

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**EFFECTOS DE LA FECHA DE SIEMBRA SOBRE EL RENDIMIENTO DE
SOJA EN CONDICIONES DE RIEGO Y SECAÑO**

por

Lucas José LAFLUF HEGUABURU

Nicolás LEGUISAMO ABU ARAB

Facundo MUIÑOS CORREA

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

MONTEVIDEO

URUGUAY

2023

PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Director:

Ing. Agr. (MSc.) (Dr.) Luis Giménez

Tribunal:

Ing. Agr. Dr. Luis Giménez

Ing. Agr. MSc. Federico Rovegno

Ing. Agr. MSc. Mauricio Bustamante

Fecha:

30 de noviembre de 2023

Estudiantes:

Lucas José Lafluf Heguaburu

Nicolás Leguisamo Abu Arab

Facundo Muiños Correa

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a la gente que nos acompañó durante toda la carrera, principalmente a la familia y los amigos que son parte fundamental de esto. A Luis, por guiarnos en la elaboración del trabajo final de grado, a Fede y Richard por la ayuda en la parte práctica del ensayo y, por último, al personal de biblioteca por la ayuda y buena disposición. Gracias a la Facultad de Agronomía por formarnos como profesionales, nos llevamos los mejores recuerdos y grandes amistades.

TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN.....	2
AGRADECIMIENTOS.....	3
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS	6
RESUMEN.....	7
SUMMARY	8
1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	11
2.1 PRODUCCIÓN DE SOJA EN EL URUGUAY	11
2.2 CARACTERÍSTICAS AGROAMBIENTALES PARA LA PRODUCCIÓN EN URUGUAY	11
2.2.1 Temperatura del aire.....	11
2.2.2 Heliofanía real - Radiación solar	12
2.2.3 Evapotranspiración	12
2.3 CARACTERÍSTICAS FENOLÓGICAS DE LA SOJA.....	12
2.4 FACTORES AMBIENTALES QUE REGULAN EL DESARROLLO	14
2.4.1 Fotoperíodo	14
2.4.2 Temperatura	15
2.4.3 Respuesta conjunta temperatura y fotoperiodo.....	18
2.4.4 Agua	19
2.4.5 Radiación solar	20
2.5 COMPONENTES DE RENDIMIENTO.....	21
2.6 FACTORES DE MANEJO QUE MODIFICAN EL RENDIMIENTO DEL CULTIVO	23
2.6.1 Fecha de siembra y su efecto sobre componentes de rendimiento....	23
2.6.2 Grupo de madurez.....	24
2.7 IMPORTANCIA DEL AGUA EN EL RENDIMIENTO DE SOJA.....	24
2.7.1 Potencial de rendimiento.....	24
2.7.2 Producción de Materia seca.....	25
2.7.3 Deficiencias hídricas y sus efectos sobre el rendimiento.....	26
2.7.4 Demanda de agua	28
2.7.5 Eficiencia en el uso del agua	29
2.8 RIEGO	30
2.9 HIPÓTESIS.....	32
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	33
3.1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO.....	33

3.1.1. Manejo experimental.....	33
3.1.2. Tratamientos.....	34
3.2 DISEÑO ESTADÍSTICO DEL EXPERIMENTO	35
3.2.1 Diseño experimental	35
3.2.2 Análisis estadístico	35
3.3 DETERMINACIONES REALIZADAS.....	36
3.3.1 Determinaciones durante el ciclo del cultivo.....	36
3.3.2 Determinaciones a cosecha.....	36
3.3.3 Cálculos realizados.....	36
3.4 CONDICIONES CLIMÁTICAS EN EL PERÍODO DEL CULTIVO	37
3.4.1 Precipitaciones	37
3.4.2 Radiación solar	38
3.4.3 Temperatura	38
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	39
4.1 DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS.....	39
4.1.1 Radiación solar incidente en las etapas fenológicas del cultivo y duración de las etapas fenológicas según la fecha de siembra.....	39
4.1.2 Temperaturas mínimas, medias y máximas.....	41
4.1.3 Suma térmica de las etapas fenológicas del cultivo según la fecha de siembra.....	43
4.1.4 Evolución del agua disponible en el suelo.....	44
4.1.5 Evapotranspiración del cultivo.....	47
4.1.6. Materia seca acumulada a inicios de floración, inicios y final del periodo crítico	49
4.1.7. Materia seca depositada a inicios y finales del PC y tasa de crecimiento del cultivo.	51
4.1.8. Rendimiento, componentes principales del rendimiento e índice de cosecha promedio según fecha de siembra y disponibilidad hídrica	52
4.1.9 Subcomponentes del rendimiento según fecha de siembra y disponibilidad hídrica	55
5. CONCLUSIONES	63
6. BIBLIOGRAFÍA.....	65

