

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

EFFECTO DE LA FECHA DE SIEMBRA Y LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA
SOBRE EL RENDIMIENTO DE SOJA

por

Agustín CARACCIOLO GARCIA
Faustino ROSALES CAFFERA

Trabajo final de grado
presentado como uno de los
requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo.

MONTEVIDEO
URUGUAY
2023

Trabajo final de grado aprobado por:

Director:

Ing. Agr. (MSc.) (Dr.) Luis Giménez

Ing. Agr. (MSc.) Federico Rovegno

Tribunal:

Ing. Agr. Dr. Luis Giménez

Ing. Agr. MSc. Federico Rovegno

Ing. Agr. MSc. Mauricio Bustamante

Fecha: 29/06/2023

Estudiantes:

Agustín Caracciolo García

Faustino Rosales Caffera

AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias por su apoyo incondicional durante toda la carrera y por inculcarnos los valores que hoy son parte de este resultado. A nuestro tutor Luis por la paciencia y por habernos propuesto y exigido a generar un trabajo científico de valor. También a Federico por habernos guiado y ayudado en todo el proceso práctico, sobre todo en tiempos de pandemia donde todo se hizo cuesta arriba. Por último, pero no menos importante, queremos agradecer nuestro grupo de amigos maravilloso que nos regaló la carrera, el cual siempre hizo mucho más ameno y disfrutable este camino.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	2
AGRADECIMIENTOS.....	3
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS.....	6
RESUMEN.....	9
SUMMARY.....	10
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	11
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	13
2.1. CARACTERIZACIÓN AGROCLIMÁTICA DEL URUGUAY.....	13
2.2. CARACTERÍSTICAS DE LA PRODUCCIÓN DE SOJA A NIVEL NACIONAL.....	14
2.3. ASPECTOS ECOFISIOLÓGICOS, FENOLÓGICOS y CAMBIOS EXTERNOS DE LA SOJA.....	15
2.3.1. <u>Temperatura</u>	17
2.3.2. <u>Fotoperiodo</u>	18
2.3.2.1. Respuesta conjunta al fotoperiodo y a la temperatura....	21
2.3.3. <u>Radiación solar e Índice de Área Foliar</u>	22
2.4. RENDIMIENTO Y COMPONENTES NUMÉRICOS DEL RENDIMIENTO.....	23
2.4.1. <u>Potencial productivo</u>	23
2.4.2. <u>Producción de materia seca</u>	25
2.4.3. <u>Tasa de crecimiento del cultivo</u>	26
2.4.4. <u>Componentes numéricos del rendimiento</u>	27
2.5. RELEVANCIA DEL AGUA EN EL CULTIVO DE SOJA.....	29
2.6. CULTIVO DE SOJA SIN DEFICIENCIAS HÍDRICAS.....	31
2.6.1. <u>Riego suplementario como principal herramienta</u>	31
2.6.2. <u>Requerimientos hídricos del cultivo</u>	33
2.6.3. <u>Relación entre la disponibilidad hídrica y la fecha de siembra</u>	35
2.7. FACTORES DE MANEJO QUE MODIFICAN EL RENDIMIENTO DEL CULTIVO.....	36
2.7.1. <u>Fecha de siembra</u>	36
2.7.2. <u>Elección de cultivar y grupo de madurez</u>	39
2.7.3. <u>Interacción entre el grupo de madurez y la fecha de siembra como factor determinante del rendimiento</u>	40
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	42
3.1. LOCALIZACIÓN Y CONDICIONES DEL EXPERIMENTO.....	42

3.1.1. <u>Manejo experimental</u>	42
3.1.2. <u>Tratamientos</u>	43
3.2. DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA DEL EXPERIMENTO.....	44
3.2.1. <u>Hipótesis biológica</u>	44
3.2.2. <u>Diseño experimental</u>	44
3.2.3. <u>Análisis estadístico</u>	45
3.3. DETERMINACIONES REALIZADAS.....	46
3.3.1. <u>Determinaciones durante el ciclo del cultivo</u>	46
3.3.2. <u>Determinaciones a cosecha</u>	46
3.3.3. <u>Descripción de los cálculos realizados</u>	47
3.4. CONDICIONES CLIMÁTICAS DURANTE EL CICLO DEL CULTIVO.....	47
3.4.1. <u>Precipitaciones y agua efectiva</u>	48
3.4.2. <u>Radiación solar</u>	49
3.4.3. <u>Temperatura</u>	49
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	51
4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS.....	51
4.1.1. <u>Rendimiento y componentes numéricos principales según fecha de siembra, disponibilidad hídrica y su interacción</u>	51
4.1.2. <u>Características climáticas en cada fecha de siembra evaluada</u>	55
4.1.2.1. Temperaturas: medias, máximas y mínimas.....	55
4.1.2.2. Suma térmica.....	60
4.1.2.3. Radiación solar incidente sobre las etapas más importantes del cultivo, como repercute sobre la acumulación de MS y el rendimiento final para las distintas fechas de siembra.....	62
4.1.2.4. Precipitaciones acumuladas.....	66
4.1.3. <u>Evolución del agua disponible en el suelo</u>	68
4.1.4. <u>Evapotranspiración del cultivo y evapotranspiración real</u>	72
4.1.5. <u>Subcomponentes del rendimiento según fecha de siembra y disponibilidad hídrica</u>	76
4.1.6. <u>Altura de planta, materia seca acumulada al inicio y al final del período crítico e índice de cosecha</u>	77
5. <u>CONCLUSIONES</u>	86
6. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	87
7. <u>ANEXO</u>	103

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla No.	Página
Tabla No. 1. Eventos fenológicos desde siembra a cosecha.....	43
Tabla No. 2. Agua efectiva (mm) para las FS evaluadas tanto regadas como secano y su relación.....	49
Tabla No. 3. Radiación solar incidente acumulada por etapa.....	49
Tabla No. 4. Rendimiento (kg. ha ⁻¹), número de granos por metro cuadrado (NG. m ⁻²) y peso de mil granos (PMG, g) para las distintas fechas de siembra (FS) y disponibilidades hídricas (R: riego y S: secano).....	51
Tabla No. 5. Rendimiento (kg. ha ⁻¹), peso de mil granos (PMG, g) y número de granos por metro cuadrado según fecha de siembra y disponibilidad hídrica.....	54
Tabla No. 6. Duración de las etapas, temperaturas medias, máximas y mínimas y promedio de una serie histórica 2002-2020, en cada etapa para las FS evaluadas: 10/10, 10/11 y 9/12.....	56
Tabla No. 7. Para cada FS octubre, noviembre y diciembre: Duración de las etapas del ciclo y sumas térmicas por etapa y acumulado total, para las distintas FS evaluadas: 10/10, 10/11 y 9/12.....	60
Tabla No. 8. Precipitaciones acumuladas (mm) para las tres fechas de siembra en estudio en las etapas fenológicas (VE-R1, R1-R3, R4-R6, R7-R8 y VE-R8) y la duración de cada etapa en días.....	67
Tabla No. 9. Número de granos por planta (NG. pl ⁻¹), número de vainas por planta (NV. pl ⁻¹), número de granos por vaina (NG. vainas ⁻¹), número de abortos de vainas por planta (NAV. pl ⁻¹) según FS y disponibilidad hídrica.....	76
Tabla No. 10. Altura de planta (cm), MS acumulada en R1, R4 y R6 (kg. ha ⁻¹), e IC (en porcentaje) según FS (octubre, Noviembre y diciembre) y según disponibilidad hídrica (riego y secano).....	78
Tabla No. 11. Materia seca acumulada a R1, R4 y R6 (kg. ha ⁻¹), e IC (en porcentaje) según fecha de siembra y disponibilidad hídrica.....	80
Tabla No. 12. Altura de planta (cm), Nudos y ramificaciones por planta a R4-R5 para las distintas fechas de siembra evaluadas según disponibilidad hídrica.....	81

Figura No.	Página
Figura No. 1. Croquis del experimento en estudio dividido en bloques.....	45
Figura No. 2. Largo del ciclo en días y duración para cada etapa del cultivo (VE-R1, R1-R3, R4-R6 y R7-R8).....	47
Figura No. 3. Precipitaciones mensuales acumuladas históricas entre 2002-2020 y en la zafra en estudio 2020-2021 según mes del año.....	48
Figura No. 4. Temperaturas mensuales (°C) acumuladas históricas entre 1991-2021 y, en el año agrícola 2020-2021.....	50
Figura No. 5. Días con temperaturas mayores a 32 °C durante cada década de cada mes entre diciembre 2020 hasta marzo 2021....	59
Figura No. 6. Radiación solar incidente promedio (MJ. m ⁻²) para 2020/21 y para una serie histórica 2002-2020 en las etapas fenológicas, para cada FS evaluada: 10/10, 10/11 y 9/12.....	63
Figura No. 7. Radiación solar incidente acumulada (MJ.m ⁻²), materia seca (MS) acumulada, kg.ha ⁻¹ desde VE a R1, R1 a R4 y R4 a R6 y el rendimiento final (kg.ha ⁻¹) para cada FS evaluada bajo riego.....	64
Figura No. 8. Evolución del porcentaje de agua disponible (%) para la FS de octubre (FS 1) bajo riego y seco.....	68
Figura No. 9. Evolución del porcentaje de agua disponible (%) para la FS de noviembre (FS 2) bajo riego y seco.....	69
Figura No. 10. Evolución del porcentaje de agua disponible (%) para la FS de diciembre (FS 3) bajo riego y seco.....	71
Figura No. 11. Evapotranspiración del cultivo (ET _c) acumulada (mm) según etapa fenológica para las FS evaluadas: 10/10, 10/11 y 9/12.....	72
Figura No. 12. Evapotranspiración real (ET _r) acumulada (mm) según etapa fenológica: vegetativo, floración (R1-R3), PC (R4-R6), madurez (R7-R8) para las FS evaluadas: 10 de octubre, 10 de noviembre y 9 de diciembre.....	74
Figura No. 13. MS (kg. ha ⁻¹) y TCC promedio (kg MS. ha ⁻¹ .día ⁻¹) medida en las etapas VE-R1, R1-R4 y R4-R6 para la FS de octubre.....	82
Figura No. 14. MS (kg. ha ⁻¹) y TCC promedio (kg MS. ha ⁻¹ .día ⁻¹)	

medida en las etapas VE-R1, R1-R4 y R4-R6 para cada FS evaluada (octubre, noviembre y diciembre).....	83
--	----

RESUMEN

En el año agrícola 2020-21 se realizó un experimento de soja (*Glycine max*, L.) en la Facultad de Agronomía. EEMAC (Estación Experimental "Dr. Mario A. Cassinoni"), en Paysandú, Uruguay. El objetivo fue evaluar el efecto de la fecha de siembra en un cultivar de ciclo corto de alto potencial bajo condiciones hídricas contrastantes. El ensayo consistió en sembrar en tres fechas de siembra (FS) (10 de octubre, 10 de noviembre y 10 de diciembre) cada una bajo condiciones de riego y secano. El diseño utilizado fue bloques completos al azar en parcelas divididas, siendo la parcela mayor las tres fechas de siembra y la parcela menor la condición hídrica (Riego y Secano), dispuesta al azar en la parcela mayor. Se realizaron cuatro repeticiones con 6 tratamientos en cada una distribuidos en 24 Unidades Experimentales (UE). No existió interacción FS con disponibilidad hídrica, donde los tratamientos bajo riego siempre rindieron más que los de secano. La FS de octubre independientemente de la FS fue la que logró los máximos rendimientos, 3936 kg.ha⁻¹, por otro lado observando solo los tratamientos bajo riego alcanzó rendimientos máximos de 5180 kg.ha⁻¹, seguidos por 3955 kg.ha⁻¹ y 4030 kg.ha⁻¹, para las FS de noviembre y diciembre respectivamente. Estos resultados son avalados por NG. m² decrecientes desde la FS más temprana hacia la más tardía siendo estos 3977, 2714 y 2483 para la FS de octubre, noviembre y diciembre respectivamente. Por otro lado, tanto en términos de NG. m² y de PMG, existió un efecto año que no generó diferencias entre noviembre y diciembre. La FS de octubre bajo riego mantuvo una TCC (tasa de crecimiento del cultivo) de 180 kg MS. ha⁻¹.día⁻¹ durante el periodo reproductivo que determinó la acumulación del mayor volumen de MS a R6, 13831 kg. ha⁻¹ seguido por 11081 y 8696 kg. ha⁻¹ para la FS de noviembre y diciembre respectivamente. La FS de noviembre generó el IC (índice de cosecha) menor, 31 % mientras que la FS de octubre y diciembre no presentaron diferencias, siendo 38 % y 40 % respectivamente. La FS de octubre provocó un alargamiento del ciclo total, aumentó la duración del PC (período crítico) y se adelantó su ocurrencia en el tiempo. Esto generó sumas térmicas mayores y RS (radiación solar) acumulada incidente mayor.

Palabras Clave: soja, fecha de siembra, disponibilidad hídrica, rendimiento, período crítico

SUMMARY

In the 2020-21 agricultural year, a soybean (*Glycine max*, L.) experiment was carried out at the Faculty of Agronomy. EEMAC ("Dr. Mario A. Cassinoni" Experimental Station), in Paysandú, Uruguay. The objective was to evaluate the effect of the planting date in a high potential short cycle crop under contrasting water conditions. The trial consisted of sowing on three sowing dates (SD) (October 10, November 10 and December 10) each under irrigation and drying conditions. The design used was complete random blocks in divided plots, the largest plot being the three planting dates and the smallest plot being the hydric condition (Irrigation and Rainfed), arranged randomly in the largest plot. Four repetitions were carried out with 6 treatments in each one distributed in 24 Experimental Units (EU). There was no SD interaction with water availability, where the irrigated treatments always yielded more than the dried ones. The SD of October, regardless of the SD, was the one that reached the maximum yields, 3936 kg.ha⁻¹, on the other hand, observing only the treatments under irrigation, it reached maximum yields of 5180 kg.ha⁻¹, followed by 3955 kg.ha⁻¹ and 4030 kg.ha⁻¹, for the SD of November and December respectively. These results are endorsed by NG. m⁻² decreasing from the earliest to the latest SD, these being 3977, 2714 and 2483 for the October, November and December SD respectively. On the other hand, both in terms of NG m⁻² and PMG, there was a year effect that there were no differences between November and December. The October SD under irrigation maintained a TCC of 180 kg DM. ha⁻¹.day⁻¹ during the reproductive period that accumulates the highest volume of DM at R6, 13831 kg. ha⁻¹ followed by 11081 and 8696 kg. ha⁻¹ for the SD of November and December respectively. The SD of November had the lowest CI, 31%, while the SD of October and December did not show differences, being 38% and 40% respectively. The October SD produced a lengthening of the total cycle, the duration of the critical period (PC) increased and its occurrences were brought forward in time. This left larger thermal sums and larger incident cumulative solar radiation (RS).

Keywords: soybean, sowing dates, hydric condition, yields, critical period

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos 20 años, la agricultura en Uruguay recuperó una fase expansiva, con la soja como la protagonista, pasando de 10.000 a 900 mil ha en la zafra 2020/21 (Oficina de Estadísticas Agropecuarias [DIEA], 2021). En ese sentido, se colocó como cultivo más importante a nivel país, acompañado de un avance tecnológico importante. De todas maneras, el cultivo, mantiene rendimientos promedio que se ubican alrededor de los 2000 kg.ha⁻¹ lo que deja en evidencia una brecha considerable entre los rendimientos potenciales y los comerciales. En la temporada de verano en estudio (2020/21) la producción fue de (1.7 mill. de tt) un 14,2% menos que a la zafra anterior. En cuanto al rendimiento medio, fue estimado en 1.881 kg.ha⁻¹, 13% menos que la zafra anterior. En relación, la superficie regada de soja, alcanzó a 13 mil hectáreas con un rendimiento de 2.891 kg.ha⁻¹ (DIEA, 2021).

En general, en el país, este cultivo se desarrolla en condiciones de secano, con precipitaciones variables (Castaño et al., 2011). Los cultivos agrícolas se enfrentan a un conjunto de limitantes, pero el factor más determinante son las deficiencias hídricas (Giménez, 2019; Giménez & García Petillo, 2011). De todos modos, los rendimientos obtenidos en cultivos regados siguen el mismo patrón que los de secano, indicando que la disponibilidad hídrica siguió siendo la principal limitante (Sebben et al., 2019). A partir del riego suplementario, se permite una ubicación del período crítico (PC) en una época de mayor oferta de recursos más conservativos que el régimen de lluvias, como son la radiación solar (RS) y la temperatura, disminuyendo el riesgo del sistema productivo (Dardanelli et al., 2003).

Las fechas de siembra (FS) de noviembre permiten acumular valores de RS incidente mayores durante el ciclo lo que permite que el cultivo obtenga mayores rendimientos, comparado con FS más tardías (Larrama Udaquiola, 2019). Sin embargo, la FS de noviembre en secano constituye una estrategia defensiva para ubicar el PC en condiciones de menor radiación y temperatura, en ambientes con bienestar hídrico la estrategia deberá ser productiva adelantando la FS y utilizando cultivares de ciclo corto (Baigorri, 2004).

De este modo, Giménez (2007), Paparcone y Silveira (2022) agregan que FS de octubre debido a una mayor acumulación de RS y temperatura durante el PC, logra rendimientos muy cercanos a los potenciales del cultivo. El objetivo principal de este trabajo fue cuantificar los efectos de la fecha de siembra en ambientes sin limitantes hídricas y con limitantes hídricas, teniendo de esa manera en consideración los factores ambientales de mayor determinación en el rendimiento.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. CARACTERIZACIÓN AGROCLIMÁTICA DEL URUGUAY

El Uruguay está situado entre los 30 y 35 grados de latitud sur, en una zona subtropical templada. La temperatura media anual sobre Uruguay es de 17,7 °C, variando desde 19,8 °C en la zona noroeste (Bella Unión), hasta 16,6 °C en la costa sur del país (Castaño et al., 2011).

Los valores medios de precipitación acumulada anual sobre el país se sitúan entre 1200 y 1600 milímetros (mm) con los menores valores situados al suroeste (departamento de Colonia) y los máximos al noreste (departamentos de Rivera y Artigas). Los valores mensuales de precipitación registrados en un año particular, se pueden apartar considerablemente de estos promedios dada la gran variabilidad interanual. Esta variabilidad se constata en todos los meses del año aproximadamente en la misma magnitud, registrándose en los años extremos valores mínimos inferiores a 20 mm/mes y máximos superiores en todos los meses a los 250 mm/mes (Castaño et al., 2011).

Por esta razón, en cualquier año, si intentamos prever la distribución de lluvias en el suroeste de Uruguay para los próximos meses, y la única información que disponemos es la caracterización climatológica, es muy poco lo que se puede decir más allá de utilizar los valores medios y su variabilidad, que como se mencionó es muy alta. De esta manera se convierte en el mayor desafío que tiene la producción agropecuaria en nuestro país (Giménez et al., 2004).

Considerando las precipitaciones como oferta hídrica, la demanda la podemos caracterizar en base a la evapotranspiración, la cual según el modelo de Penman-Monteith, presenta un claro comportamiento estacional registrándose los valores más altos durante el verano (160-185 mm/mes), seguido de la primavera (95-105 mm/mes), el otoño (65-80 mm/mes) y el invierno (25-35 mm/ mes) (Castaño et al., 2011).

En lo que refiere a Heliofanía real, Castaño et al. (2011) afirman que los valores medios de horas de insolación media diaria sobre el país se sitúan en 7 h, con los menores valores situados al sureste (departamento de Rocha) y los máximos al noroeste (departamentos de Salto y Artigas). La variabilidad entre años es baja,

siendo ésta un poco más alta durante el verano y más baja durante el invierno, con valores promedio de 9,0-9,5 h/día en enero y 5,0-5,5 h/día en julio.

2.2. CARACTERÍSTICAS DE LA PRODUCCIÓN DE SOJA A NIVEL NACIONAL

El Uruguay presenta un clima templado y húmedo, sin embargo, el potencial físico y económico de los sistemas de producción agrícolas es altamente dependiente del comportamiento de las precipitaciones ya que la mayor parte del área de los cultivos de verano se realiza en secano y durante el verano el contenido de agua de los suelos, en general, no satisface la demanda hídrica de los cultivos (Giménez & García Petillo, 2011).

La CAAD de los suelos baja en relación a las necesidades de agua de los cultivos, conjuntamente con la variabilidad del régimen de precipitaciones genera que las deficiencias hídricas más o menos prolongadas sean un fenómeno corriente. A esto se suma un aumento de la frecuencia de eventos extremos tanto por la incidencia del cambio climático global, como por la identificación de precipitaciones altamente variables, los cuales generan deficiencias hídricas severas y comprometen la producción, incrementando los costos económicos de las medidas de mitigación e impactando en aspectos productivos, económicos y sociales (Giménez & García Petillo, 2011).

La superficie total sembrada de cultivos de verano con destino a grano seco fue de 1.078.254 hectáreas, un 2% más que en la zafra anterior cuando se sembraron 1.055.424 hectáreas. La soja, que aportó casi el 90 % del área de verano, la estimación puntual fue de 908 mil hectáreas sembradas. La superficie regada de soja alcanzó 13 mil hectáreas con un rendimiento de 2.891 kilos por hectárea, 700 kilos menos por hectárea que en la zafra anterior (DIEA, 2021).

En el año 2020/21, las condiciones climáticas fueron nuevamente determinantes en el desempeño de la actividad agropecuaria, con efectos contrapuestos en la agricultura. La actividad agrícola, en tanto, mostró una caída de su valor agregado, principalmente debido a la menor producción de soja, resultado de los menores rendimientos obtenidos en la zafra 2020/21 respecto a la anterior. El cultivo de soja registró una caída de 14% en el ciclo 2020/21 con una superficie sembrada que se ubicó en el registro más bajo de los últimos 12 años y un rendimiento medio

que se redujo fuertemente (a 1,8 toneladas por ha⁻¹) como consecuencia del déficit hídrico registrado por segundo año consecutivo (Cortelezzi, 2021).

2.3. ASPECTOS ECOFISIOLÓGICOS, FENOLÓGICOS y CAMBIOS EXTERNOS DE LA SOJA

El momento en el que ocurren los diferentes estados del cultivo y la duración de las fases de desarrollo dependen fundamentalmente de dos factores ambientales: la temperatura y el fotoperíodo (Kantolic, 2008). La temperatura generalmente influye positivamente en la tasa de desarrollo del cultivo, en cambio el fotoperíodo modifica la respuesta. La soja es una planta con respuesta al fotoperíodo de día corto, en la que la duración del día (más largo) ralentiza la tasa de desarrollo (Heatherly & Elmore, 2004).

El resto de los factores ambientales (radiación, agua, nutrientes, propiedades edáficas) no modifica sustancialmente la duración del ciclo y de las fases que lo componen. Una excepción a esto es el agua, que puede aumentar la duración de la fase siembra-emergencia cuando su disponibilidad es insuficiente (Kantolic, 2008). En el otro extremo la producción y el rendimiento de grano de los cultivos de soja se ven particularmente afectados por el estrés por inundaciones, especialmente durante las etapas vegetativas y de germinación de semillas (Githiri et al., 2006).

La temperatura y el fotoperíodo son los factores ambientales que regulan la duración de las fases de desarrollo del cultivo, actuando en forma simultánea en las plantas y con evidencia de interacción entre ellos (Kantolic et al., 2003; Toledo, s.f.). La variación interanual en las fases de desarrollo está asociada a las fluctuaciones de la temperatura, dado que el fotoperíodo es constante para un mismo sitio y fecha de siembra (FS). La respuesta a la temperatura y al fotoperíodo depende del genotipo (Medina Lasaga & Pereira Portela, 2018).

Según Fehr y Caviness (1977) la escala del ciclo del cultivo se describe de acuerdo al número de nudos del tallo principal (estados V) o la presencia o tamaño de órganos reproductivos en los nudos superiores del tallo (estados R). Luego de la emergencia (VE), los cotiledones se abren y se despliegan las hojas unifoliadas (VC). Las letras V y R son seguidas de índices numéricos que identifican estadios específicos, en esas dos fases de desarrollo de la planta (Fehr & Caviness, 1977;

Toledo, s.f.). Esta escala propone una descripción de la morfología del cultivo, cuya validez es independiente del cultivar utilizado o de las condiciones generales del cultivo (sitio, fecha de siembra, densidad) (Kantolic et al., 2003).

Una hoja se encuentra totalmente desarrollada si la hoja superior no se encuentra enrollada, es decir, si los bordes de los folíolos no se tocan (Kantolic et al., 2003). Las hojas trifoliadas aparecen a un ritmo que depende, sobre todo de la temperatura, se ha estimado un filocrono de 55,5 °Cd (con una temperatura base de 6 °C) definiendo los sucesivos estados V (V1, V2, Vn) (Fehr & Caviness, 1977).

Según Farías et al. (2007) los estados reproductivos se ubican desde el período de floración hasta la maduración. El inicio de la floración de la soja es caracterizado por la apertura de una flor en cualquier nudo del tallo principal (estadio R1). La plena floración (R2), es caracterizada por la apertura de varias flores a lo largo del tallo principal, pueden ocurrir simultáneamente; al inicio de la floración (R1), en el caso de las plantas con hábito de crecimiento determinado, o entre dos y siete días después a R1, en plantas con hábito de crecimiento indeterminado (Fehr & Caviness, 1977).

En la etapa R3, hay una disminución de la floración (Fehr & Caviness, 1977) y un desarrollo de la vaina hasta el estadio R4. El desarrollo y crecimiento del grano ocurre entre R5 y R6. Por último, la maduración de la planta en su inicio R7 con una vaina normal en el tallo con color maduro y la maduración plena R8 con un 95% de las vainas con coloración madura. El período más crítico para la definición del rendimiento de un cultivo de soja abarca los períodos de floración, fructificación y comienzos del llenado de granos incluyendo, aproximadamente, la fase R4-R6 (Kantolic et al., 2003).

Verón et al. (2011) afirman que en los estados vegetativos el cultivo presenta una importante plasticidad, que se reduce durante las etapas reproductivas. La sobreproducción de flores y el extenso período de floración (R1-R5) permite saltar a cortos períodos de estrés, sin reducciones importantes en el rendimiento. El período de llenado de granos a nivel de cultivo comienza algunos días antes de R5 y, dependiendo de las condiciones ambientales y del genotipo, todavía puede haber flores presentes. De todas formas una alta proporción de flores y vainas no prosperan, existiendo una elevada mortandad (Kantolic, 2008).

El estado R4 marca el inicio del período más crítico en el desarrollo de la planta, en términos de rendimiento de grano. La ocurrencia de estrés (humedad, luz, deficiencias nutricionales, helada, vuelco, defoliación) entre R4 y poco después de R6 reducirá el rendimiento más que cualquier otro evento de estrés en otro período del desarrollo (Verón et al., 2011). Producto de una reducción de la capacidad de compensación del cultivo por la suma de abortos y vainas más pequeñas, afectando el principal componente NG por unidad de superficie (Kantolic et al., 2003). Por lo tanto, la fenología del cultivo debe ser ajustada para que el nivel de recursos (radiación, agua y nutrientes) y la sanidad del cultivo sean óptimas durante el período crítico (Kantolic, 2008).

