biomasa acumulada a MF y en el índice de cosecha (Figura 14a y 14b, respectivamente). No se encontró relación entre la biomasa y el índice de cosecha.

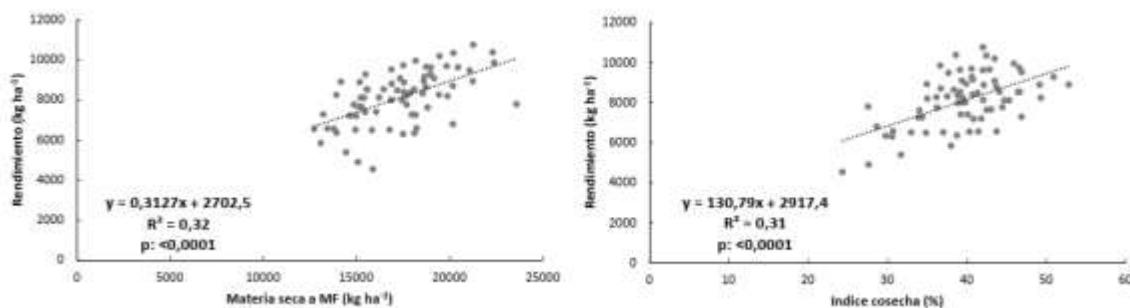


Figura 14: Regresión lineal entre materia seca acumulada a madurez fisiológica y rendimiento ajustado al 15% de humedad (Figura 14a, izquierda) y regresión lineal entre índice de cosecha y rendimiento ajustado al 15% de humedad (Figura 14b, derecha).

La tasa de crecimiento del cultivo se asoció positivamente con el rendimiento en granos (Figura 16) y con el número de granos por metro cuadrado (Figura 15). Esta

relación se ha documentado para la mayor parte de los cultivos de grano, pero era realmente escasa para el cultivo de sorgo.

En la Figura 16, dentro de cada año, la mayor proporción de los residuales de las fechas de siembra intermedias (F2 y F3) se ubicaron sobre la función (77%), mientras que los de las fechas de siembra extremas (F1 y F4) se ubicaron por debajo de la misma (75%). Esto indica una menor eficiencia reproductiva en fechas de siembras extremas, que parece ser consistente a través de toda la variación de ambientes registrada, indicada por el rango de valores de la TCC.

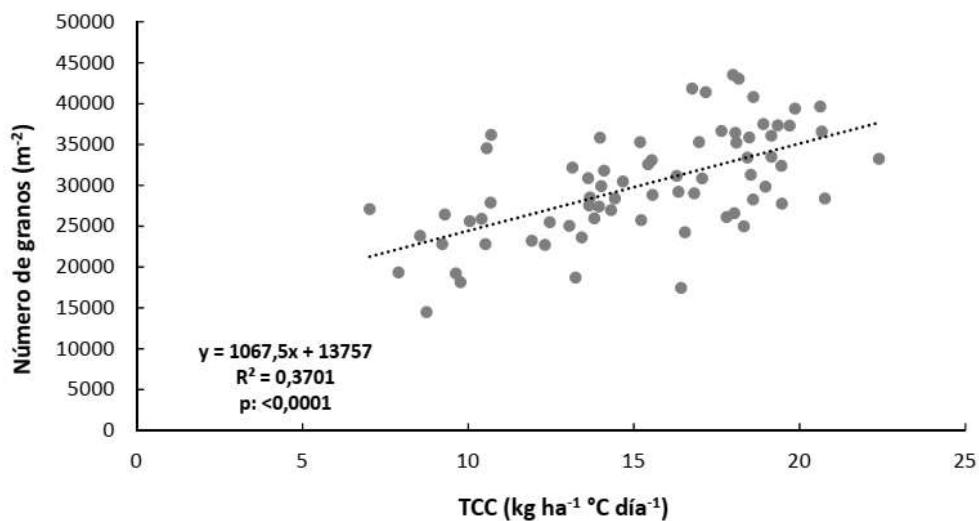


Figura 15: Regresión lineal entre tasa de crecimiento del cultivo (TCC) y número de granos.

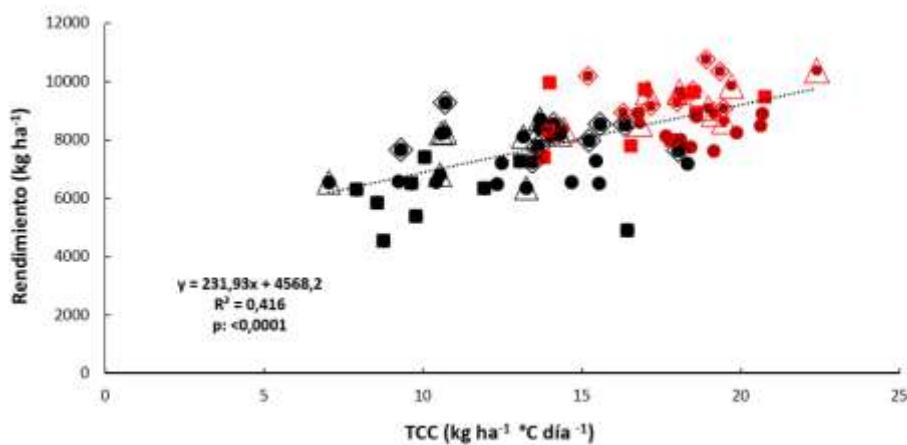


Figura 16: Regresión lineal entre tasa de crecimiento del cultivo (TCC) y rendimiento ajustado al 15% de humedad en año 1 (Campaña 2012/13) y año 2 (Campaña 2011/14) para F1, F2, F3 y F4 (fechas de siembra de fines de septiembre, octubre, noviembre y diciembre, respectivamente). Los puntos del color rojo corresponden al año 1 y los negros al año 2. Las

fechas de siembra se presentan con distinta simbología, F1 (cuadrado relleno), F2 (triángulo vacío), F3 (rombo vacío) y F4 (círculos llenos).

3.2 CAPTURA Y EFICIENCIA EN EL USO DE LOS RECURSOS

3.2.1 Intercepción de Radiación

La Figura 17 muestra la evolución de la intercepción de radiación en los tres híbridos y en ambos años ante atrasos en la fecha de siembra. Sí bien se observan algunas diferencias para un mismo híbrido en las distintas fechas de siembra en los años se realizó un análisis promediando dichos valores. Para H1 en F1 la radiación fue menor en todas las etapas del cultivo respecto de las demás fechas de siembra mientras que F4 presento los mayores valores. Para F1, F2, F3, F4 y F5 los niveles máximos de intercepción fueron 86,2%, 93,7%, 95,1%, 95,4% y 94,3%, respectivamente mientras que a floración los valores fueron de 86%, 91,8%, 94,3%, 95% y 93,9%. A inicio del periodo crítico (20 días antes de floración) los valores fueron más contrastantes 70%, 81%, 82,9%, 87,8% y 88,7% para F1, F2, F3, F4 y F5, respectivamente. También se destaca la caída de intercepción de radiación en F3 y F4 principalmente en el año 1 para este híbrido, esto se podría deber a una mayor senescencia de hojas en estas fechas de siembra (caída del índice de área foliar).