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla 1 Características hidrológicas principales del suelo del campo experimental de riego de la EEMAC	33
Tabla 2 Calendario de los eventos fenológicos para las distintas FS.....	34
Tabla 3 Precipitaciones acumuladas en cada periodo del cultivo	37
Tabla 4 RS acumulada en las diferentes etapas y en el ciclo total para las diferentes FS	38
Tabla 5 Temperaturas mínimas, medias, máximas y medias de la serie histórica por FS.....	41
Tabla 6 Sumas térmicas de las etapas fenológicas vegetativas y reproductivas para las distintas FS	43
Tabla 7 MS acumulada a R1, R4 y R6 según FS y disponibilidad hídrica.....	49
Tabla 8 MS a R4, R6 y TCC en PC según FS y disponibilidad hídrica	51
Tabla 9 Rendimiento, componentes del rendimiento e IC en promedio para las FS y según disponibilidad hídrica	53
Tabla 10 NG/planta, NV/planta, NG/vaina, abortos de vainas/planta según FS y disponibilidad hídrica	55
Tabla 11 Rendimiento, NG.m-2 y PG según FS en condiciones de riego y secano.....	58
Figura 1 Croquis del diseño experimental	35
Figura 2 Precipitaciones mensuales acumuladas en el periodo 2002-2019 y en el periodo 2021-2022.....	37
Figura 3 Días con temperaturas mayores o iguales a 32 °C por periodo en cada FS.....	38
Figura 4 RS por décadas mensuales en las etapas fenológicas para las distintas FS.....	39
Figura 5 Evolución del agua disponible para la fecha de siembra de octubre ...	45
Figura 6 Evolución del agua disponible para la fecha de siembra de noviembre	46
Figura 7 Evolución del agua disponible para la fecha de siembra de diciembre	47
Figura 8 Evapotranspiración de cultivo diaria promedio según etapa fenológica, para las distintas FS	48

RESUMEN

En el año agrícola 2021-2022 se realizó un ensayo con el objetivo de evaluar el efecto de la fecha de siembra (FS) sobre un cultivar de soja (*Glycine max*, L.) del grupo de madurez V corto con alto potencial de rendimiento bajo condiciones de riego y secano. El ensayo se realizó en la Estación Experimental "Dr. Mario A. Cassinoni" (EEMAC) de la Facultad de Agronomía, en la localidad de Paysandú, Uruguay. La evaluación consistió en tres fechas de siembra (FS) 9 de octubre, 10 de noviembre y 11 de diciembre, cada una en condiciones de riego y secano. Se realizó con un diseño de bloques completos al azar en parcelas divididas, donde las tres FS fueron las parcelas mayores, mientras que la disponibilidad hídrica (riego y secano) se las consideró como parcelas menores, las cuales se dispusieron al azar en la parcela mayor. El manejo del riego, se realizó con un umbral de riego del 60% del agua disponible (AD) durante el período crítico (PC) y 40% del AD en las etapas no críticas, de esa manera, se mantuvo al cultivo en condiciones de bienestar hídrico. Se realizaron cuatro repeticiones con seis tratamientos en cada una que se distribuyeron en 24 unidades experimentales. Los rendimientos bajo riego fueron superiores a los tratamientos en secano en cada FS. En condiciones de riego la FS de diciembre rindió 5016 kg ha⁻¹, seguido de la FS noviembre con 4701 kg ha⁻¹ y por último la FS de octubre 4277 kg ha⁻¹, se presentaron diferencias entre las FS de diciembre y octubre. No se generaron diferencias en el número de granos por metro cuadrado (NG). En cambio, el peso de grano (PG) sí se diferenció, siendo la FS de diciembre la de mayor valor, seguido por noviembre y por último octubre, siendo esto parte de lo que explica las diferencias en el rendimiento. Las temperaturas medias y máximas elevadas a las que se vieron sometidas las FS de octubre y noviembre, sumado al efecto de la radiación solar (RS), la cual fue menor durante el PC, provocó que las FS tempranas no expresaran su potencial. Tanto la FS de octubre como la de noviembre transformaron de manera menos eficiente la producción de materia seca (MS) a producción en grano, siendo la FS de diciembre la más destacada en este punto. En secano, la FS de diciembre se destacó por sobre las demás, esta performance se explica principalmente por la adecuada disponibilidad hídrica y por evitar las altas demandas atmosféricas en el PC. En conclusión, las FS tempranas ubican el PC en situaciones más favorables para obtener rendimientos elevados, sin embargo, el año presentó niveles de RS y temperaturas que influyeron negativamente en la obtención del rendimiento.

Palabras Clave: *Glycine max*, radiación solar, temperatura, periodo crítico, número de grano, peso de grano, riego, secano, octubre, noviembre, diciembre