2.3.1. Temperatura

Setiyono et al. (2007) afirman que la temperatura controla la duración de las fases, acelerando o retrasando el desarrollo según el rango térmico. Se ha estimado una temperatura base (por debajo de la cual la tasa de desarrollo es nula); en la medida que la temperatura aumenta por encima de la base, la tasa de desarrollo aumenta hasta que se alcanza un rango de temperaturas óptimas, en donde la tasa de desarrollo es máxima. Por encima del rango óptimo, se disminuye la tasa de desarrollo hasta una temperatura máxima, donde el desarrollo es nulo. Las temperaturas muy por debajo de ese rango óptimo podrían retrasar el tiempo de floración (Lyu et al., 2020).

La temperatura base varía entre 6 y 10°C (Salvagiotti, 2009). El rango óptimo de temperaturas para el crecimiento y desarrollo se encuentra entre 20 y 30 °C (Hesketh et al., 1973). En etapas vegetativas, temperaturas mayores a 20 °C son consideradas óptimas para favorecer la germinación de las semillas, crecimiento de nudos y el desarrollo de área foliar. Durante las etapas reproductivas, temperaturas de 26 °C son óptimas para el desarrollo de vainas y 24 °C para el desarrollo de los granos (Salvagiotti, 2009). El establecimiento de vainas se reduce con temperaturas inferiores a 21 °C, y por debajo de 14 °C no se produce fijación de vainas (García et al., 2009). Por otro lado, Medina Lasaga y Pereira Portela (2018) afirman que temperaturas mayores a 32 °C durante la etapa reproductiva producen aborto de vainas y problemas en el llenado de las mismas.

La temperatura también afecta el desarrollo, la formación y el crecimiento de los órganos reproductivos. Las temperaturas bajas promueven malformaciones en las

flores y favorecen el aborto y abscisión de vainas. La temperatura controla la tasa de crecimiento de las plantas a través de efectos directos sobre la asimilación de carbono y de efectos indirectos sobre la disponibilidad de agua y nutrientes (Kantolic, 2008). La tasa fotosintética es afectada debido a su papel en la regulación de las velocidades de reacción bioquímicas, procesos morfogénicos y el intercambio de CO₂ y energía con la atmósfera (Wang et al., 1997). La influencia de la temperatura del aire depende del estado de desarrollo y de la duración del periodo de temperatura (Puteh et al., 2013).

Los requerimientos de sumas térmicas desde la siembra a la emergencia son 105°C días y 125 °C días si se considera temperatura de suelo y aire respectivamente (Toledo, 2018). Las bajas temperaturas al inicio del ciclo (VE-R1) no tendrían un impacto negativo en el rendimiento, sin disminuir el NG por unidad de área. Sí existe una disminución en la eficiencia fotosintética pero compensada por una mayor cantidad de RS interceptada, debido a un aumento en la duración de la etapa entre R1-R5 en siembras tempranas (Schoving et al., 2022).

Para Fehr y Caviness (1977) la temperatura es el principal factor que influye en el desarrollo vegetativo. Las bajas temperaturas retardan, y las altas temperaturas mejoran la emergencia de las plántulas. El número de días desde la siembra hasta la etapa de emergencia (VE) puede variar de unos 5 a 15 días. El efecto de la temperatura se vuelve menos importante después de la etapa del quinto nudo (V5). Según (Zhang et al., 2016) para el ciclo siembra-madurez, el aporte de la temperatura representó el 85 % de la respuesta fenológica.

En conclusión, Piper (1996), como se cita en (Toledo, s.f.) aclara que la temperatura regula el desarrollo durante todo el ciclo, donde no existirían respuestas diferenciadas entre genotipos, es decir habría una respuesta universal a la temperatura por parte de todos los GM. El rendimiento y el tamaño del grano generalmente se ve afectado al aumentar la duración del estrés por temperatura, independientemente de la etapa de desarrollo en que se encuentre (Puteh et al., 2013).

2.3.2. Fotoperiodo

La soja es una especie con respuesta fotoperiódica cuantitativa, a días cortos (García et al., 2009). El efecto principal de la longitud del día en el desarrollo de la

soja es el de la inducción de la floración, los días cortos inducen el inicio del proceso de floración (Hicks, 1983, como se cita en Toledo, s.f.). Las plantas expuestas a fotoperíodos no inductivos, generan que la duración de las etapas de desarrollo posteriores a la floración se alargue (Guiamet & Nakayama, 1984).

En general la soja presenta una corta fase juvenil de aproximadamente 8 días desde la emergencia hasta V1, durante la cual el cultivo es insensible al fotoperíodo. A partir de V1, el fotoperíodo afecta todas las etapas de desarrollo del cultivo (García et al., 2009). Inclusive con aumentos en su duración, por ejemplo, la fase R3-R6 aumentó cuantitativamente en respuesta a la duración de la exposición al fotoperíodo extendido (Kantolic & Slafer, 2003).

Miralles et al. (2003) coinciden con García et al. (2009) e indican que en términos generales la soja se clasifica como planta de día corto. Sin embargo, según la respuesta fotoperiódica se la puede clasificar en: a) cualitativa donde es necesario superar un valor de umbral crítico para que se produzca la floración; y: b) cuantitativa donde la mayor o menor respuesta va a depender del grado de sensibilidad del GM.

En conclusión, García et al. (2009) afirman que las diferencias en fotoperíodo crítico entre cultivares ha permitido agruparlos en Grupos de Madurez. Ósea que cada cultivar tiene un valor crítico o umbral, y una sensibilidad fotoperiódica específica, cultivares de GM inferiores presentan umbrales elevados y baja sensibilidad mientras que los de GM superiores presentan umbrales menores pero mayor sensibilidad fotoperiódica. La manipulación de la sensibilidad al fotoperíodo durante la fase crítica de formación de vainas puede ser un medio para mejorar la relación fuente/fosa durante el período crítico, y con ellos aumentar los rendimientos de soja (Kumudini, 2002). En cultivares de GM de III a V fotoperíodos largos post floración se traduce en mayor rendimiento (Guiamet & Nakayama, 1984).

El fotoperíodo influye y regula la mayor parte de los eventos reproductivos condicionando el inicio y final de las diferentes fases y la tasa con que progresan los cambios dentro de la planta (Kantolic, 2004, como se cita en Toledo, s.f.). La tasa de desarrollo es máxima cuando el fotoperíodo es más corto que un determinado umbral; si el fotoperíodo es más largo que el umbral, la tasa de desarrollo disminuye y la floración se ve retrasada (Kantolic & Slafer, 2003). La

exposición a fotoperíodos largos después de la floración disminuye la tasa de desarrollo reproductivo, y esto a su vez aumenta la duración del período de floración (Guiamet & Nakayama, 1984).

Kantolic (2008) afirma que el tiempo que transcurre entre la iniciación floral y el cambio del ápice al estado reproductivo depende de la condición ambiental (principalmente, el fotoperíodo) y del hábito de crecimiento. La duración de la fase final de desarrollo, R6 hasta la madurez, depende del fotoperíodo explorado durante la fase misma, lo que es consistente con la respuesta de día corto reportada previamente para esta fase (Grimm et al., 1994). Las plantas que no perciben las señales ambientales o las tienen bloqueadas (estrés), mantienen sus órganos vegetativos como fosas de sus fotoasimilados, retrasando el crecimiento reproductivo y la madurez (Han et al., 2006). Existen evidencias que los meristemas reproductivos pueden volver al crecimiento vegetativo (Washburn & Thomas, 2000).

A nivel fenológico y fisiológico, Kantolic y Slafer (2003) reafirman que los días largos retrasan la iniciación floral y disminuyen la tasa de desarrollo de primordios florales demorando, consecuentemente, el momento de floración. La temperatura debería aumentar el número de posibles sitios de floración asociado con el aumento de racimos y/o ramas (Pereira-Flores et al., 2016). Relacionado a esto, Nico et al. (2015) demostraron que hay un efecto directo de fotoperíodos largos sobre el NG independientemente de la radiación fotosintéticamente activa, la cual en los fotoperíodos largos es mayor. Estas respuestas a las temperaturas pueden ser tenues y estar asociadas a respuestas específicas de cada cultivar (Pereira-Flores et al., 2016).

Kantolic (2008) destaca que los cultivares de ciclo corto tienen una “debilidad”: debido a que su floración precoz está relacionada con una baja sensibilidad fotoperiódica prefloración, la mayoría de estos cultivares tienen una baja sensibilidad fotoperiódica en post-floración. Por consiguiente, tienden a responder a las altas temperaturas reduciendo la duración de las fases críticas, y no logran capturar las ventajas de la diferente ubicación del PC.

2.3.2.1. Respuesta conjunta al fotoperiodo y a la temperatura

La duración de las fases de desarrollo del cultivo se ven reguladas por la temperatura y el fotoperiodo, actuando en forma simultánea en las plantas y con evidencia de interacción entre ellos (Toledo, 2018). Por lo tanto, la fenología del cultivo depende de la respuesta genotípica a ambos factores. Por ejemplo, el desarrollo de los cultivares de GM bajo resulta más dependiente de la temperatura que del fotoperíodo, debido a su baja sensibilidad a este factor y, en contraposición, la tasa de desarrollo luego de R5 resulta más afectada por el fotoperíodo que por los cambios en la temperatura (Sinclair, 1991, como se cita en Kantolic, 2008).

La temperatura, la duración del día y la variedad son importantes para determinar el comienzo de la floración y posterior desarrollo reproductivo. Las bajas temperaturas retardan y las altas aumentan el desarrollo reproductivo. Los días largos (noches cortas) retardan y los días cortos mejoran el desarrollo reproductivo (Fehr & Caviness, 1977). Por ejemplo, la temperatura, en conjunto con el fotoperíodo, pueden modificar la duración de la etapa de llenado de granos, pero pudiendo ser compensada por una tasa de llenado que haga que el PMG final no varíe (Kantolic et al., 2003).

Tanto la temperatura como el fotoperíodo tienen una dinámica estacional, y el hecho de que el cultivo presente una respuesta cuantitativa y continua a ambos factores define fuertes cambios en el desarrollo según la época de siembra y la localidad. Hay algunas evidencias que muestran que los efectos de ambos factores no son estrictamente aditivos (Kantolic, 2008). A su vez, Fassio et al. (2017) lo correlacionan con la fecha de siembra y señalan que el ciclo del cultivo se reduce en la medida que las siembras se retrasan, esto es debido a la combinación de fotoperíodos y temperaturas.

Giménez (2007) coincide con Fassio et al. (2017) y afirma que en la medida que se adelantan las FS, el ciclo se alarga en forma significativa. El autor atribuye esta respuesta a que en siembras tempranas, los requerimientos ambientales para la inducción floral se cubren más tarde, tanto en fotoperíodo como en temperatura. Se concluye que la fase del ciclo que se alarga es fundamentalmente la etapa vegetativa, VE- R1. El aumento de la temperatura causaría etapas de la soja que se adelantan o fases de crecimiento que se acortan (Lyu et al., 2020). Por ejemplo,

Zhang et al. (2016) mostraron que aumentos de 0,4 °C en la temperatura del aire y aumentos de 0,7 °C en la temperatura del suelo acortó la duración de toda la temporada de crecimiento en 4,5 días.

2.3.3. Radiación solar e Índice del Área Foliar

Dada una adecuada disponibilidad de agua, nutrientes y temperaturas, la capacidad de acumular biomasa será función de la intercepción de RS durante los períodos de máxima heliofanía (Melgar et al., 2011). En estas condiciones, el cultivo debe desarrollar un canopeo que le permita maximizar la intercepción de la RS durante las primeras etapas reproductivas. Por lo tanto, las temperaturas y la oferta de radiación según el estadio del cultivo, tendrán un rol fundamental en definir el crecimiento máximo y el rendimiento potencial (Salvagiotti, 2009).

La RS interceptada se traduce en la producción de MS y la tasa de crecimiento, la cual determina la producción de MS propiamente dicha. La energía que utiliza el cultivo es obtenida de la RS interceptada, en la cual toma principal importancia la eficiencia con la que se intercepta la RS incidente por el canopeo del cultivo (EUR) (Kantolic et al., 2003). A modo de referencia la soja comparada con otras especies C3, alcanza valores de EUR bajos, debido a su alto contenido energético en granos y los elevados requerimientos de nitrógeno, con valores de 1,02 g. MJ⁻¹ (Sinclair & Muchow, 1999).

Giménez (2017a) constató que con RS incidentes elevadas se llegó a obtener producciones de biomasa elevadas. Coincidiendo con esto, Paparcone y Silveira (2022) encontraron que a pesar de ser una especie C3, en siembras de octubre con condiciones de RS incidente elevada y temperaturas altas el cultivo permite maximizar el rendimiento. Entre los años de estudio 2011 y 2012, sin deficiencias hídricas, se produjeron 14 t. ha⁻¹ y 13,7 t. ha⁻¹ de biomasa aérea total respectivamente. Siendo mayor la RS incidente en el año con mayor producción (año 2011), aunque la diferencia no fue estadísticamente significativa (Giménez, 2017a). Se demostró que es de gran importancia la producción de hojas que intercepten la mayor cantidad de RS en cultivos de rendimientos potenciales elevados (Kantolic et al., 2003).

Para comprender el concepto de RS interceptada, Cárcova et al. (2003) definen al IAF del cultivo como la superficie foliar fotosintéticamente activa por unidad de superficie de suelo. Para una máxima captura de la oferta de radiación (e.i 95%),

es imperativo que el cultivo logre un IAF crítico (e.i 3.1 – 4.5) al inicio de la etapa más crítica y que se mantenga durante el mayor tiempo posible durante el desarrollo del cultivo. En esta misma línea, Kantolic et al. (2003) coinciden en que la captura de la RS está asociada con el índice de área foliar (IAF), y que este es resultante del producto entre el número y tamaño de las hojas del canopeo.

Por otra parte, Shibles y Weber (1965) introducen el concepto de que la tasa de crecimiento del cultivo (TCC), que está relacionada a la intercepción de la RS, la que a su vez depende del IAF. De modo tal, que si el cultivo no logra alcanzar el IAF crítico, la primera consecuencia será su menor eficiencia en la captación de la radiación, llevando a una disminución en la TCC, reduciendo el rendimiento. Toledo (s.f.) agrega que la soja puede alcanzar valores de IAF muy altos, sin embargo, la TCC no va a disminuir. El NG de una soja creciendo en óptimas condiciones queda determinado por la TCC durante el PC y dicha TCC es producto de la intercepción de radiación por el canopeo (Andrade, 1995).

En un experimento sin limitantes hídricas en Paysandú, Foster Aranda y Rovigno Arbiza (2015) con RS promedio durante todo el ciclo mayores a $20 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$, obtuvieron rendimientos en grano mayores a 6000 kg.ha^{-1} . De todos modos, cuando los valores de RS eran inferiores no se superaron los 5000 kg.ha^{-1} de rendimiento. Por lo que, Kantolic (2008) asegura que si no existen limitantes hídricas y de nutrientes, el rendimiento tenderá a ser máximo en la medida que el PC coincida con condiciones óptimas de radiación y temperatura. Con una fase vegetativa suficientemente larga como para garantizar la producción de un IAF que permita una captura plena de la RS incidente durante el PC.

2.4. RENDIMIENTO Y COMPONENTES NUMÉRICOS DEL RENDIMIENTO

2.4.1. Potencial productivo

Van Ittersum y Rabbinge (1997), como se cita en Manlla et al. (2012), definen al rendimiento potencial (RP) de un cultivo como el rendimiento obtenido por un genotipo sin limitantes de agua y nutrientes y que crece en ambientes con mínimo estrés (plagas, malezas y enfermedades) y con buenas prácticas agrícolas. En este sentido, para un genotipo definido, el RP está determinado por la disponibilidad de CO_2 , la oferta de RS y la temperatura del aire, denominados factores definidores del rendimiento. En otras palabras, Toledo (2018) define que

RP no es estático ni atemporal, varía en el espacio (latitud, longitud y altitud de un lugar, con determinados valores promedio de radiación y temperatura) y en el tiempo (nuevos cultivares rinden más en función del progreso genético), dicho rendimiento es un ideal, y se podría lograr si se controlarán todos los factores bióticos y abióticos productores de estrés.

En esta misma línea, Vogel et al. (2021) mencionan que se ha informado que el rendimiento máximo teórico de la soja está en el rango de 7.250-11.000 kg. ha⁻¹. De igual forma, plantean que este máximo, es el rendimiento que se puede obtener en ausencia de estrés, es el potencial de rendimiento. Van Roekel y Purcell (2014) utilizando condiciones óptimas de riego obtuvieron rendimientos que rara vez superaron los 6.725 kg.ha⁻¹.

Por otro lado, a nivel nacional Giménez (2017b) obtuvo rendimientos experimentales que variaron entre 4900 y 7300 kg ha⁻¹, justificando dicha amplitud por las diferencias en RS incidente entre las temporadas de estudio. Se suma a esto, que los efectos de la temperatura en la soja son un determinante importante para el crecimiento, desarrollo y rendimiento (Sionit et al., 1987). Es esperable que los rendimientos máximos se logren cuando se haga coincidir la oferta y la demanda de los recursos (agua, nutrientes, radiación) que determinan la producción y dirijan al desarrollo de un mayor número de destinos reproductivos del cultivo (Salvagiotti, 2009).

Según Giménez (2019) existe una gran amplitud de materiales genéticos disponibles, en relación a la duración del ciclo, y esto a su vez modifica el ambiente de producción al que están sometidas las diferentes etapas del cultivo. Las variedades de ciclo corto son las que presentan mayor potencial de rendimiento y menor plasticidad. Esto es coincidente con lo planteado por Kantolic (2008), la cual encontró que, en ambientes de alta productividad, los cultivares de ciclo más corto, en general, obtuvieron un NG y PMG mayores que los de cultivares de ciclo más largo. Sin embargo, en detrimento de un mayor potencial productivo dado por la RS, Muchow et al. (1993) indicaron que ciclos muy cortos reciben menor cantidad de RS incidente acumulada comparativamente a ciclos más largos.

2.4.2. Producción de materia seca

Specht et al. (1999) sostienen que, para llegar a mayores rendimientos de grano, existen básicamente dos caminos principales; aumento del índice de cosecha (IC) o aumento de la acumulación de MS, siendo el IC un indicador de la porción de MS producida que es distribuida hacia los componentes que se cosechan (Baigorri, 2003). Van Ittersum et al. (2013) agregan que la conversión en biomasa y la partición a órganos cosechables dependen de la energía solar, radiación, temperatura, concentración atmosférica de CO₂, y atributos fisiológicos del cultivo que gobiernan la intercepción de la luz.

Andrade (1995) explica que el rendimiento depende de la habilidad de un cultivo para acumular biomasa total (BT) y establecer su IC. A su vez, dicha biomasa depende de la oferta de RS en un determinado ambiente y de la eficiencia del cultivo para interceptar y convertir dicha RS en MS. Por ejemplo, Baker et al. (1989) encontraron que con aumentos de temperatura disminuye el plastocrono y se producía aumentos del número de nudos del tallo principal. El largo de los entrenudos fue más corto para tratamiento con temperaturas entre 42-34 °C, sin embargo, se formaron más nudos por planta (Allen et al., 2018).

En cuanto al segundo camino, es decir la acumulación de MS, Vázquez y Torres (1995), como se cita en Chacón Iznaga et al. (2011), definen que la producción de MS global es la cantidad de producto seco obtenido por planta o por unidad de área, como producto agrícola seco, además del que no tiene utilidad agrícola. Baigorri y Croatto (2000) coincidiendo con este lineamiento afirman que poco después de R5, la acumulación de MS y de nutrientes en las hojas, pecíolos y tallos, se hace máxima y comienzan a redistribuirse a las semillas. El período de rápida acumulación de MS de la semilla continúa hasta después de R6, donde la semilla alcanza el 80% de su peso seco.

En las etapas R1 a R5, en variedades GM III y IV indeterminadas mostraron una relación directa entre la tasa de crecimiento del cultivo (TCC) y el rendimiento del cultivo en esta etapa (Baigorri, 2003). La TCC reportada por Foster Aranda y Rovegno Arbiza (2015) entre las fases de R4 y R6 fue de 94 kg. ha⁻². día⁻¹. Monzón et al. (2021) encontraron valores similares a Foster Aranda y Rovegno Arbiza (2015) entre R3 y R6, que variaron entre 90 y 220 kg. ha⁻². día⁻¹, por otro lado,

reportaron que, mediante modelos de regresión, el 71 % del NG se debía a la MS producida durante este período.

A su vez, Giménez (2014a) fue importante en reportar en condiciones sin deficiencias hídricas, una acumulación máxima de MS a R6 de 16.160 kg. ha⁻¹ en la campaña 2010/11. Con diferencias de casi el doble con respecto al otro período en estudio (8.347 kg. ha⁻¹ en la zafra 2009/10), justificando las diferencias encontradas por la RS incidente. En un experimento realizado en Buenos Aires, Canfalone et al. (2002) obtuvieron resultados donde el tratamiento regado alcanzó su rendimiento máximo durante los tres años de 23 t ha⁻¹ de MS, mientras en el tratamiento sin riego, el máximo alcanzado fue de 13,8 t ha⁻¹ de MS.

2.4.3. Tasa de crecimiento del cultivo

El crecimiento se determina generalmente mediante medidas directas (altura de la planta, diámetro del tallo, número de hojas, área foliar, materia seca) e indirectas como la tasa de asimilación neta, TCC, tasa relativa de crecimiento, etc. (Barraza et al., 2004).

Las variables como el fotoperíodo y la temperatura son los principales factores que influyen sobre el crecimiento y la generación del rendimiento en los cultivos. Ambos factores modulan la duración de las etapas y la tasa de crecimiento de cualquier órgano vegetativo y/o reproductivo (Andrade, 1995). Por ejemplo, Kelly et al. (2021) relacionando ambas medidas (directas e indirectas) afirman que mayor acumulación de MS durante el período reproductivo de las plantas de soja bajo fotoperíodos prolongados se debe principalmente a una mayor TC promedio, con un impacto mucho menor de la extensión del período de crecimiento. Por otro lado, Bunce y Ziska (1996) encontraron un aumento en la TCR debido a aumentos de la temperatura sin aumentos importantes en la respiración.

Una forma de cuantificar la calidad del ambiente es mediante el uso del coeficiente fototermal (Q), donde Q es el cociente entre la radiación solar incidente y la temperatura diaria (Andrade, 1995). Martignone et al. (2010) lo definen como una medida de la cantidad de energía recibida para fotosíntesis por unidad de tiempo de desarrollo con el objeto de predecir el NG.m⁻². El fundamento de este cociente es que la RS tiene una alta asociación positiva con el NG.m⁻².

Jiang y Egli (1995) coinciden con este lineamiento y suman que existe una relación lineal entre el NG y la TCC durante el PC. Baigorri (2003), analizando el crecimiento define que este presenta una curva de distribución normal, donde presenta un máximo luego del cual se da el decrecimiento, y este depende de la FS. Cuando se atrasa la FS se expone al cultivo a un fotoperíodo más corto, determinando una menor producción de biomasa total.

Esto se ve reflejado en menores ramificaciones, altura de planta, número de nudos y vainas/planta; que se traduce en menores rendimientos. Por esta razón, FS luego de mediados de noviembre al haber una menor RS interceptada total se generan menores rendimientos, explicado en parte por la menor duración de las etapas vegetativas y reproductivas (Cortés, 2015). Las plantas con una alta TCR pueden anteponerse a situaciones de estrés en mejores condiciones que aquéllas con baja tasa de crecimiento (Poorter, 1989).

2.4.4. Componentes numéricos del rendimiento

Según Kantolic (2013) los componentes de rendimiento se resumen en un modelo que describe la relación entre generación de rendimiento y la captura y uso de recursos por parte del cultivo: $Y = Rd \times ei \times ec \times IC$, donde Rd, son los recursos disponibles durante la estación de crecimiento, ei es la eficiencia de intercepción y captura de la RS; ec es la eficiencia en que se convierte en biomasa la radiación e IC que proporción de esa biomasa se particiona a los granos. Las eficiencias están directamente ligadas a la disponibilidad de agua y nutrientes, por ende, las prácticas de manejo con el objetivo de aumentar el rendimiento tienden a aumentar la cantidad de recursos disponibles. En este sentido, Liu y Herbert (2000) definen que el rendimiento en grano es el producto de la interacción entre genotipos y ambiente.

Al ser el rendimiento un atributo complejo se lo puede subdividir en variables más simples de comprender: NG por unidad de superficie y el PG; si bien existen compensaciones entre estos componentes, guardan cierta independencia entre sí, que permite suponer que un aumento en cualquiera de los dos puede producir un aumento en el rendimiento. Sin embargo, en un rango amplio de condiciones agronómicas el NG es el componente que mejor explica las variaciones en la productividad del cultivo (Kantolic, 2013). Roján-Herrera et al. (2019) evaluando

fecha de siembra determinaron que en los experimentos donde se había alcanzado mayor rendimiento también se había alcanzado un NG mayor.

A su vez, García et al. (2009) afirman que el NG puede dividirse en varios componentes y estos componentes de menor orden representan la cantidad total de lugares potenciales para el establecimiento de los granos (número de nudos por unidad de área) la fertilidad de estos sitios (número de vainas por nudo) y la fertilidad de los frutos (NG por vaina). Egli (1993) coincide con el número de plantas por unidad de área, nudos por planta, vainas por nudo, para determinar el NG, y suma el PG como determinantes del rendimiento.

El número de nudos depende de la cantidad de plantas emergidas por unidad de área. Está influenciado principalmente por la densidad de plantas, el cultivar (GM, HC, juvenilidad, etc), las condiciones ambientales (latitud, disponibilidad hídrica, fertilidad, etc.) y la fecha de siembra (García et al., 2009). Los fotoperiodos largos pueden incrementar el NG por un aumento en la cantidad de nudos (Kantolic & Slafer, 2007). Seddigh y Jolliff (1984) también encontraron un aumento en la altura y ramificación de la soja con un aumento de la temperatura. En línea con lo mencionado, Kantolic (2008) afirma que cuando las condiciones nutricionales o hídricas no son óptimas, el área foliar y la producción de nudos por planta pueden volverse limitantes.

Según García et al. (2009) el número de vainas por nudo depende de las flores por nudo, y cuantas vainas se establecen por inflorescencia (1-20 vainas/inflorescencia). El nudo terminal de los cultivares con HC determinado, logra valores de 10 o más vainas (con condiciones ambientales excepcionalmente buenas). El número más habitual de vainas se encuentra entre 0 y 5. Egli y Bruening (2006) agregan que su expresión tiene un fuerte control ambiental y coinciden en que la producción de vainas y granos está relacionada con la dinámica de la producción de flores.