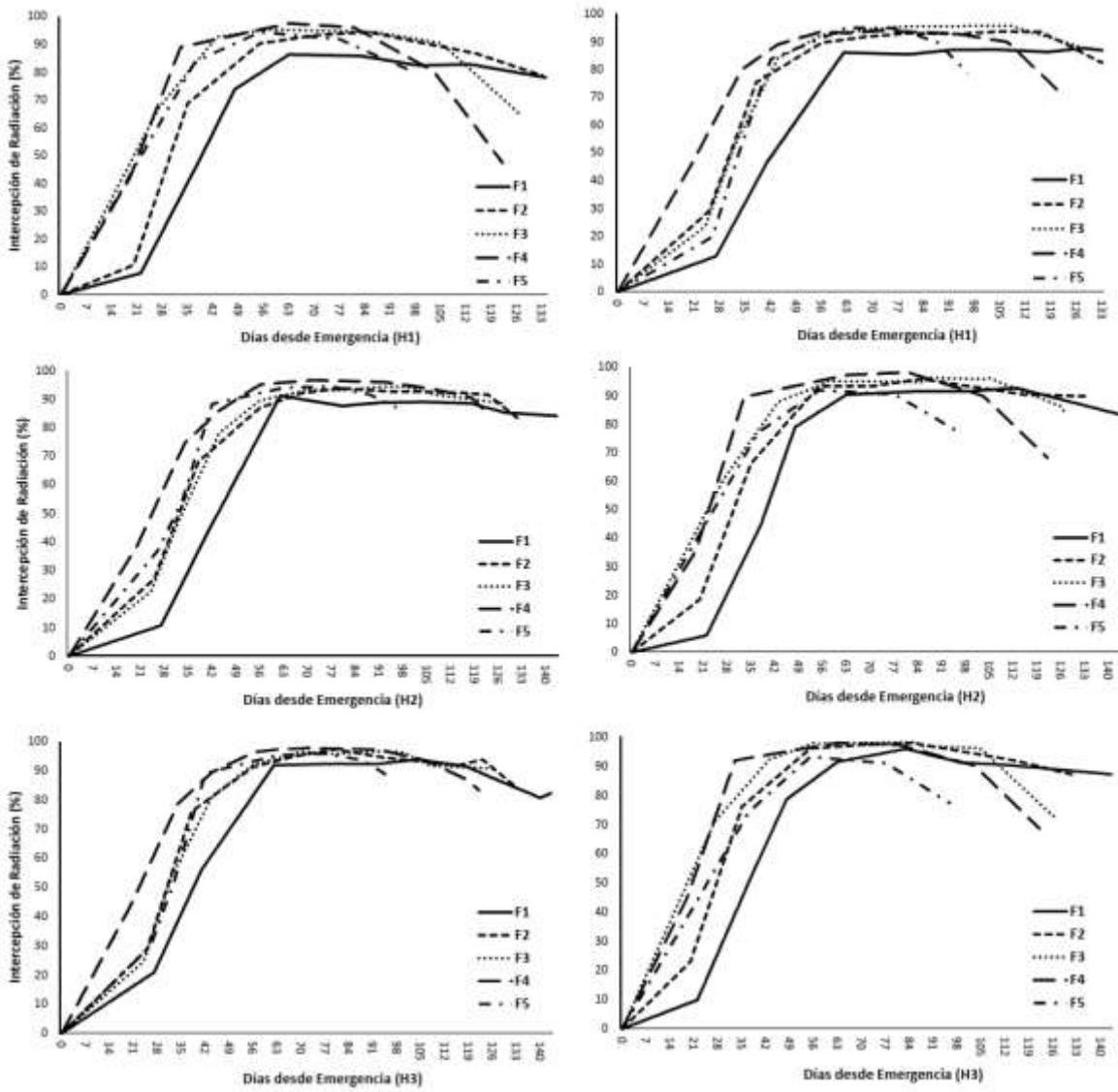


Figura 17: Evolución de la intercepción de radiación en porcentaje respecto del tiempo cronológico en días desde emergencia hasta madurez fisiológica para F1, F2, F3 y F4, mientras que para F5 la intercepción se midió algunos días pasados la floración, de los tres híbridos H1 (Ciclo corto), H2 (Ciclo intermedio) y H3 (Ciclo largo), en las 5 fechas de siembra F1, F2, F3, F4 y F5 (fechas de siembra de fines de septiembre, octubre, noviembre, diciembre y enero, respectivamente), para año 1 (Campaña 2012/13) y año 2 (Campaña 2013/14). En orden descendente las figuras corresponden a H1, H2 y H3, respectivamente. Las figuras de la izquierda corresponden al año 1 para el híbrido analizado y las figuras de la derecha al año 2.

La radiación interceptada promedio de ambos años de H2 también presentó diferencias marcadas en las fechas de siembra. Al igual que en H1 en F1 la radiación de H2 en F1 fue menor en todas las etapas del cultivo respecto de las demás fechas

de siembra, mientras que F4 presentó los mayores valores. Para F1, F2, F3, F4 y F5 los niveles máximos de intercepción fueron 90,7%, 94,6%, 95,2%, 97,3% y 92,7%, respectivamente. Los valores de intercepción de radiación a floración presentaron valores de 89,6%, 93,1%, 93,9%, 96,8% y 92,5% para F1, F2, F3, F4 y F5, respectivamente, mientras que para inicio del periodo crítico los valores fueron más contrastantes 85,9%, 86%, 86,1%, 90,2% y 91,3%. En este híbrido se observa una caída de intercepción de radiación en F4 del año 2.

La radiación interceptada, promedio de ambos años de H3, también presentó diferencias marcadas en los fechas de siembra. Al igual que en H1 y H2 en F1 la radiación de H3 en F1 fue menor en todas las etapas del cultivo respecto de las demás fechas de siembra mientras que F4 presento los mayores valores. Para F1, F2, F3, F4 y F5 los niveles máximos de intercepción fueron 94,2%, 97,6%, 97,3%, 97,7% y 93,9%, respectivamente. Los valores de intercepción de radiación a floración presentaron valores de 94,2%, 97,2 %, 97,2%, 97,7% y 93,5% para F1, F2, F3, F4 y F5 respectivamente, mientras que para inicio del periodo crítico los valores fueron más contrastantes 91,8%, 93,9%, 92,3%, 94,2% y 93,2%. En H3 también se observó una caída de intercepción en F3 y F4 en el año 2.

Estos resultados sugieren que prácticas de manejo de la canopia como el acercamiento de la distancia entre hileras (menor a 52 cm) en F1, en los híbridos más corto podría ser útil para mejorar la captura de radiación. También se observó que en fecha de siembra más tardía (F4) se produjo una caída de intercepción, la cual pudo estar relacionada a una mayor senescencia y/o a enfermedades foliares, esta caída se aceleró después de los 15 después de floración.