SUMMARY

In the 2021-2022 crop year, a trial was conducted to evaluate the effect of sowing date on a soybean cultivar (*Glycine max*, L.) with a V short maturity group, which presents a high yield potential under irrigated and rainfed conditions. The trial was done at the Experimental Station "Dr. Mario A. Cassinoni" (EEMAC), Faculty of Agronomy, in Paysandú, Uruguay. The evaluation consisted of three sowing dates, October 9, November 10 and December 11, each under irrigated and rainfed conditions. It was carried out in a design of complete random blocks in divided plots, where the three sowing dates were the major plots, while the water availability (irrigated and rainfed) were considered as minor plots, which were randomly arranged in the major plot. Irrigation management was carried out with a watering threshold of 60% of available water during the critical period and 40% of available water in the non-critical stages, thus maintaining the crop under water welfare conditions. Four replications were carried out with six treatments in each, distributed in 24 experimental units. Irrigated yields were higher than in rainfed treatments at each sowing date. Under irrigation the December sowing date yielded 5016 kg ha⁻¹, followed by the November sowing date with 4701 kg ha⁻¹ and finally the October sowing date with 4277 kg ha⁻¹, there were differences between the December and October sowing date. There were no differences in the number of grains per square meter, but the grain weight did differ, with the December sowing date having the highest value, followed by November and finally October, part of which explains the differences in yield. The high average and maximum temperatures to which the early sowing date were subjected, added to the effect of solar radiation, which was lower during the critical period, meant that the early sowing date could not express their potential. Both the October and November sowing date transformed less efficiently the dry matter production to grain production, being December the most outstanding in this point. In rainfed conditions, the December sowing date stood out over the other sowing dates, this performance is mainly explained by water availability and by the escape to the high atmospheric demands in the critical period. In conclusion, the early sowing dates placed the critical period in more favorable situations to obtain higher yields; however, the year presented solar radiation levels and temperatures that negatively affect the achievement of yield.

Keywords: *Glycine max*, solar irradiation, temperature, critical period, seed weight, numbers of grains, irrigation, rainfed, october, november, december

1. INTRODUCCIÓN

A comienzos del siglo XXI, la producción de cultivos estivales, mayoritariamente la soja, ha crecido a un ritmo sostenido debido a una expansión del sector agrícola en el país como consecuencia del aumento de los precios de los commodities, en este caso de los granos (Figueredo et al., 2019). La superficie de soja pasó de 12.000 ha en el año 2000 a 1.334.000 ha en el año agrícola 2014/15. En relación al año 2021/22, la superficie sembrada fue de 991.899 ha, mientras que la producción fue de 2.776 millones de toneladas y el rendimiento a nivel nacional fue de 2.799 kilogramos por hectárea (Oficina de Estadísticas Agropecuarias [DIEA], 2022).

La producción de soja en Uruguay provocó un cambio radical en la forma de producir, debido a fuertes cambios tecnológicos. Entre esos cambios, se destaca la adopción de la siembra directa, la utilización de materiales genéticos modificados, la incorporación de nuevas moléculas en los defensivos agrícolas y la modernización del parque de maquinaria que permite llevar a cabo una agricultura más eficiente (Giménez, 2012). Sin embargo, hay una amplia brecha tecnológica entre los rendimientos obtenidos en la investigación nacional y los resultados comerciales obtenidos.

El cultivo de soja en Uruguay concentra la siembra en el mes de noviembre la cual se realiza mayoritariamente con grupos de madurez (GM) del V al VII, con el objetivo de localizar el PC de determinación del rendimiento entre los meses de febrero y marzo para disminuir la probabilidad de deficiencias hídricas. Esto está asociado a una menor demanda atmosférica dada por un descenso en la radiación incidente luego del mes de enero. Sin embargo, esta estrategia no permite explorar los máximos rendimientos en cultivos de soja sin deficiencias hídricas (Gasó & Nuñez, 2015).

El rendimiento de soja está topeado a nivel de campo y presenta cierta variabilidad entre años, esto se debe principalmente a las deficiencias hídricas estivales, determinantes en la concreción del rendimiento. La disponibilidad hídrica depende de factores que no se pueden manejar como la baja capacidad de almacenamiento de los suelos, la variabilidad de las precipitaciones (PP) y de las condiciones ambientales que afectan la evapotranspiración de los cultivos (ETc), impidiendo alcanzar los rendimientos potenciales. El momento, la intensidad y la duración en que ocurren las deficiencias de agua, afectan el rendimiento especialmente si ocurren durante el PC (Giménez, 2010). La limitante principal de los ambientes de producción en primavera y verano es la disponibilidad hídrica, y por ende esta es la determinante principal del rendimiento (Giménez, 2012).

La solución tecnológica para reducir los efectos de los déficits hídricos es el riego suplementario, el cual permite sincronizar el periodo de formación y llenado de granos con los momentos de mayor RS disponible, los cuales ocurren generalmente a finales de diciembre y en enero. Existe información nacional que indica que la combinación más efectiva es utilizar GM precoces (de III largo a V corto) junto a FS de mediados de octubre, esto permite ubicar el periodo R3-R6 durante los momentos en el que la RS se maximiza (Gasó & Nuñez, 2015). El objetivo principal de este estudio fue evaluar la FS en soja afecta el rendimiento en condiciones de riego y seco, utilizando una variedad de GM V corto con alto potencial de rendimiento.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 PRODUCCIÓN DE SOJA EN EL URUGUAY

La producción de soja desde el año 2000 ha crecido de forma sostenida, la cual está fuertemente condicionada por la evolución de la demanda externa de este producto (Arbeletche & Gutiérrez, 2010). Este aumento en área del cultivo sustituye al sistema productivo histórico del Uruguay, donde predominaba la rotación de agricultura y pasturas por un sistema de agricultura continua donde la sucesión de cultivos de trigo y soja pasó a ser la predominante (Arbeletche, 2020).