El NG por vaina más probable se encuentra entre 2 y 4, la frecuencia más alta de granos por vaina para los cultivares de ciclo corto es de 3 a 4 granos por vainas y la de los cultivares de ciclo largo de 2 a 3 granos. Tiene un control genético muy importante pero su expresión está condicionada por el ambiente (García et al., 2009). Un aumento en el NG sin cambios en la fotosíntesis del cultivo debería dar

como resultado granos más pequeños, ya que la fuente y la fosa suelen estar en equilibrio (Egli & Bruening, 2001).

El PG puede variar desde 80 a 400 mg, pero generalmente se encuentra entre 140 y 200 mg (140 a 170 mg en los cultivares de ciclos medios y 160 a 200 mg en los cultivares de ciclo corto). También tiene un control genético y ambiental muy importante (García et al., 2009). Sin embargo, a diferencia de otros componentes, el PG a madurez fisiológica está altamente influenciado por el NG fijados y por la dinámica de la acumulación que depende a su vez, de la duración del período de llenado y de la tasa de acumulación de biomasa (Cárcova et al., 2003).

Por último, Ceretta y Vilaró (2003) relacionaron los componentes del rendimiento con características de los cultivares, encontraron que el número total de vainas por planta se incrementa a medida que se incrementa el GM, sin embargo otras variables medidas como el número de nudos del tallo principal, el número de ramas, el número de vainas en el tallo principal y el número de vainas en las ramas no presentaron correlación con el GM.

2.5. RELEVANCIA DEL AGUA EN EL CULTIVO DE SOJA.

Fassio et al. (2017) afirman que el agua de lluvia es el principal factor determinante del rendimiento en grano. Esto es debido a que los suelos agrícolas tienen una CAAD inferior a la que el cultivo de soja consume durante su ciclo. Giménez (2019) coincide con que la oferta hídrica para los cultivos estivales está determinada por varios aspectos, entre los que resalta la capacidad de almacenar agua de los suelos. Esta resulta en una limitante real, ya que en los suelos del litoral en los que se desarrolla la agricultura, sólo es posible almacenar entre el 20 y 30 % del consumo de agua que determinan los ambientes de producción.

En otras palabras, Sawchik y Ceretta (2005) mencionan que el área donde se desarrolla la mayoría de la agricultura nacional, tiene CAAD de 80 – 160 mm, lo que representaría aproximadamente 1/4 o 1/3 respectivamente del consumo de soja de primera para rendimientos potenciales. Por otro lado, Salvagiotti (2009) afirma que en condiciones de secano es normal que la demanda atmosférica determine una absorción de agua que no es suficiente para compensar las pérdidas por transpiración, dando lugar a deficiencias hídricas.

Existen diversos factores que afectan la CAAD de los suelos pero que los mismos pueden sintetizarse en dos grandes grupos: por un lado los relacionados con la génesis del suelo, como la textura o la profundidad del perfil y por otro lado factores de manejo que afectan la capacidad de recarga de agua de los suelos como la época de siembra, la duración del período de barbecho, el cultivo antecesor, el estado estructural de los suelos, entre otros (Da Silva et al., 2022; Sawchik & Ceretta, 2005).

Por otra parte, existe una alta variabilidad interanual de las precipitaciones (Castaño et al., 2011). En este mismo sentido, la variabilidad entre años en los rendimientos promedios de los cultivos regados a escala nacional, siguen el mismo patrón que los rendimientos obtenidos en secano, lo que estaría indicando que la principal limitante del rendimiento con riego entre zafras siguió siendo la disponibilidad hídrica, asociado a patrón de precipitaciones contrastantes (Sebben et al., 2019).

Wani et al. (2012) mencionan la existencia de varios estudios que indican que los rendimientos de soja no se ven afectados sustancialmente mientras que la zona donde se encuentra la raíz mantenga niveles de AD por encima del 60 %. El estrés hídrico durante el llenado del grano reduce considerablemente el tamaño de la semilla, y el estrés hídrico después de la floración y durante el llenado de las vainas es más crítico. Feng et al. (2022) plantean que la situación se agrava si se adelanta la floración debido a que se reduce la masa radicular y se reduce la absorción de agua.

Así mismo, los experimentos llevados a cabo por Fassio et al. (2016) determinaron que riegos suplementarios aplicados durante el período reproductivo, pueden significar incrementos de rendimiento de aproximadamente 50% o más respecto a los logrados en condiciones de secano. En esta misma línea, Mousa y Qurashi (2017) determinaron que el déficit hídrico durante la etapa de floración y el comienzo de formación de grano aumentó significativamente la tasa de aborto de vainas. Para Desclaux et al. (2000) la etapa más sensible del crecimiento de la soja bajo estrés hídrico es la floración y etapas posteriores a la floración.

En contraposición, Doorenbos y Kassam (1979) afirman que un 50 % de reducción en la Evapotranspiración Real/Evapotranspiración Máxima en el período de formación de las vainas puede disminuir el rendimiento en 50 %. Pudiendo

contrarrestarse en una situación de riego en la cual la cantidad de agua consumida es mayor a medida que se aumenta el riego, explicado por una mayor tasa de evaporación potencial debido a una mayor disponibilidad de agua (Rajanna et al., 2022).

La evapotranspiración de los cultivos (ET_c) es la suma de la evaporación desde el suelo y la transpiración desde las plantas (cuando no hay deficiencias de agua). La evapotranspiración real (ET_r) es la cantidad de agua evapotranspirada por el cultivo en las condiciones ambientales en que se desarrolla; en condiciones de estrés la ET_r es siempre menor a la ET_c. La ET_c se calcula como el producto de la evapotranspiración potencial (ET_p) y el coeficiente de cultivo (K_c), dicho producto permite cuantificar el requerimiento de agua del cultivo (Doorenbos & Kassam, 1979). Dichas afirmaciones fueron validadas por Giménez (2019) donde para una serie de 9 años la ET_r fue menor que la ET_c, para 8 de ellos, lo que indica que en general los cultivos realizados en secano evapotranspiran menos que la demanda evaporativa atmosférica.

Capurro et al. (2017) concluyeron que el riego aumentó el rendimiento de soja hasta una cantidad máxima de agua total efectiva, a partir de la cual no habría aumentos de rendimiento. La cantidad de agua utilizada por la soja es de 350 a 620 mm durante la temporada de crecimiento (Capurro et al., 2017; Desclaux et al., 2000). En promedio se puede esperar una productividad de 8,5 kg ha⁻¹ mm⁻¹. La respuesta del rendimiento en función del agua total efectiva se comportó como una función lineal plus-plateau. Estos números son coincidentes con los reportados por Sawchik y Ceretta (2005) los cuales obtuvieron mediante experimentación eficiencias del uso del agua (EUA) en siembras de primera del entorno de 5-8 kg grano/mm.

2.6. CULTIVO DE SOJA SIN DEFICIENCIAS HÍDRICAS

2.6.1. Riego suplementario como principal herramienta

García Petillo (2012) hace referencia al riego suplementario como la práctica que permite darle a las plantas la cantidad de agua necesaria en el momento oportuno, es decir antes que el contenido hídrico del suelo les genere un estrés que disminuya su rendimiento y de una manera uniforme dentro de la parcela. A partir del riego suplementario, se permite disminuir los riesgos que contrae la agricultura

de secano y se generan otros escenarios de manejo como un rango de FS posibles que se independizan del período de lluvias. Se permite así, una ubicación del PC en una época de mayor oferta de recursos como la RS. Además, también permite una disminución del riesgo del sistema productivo que se ve condicionado a variaciones de la RS y la temperatura que son variables más conservativas que el régimen de lluvias (Dardanelli et al., 2003).

Hayashi y Dogliotti (2021) evaluando el efecto de distintas láminas de riego de 3, 6 y 9 mm durante dos años, como primera conclusión, encontraron que los diferentes regímenes de riego afectaron el rendimiento. Incluso con láminas de riego de 3 mm, se logró un efecto positivo en el rendimiento comparado con el cultivo de secano. Estos autores concluyen que los caudales de riego menores pueden incidir positivamente en el rendimiento comparado con una estrategia de secano, acompañando la idea de reducir los costos para mejorar el diseño del sistema planteado por García Petillo (2012).

A nivel mundial existe un escenario de menor disponibilidad de agua para riego y mayor demanda de producción que ponen a la agricultura bajo riego ante el desafío de producir más con menos agua. S. Prieto et al. (comunicación personal, s.f.) encontraron que es posible realizar riegos deficitarios controlados con reducciones del 25 % de la lámina de riego y consecuentemente de la ETr, sin mermas significativas en el rendimiento.

Giménez (2014a) halló que las deficiencias hídricas impuestas en el PC (R4-R6) provocaron disminuciones significativas en los rendimientos de soja, provocando menor acumulación de MS, que determina una menor TCC en dicha etapa, afectando directamente el principal componente del rendimiento, el NG por m⁻². En tal sentido, S. Prieto et al. (comunicación personal, s.f.) hallaron que se puede utilizar menor cantidad de agua de riego, ya que el tratamiento con 75 % de reposición de agua deficitaria obtuvo rendimientos similares al de bienestar hídrico. Por lo tanto, es posible realizar riegos deficitarios controlados con reducciones del 25 % de la lámina de riego y consecuentemente de la ETr, sin mermas significativas en el rendimiento.

Por otro lado, Giménez (2014a) obtuvo los mayores rendimientos de soja bajo un sistema de riego que se basó en el bienestar hídrico del cultivo (40 % AD en vegetativo, 60 % AD en PC y 40 % AD de R6 a MF), específicamente en los años

clasificados como “Niña” que son más secos, con elevada RS y temperaturas. Estos años poseen precipitaciones por debajo del promedio y en general mayor cantidad de luz disponible en primavera y verano. Sin importar lo anterior, la disminución en soja por causa de deficiencias hídricas en el PC varió entre 45 y 50 %, la cual debido a su ubicación en el período de llenado de grano provoca que no exista posibilidad de compensación ya que los componentes principales del rendimiento ya se encuentran definidos. No obstante, la soja con deficiencias hídricas en la etapa vegetativa si tiene la capacidad de compensar previo al PC. Presentando mejores comportamientos cuando las deficiencias hídricas se acumulan en etapa vegetativa y PC, que cuando solo ocurren en el PC (Giménez, 2014b).

2.6.2. Requerimientos hídricos del cultivo

La producción de cultivos extensivos de grano persigue la cosecha de una parte de la biomasa total producida durante el ciclo de crecimiento. La biomasa producida es el resultado final de la captura de recursos (CO₂, agua y nutrientes) por parte de las plantas, la cual tiene como principal fuerza motriz a la RS a través de su participación en los procesos de fotosíntesis y transpiración (Otegui, 2009). La soja tiene dos períodos críticos bien definidos cuando se trata de requerimientos de agua: desde la siembra a la emergencia y durante el llenado de granos/vainas. Durante la germinación, tanto el déficit como el exceso de agua perjudican la correcta implantación (uniformidad y número de plantas) del cultivo (Farías, 1995).

En condiciones normales de producción, los cultivos extensivos se ven expuestos en algún momento de su ciclo a condiciones donde la demanda atmosférica supera la capacidad de absorción o el AD en el suelo es limitante al no compensar las pérdidas por evapotranspiración, dando lugar a deficiencias hídricas (Otegui, 2009). Además, se espera que la severidad, duración y frecuencia de las olas de calor aumente en estas próximas décadas, aumentando considerablemente las pérdidas por evapotranspiración (Meehl & Tebaldi, 2004). Tanto el estrés de agua, como la deficiencia de agua durante el crecimiento vegetativo puede ser muy negativo, causando plantas muy pequeñas que nunca lograrían los rendimientos potenciales (Peters & Johnson, 1960).

En efecto, los requerimientos máximos de agua de un cultivo se representan a través de la evapotranspiración del cultivo (ETc) acumulada, la cual representa la ET de un cultivo libre de enfermedades, sin limitaciones hídricas y nutricionales que logra el rendimiento potencial. Variando según sea de primera o segunda entre 600 a 400 mm (Da Silva et al., 2022; Della Maggiora et al., 2000). Foster Aranda y Rovegno Arbiza (2015) reportaron que una soja de primera alcanza los valores máximos de ETc luego de R1, explicado por un aumento del IAF y a su vez, por un aumento de la demanda atmosférica debido a la ubicación de este período durante el mes de enero.

El AD es la cual realmente puede ser extraída por el cultivo que permanece retenida entre los potenciales métricos de capacidad de campo (-22 kPa) y punto de marchitez permanente (PMP) -1500 kPa (Damiano & Taboada, 2000). Ahora bien, el consumo de agua por el cultivo aumenta linealmente al aumentar el área foliar para una misma demanda atmosférica, hasta interceptar el 95% de la RS fotosintéticamente activa, esto es porque casi toda el agua transpirada por un cultivo pasa a través de sus hojas (Gerster & Bacigaluppo, 2009). Coincidiendo con Da Silva et al. (2022), Andriani (2016) determinó que los máximos consumos totales de agua en todo el ciclo de cultivo, para sojas de GM corto de primera y segunda, fueron de 535 y 435 mm, respectivamente. Por su parte, Curto et al. (2019) encontraron el valor mínimo para el cual por debajo del mismo comienza el estrés hídrico, un valor de 312 mm.

Los valores de ETr bajo condiciones sin estrés hídrico estaban en promedio hasta un 40 % por debajo del valor estimado en condiciones estándar (ETc). Esto indica que condiciones de crecimiento y desarrollo de los cultivos en un escenario productivo puede mostrar valores diferentes a los encontrados en un contexto experimental. Explicado por una producción de biomasa aérea reducida y no por diferencias en la extracción del agua del suelo (Curto et al., 2019). La extracción de agua por parte de los cultivos cuando el contenido de AD en el suelo se encuentra por encima de un umbral crítico, está determinado por una tasa de transpiración cercana a la demanda atmosférica. Cuando el contenido de AD está por debajo de dicho umbral, la tasa de transpiración depende de la capacidad del cultivo para absorber el agua del suelo (Dardanelli et al., 2003).

Existen estrategias de riego sub-óptimo/deficitario (RD) que logran rendimientos iguales al riego total (RT) en todo el ciclo, de todas maneras, la productividad

alcanzada en RD es dependiente de las precipitaciones de cada temporada ya que se aporta solo el 50 % del agua requerida comparado con el RT. Debido a la plasticidad del cultivo es posible limitar el riego solo en las etapas vegetativas y en período crítico, pudiendo prescindir del mismo en la etapa de floración (Rovegno Arbiza, 2021).

2.6.3. Relación entre la disponibilidad hídrica y la fecha de siembra

Según Andriani (2000) sin limitantes hídricas, los valores de consumo de agua por el cultivo van a depender de la demanda atmosférica, duración del ciclo y del área foliar que él mismo pudo desarrollar. El largo del ciclo (LC) podrá variar con cambios en la fecha de siembra (FS) y la genética del cultivar utilizado. La demanda atmosférica es tal vez el factor más importante para estimar los requerimientos hídricos del cultivo, la cual dependerá de la radiación incidente, temperatura y humedad del aire. La mayor sensibilidad a deficiencias hídricas coincide con los momentos de consumo de agua más altos, por lo que debemos evitar a través de la FS y LC que los valores más altos de las curvas de consumo se superpongan (Farías, 1995).

Es importante aclarar, que el adelantamiento de la FS incrementa el largo del ciclo total de los cultivares. Este aumento en la longitud del ciclo, es debido fundamentalmente al aumento de días en la etapa vegetativa (emergencia a floración), aunque también se incrementa, en cierta medida, la duración de las etapas reproductivas. En resumen, aumenta la duración del PC y se adelanta su ocurrencia, por lo que logramos disponer de mayor radiación y temperatura para generar más rendimiento, siempre en condiciones hídricas no limitantes (Baigorri, 2003). Un PC prolongado, puede resultar en mayores rendimientos, aunque una duración excesiva de la fase no necesariamente seguirá aumentando el NG (Kantolic & Slafer, 2007).

Ahora bien, tanto Seibane (2005) en San Luis, con ensayos en 6 cultivares de soja con distintos GM y dos niveles de deficiencias hídricas (riego y secano); como tampoco S. Prieto et al. (comunicación personal, s.f.) encontraron una interacción entre la disponibilidad hídrica y la FS, posiblemente explicado por la magnitud suficiente de precipitaciones en momentos claves para no afectar el rendimiento del cultivo. Sin embargo, Manlla y Salvagiotti (2011) en Argentina lograron resultados con una mínima significancia en la interacción FS x disponibilidad

hídrica, donde solo en el tratamiento más tardío, el riego tuvo efecto sobre el rendimiento. Para las FS de octubre y noviembre las precipitaciones fueron suficientes para no afectar el crecimiento y rendimiento del cultivo.

Aun cuando, los antecedentes indican que el retraso en la FS resulta en disminuciones en los rendimientos, Vicente (2020) encontró que las diferentes FS condicionan al cultivo en la acumulación de precipitaciones, explicado no solo por la distribución de las mismas, sino que también por la ya mencionada variación en la longitud del ciclo total del cultivo. Se acumularon para la FS del 4 de octubre 600 mm en todo el ciclo y a medida que se iba retrasando la siembra se observó una disminución en el consumo de agua, llegando a la FS más tardía (16 de enero) con valores menores a 250 mm, comprometiendo significativamente el rendimiento. En conclusión, en los ambientes en los que la disponibilidad hídrica está asegurada o en los que generalmente es adecuada, se prioriza el ajuste de la duración y la tasa del llenado de granos, para asegurar un alto rendimiento. Esto se logra con FS tempranas (Baigorri, 2003).

2.7. FACTORES DE MANEJO QUE MODIFICAN EL RENDIMIENTO DEL CULTIVO.

2.7.1. Fecha de siembra

La elección de la FS es un factor importante debido a que está asociada en gran medida a la generación de los componentes del rendimiento, sobre todo a los NV por m² (Robinson et al., 2009). Según el GM que pertenezca la variedad y la FS utilizada será la respuesta que se obtenga (crecimiento y desarrollo), ya que, responden de forma diferencial al fotoperíodo (alargamiento de los días en la primera etapa del cultivo si se sembrase temprano). Las variedades que mejor se adaptan a FS tempranas son las pertenecientes al GM IV (Manlla & Salvagiotti, 2011).

García et al. (2009) dividen a los factores que afectan el comportamiento en tres, factores controlables, parcialmente controlables e incontrolables. Dentro de los controlables se encuentra: fertilización, FS, elección del cultivar, espaciamiento entre surcos, densidad de siembra, control de plagas, enfermedades y malezas entre otros. Dentro de los parcialmente controlables se ubican complementar la falta de precipitaciones mediante riego, adecuar el manejo ante la influencia de

napa freática, mejorar la captación y la eficiencia de uso del agua del perfil de suelo, etc. Por último, dentro de los incontrolables se ubica: duración del día, RS, temperatura, etc. (García et al., 2009). Como factor controlable, una consecuencia del manejo de la FS es la variabilidad de los componentes numéricos del rendimiento, dado que lo que se afecta es el ambiente en el que se desarrolla la planta (Martínez Álvarez et al., 2001).

Por ejemplo, Van Schaik y Probst (1958) demostraron que el aumento de las temperaturas de 15,6 °C a 32,2 °C y un fotoperíodo de 14 h provocó un aumento en la altura de la planta y el número de nudos. Sin embargo, Sionit et al. (1987) reportaron que aumentos excesivos en la temperatura generaban decrecimientos en la proporción de brotes, masa foliar y el peso específico de la hoja. Por otro lado, mirando otros componentes del rendimiento, hubo una fuerte interacción de CO₂ y temperatura sobre el PG por planta y NG por planta (Heinemann et al., 2006). Por otra parte, relacionando otro factor determinante, Sionit et al. (1987) reportaron que aumentos en la temperatura generaban decrecimientos en la proporción de brotes, masa foliar y el peso específico de la hoja.

La reducción en el rendimiento por retrasos en el momento de implantación del cultivo resulta de la incidencia de la radiación, la temperatura y el fotoperíodo sobre la fenología y la acumulación de materia seca (Andrade & Cirilo, 2000). Por lo tanto, al realizar un manejo de la elección de FS tempranas se está incidiendo sobre el rendimiento, dado que, permite ubicar el periodo más crítico definido entre R4-R6 en condiciones de mayor RS y mayores temperaturas (Giménez, 2007). En FS de octubre la duración del PC es mayor que en FS de noviembre, independientemente del GM. Esto permite una mayor acumulación de biomasa determinando así un mayor número de estructuras reproductivas (Gasó et al., 2015). En condiciones de fotoperíodos largos (FS tempranas), el período reproductivo se prolonga y la senescencia de las hojas se retrasa (Guiamet & Nakayama, 1984).

Las FS de noviembre permiten acumular valores de RS incidente mayores durante el ciclo lo que permite que el cultivo obtenga mayores rendimientos, comparado con FS más tardías. Se encontró que valores de RS incidente acumulada en el ciclo total superior a 3200 MJ. m⁻² permiten obtener rendimientos mayores a 7000 kg. ha⁻¹ (Larrama Udaquiola, 2019). Paparcone y Silveira (2022) agregan que con FS de octubre se logran RS incidente acumulada de 680 MJ. m⁻² durante el PC, lo

que permite obtener rendimientos de 7892 kg. ha⁻¹. Explicado por la combinación de un NG. m⁻² y un PMG alto. Además, las FS tempranas presentaron una parte significativa del PC durante el mes de enero donde ocurren las mayores demandas evaporativas atmosféricas, por ende, mayores ETc (Giménez, 2007). Se puede observar una relación directa entre los rendimientos alcanzados y las ETc acumuladas del ciclo en las diferentes FS; cuanto mayor es la ETc acumulada en el ciclo, mayor es el rendimiento (Giménez, 2014b).

Asimismo, la disminución lineal en el rendimiento observada a medida que se retrasó la siembra, destaca la importancia de la FS temprana para maximizar el potencial de rendimiento de la producción de soja irrigada. Es probable que el potencial de rendimiento mejore cuando hay más nudos disponibles para servir como sitios para el desarrollo reproductivo y cuando se alarga el intervalo R1-R7 (Bastidas et al., 2008). En experimentos llevados a cabo en Gainesville, Florida, con plantas expuestas a diferentes regímenes de temperaturas altas, se encontró que debido al crecimiento vegetativo prolongado y el acortamiento de los entrenudos se formaban más nudos, y por ende más sitios potenciales de floración/fructificación (Allen et al., 2018).

Daroish et al. (2005) como se cita en Bastidas et al. (2008) indican que las FS tienen un efecto significativo en el rendimiento en grano y rendimientos biológicos. Los máximos rendimientos en grano (437 g.m⁻²) y de MS total (1393 g.m⁻²) fueron obtenidos con FS tempranas, y estos disminuyen con FS tardías. Con una disminución lineal del rendimiento por cada día de atraso en la FS (entre 17 y 43 kg. ha⁻¹. d⁻¹), y una reducción total de 1300 kg. ha⁻¹. d⁻¹ promedio por haber atrasado la FS 45 días desde el 1 de noviembre. Demostrando la importancia de sembrar temprano para maximizar el rendimiento de la soja irrigada (Bastidas et al., 2008).

Debido a la aleatoriedad de ocurrencia de fenómenos climáticos adversos como escasez o exceso de agua, la estrategia de siembra en nuestro país debe tender a diversificar el momento de ocurrencia de la floración y llenado de grano. La máxima dispersión de la floración se logra realizando las siembras tempranas con sojas de ciclo corto (Ceretta & Vilaró, 2003). En síntesis, las FS tempranas resultan en: aumentar la fotosíntesis, aumentar el número de nudos del tallo principal (más flores, vainas y granos), mayor TC durante la fijación de vainas, una potencial

floración temprana, período reproductivo más largo y mayor tasa de llenado de granos (Pedersen & De Bruin, 2009).

2.7.2. Elección de cultivar y grupo de madurez

Baigorri (2004) menciona que en ambientes en los que se cuenta con riego, la elección y el manejo de los cultivares deberá modificarse, comparado con aquellos que no cuenten con esta tecnología. En estos casos se deberán reemplazar las estrategias defensivas (tales como la diversificación de la ubicación del PC) por estrategias productivas, eligiendo cultivares más cortos y adelantando las FS. En función de las condiciones ambientales, se debe definir el listado de cultivares más adaptados teniendo en cuenta su GM, HC y juvenilidad. Estas decisiones de manejo determinan la producción de biomasa aérea total, el IC y el llenado de granos (ubicación, duración y tasa) (García et al., 2009). Por ejemplo, Allen et al. (2018) encontraron que un cultivar GM III (indeterminado) evaluado a 38/30 °C o 42/34 °C redujo el desarrollo reproductivo, que debido al aborto de flores siguió formando nudos, dejando en evidencia su crecimiento indeterminado. Demostrando cómo algunas decisiones de manejo pueden condicionar el rendimiento final.

De la Vega y de la Fuente (2003), como se cita en Villasuso (2015), consideran que en lo que respecta al genotipo, la característica más relevante a tener en cuenta es el grupo de madurez (GM) ya que éste determina la duración del ciclo del cultivo en un determinado ambiente. Para una misma fecha y ambiente, la duración de la etapa siembra a floración es mayor a medida que aumenta el GM. Entonces a medida que aumenta el GM hasta el VI aumentan los niveles mínimos de rendimiento lo cual es un indicador de disminución del riesgo (Ceretta & Vilaró, 2003).

Villasuso (2015) describe que otra característica importante del genotipo es el hábito de crecimiento (HC), el cual puede ser determinado (caracterizado por una escasa o nula superposición del crecimiento vegetativo y reproductivo), semi determinado o indeterminado. En este último, la superposición del crecimiento entre órganos vegetativos y reproductivos es mayor, característica que confiere una cierta plasticidad al cultivo para compensar cualquier daño o atraso ocasionado por estreses abióticos y/o bióticos. Kantolic (2008) afirma que el HC modifica la longitud de la fase de producción de nudos independientemente de la

duración de la fase pre-floración, no está directamente asociado con el rendimiento potencial, pero confiere algunas características que pueden modificar la adaptación de los genotipos al ambiente.

Ceretta y Vilaró (2003) encontraron que el rendimiento debió estar determinado por mecanismos de compensación entre el NG.m² y el PMG. En este sentido, los cultivares de ciclo corto al tener menor número de vainas totales compensan su rendimiento mediante mayor NG por vaina y mayor tamaño de grano lo cual es posible en la medida que no haya restricciones de agua. Entonces la elección del genotipo sin deficiencias hídricas, debe optimizarse en relación con la FS y la materia orgánica del suelo para maximizar el rendimiento (Madias et al., 2021).

Kantolic (2008) afirma sobre la existencia de varios estudios que demostraron que los rendimientos de cultivares de ciclo corto son similares, y no mayores, que los de ciclo largo. Esto puede deberse a dos causas: por un lado, que los cultivares, además de diferir en su GM difieran en muchas otras características asociadas al rendimiento potencial; en segundo lugar, se ha observado que la duración de las fases reproductivas tiende a ser menor en los cultivares de ciclo más corto. En análisis realizados por Ceretta y Vilaró (2003) en tres años concluyeron que los mayores rendimientos y estabilidad de los mismos se logró con sojas de GM V y VI. Los rendimientos logrados con GM IV fueron de muy buen nivel con una tendencia a menor estabilidad. Paparcone y Silveira (2022) afirman que siembras tempranas de la primera década de octubre en condiciones de riego permiten lograr los mejores rendimientos en variedades de ciclo corto.