3.2.2 Radiación acumulada y eficiencia de uso

La radiación interceptada acumulada en el ciclo del cultivo presentó efecto significativo de los factores año, fecha de siembra, híbrido, interacción año x fecha, año x híbrido, fecha x híbrido e interacción triple año x fecha x híbrido (Tabla 9). El año 2 presentó una radiación interceptada acumulada superior al 6%, respecto del año1, con valores promedio de 834 y 785 MJ m⁻², respectivamente. Esta tendencia se observó en todas las fechas de siembra, excepto en F4, donde se logró mayor acumulación en el año 1. En el año 1, todas las fechas lograron diferentes valores de acumulación de radiación interceptada siguiendo el ranking F2>F4>F3>F1. En el año 2, F2 y F3 lograron la mayor acumulación de radiación seguidas por F1 y F4 (estas

últimas con diferencias entre sí). En todas las fechas de siembra el comportamiento de los híbridos siguió el ranking H3>H2>H1.

El cociente entre radiación acumulada interceptada y PAR incidente acumulada en el ciclo del cultivo, i.e. la eficiencia de intercepción durante el ciclo del cultivo, tuvo efecto de los factores fecha de siembra, híbrido, interacción año x fecha, fecha x híbrido e interacción triple año x fecha x híbrido. En el año 1, la fecha de mayor cociente fue F4 con 0,68, le siguieron sin diferencias entre sí F2 y F3 (0,64 y 0,63, respectivamente), la fecha de menor cociente fue F1 con 0,57. En año 2, F3 y F4 lograron los mayores cocientes (0,67 y 0,66, respectivamente), seguido de F2 con 0,63. Al igual que en el año 1, F1 obtuvo el menor valor con 0,56. Los híbridos manifestaron un mismo patrón en las diferentes fechas de siembra: H3≥H2≥H1, con excepción de F2 y F3 del año 1.

La eficiencia de uso de la radiación interceptada en el ciclo para producir biomasa presentó efecto significativo de año, fecha de siembra e interacción año x fecha. Hubo diferencias en la EUR entre años con valores medios de 2,36 y 1,93 g MJ⁻¹ para el año 1 y 2, respectivamente. En relación a las fechas de siembra, en el año 1 las mayores eficiencias se obtuvieron en F1, F2 y F3 (sin diferencias significativas entre ellas), con valores de 2,55, 2,36 y 2,46 g MJ⁻¹, respectivamente. La menor EUR fue para F4 con un valor de 2,07 g MJ⁻¹. En el año 2, F1, F2 y F4 presentaron las mayores EUR (sin diferencias significativas entre ellas) con valores de 1,92, 1,96 y 2,01 g MJ⁻¹, respectivamente. La menor eficiencia lograda fue en F3 con 1,84 g MJ⁻¹, aunque sin diferencias significativas con F1 y F4. Estos datos son menores a los encontrados por Narayanan et al. (2013) en una investigación sobre 8 genotipos de sorgo para producción de biomasa en Kansas (USA), donde reportaron eficiencias de $2,13 \pm 0,33$ a $3,53 \pm 0,31$ g MJ⁻¹ en 2009 y $2,08 \pm 0,35$ a $3,83 \pm 0,33$ g MJ⁻¹ en 2010, estas mayores eficiencias encontradas están relacionadas a la mayor acumulación de biomasa total de estos sorgos. Sin embargo, en ambientes con mayor demanda atmosférica, en zonas áridas y semiáridas de Texas, USA (Yang et al., 2021), se han reportado valores similares a los del rango inferior aquí reportado.

Tabla 9: Radiación interceptada acumulada a madurez fisiológica (Rad), coeficiente entre radiación acumulada interceptada y radiación PAR acumulada en el ciclo del cultivo (eficiencia de intercepción), eficiencia de uso de la radiación (EUR) para materia seca total y grano, para H1, H2 y H3 en cuatro fechas de siembra (F1, F2, F3 y F4), en ambos años evaluados.

Año	Fecha	Híbrido	Rad Acum (MJ m ⁻²)	Rad Acum/Rad PAR	EUR MS (g MJ ⁻¹)	EUR Grano (g MJ ⁻¹)			
Año 1	F1	H1	659	0,53	2,59	1,15			
		H2	750	0,56	2,75	0,92			
		H3	864	0,62	2,32	0,88			
	F2	H1	776	0,63	2,52	1,02			
		H2	808	0,66	2,25	0,88			
		H3	865	0,63	2,32	0,93			
	F3	H1	745	0,63	2,44	1,04			
		H2	746	0,61	2,56	1,07			
		H3	835	0,65	2,38	1,00			
	F4	H1	741	0,66	2,04	0,97			
		H2	795	0,67	2,09	0,89			
		H3	838	0,69	2,07	0,79			
Año 2	F1	H1	752	0,51	2,09	0,74			
		H2	865	0,58	1,81	0,54			
		H3	897	0,60	1,87	0,58			
	F2	H1	801	0,60	1,94	0,81			
		H2	860	0,62	1,97	0,76			
		H3	955	0,67	2,11	0,70			
	F3	H1	812	0,65	1,92	0,89			
		H2	880	0,66	1,75	0,80			
		H3	925	0,69	1,83	0,70			
	F4	H1	715	0,65	1,91	0,81			
		H2	767	0,66	1,91	0,75			
		H3	780	0,68	2,07	0,80			
		Valor p	SC	Valor p	SC	Valor p	SC	Valor p	SC
Año		<0,0001	43071	0,4663	0,00017	<0,0001	3,3	<0,0001	0,88
Fecha		<0,0001	52573	<0,0001	0,11	0,0036	0,49	0,0003	0,13
Híbrido		<0,0001	172820	<0,0001	0,03	0,4852	0,05	<0,0001	0,22
Año*Fecha		<0,0001	48543	0,0002	0,01	0,0001	0,85	<0,0001	0,16
Año*Híbrido		0,0487	3368	0,1728	0,0011	0,0589	0,19	0,8144	0,0023
Fecha*Híbrido		0,0001	18195	0,0005	0,01	0,2825	0,24	0,0955	0,06
Año*Fecha*Híbrido		0,0119	9775	0,0163	0,01	0,2917	0,24	0,1087	0,06
Error			23987		0,01		1,45		0,25

La EUR interceptada en el ciclo para producir grano presentó efecto significativo de año, fecha de siembra, híbridos e interacción año x fecha. El año 1 presentó mayor EUR que el año 2, con valores de 0,96 y 0,74 g MJ⁻¹, respectivamente. Los híbridos presentaron diferencias entre sí, H1 obtuvo la mayor eficiencia con un valor de 0,93 g MJ⁻¹ y se diferenció de H2 y H3, los cuales tuvieron un similar valor, i.e. 0,83 y 0,80 g MJ⁻¹, respectivamente. En el año 1, F3 presentó la mayor eficiencia y F4 la menor, con valores de 1,04 y 0,88 g m⁻² MJ⁻¹, respectivamente. En tanto, F1 y F2 tomaron valores intermedios con eficiencias de 0,98 y 0,94 g MJ⁻¹, respectivamente. En el año 2, F2, F3 y F4 presentaron los mayores valores con 0,76, 0,80 y 0,78 g MJ⁻¹, respectivamente y se diferenciaron de F1 con 0,62 g MJ⁻¹.