La agricultura extensiva en Uruguay se concentra en la región litoral oeste, principalmente en los departamentos de Colonia, Soriano, Río Negro y Paysandú. Desde el año 1950 esta ha sido la zona agrícola principal. Sin embargo, en la década del 90, la soja tiene una regionalización diferente a los demás cultivos apareciendo también en la zona este, precisamente en los departamentos de Tacuarembó y Cerro Largo. En la segunda mitad de la década del 90 se liberan los eventos transgénicos, facilitando así la aplicación del sistema en su conjunto con la siembra directa, esto provocó una expansión de la frontera agrícola, permitiendo avanzar sobre suelos que antes no eran aptos para el laboreo. Es así que regiones del noreste (Tacuarembó, Rivera y Cerro Largo), sur (San José) y centro (Durazno) del país, representan una proporción del área agrícola no tradicional del Uruguay (Sancho et al., 2008).

2.2 CARACTERÍSTICAS AGROAMBIENTALES PARA LA PRODUCCIÓN EN URUGUAY

El país está situado entre los 30 y 35° de latitud sur, el mismo se encuentra en una zona subtropical templada (Corsi, 1982). La disponibilidad de agua para la producción de cultivos, depende directamente de las condiciones climáticas, por lo tanto, es de gran relevancia estudiar estas variables para lograr buenos rendimientos. La RS y la temperatura, en conjunto con el agua, son las principales variables agrometeorológicas que regulan los procesos metabólicos de las plantas (Cárcova, 2003, como se cita en Gerster & Bacigaluppo, 2009).

2.2.1 Temperatura del aire

La temperatura media anual sobre Uruguay es variable y se encuentra entre 19,8 °C en la zona del noroeste hasta unos 16,6°C en la costa sur del país. Las temperaturas medias más altas se presentan en los meses de enero y febrero, mientras que las más bajas en junio y julio; siendo estas de 22,6°C y 12,9°C, respectivamente. En los meses más cálidos en verano, especialmente en enero las temperaturas promedio registradas son de 24°C, las máximas de 29,6°C y las mínimas 18,5°C (Castaño et al., 2011).

2.2.2 Heliofanía real - Radiación solar

La heliofanía real en Uruguay presenta una variación espacial mínima, la cual tiene una tendencia creciente en dirección sureste-noroeste. Los valores promedios de horas de insolación media diaria sobre el país se sitúan en 7 horas, los valores más altos se sitúan en el norte y los mínimos en el sureste (Castaño et al., 2011). Mediante datos extraídos de la página del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA, s.f.), seleccionando la estación de INIA Salto Grande, en el período de mes entero en los meses de Octubre a Mayo de los años 1970-2022, para las variables heliofanía hs, heliofanía cal/cm²/día, la heliofanía promedio medida en horas es mayor en diciembre y enero siendo estas de 8,97 y 9,1 horas respectivamente. En el mes de febrero disminuye 7% y en el mes de marzo estos valores disminuyen 14%. En lo que refiere a la RS por heliofanía cal/cm²/día, presenta valores máximos promedios en los meses de diciembre y enero, siendo de 567 y 566 cal/cm²/día respectivamente. En los meses posteriores la RS por heliofanía disminuye levemente, siendo 512 para febrero y 436 cal/cm²/día en marzo (INIA, s.f.).

2.2.3 Evapotranspiración

Para Castaño et al. (2011) los valores de ETc acumulados se sitúan entre 1000 y 1200 milímetros, según el método de Penman-Monteith. En el noroeste del país, se sitúan los valores máximos mientras que los mínimos están situados al suroeste, por lo tanto, se puede decir que la evapotranspiración presenta un incremento de suroeste a noroeste. El comportamiento de esta es estacional, registrando los valores más altos durante el verano, entre 160-185 mm/mes, y los mínimos en el invierno con 25-35 mm/mes. A su vez, la variabilidad interanual de la evapotranspiración es baja, variando entre 40 y 50 mm en verano, y 10 mm en el invierno.

2.3 CARACTERÍSTICAS FENOLÓGICAS DE LA SOJA

Para la descripción de los estados fenológicos del cultivo de soja se utiliza mayoritariamente en la región la escala elaborada por Fehr y Caviness (1977). Son utilizadas diferentes descripciones para identificar los estados vegetativos (V) y reproductivos (R), donde se utilizan los nudos para identificar los diferentes estadios (Fehr & Caviness, 1977). La escala es independiente de las condiciones en que crece el cultivo (sitio, FS, densidad) o del cultivar ya que toma en cuenta los cambios morfológicos ocurridos en el tallo principal del 50 % de las plantas del cultivo. En los estadios vegetativos, se describe la aparición de hojas, teniendo en cuenta el número de nudos que presentan hojas totalmente desarrolladas. Por otro lado, los estadios reproductivos se basan en la floración, el desarrollo de vainas, el desarrollo de los granos y la maduración donde se considera el estadio de los nudos superiores del tallo principal independientemente del resto de la planta (Kantolic et al., 2003).