2.7.3. Interacción entre el grupo de madurez y la fecha de siembra como factor determinante del rendimiento

El comportamiento fenológico de soja en condiciones ambientales diferentes, es un aspecto a considerar en la elección de los cultivares con mayor adaptación a las regiones de producción y en el ajuste de las prácticas de manejo del cultivo. El conocimiento de la ubicación temporal del PC en los diferentes GM, es una característica relevante debido a que el ambiente de producción, durante esta etapa, condiciona la TCC, la cual influye en el NG por superficie, componente principal del rendimiento (Egli, 1998, como se cita en Giménez, 2007).

Bastidas et al. (2008) estudiaron ocho FS distintas en las cuales siete de ellas obtuvieron un diferencial de días después de la siembra entre VE y R1 de entre 28 y 31 días. Lo que refleja lo dependiente que es R1 de la fecha de VE. Del mismo modo, Wilkerson et al. (1989) evaluaron cultivares de GM corto, a una temperatura constante de 26°C, con un fotoperiodo fuertemente inductivo y concluyeron que R1 se producía unos 20 días post VE. Los períodos de VE a R1 más largos probablemente sean producidos por la condición de fotoperiodos naturales (menos inductivos) y temperaturas más frías en el experimento de Bastidas et al. (2008) comparado con el otro ensayo.

Las diferentes respuestas al fotoperíodo de cada GM, alargando los días post siembra entre las etapas vegetativas y las reproductivas (principalmente), sumado a la posibilidad de hacer variar la FS, hacen que se obtengan distintas respuestas. Siendo los cultivares de GM IV los que mejor se adaptan a FS tempranas (Manlla & Salvagiotti, 2011). Siguiendo esta línea de pensamiento, Sebben et al. (2019) definen que las prácticas de manejo identificadas como de mayor relevancia para el logro de altos rendimientos, fueron las FS de la última década de octubre y primera de noviembre, la elección de GM cortos entre 3.8 y 5 y la disponibilidad hídrica durante los meses donde se encuentran las etapas más críticas para la determinación del rendimiento (explicando más del 50% del rendimiento en los meses de enero y febrero).

En experimentos llevados a cabo por Fassio et al. (2017) evidenciaron que en condiciones de bienestar hídrico, el factor más importante en el rendimiento de soja fue la interacción GM por FS (51,3%), la cual casi duplicó la magnitud del efecto FS (26,4%). En cambio, (Larrama Udaquiola, 2019) no evidenció una interacción entre la FS y la variedad, ya que detectó que las diferencias en rendimiento por retrasar la FS desde noviembre a enero no presentaron una diferencia entre las variedades estudiadas. Ambos experimentos fueron realizados en condiciones de bienestar hídrico.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LOCALIZACIÓN Y CONDICIONES DEL EXPERIMENTO

El experimento se llevó a cabo en la Estación Experimental “Dr. Mario A. Cassinoni” (EEMAC), de la facultad de Agronomía, ubicada en la ruta 3, km 363 del departamento de Paysandú, Uruguay. El experimento se ubicó en las coordenadas 32°38' S 58°04' O, durante el año agrícola 2020/21. El suelo experimental pertenece a la formación Fray Bentos, unidad de suelos San Manuel, según la Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay a escala 1:1.000.000 y es clasificado como un suelo Brunosol sub-éutrico típico.

3.1.1. Manejo experimental

Las fechas de siembra del ensayo fueron el 10 de octubre, 10 de noviembre y 10 de diciembre del 2020. Se utilizó la variedad (DM50i17) de GM V corto de hábito de crecimiento indeterminado. La distancia entre hileras utilizada fue de 0,40 m y una población objetivo de 350.000 pl/ha⁻¹, la misma se logró sembrando una población mayor y ajustando la misma manualmente a V2-V3.

El cultivo se mantuvo libre de malezas, enfermedades y plagas. Para ello se realizaron tres aplicaciones de glifosato a razón de 2 lt.ha⁻¹ de producto comercial para controlar malezas, una aplicación de insecticida Engeo a razón de 0,2 lt ha⁻¹ de producto comercial para el control de chinches (*Piezodorus Guildinii* y *Nezara viridula*)

En la Tabla 1, se muestran las fechas en las cuales se desarrollaron los diferentes estadios fenológicos del cultivo. Entre siembra, VE, R1, R4, R6 y cosecha (Fehr & Caviness, 1977), para las tres fechas de siembra evaluadas (10 de octubre, 10 de noviembre y 9 de diciembre) tanto en riego como en secano.

Tabla 1*Eventos fenológicos desde siembra a cosecha*

Estadio fenológico	FS Octubre		FS Noviembre		FS Diciembre	
	Riego	Secano	Riego	Secano	Riego	Secano
Siembra	10/10/2020		10/11/2020		09/12/2020	
VE	20/10/2020		17/11/2020		16/12/2020	
R1	25/11/2020		28/12/2020		25/01/2021	
R4	08/01/2021		09/02/2021	26/01/2021	12/02/2021	
R6	09/02/2021		08/03/2021		10/03/2021	
Cosecha	09/03/2021		01/04/2021		01/04/2021	

Nota. Los datos se presentan para cada una de las fechas de siembra (FS) en estudio (10 de octubre, 10 de noviembre y 9 de diciembre).

3.1.2. Tratamientos

Se realizaron cuatro repeticiones con 6 tratamientos en cada una distribuidos en 24 Unidades Experimentales (UE), que siendo un diseño tipo en bloques completos al azar con parcelas divididas, puede ser agrupado en 12 UE mayores; cada UE constituye una parcela la cual estaba integrada por 7 hileras de plantas, de 6 m de longitud y 2,8 m de ancho.

Los tratamientos se determinaron en base a fecha de siembra y condición hídrica:

Fecha de siembra: 10 de octubre - regado

Fecha de siembra: 10 de octubre - secano

Fecha de siembra: 10 de noviembre - regado

Fecha de siembra: 10 de noviembre - secano

Fecha de siembra: 9 de diciembre - regado

Fecha de siembra: 9 de diciembre - secano

Los tratamientos bajo riego se mantuvieron con el porcentaje de agua disponible (AD) por encima de 40% en las etapas no críticas del cultivo (ENC) y se mantuvo por encima de 60% AD durante el PC, dicho método mantiene el bienestar hídrico en el cultivo (Della Maggiora et al., 2000). El sistema de riego utilizado fue por goteo, para ello cada hilera presentó emisores separados cada 0,3 m y un caudal nominal de cada gotero de 1,49 l.h⁻¹. El ajuste de la lámina de riego se basó en un balance hídrico de suelos simplificado de paso diario que intervino en la medida que se llegara a los umbrales de riego indicados. El balance hídrico se realizó en

base al crecimiento radicular estimado para el cultivo de soja y se calculó según la siguiente fórmula: $\Delta H = R + PP - ET_c$

Donde ΔH corresponde a la variación de contenido de agua en el suelo (mm), R a riego (mm), PP a precipitaciones ocurridas (mm) y siendo la evapotranspiración del cultivo (ET_c) se calculó a partir de la evapotranspiración de referencia (ET_o) de Penman - Monteith y el coeficiente de cultivo (K_c). La ET_o se calculó en base a la ecuación de FAO Penman-Monteith y se usaron los K_c recomendados por FAO para las diferentes etapas del cultivo.

3.2. DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA DEL EXPERIMENTO

3.2.1. Hipótesis biológica

Las fechas de siembra de noviembre en Soja en condiciones de secano, provocan mejores rendimientos que las siembras tempranas de octubre y las tardías de diciembre.

Las fechas de siembra de octubre en Soja en condiciones bajo riego, provocan mejores rendimientos que las siembras de noviembre y diciembre.

3.2.2. Diseño experimental

El diseño utilizado fue bloques completos al azar en parcelas divididas, siendo la parcela mayor las tres fechas de siembra y la parcela menor la condición hídrica (Riego y Secano), dispuesta al azar en la parcela mayor. Este diseño experimental tiene dos fuentes de variación: tratamientos y repeticiones. Los tratamientos fueron asignados al azar a las unidades experimentales dentro de cada bloque, como se puede observar en la Figura 1.

Figura 1

Croquis del experimento en estudio dividido en bloques

BLOQUE 1	BLOQUE 2	BLOQUE 3	BLOQUE 4
P1 FS 3 S	P7 FS 2 R	P13 FS 1 R	P19 FS 3 S
P2 FS 3 R	P8 FS 2 S	P14 FS 1 S	P20 FS 3 R
P3 FS 1 S	P9 FS 3 R	P15 FS 2 S	P21 FS 1 R
P4 FS 1 R	P10 FS 3 S	P16 FS 2 R	P22 FS 1 S
P5 FS 2 R	P11 FS 1 R	P17 FS 3 R	P23 FS 2 R
P6 FS 2 S	P12 FS 1 S	P18 FS 3 S	P24 FS 2 S

Nota. Fecha de siembra octubre regado (FS 1 R), fecha de siembra octubre seco (FS 1 S), fecha de siembra noviembre regado (FS 2 R), fecha de siembra noviembre seco (FS 2 S), fecha de siembra diciembre regado (FS 3 R) y fecha de siembra diciembre seco (FS 3 S). Pn: número de parcela.

3.2.3. Análisis estadístico

El análisis estadístico del experimento fue realizado con el programa "INFOSTAT" para estudiantes, aplicado en el curso de MMCC III "Diseño y análisis de experimentos". Se estudió el análisis de varianza, mediante el cual se descompone la variación total en tantos componentes como tenga el modelo. La significancia de contrastes simples se estudió a través del test de Tukey al 0,05 y se dispuso un error estadístico definido por la interacción entre bloque y fecha de siembra como variables dependientes.

3.3. DETERMINACIONES REALIZADAS

3.3.1. Determinaciones durante el ciclo del cultivo

En el estado vegetativo se realizaron una serie de determinaciones, las cuales se repitieron en cada fecha de siembra. Los muestreos de MS se realizaron en los estadios R1, R4, R6.

Al momento de inicio de floración, R1, se tomó una muestra de plantas constituida por 2 m lineales, aproximadamente unas 26-28 plantas, y se realizaron únicamente mediciones de variables continuas; altura de planta en cm, peso fresco y seco de la muestra en kg.

En plena formación de vainas, estado R4, se tomó una muestra de 2 m lineales, realizándose las mismas mediciones de variables continuas y agregando variables discretas, como ser número de nudos fructíferos por planta, número de flores por planta, número de ramificaciones por planta, número de vainas menores a 2 cm, y número de vainas mayores a 2 cm.

Por último, en la etapa final del llenado de grano, R6, se realizó un muestreo de 2 m lineales de plantas, repitiendo la medición de las variables continuas analizadas en R1 y R4, y variando las variables discretas, en este estado se midió número de ramificaciones por planta, número de vainas con 0, 1, 2, 3 y 4 granos por nudo y por planta.

3.3.2. Determinaciones a cosecha

Al momento de madurez fisiológica del cultivo, etapa R8, se tomó una muestra de 2 m lineales de plantas representativos de cada parcela (hilera central, evitando el efecto "borde"), en las cuales se cuantifican las mismas variables discretas determinadas en R6 (componentes del rendimiento), añadiendo variables continuas como ser: peso fresco y peso seco de toda la parcela (se cosecharon en total 2 m de la muestra más 12 m lineales, 14 m totales), y PMG.

3.3.3. Descripción de los cálculos realizados

La determinación del número de granos. m^{-2} se realizó mediante el siguiente cálculo:

$$NG. m^{-2} = \text{Rendimiento (kg. } m^{-2}) / \text{PMG (kg)}$$

Para la determinación de la suma térmica en grados día (GD) se realizó la sumatoria de los grados ($^{\circ}C$) promedio (entre las temperaturas máximas y mínimas) de cada día con una temperatura base de $10^{\circ}C$, acumulados durante las diferentes etapas fenológicas del cultivo (VE-R1, R1-R3, R4-R6, R7-R8), para cada FS (10 de octubre, 11 de noviembre y 10 de diciembre).

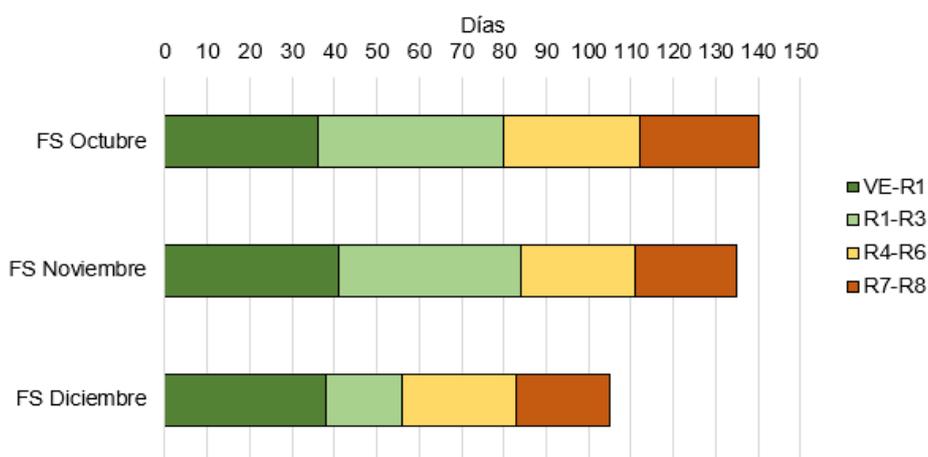
$$GD = \sum ((T \text{ máxima} + T \text{ mínima}) / 2) - T \text{ base}$$

3.4. CONDICIONES CLIMÁTICAS DURANTE EL CICLO DEL CULTIVO

En la Figura 2, se muestra el largo de cada periodo y del ciclo total del cultivo para cada FS evaluada.

Figura 2

Largo del ciclo en días y duración para cada etapa del cultivo (VE-R1, R1-R3, R4-R6 y R7-R8)



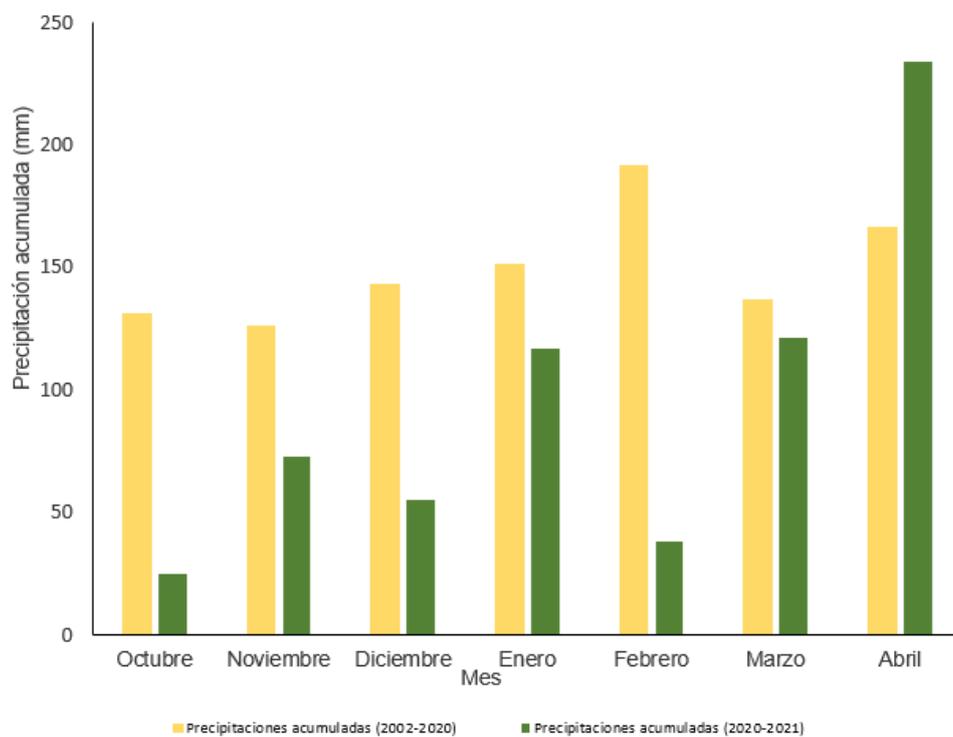
Nota. FS: Fecha de Siembra.

3.4.1. Precipitaciones y agua efectiva

En la Figura 3, se presentan las precipitaciones (mm) ocurridas en la EEMAC, durante una serie histórica de 18 años desde el 2002 al 2020 y las precipitaciones que ocurrieron durante el período en estudio, año agrícola 2020/21. Los datos fueron proporcionados en la estación meteorológica automática de la EEMAC y el pluviómetro del sitio experimental.

Figura 3

Precipitaciones mensuales acumuladas históricas entre 2002-2020 y en la zafra en estudio 2020-2021 según mes del año



En la Tabla 2, se detalla el volumen de agua efectiva para cada FS evaluada tanto para los ensayos regados como para los de secano y la relación entre riego y secano.

Tabla 2

Agua efectiva (mm) para las FS evaluadas tanto regadas como secano y su relación

	Fecha de siembra					
	Octubre		Noviembre		Diciembre	
	Regado	Secano	Regado	Secano	Regado	Secano
Agua efectiva (mm)	614	316	583	272	388	124
Relación R/S	2 : 1		2 : 1		3 : 1	

3.4.2. Radiación Solar

En la Tabla 3, se puede observar para cada FS (octubre, noviembre y diciembre), la RS incidente acumulada (en MJ. m⁻²) para los distintos periodos del ciclo del cultivo planteados por Fehr y Cavinness (1977) y el coeficiente fotothermal promedio.

Tabla 3

Radiación solar incidente acumulada por etapa

Fecha de siembra	Radiación incidente acumulada desde VE-R1 (MJ.m-2)	Radiación incidente acumulada desde R1-R3 (MJ.m-2)	Radiación incidente acumulada en PC (MJ.m-2)	Radiación incidente acumulada en todo el ciclo (MJ.m-2)	Coeficiente fotothermal (Q) promedio
10 de octubre	566	878	578	2560	1,43
10 de noviembre	733	815	518	2389	1,36
9 de diciembre	859	286	530	1958	1,36

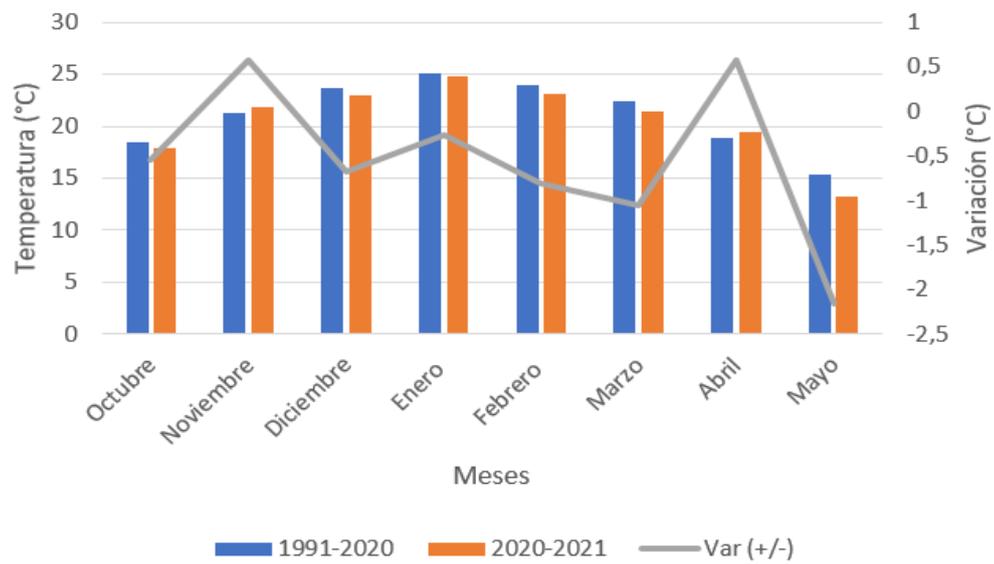
Nota. En la etapa vegetativa (VE hasta R1), entre R1-R3, en el período crítico (R4-R6), en el total del ciclo (MJ. m⁻²) y el coeficiente fotothermal (Q) promedio para las diferentes FS (10 de octubre, 10 de noviembre y 9 de diciembre).

3.4.3. Temperatura

En la Figura 4, se presentan las temperaturas (°C) ocurridas en Paysandú, durante una serie histórica de 30 años desde el 1991 al 2021 y también las temperaturas que ocurrieron durante el período en estudio, zafra 2020-2021. Los datos fueron obtenidos de la estación meteorológica automática de la EEMAC.

Figura 4

Temperaturas mensuales (°C) acumuladas históricas entre 1991-2021 y, en el año agrícola 2020-2021



4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1.1. Rendimiento y componentes numéricos principales según fecha de siembra, disponibilidad hídrica y su interacción

En la Tabla 4, se presenta el rendimiento, junto con los componentes numéricos principales según la interacción entre las fechas de siembra (FS) y disponibilidades hídricas evaluadas.

Tabla 4

Rendimiento (kg. ha⁻¹), número de granos por metro cuadrado (NG. m⁻²) y peso de mil granos (PMG, g) para las distintas fechas de siembra (FS) y disponibilidades hídricas (R: riego y S: seco)

Fecha de siembra	Rendimiento (kg. ha ⁻¹)	NG. m ⁻²	PMG (g)
Octubre - R	5180 a	3977 a	130 b
Noviembre - R	3955 b	2714 b	146 ab
Diciembre - R	4030 b	2483 b	163 a
Octubre - S	2692 c	1886 c	142 ab
Noviembre - S	1538 d	1211 d	103 c
Diciembre - S	1248 d	1069 d	145 ab

Nota. Valores con diferente letra dentro de la misma columna para cada variable difieren entre sí ($p < 0.05$, Tukey).

La Tabla 4, muestra que la FS de octubre regada fue la que obtuvo el mayor rendimiento, comparado con noviembre y diciembre; no existiendo diferencias entre ambas. Estos resultados se encuentran alejados de los máximos rendimientos teóricos reportados por Vogel et al. (2021) del entorno de los 7.250 a 11.000 kg. ha⁻¹. Por otro lado, en resultados nacionales tampoco se lograron alcanzar los rendimientos obtenidos por Giménez (2017b), o resultados más recientes reportados por Larrama Udaquiola (2019) o Paparcone y Silveira (2022), todos ellos del entorno de los 7.500 kg. ha⁻¹, esto está posiblemente explicado por RS y temperaturas por debajo del promedio histórico para toda la estación de crecimiento, donde los efectos de la temperatura son un determinante importante para el crecimiento, desarrollo y posterior rendimiento (Sionit et al., 1987).

Los resultados indican que la FS de octubre acumuló la menor RS incidente entre VE-R1, contradiciendo lo planteado por Andrade (1995). Por ende, esta diferencia en rendimiento a favor de la FS de octubre no se debe a una mayor acumulación de MS en los estadios vegetativos, sino que se explica debido a la ubicación de los estadios reproductivos durante condiciones de mayor RS incidente (Tabla 3 y 4).

A su vez, la etapa de R1-R8 para la FS de octubre presentó una duración de 104 días (Figura 2), 10 días adicionales comparado con la FS de noviembre y 37 días adicionales si se compara con la FS de diciembre. La FS de octubre canalizó la mayor oferta de RS principalmente en el PC (Tabla 3), si se relaciona con la temperatura, para el mes de enero (Tabla 1), en el que se ubicó el PC para esta FS, fue el único mes en el cual la variación de temperatura de la temporada en estudio fue cero, es decir que no presentó anomalías comparado con los demás meses (Figura 4). Teniendo en cuenta estas condiciones la FS de octubre estuvo frente a mejores condiciones de los factores definitorios de rendimiento potencial, si se compara con las demás FS.

El NG es el componente que mejor explica las variaciones en la productividad del cultivo, para la FS de octubre se logró el mayor $NG.m^{-2}$ y es también donde se constató el mayor rendimiento (Tabla 4), justificando esta correlación, con diferencias con las otras FS evaluadas. A su vez, la mayor RS incidente y el mayor coeficiente fototermal (Tabla 3) reafirman los resultados obtenidos de rendimiento para la FS de octubre (Egli, 1993; Kantolic, 2013; Martignone et al., 2010).

En lo que refiere al PMG tratándose de un cultivar de ciclo corto los valores obtenidos para todos los tratamientos, excepto para la FS de octubre bajo riego y FS de noviembre en seco, coinciden con los valores para ciclos medios del experimento de Cárcova et al. (2003), quienes adjudicaron pesos de entre 140 a 170g. Siendo los ciclos medios de ese experimento los materiales más parecidos al utilizado en nuestro ensayo. Dicho componente tiene un fuerte control genético y ambiental por lo que, dejando de lado la parte genética, la influencia del efecto año fue lo que generó las diferencias ocasionadas (García et al., 2009).

En síntesis, la FS de octubre debido a una mayor acumulación de RS incidente durante todo el ciclo (Tabla 3), aunque con temperaturas medias por debajo del promedio histórico (Figura 4), fue la que obtuvo mayores rendimientos bajo

condiciones de bienestar hídrico (Tabla 4). Dichos rendimientos son explicitados con mayor NG pero no por el mayor PMG. Siendo la FS de diciembre la que logró un mayor PMG. De todas maneras, con ello quedó demostrado que se obtuvo respuesta al adelantamiento de la FS con el objetivo de adelantar y alargar el PC.

Los tratamientos de FS de noviembre y diciembre bajo riego intentaron compensar el menor NG con un mayor PMG, lo cual no fue suficiente para alcanzar los rendimientos de la FS de octubre, debido al mayor NG logrados por esta. No existió interacción entre la FS y la disponibilidad hídrica, los tratamientos bajo riego siempre rindieron más que los no regados.

Para las FS de noviembre y diciembre no existió diferencia en rendimiento si las comparamos dentro de la misma disponibilidad hídrica, explicado por una compensación en el PMG para la FS de diciembre (Tabla 4), posiblemente argumentado por una relación fuente/fosa mayor para la FS de diciembre. Los tratamientos en seco no se observó la misma tendencia que bajo riego en la cual la FS de noviembre es la que obtuvo el menor PMG posiblemente por un efecto térmico que aceleró la tasa de llenado disminuyendo su duración.

En la Tabla 5, se presentan los valores de rendimiento (kg. ha^{-1}) y de los principales componentes numéricos del mismo, PMG (g) y NG. m^{-2} según las distintas FS (octubre, noviembre y diciembre) y las diferentes disponibilidades hídricas (riego y seco) respectivamente.