3.2.3 Agua y eficiencia de uso

La ET (mm) presentó efecto significativo de año, híbrido e interacción año x fecha (Tabla 10). La misma tuvo un comportamiento inverso entre las fechas de siembra. En el año 1, F1 presentó mayor evapotranspiración que F3 (347 y 277 mm, respectivamente). En contraste, en el año 2, F3 presentó mayor evapotranspiración que F1 (387 y 319 mm, respectivamente). Esto comportamiento podría deberse a la mayor oferta de agua debido a las mayores precipitaciones ocurridas en octubre, noviembre y diciembre en año 1 y febrero, marzo y abril del año 2.

La eficiencia del uso del agua evapotranspirada en el ciclo para producir biomasa presentó efecto significativo de año e interacción año x fecha (Tabla 10). En el año 1, se observó mayor eficiencia que en año 2 (6,1 y 4,7 g mm⁻¹ m⁻², respectivamente). Dentro de cada año hubo comportamientos diferentes entre las fechas de siembra. En año 1, F3 presentó mayor eficiencia del uso de agua que F1 (6,85 y 5,3 g mm⁻¹ m⁻², respectivamente). En el año 2 el comportamiento fue opuesto, ya que F1 presentó mayor eficiencia que F3 (F1 (5,1 y 4,22 g mm⁻¹ m⁻², respectivamente). Estos datos están en concordancia con los valores encontrados por Narayanan et al (2013), en investigación sobre 8 genotipos de sorgo para producción de biomasa en Kansas (USA), donde encontraron eficiencias de $3,39 \pm 0,8$ a $5,42 \pm 0,8$ g kg⁻¹ en 2009 y $4,04 \pm 0,58$ a $7,63 \pm 0,58$ g kg⁻¹ en 2010. Sin embargo, la EUA puede alcanzar valores de más del doble de los aquí informados en regiones áridas o semiáridas (Ajeigbe et al., 2018), debido a la alta habilidad del sorgo para generar biomasa y granos en condiciones extremas (Borrel et al., 2021).

La eficiencia del uso del agua evapotranspirada en el ciclo para producir grano presentó efecto significativo de los factores año, fecha de siembra e interacción año x fecha. El año 1 presentó una eficiencia mayor al 46% respecto del año 2 (2,55 y 1,74 g mm⁻¹ m⁻², respectivamente). En relación a las fechas de siembra, en año 1, F3 mostró una mayor eficiencia que F1 (2,91 y 2,2 g mm⁻¹ m⁻², respectivamente). En el año 2 las fechas no presentaron diferencias significativas entre sí con valores medios de 1,74 g mm⁻¹ m⁻².

Tabla 10: Evapotranspiración (ET), eficiencia de uso de agua (EUA) para materia seca total y grano y conductancia aparente del cultivo (gc), para H1 y H3 en fechas de siembra F1 y F3, en ambos años evaluados.

Año	Fecha	Híbrido	ET	EUA MS	EUA Grano	gc		
			(mm)	(g m ⁻² mm ⁻¹)	(g m ⁻² mm ⁻¹)	(mm MJ ⁻¹)		
1	Año	F1	H1	338	5,05	2,25	0,51	
			H3	356	5,64	2,15	0,41	
	F3	H1	263	6,89	2,94	0,35		
		H3	291	6,83	2,87	0,35		
2	Año	F1	H1	313	5,03	1,80	0,42	
			H3	325	5,17	1,60	0,36	
	F3	H1	384	4,07	1,87	0,47		
		H3	389	4,37	1,70	0,42		
			Valor p	SC	Valor p	SC	Valor p	SC
Año			<0,0001	9963	<0,0001	1251	<0,0001	395,3
Fecha			0,8234	5	0,0699	59,9	0,0002	94,4
Híbrido			0,0016	1488	0,1594	34,3	0,1111	10,7
Año*Fecha			<0,0001	28085	<0,0001	863	0,0013	58,9
Año*Híbrido			0,0937	315	0,8908	0,3	0,5339	1,5
Fecha*Híbrido			0,8551	3	0,4592	9,0	0,851	0,14
Año*Fecha*Híbrido			0,3096	108	0,2217	25,4	0,9833	0,002
Error			1365		217,5		51,6	
							0,01	

La conductancia aparente del cultivo (gc) presentó efecto significativo de fecha de siembra, híbrido, interacción año x fecha, fecha x híbrido y año x fecha x híbrido (Tabla 10). La interacción triple entre factores sobre la conductancia se puede observar en la figura 18. En la misma se ven diferencias significativas de H1 respecto

de H3 (H1 de mayor valor), excepto para F3 en año 1, en la cual los híbridos se comportaron de manera similar.

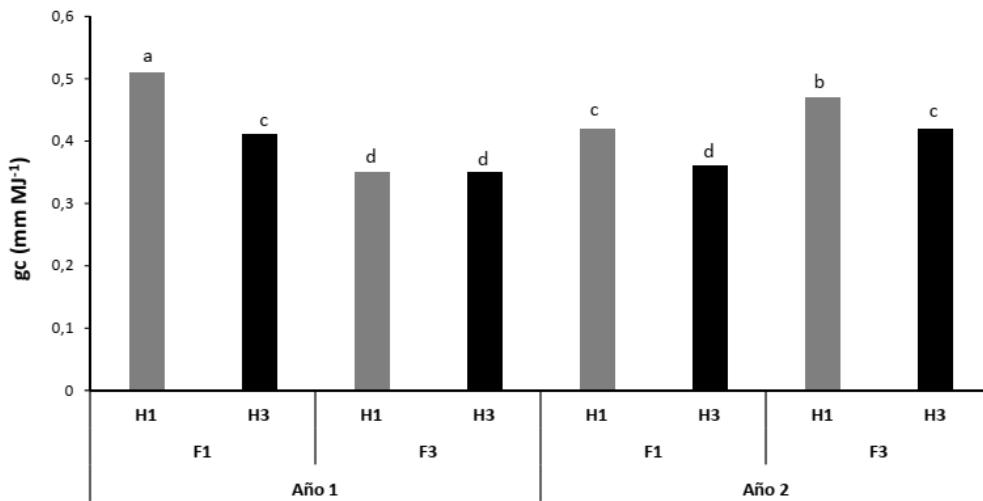


Figura 18: Conductancia aparente del cultivo (gc), para H1 (Ciclo corto) y H3 (Ciclo largo) en fechas de siembra F1 (fines de septiembre) y F3 (fines de noviembre), en año 1 (Campaña 2012/13) y año 2 (Campaña 2013/14).