Los dos primeros estadios vegetativos, se los identifican con letras VE y VC, correspondientes a la fase de emergencia y fase cotiledonar, respectivamente (Kantolic et al., 2003). Cuando la semilla absorbe la cantidad de agua equivalente al 50% de su peso (Sadras et al., 2000) y además satisface sus requerimientos térmicos, se da la germinación (Hesketh et al., 1973, como se cita en Kantolic et al., 2003). El establecimiento de las plántulas es una de las fases más críticas aún cuando las condiciones hídricas sean favorables. Una vez que los cotiledones alcanzan la superficie del suelo comienza la expansión de hojas. Estas tienen en su axila yemas que van a dar ramas o inflorescencias, o van a permanecer inactivas. El ritmo de aparición de hojas depende principalmente de la temperatura. En simultáneo al crecimiento de la parte aérea, las raíces primarias y secundarias se desarrollan y profundizan (Kantolic et al., 2003).

La apertura de la primera flor da comienzo a la fase de floración (R1), esta comienza en una posición intermedia del tallo principal y progresa hacia los nudos superiores e inferiores y desde la base hacia el extremo de las ramificaciones. La fecundación de estas flores ocurre el mismo día en que se abren o el día anterior, y a partir de ese momento comienzan a formarse las vainas. Se da una superposición de aparición de hojas y formación de estructuras reproductivas (Kantolic et al., 2003). En el momento que se abren flores en alguno de los nudos superiores del tallo, se define el estado de plena floración (R2) (Kantolic, 2008).

Entre R3 y R4 comienza PC de determinación del rendimiento, el cual se extiende hasta R6. El subperíodo entre R4.5 y R5.5 es donde se completa la floración y las vainas y semillas pequeñas pueden abortar bajo condiciones ambientales no adecuadas (Sadras et al., 2000). Toledo (2013) sostiene que este subperíodo es el momento más sensible del cultivo y cualquier situación de estrés (déficit hídrico, de nutrientes, defoliación, enfermedades, ataque de plagas o granizo) afecta el número final de vainas y de granos, por lo tanto, el rendimiento.

Una vez que las vainas alcanzan su máxima longitud comienza a hacerse evidente el llenado de granos, donde estos aumentan su tamaño ocupando progresivamente cada lóculo de la vaina (Kantolic et al., 2003). Alrededor de R5.5 la altura de la planta y el número de nudos se maximiza (Ritchie et al., 1985). Entre R5 y R6 se maximiza el área foliar y avanza el ciclo donde se puede ver un creciente amarillamiento de las hojas (Kantolic et al., 2003), además concluye la formación de tallos, hojas, flores, raíces, y se registra el mayor número de nudos en el tallo principal (Toledo, 2013).

En situaciones desfavorables durante el periodo R6 y R6.5, pueden acortar el período de llenado de granos y disminuir el PG afectando el rendimiento. En cambio, condiciones adversas en el periodo R6.5 y R7 producen efectos de menor magnitud, debido a que las semillas ya han acumulado una gran proporción de su peso seco total (Sadras et al., 2000). La madurez fisiológica (R7) se alcanza

cuando cesa la acumulación de MS en el grano y las vainas comienzan a tomar color marrón (Kantolic et al., 2003).

2.4 FACTORES AMBIENTALES QUE REGULAN EL DESARROLLO

El momento y la duración de las fases de desarrollo dependen principalmente de la temperatura y del fotoperíodo. Los factores ambientales como RS, nutrientes y las propiedades edáficas, no modifican sustancialmente la duración del ciclo. Por otro lado, el agua puede aumentar la duración de la fase siembra - emergencia cuando la disponibilidad hídrica es insuficiente y es frecuente el acortamiento de fructificación y llenado de grano bajo condiciones de estrés. Parte de estos efectos están mediados por las respuestas del cultivo a las deficiencias hídricas y no afectan directamente el desarrollo (Kantolic, 2008).

La temperatura y el fotoperíodo tienen una influencia conjunta en la regulación de la duración de las fases de desarrollo del cultivo (Kantolic et al., 2003), esta duración varía según la sensibilidad termo-fotoperiódica de cada cultivar (Bodrero, 2003). La tasa de desarrollo (TD) es una variable útil para explicar el comportamiento del cultivo, ya que un aumento de la TD reduce el tiempo entre dos estados de desarrollo. Los efectos de los factores ambientales se van a describir según su acción sobre la TD o la duración de las fases (Kantolic, 2008).

2.4.1 Fotoperíodo

Hicks (1983) indica que el efecto principal del fotoperíodo en el desarrollo de la soja es inducir la floración. Este regula el desarrollo durante la mayor parte del ciclo, desde V1-V2 hasta R7, mientras que la temperatura afecta durante todo el ciclo del cultivo (Toledo, 2018). La soja florece cuando los días se acortan por debajo del umbral crítico (Hicks, 1983). Es una planta de días cortos y el fotoperíodo regula la mayor parte de los eventos reproductivos (Kantolic, 2008), por lo que al acortarse la duración de los días aumenta la velocidad de desarrollo y se adelanta el inicio de la floración (Toledo, 2018).