Tabla 5

Rendimiento (kg. ha⁻¹), peso de mil granos (PMG, g) y número de granos por metro cuadrado según fecha de siembra y disponibilidad hídrica

Fecha de siembra	Rendimiento (kg. ha ⁻¹)	NG. m ⁻²	PMG (g)
Octubre	3936 a	2932 a	136 ab
Noviembre	2601 b	1962 b	124 b
Diciembre	2784 b	1776 b	154 a
Disponibilidad hídrica	Rendimiento (kg. ha ⁻¹)	NG. m ⁻²	PMG (g)
Riego	4388 a	3058 a	146 a
Secano	1826 b	1389 b	130 b

Nota. Valores con diferente letra dentro de la misma columna para cada variable difieren entre sí ($p < 0.05$, Tukey).

En la Tabla 5, se muestra nuevamente la importancia del adelantamiento de la FS, observando los componentes del rendimiento, hay una tendencia dentro de los tratamientos a medida que se atrasa la FS disminuye el NG.m⁻², con diferencias significativas. Los resultados demuestran la importancia del NG en la productividad, siendo mayor para la FS que más altos rendimientos obtuvo (Kantolic, 2013; Roján-Herrera et al., 2019).

Si se desagregan los componentes por su interacción FS y disponibilidad hídrica (Tabla 4), se cumple con lo planteado por Cárcova et al. (2003) solo para los tratamientos bajo bienestar hídrico (Anexo 1). El riego permitió que el contenido hídrico del suelo sea suficiente como para evitar un estrés. Sin embargo, las condiciones de temperatura y RS no fueron las óptimas para expresar el rendimiento potencial. En secano, la disponibilidad hídrica para el cultivo quedó condicionada por las precipitaciones, con déficit hídricos severos para las tres FS en diferentes etapas del ciclo siendo más importante durante el PC (Figura 3 y Tabla 2). Esto provocó que los rendimientos obtenidos para secano hayan sido bajos (Tabla 4).

En la Tabla 5, se observa que el rendimiento fue más del doble cuando el cultivo se encontró bajo riego en comparación con secano, independientemente de la FS. Estos resultados apoyan la afirmación de que la soja requiere entre 350 a 620 mm durante la estación de crecimiento (Capurro et al., 2017; Desclaux et al., 2000). Como se observa en la Tabla 2, el agua efectiva (mm) alcanzó este rango solo para los ensayos regados, con un máximo en la FS de octubre de 614 mm. Al observar la diferencia entre riego y secano, se demuestran las bajas

precipitaciones durante el año agrícola. Las FS de octubre y noviembre en secano acumularon aproximadamente el 50 por ciento del agua efectiva (mm) acumulada que las mismas FS regadas. Para la FS de diciembre la situación fue más crítica con una relación de 3:1 entre riego y secano (Tabla 2).

Se trató de un año particularmente seco en el que las precipitaciones se encontraron desde octubre hasta marzo por debajo del promedio de los últimos 18 años (Figura 3). Estos resultados generaron que se maximizará la brecha en rendimiento entre riego y secano (Tabla 5).

4.1.2. Características climáticas en cada fecha de siembra evaluada

4.1.2.1. Temperaturas: medias, máximas y mínimas

En la Tabla 6, se puede observar la comparación entre las distintas temperaturas medias alcanzadas durante cada etapa del ciclo del cultivo para cada FS en estudio, esto a su vez se relaciona con el largo en días de cada etapa.

Tabla 6

Duración de las etapas, temperaturas medias, máximas y mínimas y promedio de una serie histórica 2002-2020, en cada etapa para las FS evaluadas: 10/10, 10/11 y 9/12

Fecha de siembra	Largo del período en días	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Temperatura media (°C)	Temperatura media (°C) histórica del 2002-2020
VE-R1					
Octubre	36	26,8	13,3	20,1	19,7
Noviembre	41	29,5	15,7	22,6	22,5
Diciembre	38	31,8	17,8	24,8	24,1
R1-R3					
Octubre	44	29,1	18,1	23,6	23,8
Noviembre	43	30,7	18,2	24,4	24,4
Diciembre	18	28,7	18,1	23,4	24,0
R4-R6					
Octubre	32	30,1	18,2	24,1	24,6
Noviembre	27	29,8	17,5	23,7	23,9
Diciembre	27	30,2	17,4	23,8	23,3
R7-R8					
Octubre	28	29,9	17,5	23,7	23,3
Noviembre	24	25,8	15,6	20,7	21,4
Diciembre	22	25,3	15,5	20,4	20,8

En la Tabla 6, se observa que para las etapas VE-R1 las diferencias máximas de duración de la etapa fue de cinco días. En relación a las temperaturas medias la diferencia fue aumentando aproximadamente 2 a 3 °C a medida que se iba atrasando la FS. El fotoperiodo poco inductivo en este momento y las bajas temperaturas en el periodo VE-R1 hacen que los resultados difieran con los obtenidos por Bastidas et al. (2008), los cuales para 8 fechas de siembra lograron períodos de VE a R1 de entre 28 y 31 días.

Entre las FS de octubre y noviembre, las temperaturas medias mostraron una notoria diferencia, fue cinco días más largo el periodo para la FS de noviembre, dejando en evidencia el fotoperiodo poco inductivo en ese momento, alargando la etapa de VE-R1 para la FS de noviembre. Si se analizan las FS de noviembre y diciembre la diferencia fue de tres días. Estos resultados, no coinciden con los obtenidos por Baigorri (2003), ni con los reportados por Bastidas et al. (2008) en los que las temperaturas más bajas alargan el periodo vegetativo, si no que se observó una duración menor de VE-R1 para la FS más temprana (Tabla 6). De todos modos, las temperaturas medias durante este período se encuentran dentro del rango óptimo para el crecimiento y desarrollo.

En relación, a las temperaturas medias durante el experimento las mismas no difirieron en gran medida con el registro histórico (Figura 4 y Tabla 6). Sin embargo, con las temperaturas mínimas alcanzadas pudo verse limitado el establecimiento de vainas y desarrollo de granos, ya que existieron días con temperaturas menores a 21 °C (García et al., 2009; Salvagiotti, 2009).

De todas maneras, las bajas temperaturas al inicio del ciclo principalmente para la FS de octubre, no tuvieron un impacto negativo en el rendimiento, seguramente disminuyó la eficiencia fotosintética, pero se logró compensar por una mayor cantidad de RS interceptada (Tabla 3), debido al aumento en la duración de la etapa entre R1-R6 (Schoving et al., 2022).

Para el periodo comprendido entre R1-R3, la diferencia en su duración se manifestó con mayor claridad (Tabla 6). La diferencia en la duración para la FS de diciembre fue muy marcada en contraste con las FS de octubre y noviembre, aproximadamente 25 días menos que las FS más tempranas. Sin embargo, la diferencia entre el promedio de las temperaturas medias no fue mayor a 1 °C, por lo que esto pudo deberse a un fotoperiodo muy inductivo durante fines de enero comienzo de febrero (Tabla 1), momento del año en el cual transitó la floración el tratamiento sembrado en diciembre. Esto demuestra que el fotoperiodo y la temperatura no siempre actúan de forma aditiva (Kantolic, 2008).

Las temperaturas medias, máximas y mínimas, para las tres FS durante el PC, tuvieron diferencias, mínimas, pero existieron (Tabla 6). Se puede decir que el fotoperiodo fue el factor que incidió de manera más importante para que el PC de la FS de diciembre sea cinco días más corto que la FS de octubre. De todas maneras, la FS de noviembre transcurrió su PC durante la misma cantidad de días que la FS de diciembre. Sin embargo, debido a que la FS de noviembre transcurrió su PC desde la primera decena de febrero hasta marzo (Tabla 1 y Figura 2) sometida a una mayor cantidad de días con estrés térmico (Figura 5), pudo haber presentado un menor tamaño de grano, el cual se puede asociar a un PMG menor (Tabla 5).

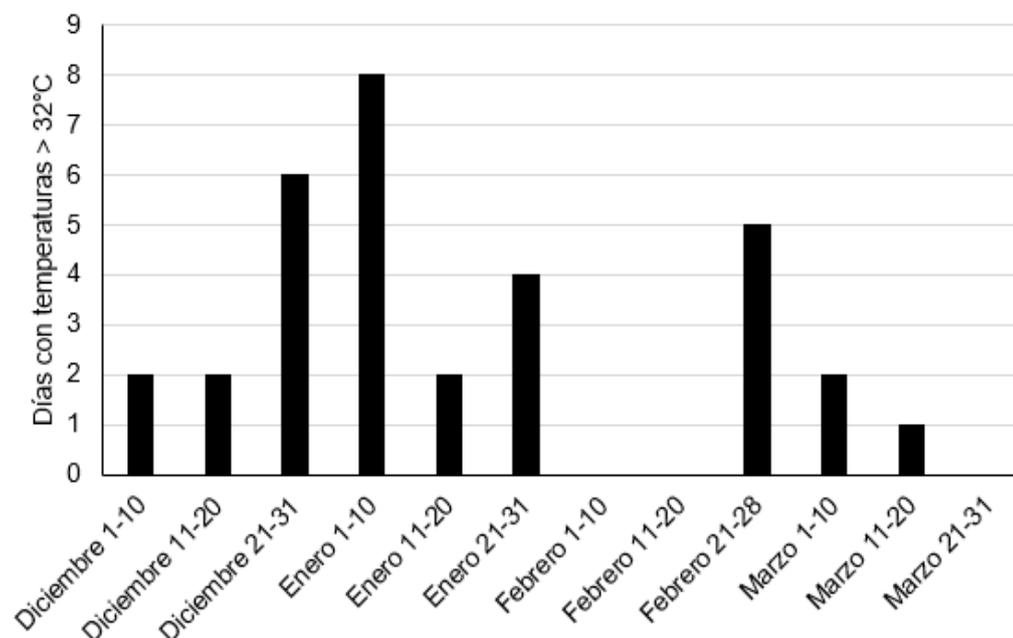
La FS de diciembre, mostró similar duración y ubicación del PC, que la FS de noviembre, lo cual debió demostrar PMG similares (Tabla 1 y Figura 2), sin

embargo, dado que este componente también depende de la tasa de acumulación de MS y del NG fijados (Cárcova et al., 2003), el mismo presentó un PMG menor.

En la Figura 5, se muestra la cantidad de días en los cuales existieron temperaturas máximas mayores a 32 °C durante los meses que se ubicaron las etapas reproductivas de cada FS. Las temperaturas por encima de este valor, afectan el desarrollo de las vainas y su posterior llenado provocando pérdidas en el rendimiento (Medina Lasaga & Pereira Portela, 2018). Para la FS de noviembre, durante la etapa final del PC existieron 7 días con temperaturas superiores a 32 °C pudiendo explicar el porqué de la similitud entre la duración del PC entre FS de diciembre y noviembre (Figura 2), en donde se pudo haber acelerado el desarrollo de esta última.

Figura 5

Días con temperaturas mayores a 32 °C durante cada década de cada mes entre diciembre 2020 hasta marzo 2021



En la FS de octubre, el PC transcurrió en el mes de enero (Tabla 1), en el cual para el año agrícola en estudio existieron temperaturas máximas mayores a 35 °C lo que podría haber afectado la fotosíntesis (Toledo, 2018). En términos numéricos para el PC de la FS de octubre se registraron 14 días con temperaturas mayores a 32 °C, ocasionando así efectos negativos en la concreción de los componentes numéricos del rendimiento y en consecuencia alejándose de los rendimientos potenciales o reales logrados en ensayos nacionales (Paparcone & Silveira, 2022).

Para el caso de las FS más tardías, las mismas ubicaron el PC en febrero y parte de marzo (Tabla 1), en que las temperaturas en algunos días superaron los 32 °C (Tabla 6), teniendo en cuenta máximos promedios. Pero claramente, ubicar el PC más adelante significó haber colocado para la FS de noviembre plena floración y para FS de diciembre el periodo vegetativo, en el mes con mayores temperaturas. Esto afectó las relaciones fuente/fosa de ambas FS. Para la FS de noviembre y diciembre las temperaturas superiores a 32 °C al inicio del PC provocaron abortos de vainas, comprometiendo el rendimiento (Tabla 5) (Medina Lasaga & Pereira Portela, 2018). Por último, la FS de diciembre al ubicar el periodo vegetativo en

condiciones de RS y temperaturas mayores implicaría un aumento de la biomasa en estos primeros estadios para esta FS.

En contraposición, existieron cinco días aproximadamente durante fines de diciembre y comienzos de enero con temperaturas menores a 14 °C, en los cuales se detiene la fijación de vainas y por lo tanto se alarga el periodo (García et al., 2009; Lyu et al., 2020). Esto sumado a una baja respuesta al fotoperiodo denota el porqué de la duración parecida de la etapa reproductiva para la FS de noviembre y octubre (Figura 2), pero con claras diferencias en el rendimiento final (Tabla 4).

4.1.2.2. Suma térmica

En la Tabla 7, se presentan la duración en días de cada etapa del ciclo del cultivo, las sumas térmicas totales y por período para las tres FS.

Tabla 7

Para cada FS octubre, noviembre y diciembre: Duración de las etapas del ciclo y sumas térmicas por etapa y acumulado total, para las distintas FS evaluadas: 10/10, 10/11 y 9/12

Estado Fenológico	Fecha de siembra					
	Octubre		Noviembre		Diciembre	
	Duración (días)	Suma térmica (°C.d)	Duración (días)	Suma térmica (°C.d)	Duración (días)	Suma térmica (°C.d)
VE-R1	36	382	41	522	38	614
R1-R3	44	584	43	617	18	231
R4-R6	32	448	27	365	27	369
R7-R8	28	379	24	252	22	225
TOTAL	140	1.793	135	1.756	105	1.439

Como se observa en la Tabla 7, en la FS de octubre se dan las menores sumas térmicas en, VE-R1, lo que coincide con las menores temperaturas medias registradas en este mes para ese período (Tabla 6). De forma opuesta, ocurre para FS de noviembre y diciembre. La temperatura controla la duración de las fases acelerando o retrasando el desarrollo (Setiyono et al., 2007), frente a estos resultados es de esperar una mayor tasa de desarrollo en esta etapa para las FS de noviembre y diciembre.

Sin embargo, durante el PC la FS de octubre logró las mayores sumas térmicas, siendo 79 °C día la máxima diferencia entre octubre y diciembre, por otro lado, entre noviembre y diciembre la diferencia fue solamente de 4 °C día.

La FS de octubre, permitió ubicar el PC en condiciones de RS mayor (Tabla 3) y temperatura superior (Tabla 7), coincidiendo con Giménez (2007). Importa destacar que las diferencias en las temperaturas medias en el PC no fueron tan importantes, por lo que la suma térmica mayor se debió en mayor medida a la duración de la etapa y no a las temperaturas promedio (Tabla 6).

Por otra parte, si observamos las sumas térmicas totales, la FS de diciembre logró menores sumas térmicas en todo su ciclo. En esta situación térmica, el NG, se vió afectado negativamente. En contraposición a la FS de octubre que fue la que logró las mayores sumas térmicas con una diferencia de 37 °C.d con la FS de noviembre que se ubicó en un punto intermedio. Estos valores se ven reflejados en los resultados obtenidos en NG, siguiendo un orden decreciente desde la FS de octubre a la FS de diciembre (Tabla 5) (Martínez Álvarez et al., 2001).

Por otro lado, si se relaciona con el fotoperíodo, estos resultados de rendimiento coinciden con Kumudini (2002), la FS de octubre transitó la etapa crítica de formación de vainas durante un fotoperíodo más largo (Tabla 1) que pudo ser un medio para mejorar la relación fuente/fosa, lo que directamente aumentó el rendimiento final, además de la acumulación importante de GD durante todo el ciclo (Tabla 7).

A pesar de obtener diferencias en las sumas térmicas, durante todo el ciclo de VE-R8, cuando observamos el promedio de temperatura en el largo del ciclo de cada FS fue del entorno de los 23 °C para las tres FS (Tabla 6), dejando en evidencia que la diferencia en °C día no fue debido a una diferencia en temperaturas si no una menor duración del largo del ciclo total debido a una respuesta fotoperiódica (Figura 2). Siendo la FS de octubre la que mostró un ciclo más largo.

Durante los estadios reproductivos (de R1 a R8) la FS de octubre fue la que obtuvo una mayor suma térmica. Esta mayor acumulación de GD en la etapa reproductiva sigue la tendencia marcada anteriormente sobre una mayor suma térmica total en todo el ciclo. De este modo, se puede concluir, que las FS tempranas de octubre, necesitan de una mayor acumulación de GD para completar sus diferentes fases

de desarrollo. Debido a una menor temperatura media durante toda la estación de crecimiento, para poder alcanzar estos mayores valores de GD el cultivo alargó su ciclo (Figura 2).

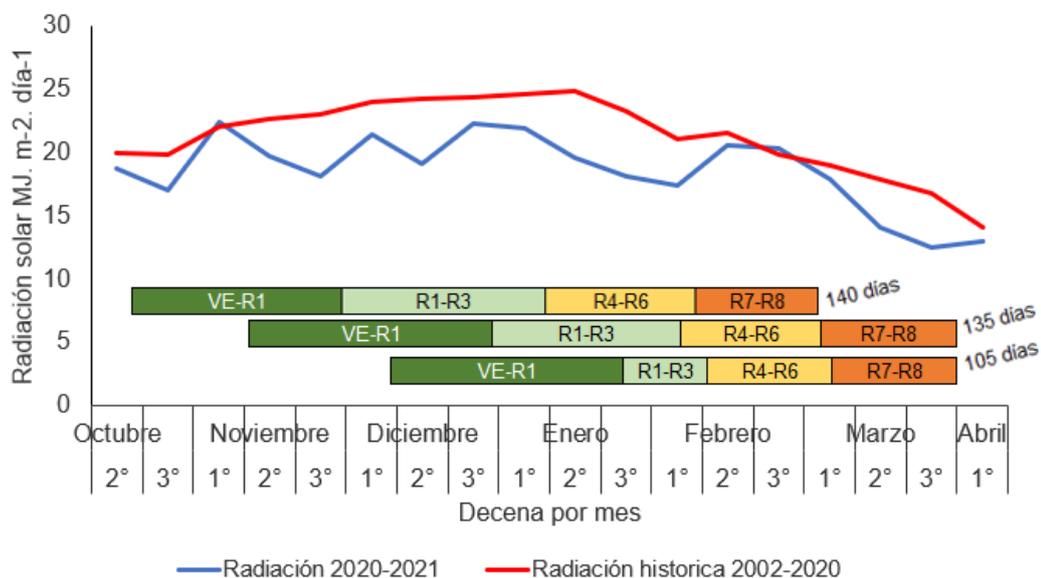
Es valioso destacar que, sin ser para la FS de noviembre, el resto de los meses de la estación de crecimiento, la temperatura estuvo siempre por debajo de una serie histórica de 30 años, variando en promedio en toda la estación $-0,5$ °C. Por esto, se podría esperar valores de sumas térmicas mayores y con ello mayores valores en los componentes numéricos del rendimiento, especialmente NG, reafirmando el concepto de que el rendimiento potencial no es estático ni atemporal (Sionit et al., 1987; Toledo, 2018).

4.1.2.3. Radiación solar incidente sobre las etapas más importantes del cultivo, como repercute sobre la acumulación de MS y el rendimiento final para las distintas fechas de siembra

En la Figura 6, se presentan los datos de la radiación solar incidente mensual y las distintas etapas del ciclo del cultivo, para las tres FS evaluadas y la serie histórica de radiación solar de 2002-2020.

Figura 6

Radiación solar incidente promedio (MJ. m⁻²) para 2020/21 y para una serie histórica 2002-2020 en las etapas fenológicas, para cada FS evaluada: 10/10, 10/11 y 9/12

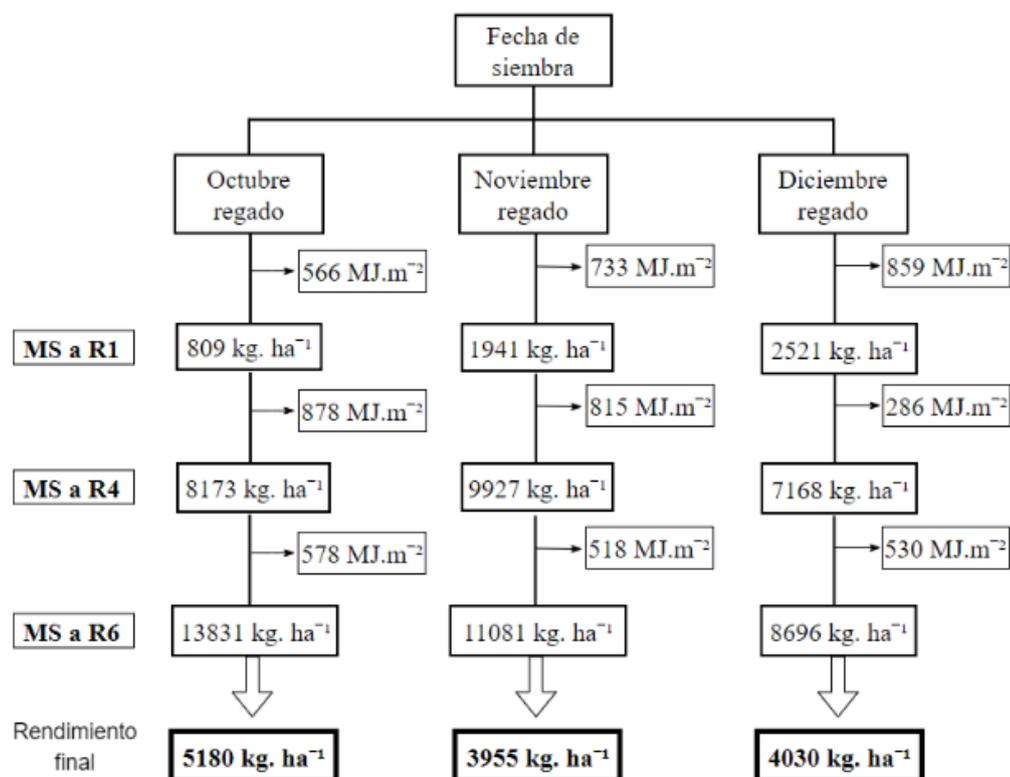


En la Figura 6, se puede observar que a pesar de ciertos momentos como son la primera década de noviembre y la tercera de febrero, la RS incidente fue inferior durante el experimento comparado con los valores de la serie histórica. Esto interpretamos que produjo rendimientos menores a los reportados por Paparcone y Silveira (2022) (Tabla 4), debido principalmente a una menor acumulación de RS durante las etapas del cultivo provocando una menor acumulación de MS (Figura 7).

En la Figura 7, se puede observar para cada FS bajo riego a medida que iban avanzando en el ciclo, que cantidad de RS se acumuló en MJ.m⁻² por etapas y a su vez, al final de cada etapa, cuanto se transformó en MS medida en kg.ha⁻¹. Mostrando el resultado como rendimiento final de cada tratamiento.

Figura 7

Radiación solar incidente acumulada (MJ.m^{-2}), materia seca (MS) acumulada, kg.ha^{-1} desde VE a R1, R1 a R4 y R4 a R6 y el rendimiento final (kg.ha^{-1}) para cada FS evaluada bajo riego



En la Figura 7, se puede observar que existieron diferencias entre la RS acumulada total en cada ciclo según la FS. La FS de octubre fue la que acumuló mayor RS incidente durante el ciclo (Tabla 3), comparado con la FS de noviembre que se redujo un 11 % y por último, la que presentó menor RS incidente durante el ciclo fue la FS de diciembre con una reducción del 22 % con respecto a octubre. Por lo tanto, queda en evidencia, que al adelantar la FS se incrementó el largo del ciclo total (Andriani, 2000). Además aumentó la duración del PC y se adelantó la ocurrencia (Figura 6) provocando que la FS temprana dispusiera de una mayor RS incidente, por lo tanto, mayor MS a R6 generando un mayor rendimiento (Figura 7), coincidiendo con Baigorri (2003).

En cada FS evaluada, la RS incidente acumulada fue variando según la etapa del ciclo dependiendo en qué parte del año se ubicó. Desde R1 a R8 la acumulación de RS incidente fue de 2.073, 1.715 y 1.117 MJ.m^{-2} para las FS de octubre, noviembre y diciembre respectivamente. Durante el PC existió una diferencia en

la duración de esta etapa cuando comparamos la FS de octubre (32 días) y las otras dos fechas con 27 días de longitud, con una mayor duración de las etapas reproductivas en general para la FS más temprana. Esta mayor duración de las etapas reproductivas, junto con una mayor RS incidente diaria promedio permitió que la FS de octubre acumule mayor RS, que se tradujo a una mayor cantidad de MS, explicando gran parte del rendimiento logrado (Figura 7) (Gasó et al., 2015).

En la etapa vegetativa, la FS de diciembre fue la que acumuló mayor RS, no tuvo gran diferencia con la FS de noviembre, pero sí fue más marcada la diferencia con la FS de octubre. Por lo que, coincidiendo con lo reportado por Giménez (2017a) con mayores niveles de RS incidente la FS de diciembre logró acumular más MS durante el periodo VE-R1 (Figura 7). Esta mayor biomasa determinaría un aumento de uno de los componentes ecofisiológicos del rendimiento que es la eficiencia de intercepción (e_i) (Kantolic, 2013).

Sin embargo, como se observa en la Figura 7, esta mayor acumulación de MS tal vez haya aumentado la e_i de la FS de diciembre, no obstante, los resultados muestran una clara disminución de la RS incidente acumulada durante la etapa R1-R4. Por lo tanto, la menor duración de este periodo comparado con las FS de octubre y noviembre (Figura 6) tuvo mayor importancia que la mayor acumulación de MS al comenzar el periodo, provocando que la FS de diciembre haya sido a R4, la FS que acumuló menor volumen de MS (Figura 7).

Por otro lado, la FS de noviembre logró acumular valores de RS incidente muy similares a la FS de octubre, que a sí mismo le permitieron acumular en ciertas etapas mayores cantidades de MS (Figura 7). En cambio, ni los mayores niveles de RS incidente acumulada, ni la MS acumulada le permitieron superar el rendimiento de la FS de diciembre, sin diferencias significativas entre ambos (Tabla 4). Entonces el principal factor que afectó el rendimiento para la FS de noviembre fue la temperatura, explicado en el capítulo anterior.

Es conveniente enfatizar que a partir de los resultados presentados, se observó que la diferencia en producción de MS de R4 a R6 para la FS de octubre y noviembre fue de $5.658 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ y $1.154 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ respectivamente, sin embargo la diferencia en RS incidente fue de $60 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$. Este incremento demostró como la producción de MS es dependiente también de la temperatura y el fotoperíodo, dado que el primer factor presenta diferencias mínimas (Tabla 6) esta diferencia

radica en el fotoperíodo que como se mencionó generó un alargamiento de todo el ciclo, pero especialmente del período reproductivo generando 5 días adicionales para la FS de octubre.

En conclusión, la FS de octubre logró acumular mayor RS incidente total debido a un largo de ciclo mayor, lo que también permitió adelantar la ubicación de la etapa reproductiva, principalmente el PC, ubicando el mismo con condiciones de RS incidente promedio mayores (Figura 7). Provocando la mayor acumulación de MS a R6 lo que le permitió lograr el mejor de los rendimientos (Tabla 4), reafirmando lo planteado por Monzón et al. (2021).