Para la variable EUA MS se pudo probar sólo parcialmente la hipótesis de que la EUA se incrementa con el atraso de la fecha de siembra, principalmente debido a una menor conductancia aparente (gc), ya que este comportamiento solo se observó en el año 1. En el año 2, el comportamiento fue opuesto, es decir que al atrasar la fecha de siembra disminuyó la EUA MS y aumentaron los valores de conductancia aparente (gc). La EUA grano en el año 1 aumentó ante atrasos en la fecha de siembra, mientras que en el año 2 no se observaron diferencias entre fechas.

3.2.4 Relaciones funcionales entre las variables ecofisiológicas evaluadas

La eficiencia de uso de agua y la eficiencia de uso de la radiación de la materia seca total acumulada a madurez fisiología se asociaron estrecha y positivamente, con un coeficiente de regresión fue de 0,43 (Figura 19).

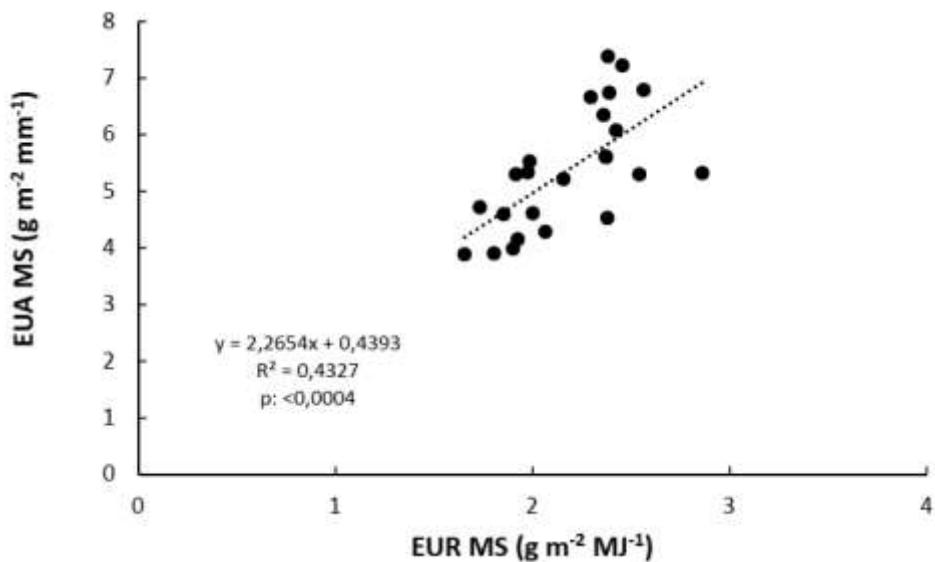


Figura 19: Regresión lineal entre eficiencia de uso de agua (EUA MS) y eficiencia de uso de radiación (EUR MS) de la materia seca total acumulada a madurez fisiológica.

La EUA MS tuvo una relación negativa con la conductancia aparente del cultivo con un coeficiente de regresión de 0,45 (Figura 20). La EUR MS no estuvo asociada con la gc ($P>0,1$).

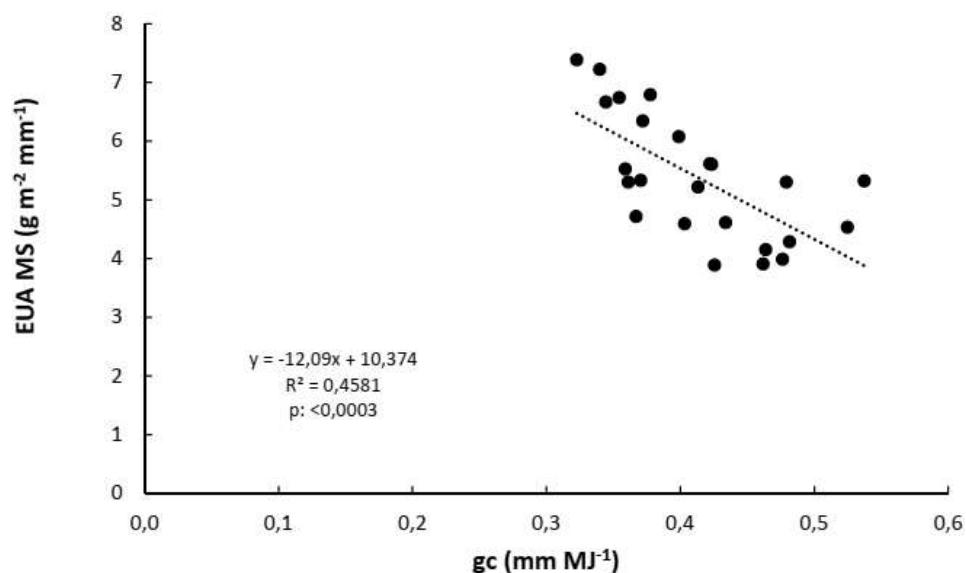


Figura 20: Regresión lineal entre eficiencia de uso de agua de la materia seca total acumulada a madurez fisiológica (EUA MS) y la conductancia aparente del cultivo (gc).

La eficiencia de uso de agua y la eficiencia de uso de la radiación para grano también presentaron una estrecha relación positiva, con un coeficiente de regresión de

0,60 (Figura 21). Llamativamente, no se detectó una asociación significativa entre EUA para grano y gc. Tampoco hubo una asociación entre EUR grano y gc.

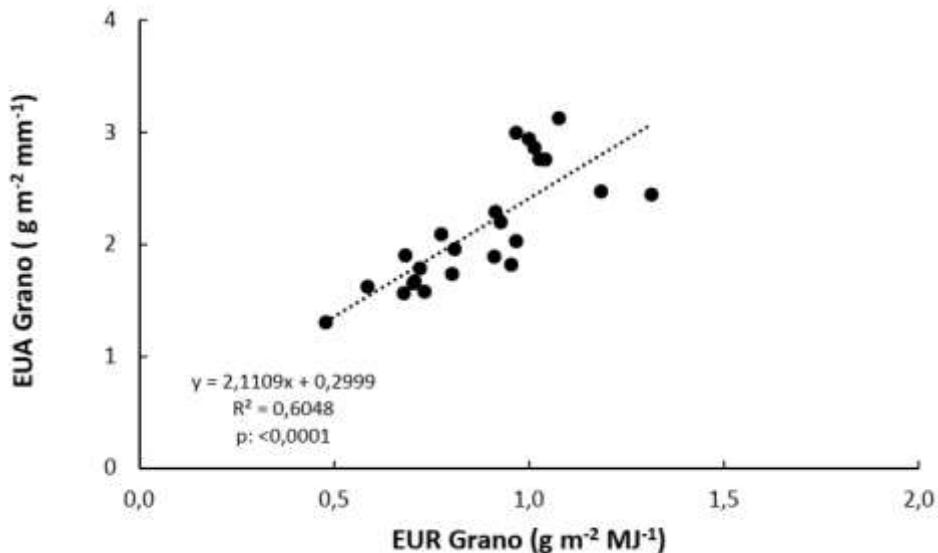


Figura 21: Regresión lineal entre eficiencia de uso de agua para grano (EUA Grano) y eficiencia de uso de radiación para grano (EUR Grano).