El sitio de percepción del estímulo son las hojas aun cuando los cambios se producen en los meristemas y los cultivares adquieren capacidad de respuesta cuando despliegan la primera hoja trifoliada. En ese estado, la planta posee un área foliar suficiente para percibir el estímulo fotoperiódico (Bodrero, 2003). La mayoría de los genotipos de soja tienen respuesta cuantitativa (Sinclair et al., 1991), mientras que la sensibilidad al fotoperíodo y el umbral por encima del cual se retrasa el desarrollo varía entre genotipos. Los cultivares de GM bajos presentan un mayor umbral y una menor sensibilidad al fotoperíodo que los grupos de madurez altos (Kantolic, 2008).

Se debe tener en cuenta que las plantas que florecen anticipadamente tienen poco desarrollo en general, mostrando una reducción en el área foliar y un menor crecimiento o desarrollo en la altura de la planta. Un atraso en la FS reduce la duración del ciclo básicamente por el acortamiento en días de R1 a R8, sin embargo, no disminuye solo la etapa reproductiva sino también la etapa vegetativa de la soja (Toledo, 2013). El ciclo se acorta, por lo tanto, la maduración de las plantas se adelanta, y a su vez el periodo de llenado de grano disminuye haciendo que el rendimiento del cultivo sea menor (Hicks, 1983).

El fotoperiodo post floración y la sensibilidad fotoperiódica de la planta, regulan el largo del PC y la captura de recursos como RS, modificando el NG (Kantolic et al., 2013). Luego de la floración, el fotoperiodo afecta directamente la partición de asimilados entre estructuras reproductivas y vegetativas, modificando el número de nudos por planta por m² (Nico et al., 2015). En FS de la segunda quincena de noviembre, con fotoperiodos más largos y radiación fotosintéticamente activa media mayor, se obtuvieron mejores rendimientos que en FS tardías de fines de diciembre. Estos rendimientos se explican por la mayor duración de las fases post floración y mayor número de nudos por m² que se obtuvieron en las fechas más tempranas (Nico et al., 2018).

El NG y el tamaño de los órganos reproductivos que se forman se ven afectados por el fotoperiodo, cuando las semillas crecen y se desarrollan más tarde, la exposición a fotoperiodos cortos acelera la TD y disminuye la duración del llenado de grano. En la medida que se exponen las plantas a fotoperiodos largos aumenta el número de semillas y esto está relacionado con un aumento en el número de nudos y número de vainas por nudo (Kantolic, 2008). Sin embargo, fotoperiodos muy largos en genotipos altamente sensibles, pueden reducir el número de semillas al promover un mayor aborto de vainas y semillas (Thomas & Raper, 1976, como se cita en Kantolic, 2008).

2.4.2 Temperatura

La temperatura es determinante en la duración de los distintos estados fenológicos del cultivo (Toledo, 2013), cuanto mayor es la temperatura, menor es la duración de cada período (Salvagiotti, 2009); se da un aumento lineal de la TD al aumentar la temperatura, entre la temperatura base y la óptima (Toledo, 2018). Las temperaturas cardinales para el desarrollo vegetativo varían, donde la temperatura base va de 6°C a 10°C, las temperaturas óptimas diurnas van de 30°C a 35°C, las óptimas nocturnas de 21°C a 27°C, y la máxima es de 40°C. Sin embargo, para un desarrollo normal vegetativo y reproductivo la temperatura óptima debe encontrarse entre 25°C y 30°C, donde por debajo de la temperatura base y por encima de la máxima la TD se detiene (Toledo, 2018). Farias et al. (2007) destacan que la soja se adapta mejor en regiones donde las temperaturas oscilan entre 20 y 30°C, siendo que la temperatura ideal se encuentra más próxima a los 30°C.

Salvagiotti (2009) indica que para las etapas vegetativas las óptimas deberían estar por encima de los 20°C para favorecer la germinación de las semillas, crecimiento de nudos y desarrollo foliar, y durante las etapas reproductivas las temperaturas alrededor de 26°C son óptimas para el desarrollo de las vainas y de 24°C para el desarrollo de las semillas. En cuanto a la capacidad fotosintética de la planta, Whigham y Minor (1978) señalan que la temperatura del aire óptima para la fotosíntesis se encuentra entre 25 y 30°C, ya que por encima de 30°C la asimilación de CO₂ se reduce y la tasa respiratoria se incrementa generando pérdidas en el PG. Por último, Lindsey y Thomson (2012), como se cita en Puteh et al. (2013), reportaron que el rango óptimo de temperatura para soja es de 25-29°C. En conclusión, los diferentes autores difieren en lo que se refiere al rango óptimo, pero se podría considerar un rango entre 20 y 30°C donde el cultivo se desarrollaría correctamente.

Según Thuzar et al. (2010), el rendimiento de la soja se ve más afectado por las altas temperaturas durante los estadios reproductivos que durante los vegetativos, debido a la alta sensibilidad de los órganos reproductivos al estrés térmico. En estadios reproductivos tempranos el estrés térmico durante R1-R5, puede reducir el NG (Egli, 1998; Molino et al. 2007, como se cita en Arrocha Rodríguez, 2019). En la fase R3, el rendimiento puede verse limitado, debido a la disminución en el número de vainas producidas y fijadas, ya que solo un 43% de las vainas llegan a la madurez (Kavanová et al., 2017). Además, durante la etapa de llenado de granos (R5-R7), puede verse disminuido tanto el tamaño de los granos (Dornbos & Mullen, 1991; Prasad et al., 2008); como el NG, esto último podría estar explicado por las limitaciones en la translocación de fotoasimilados hacia los granos, como causa del estrés térmico (Ergo et al., 2018). Sin embargo, Ergo et al. (2018) observaron que materiales sometidos a estrés calórico durante el llenado de grano no presentaron cambios significativos en el PG, destacando la capacidad de compensar de la planta.