En la FS de diciembre la situación fue la inversa, comenzando con altos valores de RS acumulada, por lo tanto, una gran cantidad de MS acumulada al inicio que al final no se tradujo en un mayor rendimiento (Figura 7), debido a un acortamiento de las etapas reproductivas (Figura 2). Por último, la FS de noviembre obtuvo valores de RS y MS acumulada en parte del ciclo hasta superiores a la FS de octubre, pero debido a la más baja acumulación de MS en el PC y al estrés producido por la temperatura (Figura 5) en gran parte de su PC no alcanzó rendimientos superiores (Tabla 4).

Es importante aclarar que la RS incidente durante el año agrícola en estudio fue un 14% inferior a la serie histórica 2002-2020 (Figura 6). Los valores máximos en la primera década de noviembre y a fines de diciembre sin llegar en los meses de mayor RS a los valores históricos, lo que a nuestro entender comprometió el rendimiento. De forma similar, los resultados obtenidos de RS incidente durante el PC fueron un 9 % menor que los resultados logrados para la misma FS por Paparcone y Silveira (2022), demostrando nuevamente los bajos rendimientos del año agrícola 2020/21, en condiciones experimentales similares.

4.1.2.4. Precipitaciones acumuladas

En la Tabla 8, se presentan las precipitaciones acumuladas en las distintas etapas del ciclo del cultivo para las tres FS en estudio, como ya se indicó, las diferencias en la duración de las etapas de VE a R1 fueron mínimas. Sin embargo, sí lo fueron las precipitaciones ocurridas, siendo más del doble si se compara la FS de octubre con la de diciembre y más del cuádruple si se comparan las FS de octubre y noviembre. Esto coincide con Castaño et al. (2011), en dos sentidos, por un lado,

deja en evidencia la gran variabilidad interanual de las precipitaciones a nivel nacional. Por otra parte, analizando precipitaciones efectivas, para el mes de noviembre fueron de 201 mm, por lo cual, solamente para este mes se estaría cubriendo la evapotranspiración asumiendo valores de 160-185 mm/mes según el modelo Penman-Monteith.

Tabla 8

Precipitaciones acumuladas (mm) para las tres fechas de siembra en estudio en las etapas fenológicas (VE-R1, R1-R3, R4-R6, R7-R8 y VE-R8) y la duración de cada etapa en días

Estado Fenológico	Fecha de siembra					
	Octubre		Noviembre		Diciembre	
	Duración (días)	Precipitaciones (mm)	Duración (días)	Precipitaciones (mm)	Duración (días)	Precipitaciones (mm)
VE-R1	36	26,4	41	123,0	38	57,6
R1-R3	44	122,6	43	143,2	18	116,2
R4-R6	32	139,8	27	33,0	27	28,8
R7-R8	28	33,0	24	103,4	22	103,4
TOTAL	140	322	135	403	105	306

Los datos de precipitaciones del año agrícola 2020/21 durante los períodos reproductivos de las tres FS, muestran que tanto las precipitaciones acumuladas como la duración de los períodos tuvieron un orden decreciente desde la FS más temprana hacia la más tardía (desde R1-R8) (Tabla 8). Dada la importancia del requerimiento de agua durante el PC (Farías, 1995), se justifica la respuesta en rendimiento de la FS de octubre frente a las demás FS evaluadas (Tabla 4).

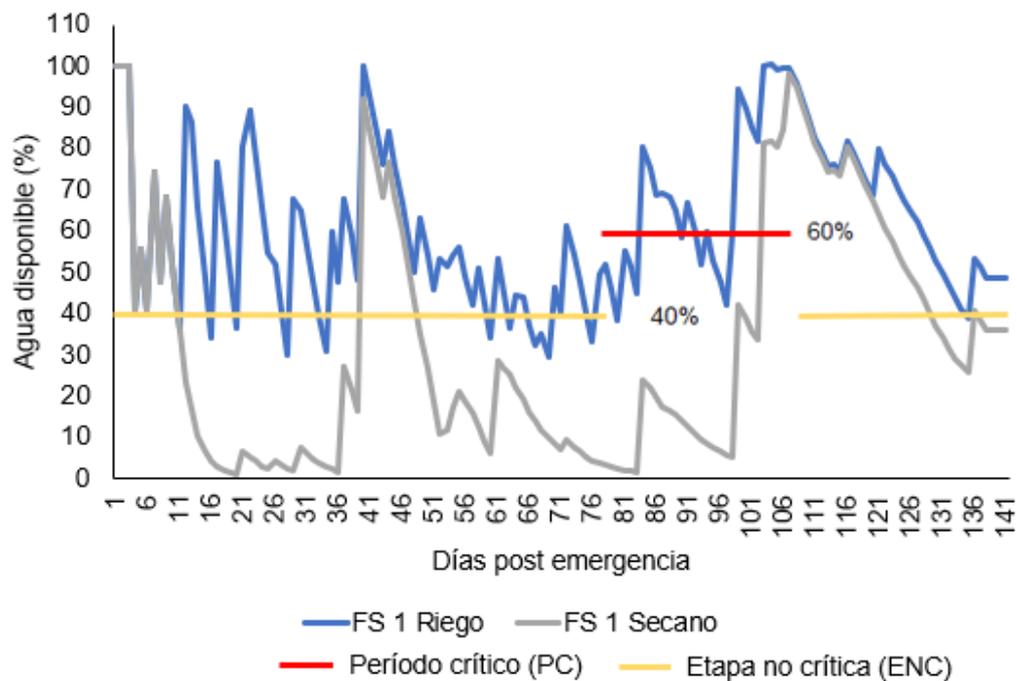
Por otro lado, los resultados en el llenado de vainas demuestran lo crítico que resultó ser las precipitaciones escasas, generando el menor PMG para la FS de noviembre (Tabla 4), esto coincidió con el reporte de Wani et al. (2012), el estrés hídrico durante el llenado de grano reduce considerablemente el tamaño promedio de grano. Sin embargo, la FS de diciembre que obtuvo igual duración y precipitaciones, registró valores de PMG iguales a octubre (Tabla 4), concluyendo que el PMG a madurez fisiológica está altamente influenciado por [el] NG fijados, que si bien no hay diferencias entre noviembre y diciembre hay una diferencia numérica de 142 granos fijados entre ambas FS para los tratamientos de secano (Tabla 4) (Cárcova et al., 2003).

4.1.3. Evolución del agua disponible en el suelo

En las Figuras 8, 9 y 10, se presenta la evolución del porcentaje de agua disponible en el suelo bajo condiciones de riego y seco, en las FS evaluadas de octubre, noviembre y diciembre.

Figura 8

Evolución del porcentaje de agua disponible (%) para la FS de octubre (FS 1) bajo riego y seco



En la Figura 8, se puede observar que en la FS de octubre en seco durante las ENC y PC, la disponibilidad hídrica se encontró generalmente por debajo de los umbrales de riego utilizados, 40% y 60%. Esto fue debido a las bajas precipitaciones reportadas durante gran parte del ciclo, principalmente en los días previos al PC y 15 días durante el PC. De este modo, se coincide con lo planteado por Giménez (2014a y 2014b), que reportó que las deficiencias hídricas durante el PC provocan disminuciones entre 45 y 50% del rendimiento, afectando directamente el componente principal NG. m², sin capacidad de compensación (Tabla 4).

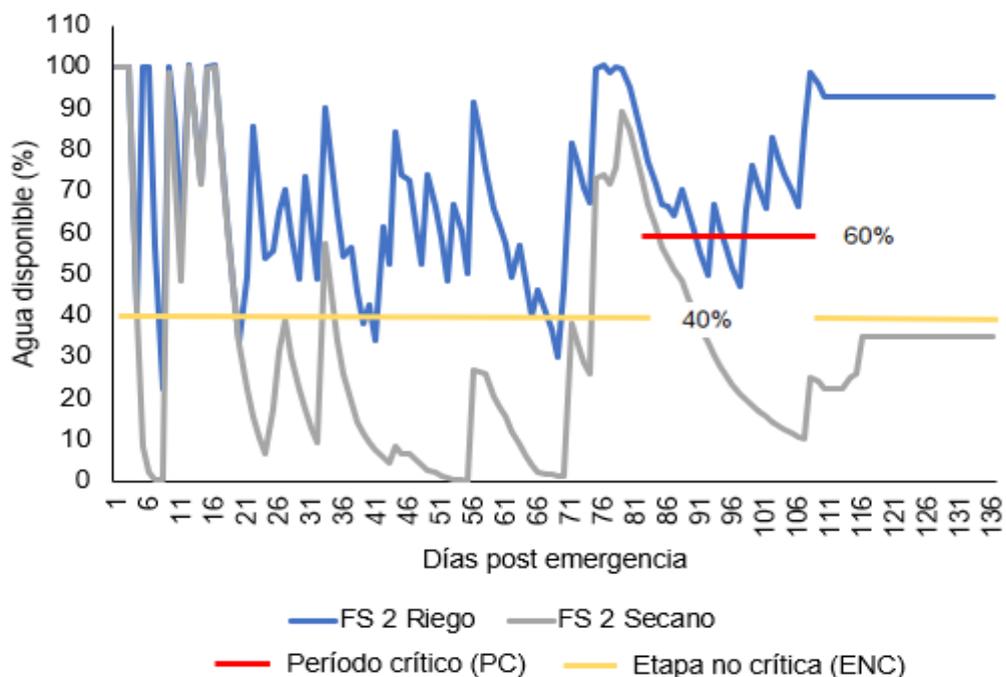
Por otro lado, cuando observamos el tratamiento regado, el mismo logró mantener niveles de AD prácticamente siempre por encima de los umbrales planteados de

riego. Esta estrategia permitió, el bienestar hídrico durante la etapa más sensible del cultivo, sumado a una mayor oferta de recursos como RS (Figura 7) y temperatura (Tabla 6) lo que hizo que este tratamiento haya alcanzado el mayor de los rendimientos (Tabla 4).

De todas maneras, existieron algunos días durante el PC en el cual el AD no alcanzó el 60 %, explicado por una alta demanda atmosférica y una mayor ETc, lo que terminó condicionando el rendimiento final (Tabla 4) (Dardanelli et al., 2003; Giménez, 2014a; Meehl & Tebaldi, 2004).

Figura 9

Evolución del porcentaje de agua disponible (%) para la FS de noviembre (FS 2) bajo riego y seco



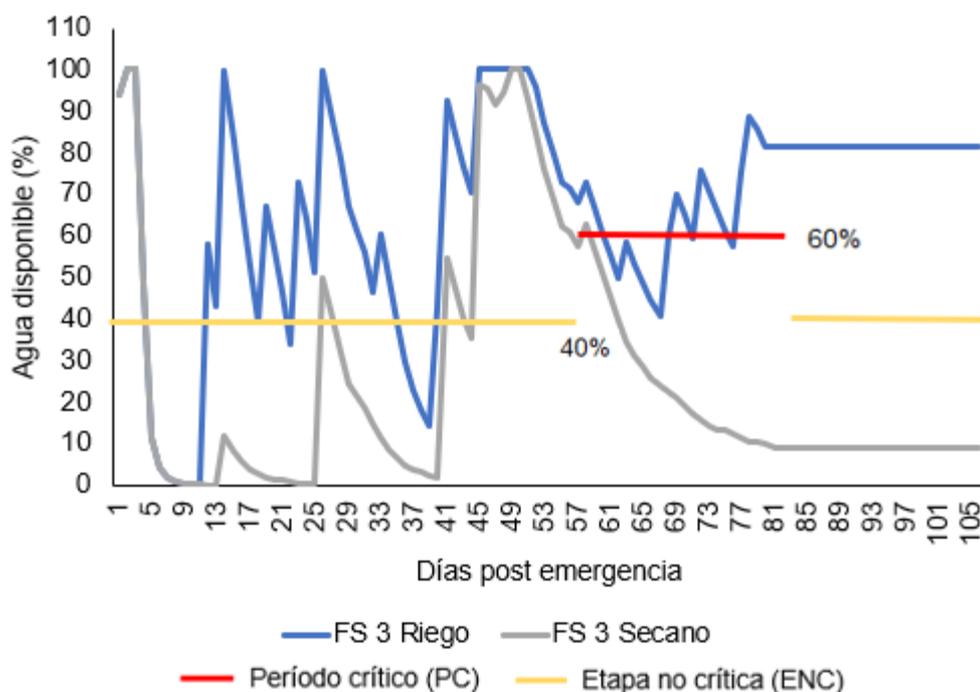
En la Figura 9, se observa que, para el tratamiento de seco el déficit hídrico medido como AD fue muy claro para las ENC y PC, superando los umbrales sólo en los 20 días previos al PC. El valor de agua efectiva alcanzado durante todo el ciclo para la FS de noviembre, en seco, fue de 272 mm (Tabla 2), mostrando claramente las condiciones hídricas restrictivas en las cuales creció y cómo esto repercutió directamente en el rendimiento (Tabla 4) (Capurro et al., 2017; Curto et al., 2019). Al igual que la FS de octubre, en seco, dado el año “Niña” transitado durante el experimento, las bajas precipitaciones no permitieron que el PC

presente valores mayores al 60% de AD. Si se compara el promedio de los tratamientos regados con los de secano la limitación hídrica provocó disminuciones del 42 % (Tabla 5), sin embargo, observando la misma diferencia en la FS de octubre, alcanzó el 52 %, coincidiendo con (Giménez, 2014a, 2014b).

En la FS de noviembre bajo riego, la situación fue diferente al secano. El riego suplementario, permitió al cultivo superar los umbrales de ENC y PC prácticamente en todo el ciclo, solo con valores inferiores en los primeros días del PC. Al comparar la FS de noviembre con la FS de octubre aproximadamente el 20 por ciento del PC para ambos se encontró por debajo del 60 % de AD, por lo que, la diferencia alcanzada en rendimiento no fue explicada por el agua. Las temperaturas menores (Tabla 6), durante el PC en comparación con las ocurridas en la FS de octubre, sumado a una duración más corta del PC, (Figura 2), acumulando menos grados día (Tabla 7). Y, por último, RS acumulada menor durante el PC, entre la FS de octubre y la de noviembre (Tabla 3) y las temperaturas excesivas durante el PC para la FS de noviembre, a nuestro entender son las condiciones que explican por qué la FS de noviembre regada no alcanzó los máximos valores de rendimiento alcanzados por la FS de octubre bajo riego (Tabla 4).

Figura 10

Evolución del porcentaje de agua disponible (%) para la FS de diciembre (FS 3) bajo riego y seco



Por último, en la Figura 10, se observa que la FS de diciembre, tanto para riego como para seco siguió la misma tendencia que la FS de noviembre. Las mayores diferencias, radican en un ciclo más corto para la FS de diciembre (Figura 2). Esto limitó el consumo de agua efectiva total, siendo mayor para la FS de noviembre la que consumió 583 mm y la FS de diciembre 388 mm. Este menor consumo de agua de la FS de diciembre debido a un ciclo más corto ocasionado por una inducción fotoperiódica contribuye al menor rendimiento logrado por esta FS (Tabla 4 y 6). Aunque los consumos de agua dependen de la demanda y del largo del ciclo, los resultados obtenidos se acercan a los planteados por Da Silva et al. (2022), Andriani (2016) y Curto et al. (2019).

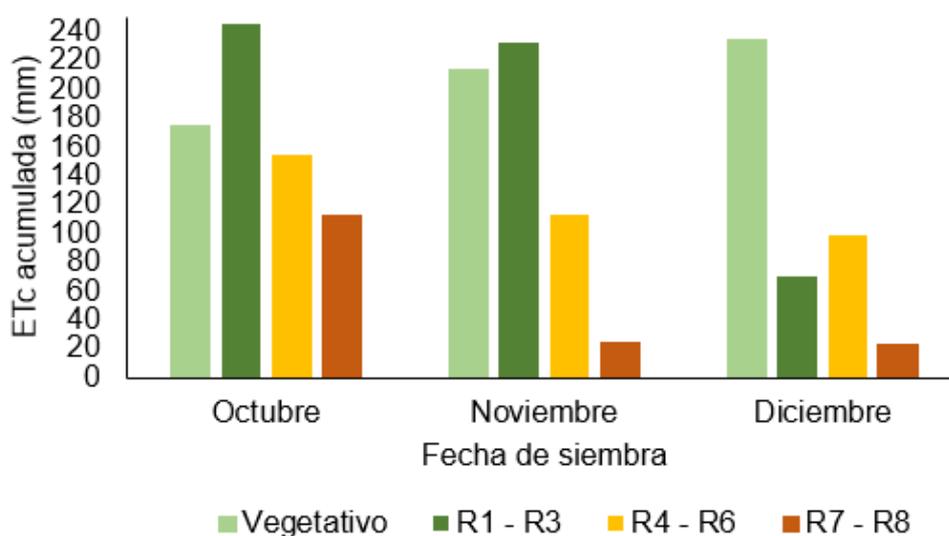
En conclusión, la FS de diciembre debido al menor largo de ciclo, mostró los valores de agua efectiva menor entre las distintas FS (Tabla 2). Además, de ello las diferencias se incrementan aún más debido a condiciones de temperatura y RS menores comparado con la FS de octubre y noviembre respectivamente. Siendo de todas maneras, la mayor limitante para la FS de diciembre la duración de las etapas reproductivas, que condicionaron su rendimiento final (Tabla 4).

4.1.4. Evapotranspiración del cultivo y evapotranspiración real

En la Figura 11, se presentan los valores de evapotranspiración del cultivo (ETc) acumulada durante las distintas etapas del ciclo del cultivo (VE-R1, R1-R3, R4-R6 y R7-R8), para las FS de octubre, noviembre y diciembre.

Figura 11

Evapotranspiración del cultivo (ETc) acumulada (mm) según etapa fenológica para las FS evaluadas: 10/10, 10/11 y 9/12



En la Figura 11, se puede observar que la FS de octubre logró el valor más alto de ETc acumulada en la etapa de R1-R3 con un total de 245 mm. A medida que se va aumentando el riego, aumenta la ETc debido a que existe mayor cantidad de agua disponible (Rajanna et al., 2022). De todas maneras, el cultivo fue demandando más agua mientras iba aumentando el área foliar, hasta llegar a un IAF crítico (Kantolic, 2008). Para el caso del periodo comprendido entre R4-R6, la FS de octubre mostró valores de ETc acumulados menores al periodo R1-R3, pero fue mayor que lo acumulado durante el mismo período para las otras FS. Esto se explica por una duración del PC mayor y una ETc diaria también superior a las otras FS evaluadas.

Mientras tanto, la FS de noviembre, tiene la mayor acumulación en el mismo período que la FS de octubre (R1-R3), acumulando 233 mm. Es importante destacar que la FS de noviembre durante la fase vegetativa alcanzó valores de

214 mm de ETc acumulada, explicado por la mayor duración de este período comparado con las otras FS y no por una ETc diaria mayor ya que la FS de diciembre superó ese valor en la etapa de VE-R1. Por otra parte, durante el PC la FS de noviembre acumuló una ETc inferior a la FS de octubre debido a una menor duración de la etapa y una ETc diaria promedio inferior. La disminución de la demanda atmosférica se explica por menores valores de RS incidente (Figura 7) (Andriani, 2000; Farías, 1995).

Para la FS de diciembre, los valores máximos acumulados fueron 235 mm durante el periodo vegetativo, comparado con las otras FS evaluadas fue la máxima ETc acumulada en esta etapa. Sin embargo, si comparamos el resto de los periodos la FS de diciembre fue la que obtuvo los valores más bajos. Durante los meses de diciembre y enero ocurrieron escasas precipitaciones (Figura 3), inferiores al promedio histórico (2002-2020), que expusieron al cultivo a mayores requerimientos de agua por riego (Bastidas et al., 2008). De todas maneras, la RS no superó al promedio histórico por lo que no puede concluirse que el principal factor que elevó la demanda atmosférica fue la RS, sino que también hay que tener en cuenta las altas temperaturas mayores a 32 °C (Figura 5).

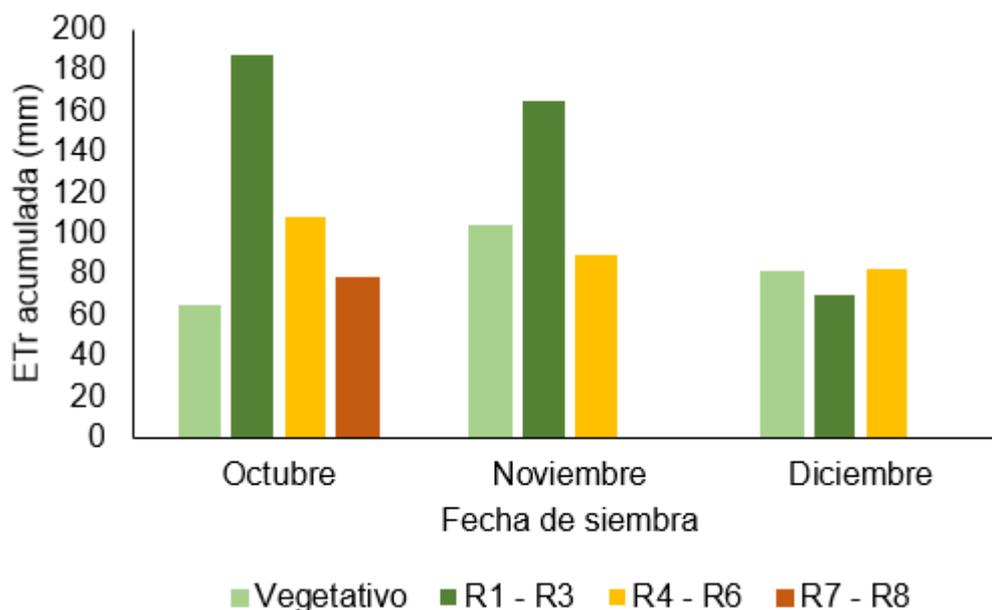
En conclusión, en la Figura 9, se observa que para las FS de octubre y de noviembre los valores máximos de ETc acumulada se ubicaron durante la etapa comprendida entre R1-R3, misma tendencia reportada por (Foster Aranda & Rovegno Arbiza, 2015).

En contraposición, la FS de diciembre acumuló su ETc máxima durante la etapa vegetativa debido al aumento de la demanda atmosférica por mayor RS y temperaturas. Se debe destacar que la duración de la fase vegetativa para la FS de diciembre fue un resultado en discordancia con lo esperado, discrepando con lo establecido por Fehr y Caviness (1977), Lyu et al. (2020) entre otros autores.

En resumen, la FS de octubre fue la que tuvo mayor ETc acumulada durante el ciclo, 614 mm, producto de valores diarios de ET mayores que se acumularon por más días debido a que el ciclo total del cultivo fue más largo (Figuras 2 y 11). En la Figura 12, se presenta la evapotranspiración real (ETr) acumulada estimada durante el ciclo de crecimiento en las FS de octubre, noviembre y diciembre para las etapas fenológicas: VE-R1, R1-R3, R4-R6 y R7-R8.

Figura 12

Evapotranspiración real (ETr) acumulada (mm) según etapa fenológica: vegetativo, floración (R1-R3), PC (R4-R6), madurez (R7-R8) para las FS evaluadas: 10 de octubre, 10 de noviembre y 9 de diciembre



En cuanto a la ETr (Figura 12), se observa una tendencia similar a la ETc para las FS de octubre y noviembre, con la principal diferencia que al ser insuficientes las precipitaciones para cubrir los requerimientos del cultivo los valores acumulados son inferiores. La ETr fue siempre menor a la ETc en situaciones de estrés, reafirmando lo planteado por Doorenbos y Kassam (1979) y validado por Giménez (2019). Al igual que lo observado en la Figura 11, el periodo entre R1-R3 sigue siendo el momento del ciclo en el cual la acumulación es mayor para las FS de octubre y noviembre, con un valor superior para la FS más temprana.

Los valores de ETr nunca alcanzaron los de ETc dejando en evidencia las condiciones del año, en el cual las precipitaciones efectivas nunca llegaron a cubrir los umbrales planteados para las ENC y PC en su totalidad. Esto repercutió en el rendimiento final, con diferencias claras entre los tratamientos bajo riego y seco (Tabla 4).

Es evidente, que al comparar las Figuras 11 y 12, observando los requerimientos de agua del cultivo representados por la ETc y los que realmente mostraron durante el ciclo de crecimiento (ETr), delata la eficiencia en el uso del agua (EUA)

por parte del cultivo. La EUA fue de aproximadamente $8,5 \text{ kg. mm}^{-1}$ (Capurro et al., 2017; Desclaux et al., 2000; Sawchik & Ceretta, 2005).

En conclusión, para las tres FS evaluadas cuando comparamos la ETc con la ETr las diferencias son relevantes, en algunos casos menores que en otros. En la FS de diciembre, sin tener en cuenta la etapa vegetativa, las diferencias fueron menores entre las ET acumuladas. Sin embargo, si observamos las FS de octubre y noviembre durante la etapa vegetativa, R1-R3 y R4-R6 la diferencia en mm fue muy marcada, explicado por las escasas precipitaciones durante el año agrícola que provocaron que en seco, prácticamente nunca haya alcanzado los umbrales planteados tanto para las ENC como para el PC.

De todas maneras, la FS de octubre, demostró tener una mayor EUA, transformando mm en kg de grano dentro de los márgenes planteados por los autores anteriormente mencionados. Sin alcanzar los rendimientos potenciales del cultivo (Tabla 4).

Importa comparar los resultados logrados con información nacional anterior. Al comparar la RS incidente acumulada en todo el ciclo para tres FS, durante el experimento de Paparcone y Silveira (2022), esta alcanzó valores significativamente superiores a los observados en la Tabla 3. Con un promedio general mayor a 3000 MJ. m^{-2} y con promedios diarios superiores a los promedios máximos históricos de $25 \text{ MJ.m}^{-2}. \text{d}^{-1}$, esto no sucedió en el experimento actual (Figura 6). En relación a la temperatura, la diferencia radicó en la suma térmica. Se obtuvieron valores superiores debido a un mayor largo del ciclo total para las tres FS evaluadas.

En resumen, el experimento actual se desarrolló con condiciones de RS incidente acumulada total menor y a su vez RS incidente diaria promedio inferior al promedio histórico (Figura 6 y 7). Las sumas térmicas acumuladas en todo el ciclo fueron inferiores a las indicadas por Paparcone y Silveira (2022) debido principalmente al significativo acortamiento de los ciclos (Figura 2). Un acortamiento de las etapas que seguramente esté explicado por condiciones de estrés térmico durante el desarrollo de las primeras etapas reproductivas (Figura 5).

Por último, fue un año agrícola con precipitaciones por debajo del promedio histórico (Figura 3), lo que no permitió al cultivo alcanzar mayores niveles de ETr.

La suma de estos factores, además de los anteriormente descritos, explican la diferencia en rendimientos (Tabla 4 y 6) comparado con trabajos nacionales anteriores.