Existió una alta asociación entre la EUR grano y EUR MS, con un coeficiente de regresión de 0,66 (Figura 22). No se observó una relación entre el IC (%) y gc.

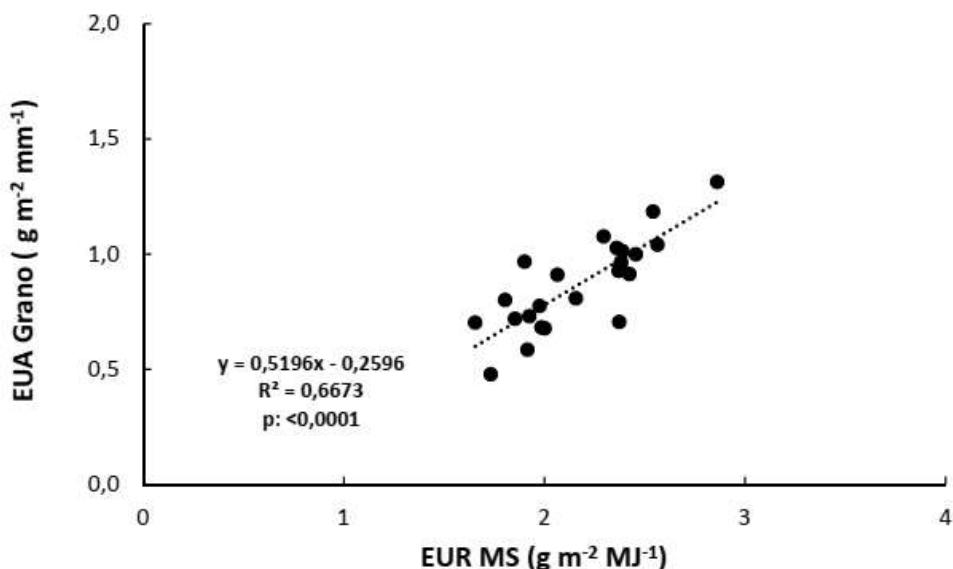


Figura 22: Regresión lineal entre eficiencia de uso de agua para grano (EUA Grano) y eficiencia de uso de radiación de la materia seca a madurez fisiológica (EUR MS).

4 INTEGRACIÓN DE RESULTADOS

En la Figura 23 se muestra un diagrama de flujos con el objetivo de dimensionar, de manera conjunta, las relaciones entre las principales variables presentadas en las diferentes subsecciones.

El atraso en la fecha de siembra expuso al cultivo (en etapa vegetativa) a mayores temperaturas y duración del día que produjeron sumas térmicas diferenciales en las distintas fechas e híbridos alcanzando distinto número de hojas totales (Tablas 5 y 6). El número de hojas tuvo relación con la intercepción de radiación (PAR) durante el desarrollo del cultivo resultando en variaciones en la radiación interceptada acumulada en el ciclo (Tabla 9).

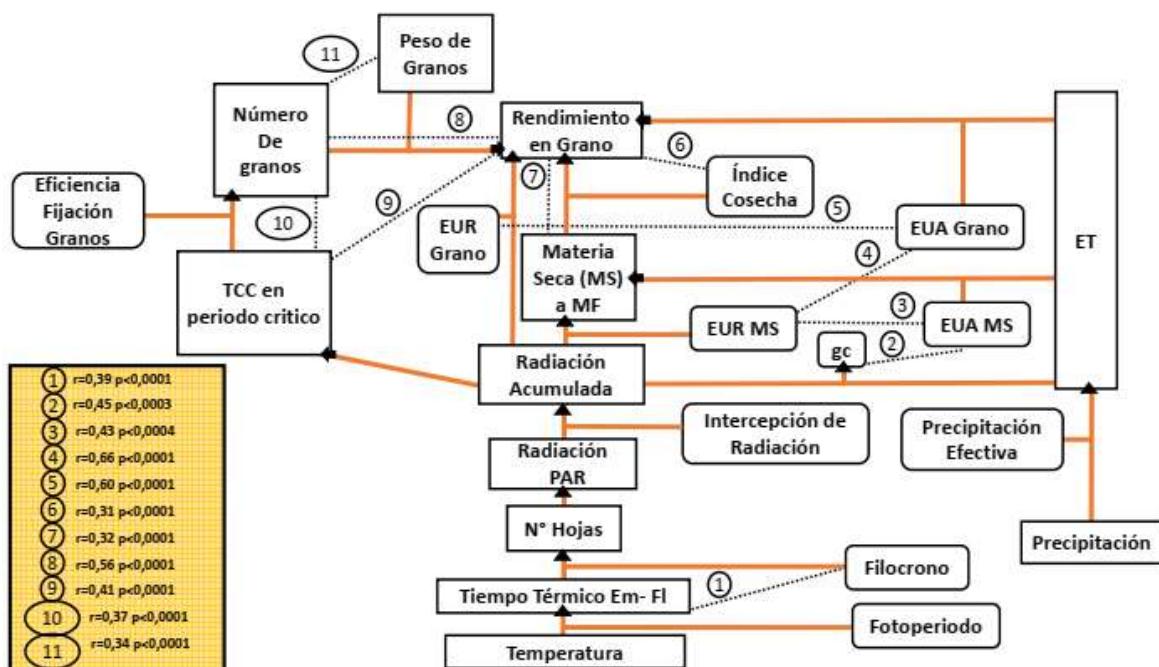


Figura 23: Diagrama de flujos de las principales variables analizadas. Las líneas de color indican la relación de las variables y las líneas punteadas indican las regresiones lineales entre dos variables analizadas.

La radiación acumulada durante el ciclo del cultivo se transformó en materia seca total, que presentó diferentes eficiencias de conversión (EUR MS), principalmente entre fechas de siembra (Tabla 9). La materia seca total acumulada a madurez fisiológica afectada por índice de cosecha resultó en rendimientos en grano diferenciales entre fechas de siembra (fechas de fines de octubre y noviembre presentaron los mayores rendimientos) (Tabla 8). Por otra parte, el rendimiento en grano manifestó diferencias en eficiencia de uso de la radiación (EUR grano) por efecto de las fechas de siembra y de los híbridos (Tabla 9). Las diferencias de EUR

MS y EUR grano (mayores en año 1) se deben en términos generales a una mayor acumulación de materia seca total y en grano en el año 1 en relación a una menor acumulación de radiación durante el ciclo en relación al año 2, en el que se observó un comportamiento inverso.