En contraste con lo dicho por Ergo et al. (2018), los autores Alsajri et al. (2020) y Burroughs et al. (2023) indican que la temperatura tuvo un efecto significativo sobre el PG, mostrando una correlación negativa, donde a medida que aumenta la temperatura, disminuye el PG. Estos resultados, coinciden con Gibson y Mullen (1996), quienes señalaron que el aumento de temperatura de 30 a 35°C durante el día, provocaron disminuciones de un 18% en el PG cuando ocurrió durante el periodo R1 a R5, 18% en el periodo R5 a R8 y 27% si ocurre durante toda la fase reproductiva. Las altas temperaturas en la mitad del periodo reproductivo limitan la capacidad potencial del llenado de granos, por lo que al aumentar la temperatura de 25 a 35°C disminuye el PG (Puteh et al., 2013). Temperaturas por encima de 30/25°C (día/noche) durante la floración y desarrollo de vainas reducen el PG independientemente de la temperatura durante el llenado de grano (Egli & Wardlaw, 1980, como se cita en Onat et al., 2017). Además, Egli y Bruening (2007) afirman que el calor y la sequía durante la formación de granos acelera la senescencia y disminuye la capacidad fotosintética, lo que acorta el período de llenado y afecta negativamente el PG.

La disminución en la fotosíntesis y crecimiento de las plantas (Molino, 2011), provoca un menor suministro de asimilados a las vainas y aumenta la tasa de aborto (Boote et al., 1998). El establecimiento de vainas, la floración (Whigham & Minor, 1978), y la formación de nudos se ven afectados por temperaturas máximas de 35°C haciendo que disminuyan tanto el número de flores como el NG por nudo (Onat et al., 2017). A su vez, Prasad et al. (2000) agregan que el rendimiento en vainas se reduce 50% cuando la temperatura del suelo y del aire alcanzan los 20 y 38 °C, respectivamente, en el periodo R1-R8. Con temperaturas de 38/28°C (día/noche) durante 14 días luego del comienzo de la fijación de vainas, se aumenta la producción de etileno, lo que reduce significativamente el NG fijados, el tamaño de grano y el rendimiento por planta en comparación con temperaturas máximas de 28/18°C (Djanaguiraman & Prasad, 2010). Además del aborto de flores y vainas jóvenes, condiciones de estrés severo pueden aumentar la mortandad de vainas más grandes (Egli & Bruening, 2006), por lo que se puede concluir que la producción de flores y vainas es sensible a la temperatura (Burroughs et al., 2023).

El NG está relacionado directamente con la cantidad de vainas fijadas, mientras que el NG por vaina no sufrió cambios significativos bajo condiciones de estrés térmico (Kavanová et al., 2017; Molino, 2011). Los cultivares sometidos a estrés térmico durante el PC en condiciones de secano disminuyeron 38% la tasa de fijación de vainas, afectando así el NG. Además, bajo estrés durante la fructificación se redujo el NG en un 17% y 42% bajo condiciones de riego y secano, respectivamente (Molino, 2011). Por su parte, Ergo et al. (2018) observaron reducciones de 21% en rendimiento en cultivos bajo riego expuestos a 6 horas diarias de más de 32°C durante 21 días luego de R5.5, lo cual estuvo explicado principalmente por el NG, componente que se redujo un 25%.

Si hablamos de temperatura media, Burroughs et al. (2023) sostienen que el NG por vaina se ve disminuido cuando la temperatura media del ciclo excede los 22°C y el NG por planta disminuye con temperaturas medias de 22,8°C. A su vez, Heinemann et al. (2006) demostraron que el rendimiento disminuye 35% con temperaturas medias diarias de 27,5°C en comparación con un control de 17,5°C, siendo el NG el responsable del 88% de la variación del rendimiento. Por último, Thomas y Raper (1978) como se cita en Molino (2011), reportaron reducciones en el número de vainas a partir de 22 °C de temperatura media, además Alsajri et al. (2020) mostraron que temperaturas medias diarias de 33°C provocaron una reducción del rendimiento de entre 32% (en cultivares indeterminados) y 67% (en cultivares determinados), comparado con temperaturas de 25°C. Por su parte, el PG se ve afectado por temperaturas medias que superan los 23° de media luego de la floración (Thomas et al., 2010).

Las altas temperatura también afectan el índice de cosecha (IC), a medida que aumenta la temperatura el IC disminuye, ya que los asimilados tienen que ser utilizados en otros procesos fisiológicos como son la respiración de

mantenimiento, el ajuste osmótico y el crecimiento de las raíces (Chaves & Gutierrez, 2016). Además, en el estudio realizado por Roján Herrera et al. (2022), los valores más bajos de IC coincidieron con el periodo donde las temperaturas fueron más elevadas. A su vez, la elevada temperatura disminuye la producción de vainas y semillas, y el IC disminuye de manera no lineal a medida que las temperaturas de crecimiento exceden los 22 °C (Burroughs et al., 2023).