4.1.5. Subcomponentes del rendimiento según fecha de siembra y disponibilidad hídrica

En la Tabla 9, se pueden observar los subcomponentes del rendimiento más importantes, para las distintas FS y disponibilidad hídrica evaluadas.

Tabla 9

Número de granos por planta (NG. pt^{-1}), número de vainas por planta (NV. pt^{-1}), número de granos por vaina (NG. $vainas^{-1}$), número de abortos de vainas por planta (NAV. pt^{-1}) según FS y disponibilidad hídrica

Fecha de siembra	NG. $planta^{-1}$	NV. $planta^{-1}$	NG. $vaina^{-1}$	NAV. $planta^{-1}$
Octubre	94 a	44 a	2,12	1,63
Noviembre	69 b	30 b	2,26	0,88
Diciembre	58 b	27 b	2,08	1,25
Disponibilidad hídrica	NG. $planta^{-1}$	NV. $planta^{-1}$	NG. $vaina^{-1}$	NAV. $planta^{-1}$
Riego	97 a	42 a	2,36 a	1,25
Secano	50 b	25 b	1,95 b	1,25

Nota. Valores con diferente letra dentro de la misma columna para cada variable difieren entre sí ($p < 0.05$, Tukey).

En la Tabla 9, se observa que la FS de octubre obtuvo un mayor NG. $planta^{-1}$ y un mayor NV. $planta^{-1}$, en comparación con las otras dos FS evaluadas. En la misma tendencia observada en la Tabla 4, la FS de octubre obtuvo los valores más altos de NG por unidad de superficie, explicado por un mayor NG y vainas por planta, estos resultados concuerdan con García et al. (2009). En relación a los valores alcanzados, según disponibilidad hídrica, para estos dos sub-componentes los tratamientos bajo riego obtuvieron valores superiores al secano. Se concluye, que al estar bajo bienestar hídrico el cultivo cubre sus requerimientos hídricos y permite mantener el crecimiento de sus sub-componentes del rendimiento.

Se puede observar que no se detectaron diferencias en el NG. $vaina$ para las diferentes FS (Tabla 9), aunque el valor alcanzado no llega a la frecuencia más alta de granos por vaina planteada por García et al. (2009) para los cultivares de

ciclo corto, de 3 a 4 granos por vainas. Sin embargo, se debe destacar que este componente tiene una fuerte influencia ambiental y genética. El factor ambiental queda demostrado al observar los distintos subcomponentes según disponibilidad hídrica, como era previsible los tratamientos bajo riego fueron los que obtuvieron los valores mayores en todos los sub-componentes del rendimiento estudiados.

Para analizar el NAV. planta⁻¹ es importante relacionarlo con el NV. planta⁻¹ ya que si se visualiza solo el primer subcomponente no existen diferencias significativas entre las distintas FS. Sin embargo, al observar el NV. planta⁻¹ la FS de octubre presenta los valores mayores en este componente por lo que la relación de NAV. planta⁻¹ según el NV. planta⁻¹ es menor, justificando entonces las mejores condiciones durante PC y R7-R8 para esta FS comparado con noviembre y diciembre. Los resultados afirman que la elección de la FS es un factor determinante del NV por m², al igual que fue reportado por Robinson et al. (2009). Si se realiza el mismo análisis para el estatus hídrico, si bien NAV. planta⁻¹ tiene el mismo resultado, debe ser tomada de la misma forma que para las FS pues NV. planta⁻¹ es el doble para riego que para secano.

4.1.6. Altura de planta, materia seca acumulada al inicio y al final del período crítico e índice de cosecha

En la Tabla 10, se presentan los resultados obtenidos en distintos estadios de la MS y altura de planta para las tres FS evaluadas, también se muestra el IC obtenido por cada una de ellas.

Tabla 10

Altura de planta (cm), MS acumulada en R1, R4 y R6 (kg. ha⁻¹), e IC (en porcentaje) según FS (octubre, noviembre y diciembre) y según disponibilidad hídrica (riego y seco)

Fecha de siembra	Altura (cm)	MS a R1(kg. ha ⁻¹)	MS a R4 (kg. ha ⁻¹)	MS a R6 (kg. ha ⁻¹)	IC (%)
Octubre	85 a	693 c	6486 a	10604 a	38 a
Noviembre	91 a	1780 b	6845 a	8019 ab	31 b
Diciembre	71 b	2174 a	6124 a	6651 b	40 a
Disponibilidad hídrica	Altura (cm)	MS a R1(kg. ha ⁻¹)	MS a R4 (kg. ha ⁻¹)	MS a R6 (kg. ha ⁻¹)	IC (%)
Riego	98 a	1757 a	8422 a	11203 a	41 a
Secano	67 b	1341 b	4547 b	5647 b	32 b

Nota. Valores con diferente letra dentro de la misma columna para cada variable difieren entre sí ($p < 0.05$, Tukey).

En relación a la FS y el efecto en la altura de planta, se puede visualizar en la Tabla 10, la menor altura obtenida en la FS de diciembre, mientras que en octubre y noviembre si bien difieren en 6 cm, la misma no fue significativa. Los resultados son coincidentes con Jiang y Egli (1995), donde a medida que se atrasó la FS se expuso al cultivo a un fotoperíodo más corto determinando una menor altura.

La MS acumulada a R1, sigue una tendencia de crecimiento desde la FS más temprana hacia la más tardía. Por otro lado, para la MS acumulada a R4 no presentó diferencias. Por último, en R6 ocurre lo opuesto de lo ocurrido a R1, es decir que los mayores valores de MS acumulada se logran en FS de octubre y disminuyen hacia FS de diciembre, inclusive con diferencias entre estas dos FS (Tabla 10). Estos resultados de MS, demuestran que las FS condicionan a las plantas a distintas temperaturas y fotoperíodos. A medida que se atrasa la FS se expone al cultivo a un fotoperíodo más corto determinando una menor producción de biomasa (Tabla 10) (Andrade, 1995; Baigorri, 2003; Cortés, 2015).

Por otro lado, relacionando los valores de RS incidente (Tabla 3 y Figura 7) y la temperatura media durante el periodo VE-R1 (Tabla 6), con los valores de MS a R1 para la FS de diciembre, se ve claramente el efecto que tuvieron estas variables. La temperatura controla la TCC a través de efectos directos sobre la asimilación de carbono y de efectos indirectos sobre la disponibilidad de agua y nutrientes (Kantolic, 2008). La FS de diciembre ubicó su fase vegetativa en condiciones de mayor RS y temperatura, lo que generó mayor biomasa que determinó mayor RS interceptada (Tabla 3 y 6). Sin embargo, dado el fotoperíodo

inductivo de diciembre la planta se induce antes determinando una menor altura, lo que determina que esta mayor producción de biomasa en esta etapa puede estar explicada por un mayor peso específico de las hojas, lo que contradice lo reportado por Cortés (2015).

En el sentido opuesto, la FS de octubre ubicó su fase vegetativa en condiciones de menor RS y temperatura, ocasionando menores niveles de MS a R1, lo que se ejemplifica claramente en una menor altura de planta (Tabla 10). No obstante, la FS de octubre superó en 2585 kg. ha^{-1} de MS a la FS de noviembre a R6 (Tabla 10). Este incremento de MS se explica por una mayor duración del período reproductivo para la FS de octubre (Figura 2).

En cuanto al IC, si bien la FS de diciembre logró los valores de MS mayores en etapas tempranas, en la totalidad de su ciclo terminó teniendo menores valores de MS comparado con la FS de octubre. Esto indica que, si bien la FS de diciembre logró menores valores de MS totales, esa menor cantidad se convierte con más eficiencia en grano, pero no implicó mejores rendimientos. Para el caso de la FS de noviembre el IC explica que a pesar de acumular mayor cantidad de MS a R6 (Tabla 11) que la FS de diciembre, debido a una mayor eficiencia por parte de la FS más tardía en la partición a grano, obtuvieron rendimientos similares (Tabla 4).

Por otro lado, este mayor IC en la FS de diciembre reflejó la mejor partición de asimilados, mantuvo igual MS a inicio del PC (Tabla 10) pero contó con menos fosas para particionar esa fuente igualitaria (Tabla 9), lo cual determinó un mayor PMG y el mayor IC. Este es uno de los motivos por el cual García et al. (2009) plantean la elección de cultivares en función de la FS, debido al efecto de las condiciones ambientales sobre el IC.

En la Tabla 11, se presentan los resultados obtenidos en distintos estadios de la MS para las tres FS evaluadas, se muestra el IC obtenido por cada una de ellas, discriminado según la interacción FS por disponibilidad hídrica. Este análisis tiene como objetivo evaluar además de la FS el efecto del riego en las variables estudiadas.

Tabla 11

Materia seca acumulada a R1, R4 y R6 (kg. ha⁻¹), e IC (en porcentaje) según fecha de siembra y disponibilidad hídrica

Tratamiento	Fecha de siembra	MS a R1 (kg. ha ⁻¹)	MS a R4 (kg. ha ⁻¹)	MS a R6 (kg. ha ⁻¹)	IC (%)
RIEGO	Octubre	809 cd	8173 b	13831 a	39 ab
	Noviembre	1941 ab	9927 a	11081 ab	36 ab
	Diciembre	2521 a	7168 b	8696 bc	46 a
SECANO	Octubre	577 d	4800 c	7378 bc	37 ab
	Noviembre	1619 bc	3763 c	4958 c	25 b
	Diciembre	1827 ab	5080 c	4605 c	34 ab

Nota. Valores con diferente letra dentro de la misma columna para cada variable difieren entre sí ($p < 0.05$, Tukey).

En lo que respecta a la MS a R4, a diferencia de lo que ocurrió en la MS a R1 hay una diferencia marcada entre los tratamientos de riego y secano, llegando en el caso más extremo a más del doble de producción de MS en la FS de noviembre. Estos resultados demuestran la plasticidad del cultivo en los estados vegetativos inclusive frente a condiciones contrastantes de bienestar hídrico y secano (Verón et al., 2011). Por otro lado, al tratarse de un cultivar de tipo indeterminado posiblemente se posicionó mejor frente al estrés ocasionado por los tratamientos de secano (Villasuso, 2015). De esta forma, se pudo acortar la brecha entre ambos tratamientos.

El estado de R4 marca el inicio del período más crítico en el desarrollo de la planta, en términos de rendimiento de grano (Verón et al., 2011), por lo que desde este punto de vista de la MS que se produjo a R4 en secano ya se había comprometido parte del rendimiento. En este escenario se estuvo frente a dos situaciones contrastantes, el agua afecta directamente sobre la eficiencia y captura de la radiación a través de la generación de biomasa (Tabla 11).

En los tratamientos regados, la FS de noviembre en el muestreo a R4 fue la que se destacó frente a las FS de octubre y diciembre las cuales no presentaron diferencias. Este resultado, en parte, es explicado por la mayor altura lograda por las plantas de la FS de noviembre (Tabla 10), la cual a su vez sigue el efecto de una mayor radiación acumulada hasta R3 para la FS de noviembre, 104 MJ.m⁻² adicionales en comparación con la FS de octubre y 403 MJ.m⁻² si se compara con la FS de diciembre (Tabla 3). En síntesis, la FS de noviembre permite ubicar el período desde emergencia hasta finales de floración en condiciones de RS mayor generando más biomasa hasta R4.

Por último, se detectaron diferencias entre riego y secano para igual FS en la MS acumulada a R6 (Tabla 11). En este punto, se alcanza la máxima acumulación de MS y comienza la distribución hacia los granos (Baigorri & Croatto, 2000). En este escenario, teniendo en cuenta la conformación del rendimiento, la FS de octubre con riego logró el mayor rendimiento por tener los mayores niveles de MS acumulada a R6 (Tabla 10).

En la Tabla 12, se presentan la altura, los nudos y las ramificaciones por planta para las distintas FS según su disponibilidad hídrica.

Tabla 12

Altura de planta (cm), Nudos y ramificaciones por planta a R4-R5 para las distintas fechas de siembra evaluadas según disponibilidad hídrica

Tratamiento	Fecha de siembra	Altura (cm)	Nudos. Planta	Ramificaciones. planta
RIEGO	Octubre	103 ab	15 b	2,75 ab
	Noviembre	111 a	17 a	4 a
	Diciembre	80 bc	14 b	1,5 b
SECANO	Octubre	68 c	12 cd	2,5 ab
	Noviembre	70 c	10 d	2 ab
	Diciembre	62 c	13 bc	2,25 ab

Nota. Valores con diferente letra dentro de la misma columna para cada variable difieren entre sí ($p < 0.05$, Tukey).

En la Tabla 12, se muestra que la FS de octubre y diciembre lograron la misma cantidad de nudos a pesar de existir una diferencia importante de 14 cm en altura. Las altas temperaturas ocurridas durante la FS de diciembre (Tabla 6) generaron menor largo de entrenudos pero mayor número de nudos por planta. A su vez, la FS de octubre regada logró más ramificaciones que la FS de diciembre, que en consecuencia dispusieron mayor biomasa la cual se observa en una diferencia numérica de 1005 kg. ha^{-1} de MS pero no detectada estadísticamente (Tabla 11). Cuando se atrasa la FS, los fotoperíodos cortos y las altas temperaturas determinan una menor producción de biomasa, explicados por menor altura y menores ramificaciones.

En lo que refiere a la altura de planta existió un claro efecto del riego sobre esta variable alcanzando mayor altura para los tratamientos con riego. A su vez, las mayores alturas de planta se alcanzaron en las FS de octubre y noviembre con riego con diferencias con la FS de diciembre regada. Sin embargo, para secano

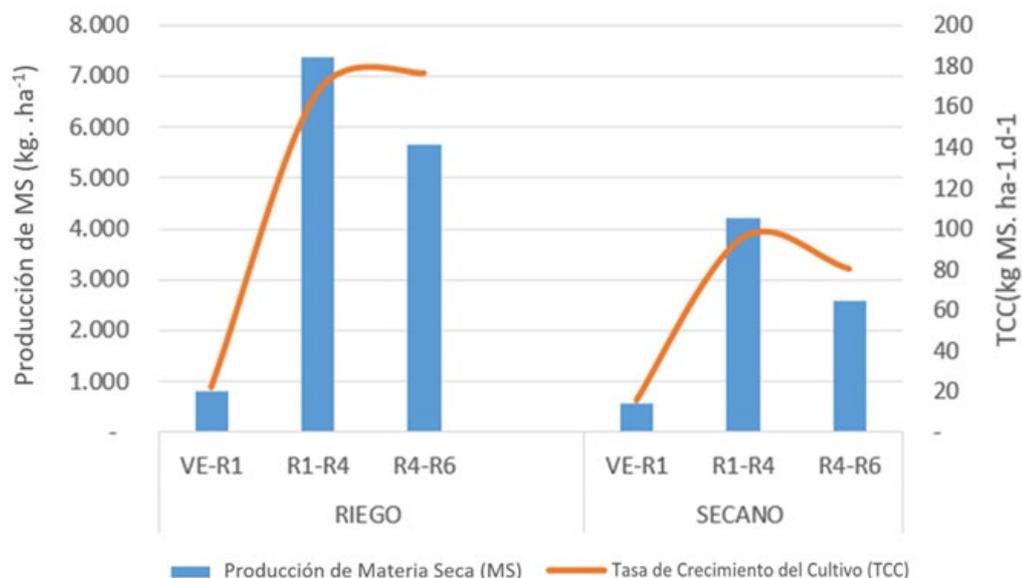
no existen diferencias en altura de planta entre las distintas FS. Para las FS de octubre y noviembre bajo riego los fotoperíodos largos no inductivos generaron que estas dos FS se comporten similar en cuanto a duración, posiblemente generó que no se detecten diferencias para la altura.

El subcomponente que se afectó a través de la altura es el número de nudos por planta, bajo bienestar hídrico la FS de noviembre a mayor altura logró mayor cantidad de nudos (Tabla 12). Sin embargo, se pudo constatar que debido a temperaturas elevadas durante el crecimiento (Tabla 6) la FS de diciembre logró con una menor altura, la misma cantidad de nudos que la FS octubre. Explicado por un menor largo de entrenudos (Allen et al., 2018).

En la Figura 13, se presentan los valores de MS durante los períodos VE-R1, R1-R4 y R4-R6, y su correspondiente TCC para la FS de octubre según disponibilidad hídrica.

Figura 13

MS (kg. ha⁻¹) y TCC promedio (kg MS. ha⁻¹.día⁻¹) medida en las etapas VE-R1, R1-R4 y R4-R6 para la FS de octubre



La Figura 13 deja en evidencia cómo a pesar de iniciar con valores similares de MS y TCC en el período vegetativo el riego permitió en etapas posteriores lograr mayores valores MS que determinaron niveles de TCC más elevados durante el periodo reproductivo. Especialmente en el transcurso del PC, alcanzando niveles

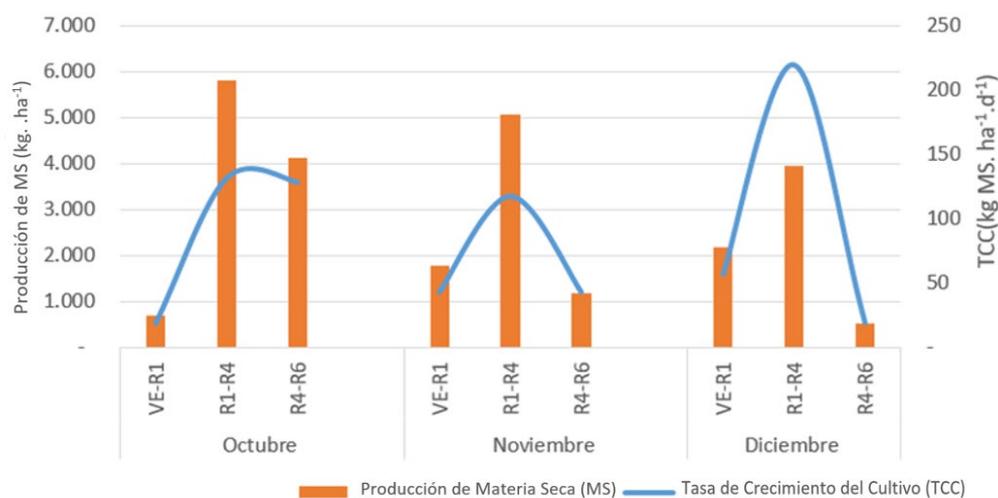
de 160 a 180 kg MS.ha⁻¹.d⁻¹, logrando mantener los niveles elevados durante este periodo. Valores similares de TCC fueron reportados por (Foster Aranda & Rovegno Arbiza, 2015), y Monzón et al. (2021).

En el sentido opuesto, secano logró valores inferiores de MS lo que generó una menor RS interceptada y en consecuencia rangos menores de TCC entre 80 y 100 kg MS.ha⁻¹.d⁻¹, teniendo en cuenta la correlación entre el NG y la TCC se repercutió en el rendimiento (Tabla 4 y 6) (Andrade, 1995).

En la Figura 14, se muestran los valores de MS durante los períodos VE-R1, R1-R4 y R4-R6, y su correspondiente TCC para las distintas FS evaluadas (octubre, noviembre y diciembre).

Figura 14

MS (kg. ha⁻¹) y TCC promedio (kg MS. ha⁻¹.día⁻¹) medida en las etapas VE-R1, R1-R4 y R4-R6 para cada FS evaluada (octubre, noviembre y diciembre)



En la Figura 14, se observa como la TCC presenta una distribución normal con un máximo para todos los casos en torno a R1-R4, este máximo varió dependiendo de la FS (Baigorri, 2003). Las mayores condiciones de radiación y temperatura a medida que se atrasó la FS (Tabla 3 y Figura 4) generaron que para el periodo VE-R1, la TCC y la MS presenten un orden creciente desde la FS más temprana hacia la más tardía.

Al momento de inicio de floración los valores de MS difieren entre FS (Tabla 10 y Figura 14), de igual forma la TCC, la cual presentó valores en torno a 200 kg

MS.ha⁻¹.d⁻¹ para la FS de diciembre y valores similares en torno a 120 kg MS.ha⁻¹.d⁻¹ para la FS de octubre y noviembre. Esto tiene su explicación en un valor de MS similar de la FS de diciembre con las otras FS, (Tabla 10) pero dado que diciembre presentó 25 días menos para el período R1-R4 (Figura 2) generó que su TCC alcance valores elevados similares a los reportados por Monzón et al. (2021). Este acortamiento de esta fase estuvo dado por el fotoperiodo inductivo durante esta fase para la FS de diciembre.

Para el periodo R4-R6, la FS de octubre logró mantener valores similares de TCC a los obtenidos en el periodo R1-R4, dejando en evidencia la importancia de la FS en la ubicación del PC. Esta FS permitió lograr los mayores valores de MS y la mayor TCC en el PC (Figura 14) lo que repercutió en la obtención del mayor rendimiento (Tabla 5), demostrando la posible respuesta correlativa entre la TCC y el NG en el PC afirmada por Jiang y Egli (1995). A su vez, observando los valores de MS, constituye el mayor valor de biomasa a particionar a fosas justificando de otra forma los resultados obtenidos.

En las FS de noviembre y diciembre, se constató que para el periodo R4-R6, la TCC se redujo drásticamente en comparación a los máximos que obtuvieron en el periodo R1-R4 demostrando nuevamente la importancia de la FS en la ubicación del PC y la consecuencia en el rendimiento generado. Cabe destacar que esta ubicación del PC en condiciones de mayor RS y temperatura (Tabla 3 y Figura 4) para la FS de octubre constituyen la sustitución de una estrategia productiva por la habitual defensiva que intenta evitar condiciones estresantes ocurridas en situaciones de sequía en los meses de diciembre y enero donde se constatan los mayores valores de ETc para nuestro país.

Es importante destacar, que el valor obtenido en la FS de octubre con riego de MS a R6 fue 2.329 kg MS.ha⁻¹.d⁻¹ por debajo de los valores logrados por Giménez (2014a). Los bajos resultados son coincidentes con los menores niveles de RS y temperatura ocurridos durante el año agrícola. En promedio, la RS y la temperatura, se ubicaron casi en su totalidad por debajo del promedio histórico, para el primer caso fue 2,7 MJ.m⁻².día⁻¹ inferior (Figura 6) y para la temperatura 0,7 °C inferior (Figura 4) lo cual repercutió en una menor TCC promedio durante los períodos vegetativos de 19 kg MS.ha⁻¹.d⁻¹ y durante los períodos reproductivos de 130 kg MS.ha⁻¹.d⁻¹. En el primer caso, generó una menor biomasa a R1 y en el segundo, dada la relación lineal entre la TCC y el NG durante el PC, los resultados

de rendimiento obtenidos son también 2712 kg por debajo de los rendimientos obtenidos por Papparcone y Silveira (2022) en condiciones experimentales similares a las realizadas en este ensayo.

5. CONCLUSIONES

La FS temprana de octubre fue la que obtuvo mayores rendimientos, rechazando la hipótesis biológica en condiciones de secano, pero no se rechaza la hipótesis biológica bajo condiciones de riego.

El adelantamiento de la FS a octubre incrementó el largo del ciclo total, aumentó la duración del PC y se adelantó su ocurrencia en el tiempo. Esto generó sumas térmicas mayores y RS acumulada incidente mayor. Este incremento en la RS y la suma térmica permitió un mayor rendimiento, especialmente por la ubicación durante etapas reproductivas con particular énfasis en el PC.

La FS de octubre aun acumulando menor volumen de MS a comienzos del ciclo se destacó frente a las demás FS debido a que llegó a R6 con la mayor acumulación de MS, por un mayor periodo reproductivo. Por otro lado, la FS de noviembre logró acumular mayor RS hasta R4 que se tradujo en un volumen de MS acumulada mayor a comienzos del PC, sin embargo, no se tradujo en un mayor rendimiento final.

En el PC, la FS de octubre logró mantener valores de TCC elevados en comparación con las demás FS lo que repercutió en un mayor NG reafirmando la importancia de dicho componente en la explicación del rendimiento.

Durante la etapa final del PC temperaturas superiores a 32 °C aceleraron el desarrollo provocando una similitud en la duración del PC entre FS de noviembre y diciembre. La FS de diciembre a pesar de generar la menor producción de MS a R6, logró transformarla de forma eficiente en grano, logrando el mayor PMG.

No se alcanzaron los rendimientos potenciales del cultivo debido a varios factores, existieron momentos dentro del PC en el cual el AD no alcanzó los umbrales de 60%, debido a una alta demanda atmosférica, los niveles de radiación durante el ensayo estuvieron por debajo del promedio histórico nacional repercutiendo en la generación de biomasa y en consecuencia en la posterior transformación en grano. Por otro lado, existieron días en los cuáles la elevada temperatura pudo haber provocado abortos de vainas afectando el rendimiento.