Otro camino evaluado en este trabajo fue el de la relación de la tasa de crecimiento del cultivo (TCC) y la eficiencia de fijación de granos (EFF), obteniéndose diferentes valores en el número de granos (m^{-2}), principal componente de rendimiento, el cual presentó relación inversa con el peso de los mismos (P1000) (Tabla 8).

Las precipitaciones en ambos años tuvieron marcadas diferencias en su distribución (Figuras 5 y 6), las mismas fueron corregidas en precipitación efectiva y relacionadas con las variaciones de almacenaje de agua permitiendo mediante un balance hídrico estimar la evapotranspiración del cultivo (ET mm) (Tabla 10). Dicha ET se utilizó, por un lado, para estimar la EUA MS y EUA grano al relacionarlo con la acumulación de materia seca en madurez fisiológica y rendimiento en grano y por el otro para calcular la conductancia aparente de la canopia (gc) (Tabla 10). La ET (mm) fue variable entre años y fechas de siembra debido principalmente a las variaciones en precipitaciones durante el ciclo de los cultivos. La hipótesis 3 se pudo probar parcialmente posiblemente debido a un año atípico en cuando a precipitaciones de los meses de febrero, marzo y abril del año 2 que resultaron en elevados valores de ET en F3 y por consiguiente en una baja EUA MS y mayores valores de (gc). Se detectó que H1 presentó consistentemente mayor valores de conductancia aparente, por lo que esta métrica emerge como valiosa para caracterizar híbridos con diferente comportamiento a déficit hídrico.

5 CONCLUSIONES

Atrasos en las fechas de siembra desde fines de septiembre (F1) a fines de noviembre (F4) provocaron una disminución de días cronológicos desde siembra a emergencia y días desde emergencia a floración y un aumento en los días desde floración a madurez fisiológica. Los días desde emergencia a floración en este periodo presentaron un efecto diferencial en los híbridos H1<H2<H3 y estuvieron asociados a la duración total del ciclo ontogénico.

La altura de todos los híbridos aumentó de manera progresiva hasta F4 en el año 2. En ambos años y en todas las fechas, la altura siguió el siguiente patrón: H1< H2 < H3.

La acumulación de materia seca a madurez fisiológica se mantuvo ante atrasos en la siembra y disminuyó en F4. A mayor ciclo del cultivo de registraron mayores valores de acumulación, independientemente de fecha y año.

Los mayores rendimientos de obtuvieron en las fechas de siembra intermedias, F2 y F3, con diferencias marcadas entre F1 y F4 según el año y sin diferencias entre híbridos.

Los mayores valores de índice de cosecha y número de granos por metro cuadrado se obtuvieron en F2, F3 y F4. Para estas variables, H1 obtuvo mayores valores que H2 y H3. El peso de mil granos presentó una fuerte disminución en la fecha de siembra más tardía (F4), mientras que H1 presentó los menores valores, independientemente de la fecha de siembra.

El rendimiento en grano estuvo relacionado de manera positiva con el número de granos por metro cuadrado, la tasa de crecimiento, la acumulación de materia seca a madurez fisiológica y el índice de cosecha.

La evolución de la intercepción de la radiación durante todo el ciclo del cultivo en todos los híbridos fue menor en F1 y mayor en F4 (F2 y F3, tomaron valores intermedios entre estas), también se observó una notoria caída en F4 al final del ciclo del cultivo.

La eficiencia de uso de la radiación fue mayor en año 1, debido principalmente a una mayor acumulación de materia seca a madurez fisiológica y una menor acumulación de radiación. La eficiencia de uso del agua para materia seca y grano presentó diferencias entre años y un comportamiento opuesto en las fechas de siembra.

La conductancia del cultivo presentó diferencias significativas de H1 respecto de H3 (H1 de mayor valor). Se observó una relación positiva entre eficiencia de uso de la radiación y eficiencia de uso de agua tanto para materia seca como para grano y una relación inversa entre conductancia y eficiencia de uso de agua de la materia seca.

6 CONSIDERACIONES FINALES

El dispositivo experimental utilizado y las mediciones realizadas permitieron poner a prueba las hipótesis y cumplir con los objetivos fijados.

Los resultados obtenidos son muy útiles para mejorar los conocimientos sobre la interacción de la fecha de siembra con la longitud del ciclo de los genotipos. La

información disponible hasta el momento en el área de estudio era realmente escasa y muy dispersa.

La integración de los resultados de los dos años de experimentación permitió discriminar con claridad cuáles son las variables más influyentes sobre la captura y eficiencia de uso de recursos.

Dicho análisis permitió detectar compensaciones entre variables ecofisiológicas que no habían sido esperadas *a priori*, e.g. la compensación entre conductancia aparente del cultivo y eficiencia en el uso de la radiación para materia seca. Dichas compensaciones abren la posibilidad de generar nuevas hipótesis y diseñar nuevos estudios. Un interrogante emergente que surge de los resultados es sobre la influencia de los genotipos seleccionados sobre los resultados obtenidos. Sería recomendable para futuros estudios estudiar sobre un conjunto más amplio de genotipos la variabilidad en la conductancia del cultivo en fechas de siembra extremas.

Asimismo, debido a que el experimento fue realizado en condiciones de secano, los resultados fueron influenciados por la cantidad y distribución de precipitaciones en cada campaña. Es por ello que los futuros estudios sobre el tema deberían profundizar aspectos relacionados con el estudio ante diferentes escenarios climáticos, más aún ante los desafíos que plantea el cambio climático global. El uso de modelos de simulación calibrados y evaluados para la zona en estudio podría ser muy valioso para el cumplimiento de esta premisa.

En este sentido, los resultados obtenidos pueden ser muy útiles para calibrar modelos de simulación y para generar nuevas hipótesis sobre las compensaciones encontradas entre las variables ecofisiológicas evaluadas.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Ajeigbe H. A., Akinseye F. M., Ayuba K., Jonah J. 2018. Productivity and Water Use Efficiency of Sorghum [Sorghum bicolor (L.) Moench] Grown under Different Nitrogen Applications in Sudan Savanna Zone, Nigeria. International Journal of Agronomy. Article ID 7676058, 11 pages.
- Anda A., Pinter L. 1994. Sorghum Germination and Development as Influenced by Soil Temperature and Water Content. Agronomy Journal. Volume 86. 621-624.
- Andrade F. H., Cirilo A., Uhart S., Otegui M. 1996. Ecofisiología del Cultivo de Maíz. Editorial La Barrosa, Dekalb Press. INTA, FCA UNMP. Buenos Aires. p. 193-220.
- Bolsa de Cereales de Entre Ríos. Proyecto SIBER. Informe de campaña de Sorgo 2020/21. Disponible en URL: <https://www.bolsacer.org.ar/Fuentes/siberd.php?Id=1293>
- Borrell A., Van Oosterom E., George-Jaeggli B., Rodriguez D., Eyre J., Jordan D. J., Mace E., Singh V., Vadez V., Bell M., Godwin I., Cruickshank A., Tao J., Hammer G. 2021. Chapter 5 – Sorghum. 196-221.
- Caviglia O. P., Sadras V. O. 2001. Effect of nitrogen supply on crop conductance, water – and radiation- use efficiency of wheat. Field Crop Research. 69: 259-266.
- Cirilo A. G., Andrade F. H. 1994. Sowing date and maize productivity: I. Crop growth and dry matter partitioning. Crop Science 34: 1039-1043.
- Cooper P., Keatinge J., Hughes G., 1983. Crop evapotranspiration — A technique for calculation of its components by field measurements. Field Crops Res. 7, 299–312.
- Curt M. D., Fernandez J., Martinez M. 1995. Productivity and water use efficiency of sweet sorghum (Sorghum bicolor (L.) Moench) cv “Keller” in relation to water regime. Biomass and Bioenergy 8: 401-409.
- Di Rienzo J. A., Casanoves F., Balzarini M. G., Gonzalez L., Tablada, M., Robledo, C. W. 2011. Infostat Córdoba, Argentina. Retrieved from. Universidad Nacional de Córdoba. Disponible en URL: <http://www.infostat.com.ar/>