No existió interacción FS con disponibilidad hídrica, donde los tratamientos bajo riego siempre rindieron más que los de secano.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Allen, L. H., Zhang, L., Boote, K. J., & Hauser, B. A. (2018). Elevated temperature intensity, timing, and duration of exposure affect soybean internode elongation, mainstem node number, and pod number per plant. *The Crop Journal*, 6(2), 148-161. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2017.10.005>
- Andrade, F. H. (1995). Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. *Field Crops Research*, 41(1), 1-12. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(94\)00107-N](https://doi.org/10.1016/0378-4290(94)00107-N)
- Andrade, F. H., & Cirilo, A. G. (2000). Fecha de siembra y rendimiento de los cultivos. En F. H. Andrade & V. O. Sadras (Eds.), *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja* (pp. 135-153). INTA.
- Andriani, J. M. (2000). Consumo de agua de los cultivos en el Sur de Santa Fe. *Para Mejorar la Producción*, (13), 27-30.
- Andriani, J. M. (2016). Lo que hay que saber del "consumo de agua de los cultivos". *Para Mejorar la Producción*, (55), 99-108.
- Baigorri, H. E. J. (2003). Desarrollo y crecimiento de cultivares de soja en función de la fecha de siembra y su importancia en la recomendación de manejo. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Jornada Nacional de Soja* (pp. 101-113). http://www.inia.org.uy/publicaciones/documentos/ad/ad_325.pdf
- Baigorri, H. E. J. (2004). *Criterios para la elección y el manejo de cultivares de soja*. INTA. http://agro.unc.edu.ar/~ceryol/documentos/soja/Eleccion_cultivares.pdf
- Baigorri, H. E. J., & Croatto, D. R. (2000). *Manejo del cultivo de la soja en Argentina*. INTA.
- Baker, J. T., Allen Jr., L. H., Boote, K. J., Jones, P., & Jones, J. W. (1989). Response of soybean to air temperature and carbon dioxide concentration. *Crop Science*, 29(1), 98-105. <https://doi.org/10.2135/cropsci1989.0011183X002900010024x>

- Barraza, F. V., Fischer, G., & Cardona, C. E. (2004). Estudio del proceso del crecimiento del cultivo del Tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) en el Valle del Sinú medio, Colombia. *Agronomía Colombiana*, 22(1), 81-90.
- Bastidas, A. M., Setiyono, T. D., Dobermann, A., Cassman, K. G., Elmore, R. W., Graef, G. L., & Specht, J. E. (2008). Soybean sowing date: The vegetative, reproductive, and agronomic impacts. *Crop Science*, 48(2), 727-740. <https://doi.org/10.2135/cropsci2006.05.0292>
- Bunce, J. A., & Ziska, L. H. (1996). Responses of respiration to increases in carbon dioxide concentration and temperature in three soybean cultivars. *Annals of Botany*, 77(5), 507-514. <https://doi.org/10.1006/anbo.1996.0061>
- Canfalone, A., Villacampa, Y., Cortés, M., & Navarro, M. (2002). Crecimiento de soja en función de la temperatura del aire y de la radiación fotosintéticamente activa. *Revista Brasileira de Agrociência*, 8(3), 185-189.
- Capurro, M. C., Beretta, A., García, C., Sawchik, J., & Puppo, L. (2017). Rendimiento de la soja en respuesta a distintas dosis y momentos de riego. *Agrociencia (Uruguay)*, 21(2), 65-76.
- Cárcova, J., Abeledo, L., & López Pereira, M. (2003). Análisis de la generación del rendimiento: Crecimiento, partición y componentes. En E. H. Satorre, R. L. Benech, G. A. Slafer, E. B. de la Fuente, D. J. Miralles, & M. E. Otegui (Eds.), *Producción de granos: Bases funcionales para su manejo* (pp. 75-98). FAUBA.
- Castaño, J. P., Giménez, A., Ceroni, M., Furest, J., & Aunchayna, R. (2011). *Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009*. INIA. <http://www.inia.uy/Documentos/Privados/GRAS/Caracterizacion-agroclimatica/carac-agro-2010.pdf>
- Ceretta, S., & Vilaró, D. (2003). Comportamiento de sojas de distinto grupo de madurez en Uruguay. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Jornada Nacional de Soja* (pp. 115-122). http://www.inia.org.uy/publicaciones/documentos/ad/ad_325.pdf

- Chacón Iznaga, A., Cardoso Romero, S., Barreda Valdés, A., Colás Sánchez, A., Alemán Pérez, R., & Rodríguez Valdés, G. (2011). Acumulación de materia seca, rendimiento biológico, económico e índice de cosecha de dos cultivares de soja [*Glycine max* (L.) Merr.] en diferentes espaciamientos entre surcos. *Centro Agrícola*, 38(2), 5-10.
- Cortelezzi, Á. (2021). Situación y perspectivas de las cadenas agroindustriales 2021-2022. En *Anuario OPYPA 2021* (pp. 15-30). MGAP.
- Cortés, E. J. (2015). *Desarrollo de estrategias de siembra del cultivo de soja [Glycine max (L.) Merr] en el departamento San Justo, Córdoba, Argentina* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Córdoba]. Repositorio digital UNC. <https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/2530>
- Curto, L., Covi, M., & Gassmann, M. I. (2019). Actual evapotranspiration and the pattern of soil water extraction of a soybean (*Glycine max*) crop. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo*, 51(2), 125-141. <https://revistas.uncu.edu.ar/ojs3/index.php/RFCA/article/view/2615>
- Da Silva, E. H. F. M., Hoogenboom, G., Boote, K. J., Gonçalves, A. O., & Marin, F. R. (2022). Predicting soybean evapotranspiration and crop water productivity for a tropical environment using the CSM-CROPGRO-Soybean model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 323, Artículo e109075. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109075>
- Damiano, F., & Taboada, M. (2000). Predicción del agua disponible usando funciones de pedotransferencia en suelos agrícolas de la región pampeana. *Ciencia del Suelo*, 18(2), 77-88.
- Dardanelli, J., Collino, D., Otegui, M. E., & Sadras, V. O. (2003). Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de granos. En E. H. Satorre, R. L. Benech, G. A. Slafer, E. B. de la Fuente, D. J. Miralles, & M. E. Otegui (Eds.), *Producción de cultivos de granos: Bases funcionales para su manejo* (pp. 375-442). UBA.
- Della Maggiora, A. I., Gardiol, J. M., & Irigoyen, A. I. (2000). Requerimientos hídricos. En F. H. Andrade & V. O. Sadras (Eds.), *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja* (pp. 155-171). INTA.

- Desclaux, D., Huynh, T. T., & Roumet, P. (2000). Identification of soybean plant characteristics that indicate the timing of drought stress. *Crop Science*, 40(3), 716-722. <https://doi.org/10.2135/cropsci2000.403716x>
- Doorenbos, J., & Kassam, A. (1979). *Yield response to water*. FAO.
- Egli, D. B. (1993). Cultivar maturity and potential yield of soybean. *Field Crops Research*, 32(1-2), 147-158. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(93\)90027-K](https://doi.org/10.1016/0378-4290(93)90027-K)
- Egli, D. B., & Bruening, W. P. (2001). Source-sink relationships, seed sucrose levels and seed growth rates in soybean. *Annals of Botany*, 88(2), 235-242. <https://doi.org/10.1006/anbo.2001.1449>
- Egli, D. B., & Bruening, W. P. (2006). Temporal profiles of pod production and pod set in soybean. *European Journal of Agronomy*, 24(1), 11-18. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2005.04.006>
- Farías, J. R. B. (1995). Requisitos climáticos. En H. C. Minor (Ed.), *El cultivo de la soja en los trópicos: Mejoramiento y producción* (pp. 13-17). FAO.
- Farías, J. R. B., Nepomuceno, A. L., & Neumaier, N. (2007). *Ecofisiología da soja*. EMBRAPA.
- Fassio, A., Pérez, O., Ibáñez, W., Ceretta, S., Rabaza, C., & Vergara, G. (2017). Soja: Adaptación de ciclos de madurez a diferentes épocas de siembra bajo condiciones de riego. *Revista INIA*, (48), 28-33.
- Fassio, A., Pérez, O., Ibáñez, W., Rabaza, C., Vergara, G., Sawchik, J., Schusselin, M., & Silva, L. (2016). Soja: Rendimiento con y sin riego a diferentes poblaciones de siembra. *Revista INIA*, (47), 22-26.
- Fehr, W. R., & Caviness, C. E. (1977). *Stages of soybean development*. Iowa State University. <https://dr.lib.iastate.edu/entities/publication/58c89bfe-844d-42b6-8b6c-2c6082595ba3>
- Feng, Y. Y., Richards, R. A., Jin, Y., Siddique, K. H. M., Li, F. M., & He, J. (2022). Yield and water-use related traits in landrace and new soybean cultivars in arid and semi-arid areas of China. *Field Crops Research*, 283, Artículo e108559. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108559>

- Foster Aranda, P. E., & Rovegno Arbiza, F. C. (2015). *Efectos de diferentes disponibilidades hídricas en distintas etapas fisiológicas de soja sobre el rendimiento* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.
- García, F. O., Ciampitti, I. A., & Baigorri, H. E. J. (Eds.). (2009). *Manual de manejo del cultivo de soja*. IPNI.
- García Petillo, M. (2012). Conceptos básicos para el diseño y el manejo del riego. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Riego en cultivos y pasturas: 2do Seminario Internacional, Salto, Uruguay, 2012* (pp. 25-32).
<http://inia.uy/en/Publicaciones/Documentos%20compartidos/18429080413094411.pdf>
- Gaso, D., Morales, X., Calistro, R., Capurro, M. C., Silva, L., Schusselin, M., & Sawchik, J. (2015). Potenciales de rendimiento de grupos de madurez contrastantes en diferentes épocas de siembra y ambientes. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Día de Campo "Manejo en Cultivos de Verano"* (pp. 11-18).
- Gerster, G., Bacigaluppo, S. (2009). Cómo alcanzar altos rendimientos en soja. *Para Mejorar la Producción*, (42), 63-67.
- Giménez, A., Castaño, J. P., Olivera, L., & Baethgen, W. (2004). Algunas consideraciones sobre el clima, la producción agropecuaria y la toma de decisiones. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Jornada Técnica de Cultivos de Verano* (pp. 1-9).
<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/396/1/112761060612161741.pdf>
- Giménez, L. (2007). Comportamiento fenológico de diferentes grupos de madurez de soja (*Glicine max*) en Uruguay: Ubicación temporal del período crítico. *Agrociencia (Uruguay)*, 11(2), 1-9.
<https://doi.org/10.31285/AGRO.11.751>
- Giménez, L. (2014a). Efecto de las deficiencias hídricas en diferentes etapas de desarrollo sobre el rendimiento de soja. *Agrociencia (Uruguay)*, 18(1), 53-64. <https://doi.org/10.31285/AGRO.18.439>

- Giménez, L. (2014b). Qué sabemos del riego de cultivos en Uruguay y qué falta por investigar. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas* (pp. 22-34).
- Giménez, L. (2017a). *Deficiencias hídricas en distintas etapas fenológicas de maíz y soja y evaluación del modelo Aquacrop* [Disertación doctoral]. Universidad de la República.
- Giménez, L. (2017b). Respuesta del maíz y la soja a diferentes disponibilidades hídricas en distintas etapas de desarrollo. *Agrociencia (Uruguay)*, 21(2), 77-90. <https://doi.org/10.31285/AGRO.21.2.10>
- Giménez, L. (2019). Rendimientos de maíz y soja: Un desafío que provoca... La información experimental y la producción comercial. *Cangüé*, (41), 7-12.
- Giménez, L., & García Petillo, M. (2011). Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*, 15(2), 100-108. <https://doi.org/10.31285/AGRO.15.598>
- Githiri, S. M., Watanabe, S., Harada, K., & Takahashi, R. (2006). QTL analysis of flooding tolerance in soybean at an early vegetative growth stage. *Plant Breeding*, 125(6), 613-618. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.2006.01291.x>
- Grimm, S. S., Jones, J. W., Boote, K. J., & Herzog, D. C. (1994). Modeling the occurrence of reproductive stages after flowering for four soybean cultivars. *Agronomy Journal*, 86(1), 31-38. <https://doi.org/10.2134/agronj1994.00021962008600010007x>
- Guiamet, J. J., & Nakayama, F. (1984). The effects of long days upon reproductive growth in soybeans (*Glycine max* (L.) Merr.) cv. Williams. *Japanese Journal of Crop Science*, 53(1), 35-40. <https://doi.org/10.1626/jcs.53.35>
- Han, T., Wu, C., Tong, Z., Mentreddy, R. S., Tan, K., & Gai, J. (2006). Postflowering photoperiod regulates vegetative growth and reproductive development of soybean. *Environmental and Experimental Botany*, 55(1-2), 120-129. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2004.10.006>

- Hayashi, R. M., & Dogliotti, S. (2021). Deficit irrigation in soybeans, the effect on grain yield and water productivity in temperate climates. *Agrociencia Uruguay*, 25(2), Artículo e500. <https://doi.org/10.31285/AGRO.25.500>
- Heatherly, L. G., & Elmore, R. W. (2004). Managing inputs for peak production. En H. R. Boerma & J. E. Specht (Eds.), *Soybeans: Improvement production and uses* (3rd ed., pp. 451-536). American Society of Agronomy; Crop Science Society of America; Soil Science Society of America.
- Heinemann, A. B., Maia, A. de H. N., Dourado-Neto, D., Ingram, K. T., & Hoogenboom, G. (2006). Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) growth and development response to CO₂ enrichment under different temperature regimes. *European Journal of Agronomy*, 24(1), 52-61. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2005.04.005>
- Hesketh, J. D., Myhre, D. L., & Willey, C. R. (1973). Temperature control of time intervals between vegetative and reproductive events in soybeans. *Crop Science*, 13(2), 250-254. <https://doi.org/10.2135/cropsci1973.0011183X001300020030x>
- Jiang, H., & Egli, D. B. (1995). Soybean seed number and crop growth rate during flowering. *Agronomy Journal*, 87(2), 264-267. <https://doi.org/10.2134/agronj1995.00021962008700020020x>
- Kantolic, A. G. (2008). Control ambiental y genético de la fenología del cultivo de soja: Impactos sobre el rendimiento y la adaptación de genotipos. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 28(1), 63-88.
- Kantolic, A. G. (2013). *Ecofisiología del cultivo de soja: Bases para el manejo y para el aumento del rendimiento potencial*. FCA-UNC.
- Kantolic, A. G., Giménez, P. I., & De la Fuente, E. B. (2003). Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en soja. En E. H. Satorre, R. L. Benech, G. A. Slafer, E. B. de la Fuente, D. J. Miralles, M. E. Otegui, & R. Savin (Eds.), *Producción de granos: Bases funcionales para su manejo* (pp. 167-186). FAUBA.

- Kantolic, A. G., & Slafer, G. A. (2003). Número de granos en soja y la sensibilidad al fotoperíodo en etapas reproductivas. En E. H. Satorre, R. L. Benech, G. A. Slafer, E. B. de la Fuente, D. J. Miralles, M. E. Otegui, & R. Savin (Eds.), *Producción de granos: Bases funcionales para su manejo* (pp. 186-187). FAUBA.
- Kantolic, A. G., & Slafer, G. A. (2007). Development and seed number in indeterminate soybean as affected by timing and duration of exposure to long photoperiods after flowering. *Annals of Botany*, 99(5), 925-933.
<https://doi.org/10.1093/aob/mcm033>
- Kelly, S. J., Cano, M. G., Fanello, D. D., Tambussi, E. A., & Guiamet, J. J. (2021). Extended photoperiods after flowering increase the rate of dry matter production and nitrogen assimilation in mid maturing soybean cultivars. *Field Crops Research*, 265, Artículo e108104.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108104>
- Kumudini, S. (2002). Trials and tribulations: A review of the role of assimilate supply in soybean genetic yield improvement. *Field Crops Research*, 75(2-3), 211-222. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(02\)00027-8](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(02)00027-8)
- Larrama Udaquiola, J. M. (2019). *Efecto de la fecha de siembra, el grupo de madurez y la interacción sobre el rendimiento de soja* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.
- Liu, X. B., & Herbert, S. J. (2000). Some aspects of yield physiology research in soybean. *Journal of Northeast Agricultural University*, 7(1), 71-78.
- Lyu, J., Cai, Z., Li, Y., Suo, H., Yi, R., Zhang, S., & Nian, H. (2020). The floral repressor GmFLC-like is involved in regulating flowering time mediated by low temperature in soybean. *International journal of molecular sciences*, 21(4), Artículo e1322. <https://doi.org/10.3390/ijms21041322>
- Madias, A., Di Mauro, G., Vitantonio-Mazzini, L. N., Gambin, B. L., & Borrás, L. (2021). Environment quality, sowing date, and genotype determine soybean yields in the Argentinean Gran Chaco. *European Journal of Agronomy*, 123, Artículo e126217.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126217>

- Manlla, A., Castellarín, J., & Salvagiotti, F. (2012). Rendimiento potencial de trigo y brechas de producción según genotipo y fecha de siembra: Análisis de dos años de experiencias en Oliveros (Santa Fe). *Para Mejorar la Producción*, (47), 13-17.
- Manlla, A., & Salvagiotti, F. (2011). Explorando brechas de producción y rendimiento potencial en soja: Oferta de recursos y máximos rendimientos alcanzables en condiciones de campo. *Para Mejorar la Producción*, (46), 61-66.
- Martignone, R., Enrico, J. M., Bodrero, M., & Andriani, J. M. (2010). Factores asociados con la variabilidad de rendimientos entre grupos de madurez en soja. *Manejo Para la Producción*, (45), 25-34.
- Martínez Álvarez, D. L., Baigorri, H., Bologna, S., Bongiovanni, M., Amitrano, V., & Escudero, S. (2001). Crecimiento de cultivares de soja de gm iii al vii en fechas de siembra de octubre a diciembre, en villa mercedes, campañas agrícolas 1998/99 y 1999/00. En *Avances en la Producción Vegetal del NOA (1998-2001)* (pp. 339-346). UNT.
- Medina Lasaga, M. L., & Pereira Portela, I. (2018). *Potencial de rendimiento de un amplio rango de grupos de madurez de soja en diferentes condiciones ambientales del Uruguay* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.
- Meehl, G. A., & Tebaldi, C. (2004). More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science*, 305(5686), 994-997. <https://doi.org/10.1126/science.1098704>
- Melgar, R., Vitti, G., & De Melo Benites, V. (2011). *Fertilizando para altos rendimientos: Soja en Latinoamérica*. Instituto Internacional de la Potasa.
- Miralles, D. J., Windauer, L. B., & Gómez, N. V. (2003). Factores que regulan el desarrollo de los cultivos de grano. En E. H. Satorre, R. L. Benech, G. A. Slafer, E. B. de la Fuente, D. J. Miralles, M. E. Otegui, & R. Savin (Eds.), *Producción de granos: Bases funcionales para su manejo* (pp. 59-70). FAUBA.

- Monzón, J. P., Cafaro La Menza, N., Cerrudo, A., Canepa, M., Rattalino Edreira, J. I., Specht, J., Andrade, F. H., & Grassini, P. (2021). Critical period for seed number determination in soybean as determined by crop growth rate, duration, and dry matter accumulation. *Field Crops Research*, 261, Artículo e108016. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.108016>
- Mousa, M. A. A., & Qurashi, A. D. A. (2017). Growth and yield of cowpea (*Vigna unguiculata* L.) cultivars under water deficit at different growth stages. *Legume Research*, 41(5), 702-709.
- Muchow, R. C., Robertson, M. J., & Pengelly, B. C. (1993). Radiation-use efficiency of soybean, mugbean and cowpea under different environmental conditions. *Field Crops Research*, 32(1-2), 1-16. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(93\)90017-H](https://doi.org/10.1016/0378-4290(93)90017-H)
- Nico, M., Miralles, D. J., & Kantolic, A. G. (2015). Post-flowering photoperiod and radiation interaction in soybean yield determination: Direct and indirect photoperiodic effects. *Field Crops Research*, 176, 45-55. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.02.018>
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2021). *Encuesta agrícola "invierno 2021"*. MGAP. https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2021-10/PUBLICACION_INV_2021.pdf
- Otegui, M. E. (2009). Bases ecofisiológicas para el manejo del agua en cultivos para grano conducidos en secano. *Informaciones Agronómicas*, (44), 16-20.
- Paparcone, S., & Silveira, F. (2022). *Efecto de la fecha de siembra y disponibilidad hídrica sobre el rendimiento del cultivo de soja* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.
- Pedersen, P., & De Bruin, J. (2009). Soybean planting date and growth and development study. *Farm Progress Reports*, 2007(1), 6-7.

- Pereira-Flores, M. E., Justino, F., Ruiz-Vera, U. M., Stordal, F., Martins Melo, A. A., & De Ávila Rodríguez, R. (2016). Response of soybean yield components and allocation of dry matter to increased temperature and CO₂ concentration. *Australian Journal of Crop Science*, 10(6), 808-818. <https://doi.org/10.21475/ajcs.2016.10.06.p7310>
- Peters, D. B., & Johnson, L. C. (1960). Soil moisture use by soybeans. *Agronomy Journal*, 52(12), 687-689. <https://doi.org/10.2134/agronj1960.00021962005200120005x>
- Poorter, H. (1989). Interspecific variation in relative growth rate: On ecological causes and physiological consequences. En H. Lambers, M. L. Cambridge, H. Konings, & T. L. Pons (Eds.), *Causes and consequences of variation in growth rate and productivity of higher plants* (pp. 45-68). SPB Academic Publishing.
- Puteh, A. B., ThuZar, M., Mondal, M. M. A., Abdullah, N. A. P. B., & Halim, M. R. A. (2013). Soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] seed yield response to high temperature stress during reproductive growth stages. *Australian Journal of Crop Science*, 7(10), 1472-1479.
- Rajanna, G., Dass, A., Suman, A., Babu, S., Venkatesh, P., Singh, V., Upadhyay, P. K., & Sudhishri, S. (2022). Co-implementation of tillage, irrigation, and fertilizers in soybean: Impact on crop productivity, soil moisture, and soil microbial dynamics. *Field Crops Research*, 288, Artículo e108672. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108672>
- Robinson, A. P., Conley, S. P., Volenec, J. J., & Santini, J. B. (2009). Analysis of high yielding, early-planted soybean in Indiana. *Agronomy Journal*, 101(1), 131-139. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0014x>
- Roján-Herrera, O., Maqueira-López, L. A., & Torres-de la Noval, W. (2019). Variabilidad del rendimiento en cultivares de soya (*Glycine max* L.): Parte I. Época de frío. *Cultivos Tropicales*, 40(1), Artículo e08. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0258-59362019000100008&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Rovegno Arbiza, F. C. (2021). *Estudio de estrategias de manejo del riego en maíz y soja* [Tesis de maestría]. Universidad de la República.

- Salvagiotti, F. (2009). Manejo de soja de alta producción. *Para Mejorar la Producción*, (42), 57-62.
- Sawchik, J., & Ceretta, S. (2005). Consumo de agua por sojas de distintos grupos de madurez en diferentes ambientes de producción (CALMER-AUSID-INIA). En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Jornada Técnica de Cultivos de Verano* (pp. 41-51).
- Schoving, C., Champolivier, L., Maury, P., & Debaeke, P. (2022). Combining multi-environmental trials and crop simulation to understand soybean response to early sowings under contrasting water conditions. *European Journal of Agronomy*, 133, Artículo e126439.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126439>
- Sebben, G., Masoller, H., & Arana, S. (2019). Riego: "La tecnología de mayor impacto en la producción agrícola". *Cangüé*, (42), 13-18.
- Seddigh, M., & Jolliff, G. D. (1984). Night temperature effects on morphology, phenology, yield and yield components of indeterminate field-grown soybean. *Agronomy Journal*, 76(5), 824-828.
<https://doi.org/10.2134/agronj1984.00021962007600050026x>
- Seibane, H. D. (2005). *Efectos de la fecha de siembra y la disponibilidad hídrica sobre el desarrollo y crecimiento de cultivares de soja de diferentes grupos de madurez, en Villa Mercedes (San Luis)* [Trabajo final de grado]. Universidad Nacional de San Luis.
- Setiyono, T. D., Weiss, A., Specht, J., Bastidas, A. M., Cassman, K. G., & Dobermann, A. (2007). Understanding and modeling the effect of temperature and daylength on soybean phenology under high-yield conditions. *Field Crops Research*, 100(2-3), 257-271.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.07.011>
- Shibles, R. M., & Weber, C. R. (1965). Leaf area, solar radiation interception and dry matter production by soybeans. *Crop Science*, 5(6), 575-577.
<https://doi.org/10.2135/cropsci1965.0011183X000500060027x>
- Sinclair, T. R., & Muchow, R. C. (1999). Radiation use efficiency. *Advances in Agronomy*, 65, 215-265. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60914-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60914-1)

- Sionit, N., Strain, B. R., & Flint, E. P. (1987). Interaction of temperature and CO₂ enrichment on soybean: Growth and dry matter partitioning. *Canadian Journal of Plant Science*, 67(1), 59-67. <https://doi.org/10.4141/cjps87-007>
- Specht, J. E., Hume, D. J., & Kumudini, S. V. (1999). Soybean yield potential—a genetic and physiological perspective. *Crop Science*, 39(6), 1560-1570. <https://doi.org/10.2135/cropsci1999.3961560x>
- Toledo, R. E. (s.f.). *Soja: Su ecofisiología y Manejo*. FCA-UNC. <https://docplayer.es/docview/76/73441708/#file=/storage/76/73441708/73441708.pdf>
- Toledo, R. E. (2018). *Ecofisiología, rendimiento y calidad de soja*. FCA-UNC.
- Van Ittersum, M. K., Cassman, K. G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P., & Hochman, Z. (2013). Yield gap analysis with local to global relevance. *Field Crops Research*, 143, 4-17. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>
- Van Roekel, R. J., & Purcell, L. C. (2014). Soybean biomass and nitrogen accumulation rates and radiation use efficiency in a maximum yield environment. *Crop Science*, 54(3), 1189-1196. <https://doi.org/10.2135/cropsci2013.08.0546>
- Van Schaik, P. H., & Probst, A. H. (1958). Effects of some environmental factors on flower production and reproductive efficiency in soybeans. *Agronomy Journal*, 50(4), 192-197. <https://doi.org/10.2134/agronj1958.00021962005000040007x>
- Verón, C., Marcolini, S., Goytia, M., Mancini, C., Radi, D., Viñuela, J., & Zuliani, S. (2011, 29-30 de noviembre). *Análisis de los ciclos biológicos de los cultivos de soja y maíz desde diferentes perspectivas* [Contribución]. Decimosextas Jornadas "Investigaciones en la Facultad" de Ciencias Económicas y Estadística, Rosario. https://rehip.unr.edu.ar/bitstream/handle/2133/8335/Veron%2CMarcolini%2CGoytia%20y%20otros_analisis%20de%20los%20ciclos_soja.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Vicente, C. (2020). *Atrasar la siembra y modificar la distancia entre hileras: ¿Cómo impacta en el rinde de soja?* [Trabajo final de grado]. Universidad Nacional de La Plata.

- Villasuso, E. (2015). *Estrategias de crecimiento y generación del rendimiento potencial en ocho genotipos de soja (Glycine max (L.) Merr) que difieren en su grupo de madurez* [Trabajo final de grado]. Universidad Nacional de Villa María.
- Vogel, J. T., Liu, W., Olhoft, P., Crafts-Brandner, S. J., Pennycooke, J. C., & Christiansen, N. (2021). Soybean yield formation physiology – A Foundation for precision breeding based improvement. *Frontiers in Plant Science*, 12, Artículo e719706.
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2021.719706>
- Wang, Z., Reddy, V. R., & Quebedeaux, B. (1997). Growth and photosynthetic responses of soybean to short-term cold temperature. *Environmental and Experimental Botany*, 37(1), 13-24. [https://doi.org/10.1016/S0098-8472\(96\)01033-7](https://doi.org/10.1016/S0098-8472(96)01033-7)
- Wani, S. P., Heng, L. K., & Vajja, N. R. (2012). Soybean. En P. Steduto, C. H. Theodore, E. Fereres, & D. Raes (Eds.), *Crop yield response to water* (pp. 124-131). FAO.
- Washburn, C. F., & Thomas, J. F. (2000). Reversion of flowering in Glycine Max (Fabaceae). *American Journal of Botany*, 87(10), 1425-1438.
<https://doi.org/10.2307/2656869>
- Wilkerson, G. G., Jones, J. W., Boote, K. J., & Buol, G. S. (1989). Photoperiodically sensitive interval in time to flower of soybean. *Crop Science*, 29(3), 721-726.
<https://doi.org/10.2135/cropsci1989.0011183X002900030037x>
- Zhang, L., Zhu, L., Yu, M., & Zhong, M. (2016). Warming decreases photosynthates and yield of soybean [Glycine max (L.) Merrill] in the North China Plain. *The Crop Journal*, 4(2), 139-146.
<https://doi.org/10.1016/j.cj.2015.12.003>

7. ANEXO

Figura A1

Distribución de los componentes del rendimiento según fecha de siembra y disponibilidad hídrica