Díaz M. G. 2010. Prácticas de manejo del cultivo de sorgo para mejorar su rendimiento. IX Congreso Nacional de maíz y I Simposio Nacional de sorgo. Rosario, Santa Fe. p. 386-390.

Erbacher, A., Bell, L. W., Gentry, J., Lawrence, D., Baird, J., Dunn, M., Aisthorpe, D. and Brooke, G. (2022). Water use efficiency is improved by storing more water before planting. In: Proceedings of the 20th Agronomy Australia Conference, 2022, 6 - 10 February 2022, Toowoomba Qld.

FAOSTAT, Food and Agricultural Organization of the United Nations Stadistics. 2020. Disponible en URL: <https://www.fao.org/faostat/es/#compare>

Gallo W.P., Daughtry C.S.T. 1986. Techniques for measuring intercepted and absorbed photosynthetically active radiation in crop canopies. *Agronomy Journal* 78: 752-756.

Gambín B. L., Borrás L. 2007. Plasticity of sorghum kernel weight to increased assimilate availability. *Field Crops Research* 100: 272–284.

Giorda L. M. 1997. Sorgo granífero. EEA Manfredi – INTA Centro Regional Córdoba. Cuaderno de Actualización Técnica N° 7:71.

Gizzi. G., Gambín B. L. 2016. Eco-physiological changes in sorghum hybrids released in Argentina over the last 30 years. *Field Crops Research*.188: 41-49.

Hammer G. L., Carberry P. S., Muchow R. C. 1993. Modelling genotypic and environmental control of leaf area dynamics in grain sorghum. I. Whole plant level. *Field Crops Research* 33: 293–310.

Hammer G. L., Vanderlip R. L., Gibson G., Wade L. J., Henzell R. G., Younger D. R., Warren J., Dale A. B. 1989. Genotype-by-Environment Interaction in Grain Sorghum. II. Effects of Temperature and Photoperiod on Ontogeny. *Crop Sci* 29: 376-384.

Hatfield H. L., Dold C. 2019. Water-Use Efficiency: Advances and Challenges in a Changing Climate. *Frontiers in Plant Science*. 10: 103.

Heiniger R. W., Vanderlip R. L., Welch S. M., Muchow R. C. 1997. Developing Guidelines for Replanting Grain Sorghum: II. Improved Methods of Simulating Caryopsis Weight and Tiller Number. *Agronomy Journal*. 89: 84-92.

INIA. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. Cálculo Precipitación Efectiva. Disponible en URL: <http://www.inia.uy/gras/Monitoro-Ambiental/Balance-H%C3%ADdrico/Calculo-Precipitacion-Efectiva>

- Kotari K., Ale S., Bordovsky J. P., Porter. D. O. Munster C. L., Hoogenboom G. 2020. Potential benefits of genotype-based adaptation strategies for grain sorghum production in the Texas High Plains under climate change. 117: 126037.
- Matthews R., Harris D., Williams J., Nageswara Rao R., 1988. The physiological basis for yield differences between four genotypes of groundnut (*Arachis hypogaea*) in response to drought. II. Solar radiation interception and leaf movement. *Exp. Agric.* 24, 203–213.
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Presidencia de la Nación. Estimaciones Agrícolas, serie estadística. Disponible en URL: <https://datosestimaciones.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>
- Narayanan S., Aiken R. M., Vara Prasad P. V., Xin Z., y Yu J. 2013. Water and radiation use efficiencies in Sorghum. *Agronomy Journal*. 105: 649-656.
- Ottman M. J., Husman S. H., Gibson R. D., Rogers M. T. 1998. Planting date and Sorghum Flowering at Maricopa. Forage and Grain Agriculture Report. Disponible en <http://ag.arizona.edu/pubs/crops/az1059/az105921.html>
- Padilla J. M., Otegui M. E. 2005. Co-ordination between Leaf Initiation and Leaf Appearance in Field-grown Maize (*Zea mays*): Genotypic Differences in Response of Rates to Temperature. *Annals of Botany*. 96: 997-1007.
- Parra G., Borrás L., Gambin B.L. 2021. Crop attributes explaining current grain yield dominance of maize over sorghum. *Field Crops Research*. 275: 108346.
- Sadras V.O., Whitfield D. M., Connor D. J., 1991. Transpiration efficiency in crops of semi-dwarf and standard-height sunflower. *Irrig. Sci.* 12, 87–91.
- Scotta B. A., Gambín B. L., Borrás L. 2012. Fenotipificación para rasgos asociados con la determinación del número de granos en una población de RILs de sorgo. Congreso Aapresid 8 al 10 de agosto de 2012, Rosario, Santa Fe, Argentina.
- Vaksmann M., Traoré S. B., Kouressy M., Coulibaly H., Reyniers F. N. 1998. Le futur des céréales photopériodiques pour une production durable en Afrique semi-aride. Florence, Italia: CIRAD and CeSIA. Etude du développement d'un sorgho photopériodique du Mali. pp. 109–122.
- Van Oosterom E. J, Hammer G. L. 2008. Determination of grain number in sorghum. *Field Crops Research*. 108: 259-268.
- Vanderlip R. L. 1993. How a Sorghum Plant Develops. Kansas State University.

Whiteman P. C. and Wilson G. L. 1965. University of Queensland Papers. Department of Botany. Volume IV Number 14. 233-239

Yang K. W., Chapman S., Carpenter N., Hammer G., McLean G., Zheng B., Chen Y., Delp E., Masjedi A., Crawford M., Ebert D., Habib A., Thompson A., Weill C., Tuinstra M. R. 2021. Integrating crop growth models with remote sensing for predicting biomass yield of sorghum. In Silico Plants. 3: 1-19.