En conclusión, la temperatura es un factor clave que afecta el rendimiento, tamaño y calidad de las semillas en el cultivo de soja (Alsajri et al., 2020; Sobko et al., 2020). El aumento de la temperatura por encima del rango óptimo (20-30°C) tiene efectos negativos en la fenología de las plantas, lo que se traduce en una disminución en la cantidad de biomasa acumulada, en el peso de las vainas y las semillas, y, en consecuencia, en una reducción del rendimiento. En la misma línea, Puteh et al. (2013) afirman que los componentes de rendimiento se ven levemente afectados con temperaturas de 30°C y tienen efectos severos cuando las temperaturas alcanzan los 35°C. En el periodo reproductivo, temperaturas dentro del rango 32-38°C reducen los componentes del rendimiento (Dornbos & Mullen, 1991; Gibson & Mullen, 1996; Huxley et al., 1976), mientras que por encima de 39°C durante el día y 29°C durante la noche se reduce la viabilidad del polen, provocando un menor rendimiento (Djanaguiraman et al., 2013, como se cita en Alsajri et al., 2020).

2.4.3 Respuesta conjunta temperatura y fotoperiodo

La duración de las diferentes fases de desarrollo está regulada simultáneamente por la temperatura y por el fotoperiodo, por lo tanto, la fenología del cultivo depende de la respuesta genotípica a ambos factores (Kantolic, 2008). Dentro del ciclo del cultivo hay una respuesta diferencial donde la TD luego de R5 se ve más afectada por el fotoperiodo que por la temperatura (Grimm et al., 1994, como se cita en Kantolic, 2008). Dependiendo del GM la respuesta va a ser diferente, donde en los GMs III y IV la temperatura es el factor determinante mientras que en los GMs V a VIII operan conjuntamente fotoperiodo y temperatura (Giménez, 2007). Los cultivares de GM bajos son más dependientes de la temperatura que del fotoperiodo, debido a su baja sensibilidad a este último (Sinclair et al 2007, como se cita en Kantolic, 2008).

Según Toledo (2018) hay una permanente interacción entre temperatura y fotoperiodo, donde la respuesta al fotoperiodo se ve afectada por la temperatura. Bajo temperaturas óptimas, un genotipo más sensible (GM largo) requiere menos horas de luz para inducir a la floración, respecto a un genotipo menos sensible (GM corto). En condiciones sub óptimas, se da un retraso en el inicio de la floración ya que se modifica la sensibilidad de los genotipos al fotoperiodo, el genotipo menos sensible queda sin respuesta y el más sensible se desplaza hacia más horas de luz. Esto puede ocurrir en FS tempranas donde las temperaturas medias ambientales son más frescas, por lo tanto, aumenta la etapa vegetativa y disminuye la sensibilidad al fotoperiodo. Si la temperatura se encuentra por debajo

de 25°C se retrasa la floración independientemente de la longitud del día. Por otro lado, con temperaturas mayores a 32°C y fotoperiodos largos se producen abortos de flores y vainas (Whigham et al., 1983, como se cita en Toledo, 2013).

2.4.4 Agua

Según Farias et al. (2007), la disponibilidad hídrica durante la estación de crecimiento es la principal limitante a la hora de expresar el potencial de rendimiento y la mayor causa de su variabilidad. En secano, las deficiencias hídricas estivales son provocadas por factores que no admiten mayores transformaciones por manejo como lo son la capacidad de almacenaje de agua disponible de los suelos (CAAD) y el régimen de PP, que en general, es deficitario en relación a las necesidades hídricas de los cultivos, además de ser muy variable en ocurrencia, volumen e intensidad (Giménez, 2010). Sin embargo, podemos tomar decisiones sobre las prácticas de manejo culturales, como por ejemplo época de siembra, evitando colocar el PC en los periodos de menor disponibilidad de agua. Por otro lado, podemos manejar el agua mediante riego donde es fundamental conocer la ETP máxima en el cultivo, la cual se define como el consumo de agua en condiciones de óptima disponibilidad hídrica (Farias et al., 2007).

La necesidad de agua en el cultivo de soja va aumentando con el desarrollo de la planta, alcanzando un máximo durante floración - llenado de grano, con 7-8 mm/día de requerimiento. En el ciclo total se requieren entre 450 y 800 mm dependiendo de la FS y de las condiciones climáticas del año, además la distribución del agua es un factor clave, ya que una distribución desuniforme de las PP limita la obtención de rendimientos altos. Esto ocurre principalmente en las fases de mayor demanda de agua (floración) y las más críticas en la ocurrencia de déficits hídricos (llenado de grano). Con 650-700 mm de agua bien distribuidos se logran los mayores rendimientos. En la fase crítica (R1-R6) el requerimiento es de 120-300 mm (Farias et al., 2007).

Las deficiencias hídricas durante el llenado de grano son más perjudiciales que durante la floración, provocan el aborto de vainas y problemas en la formación de los granos, lo cual no se ve plenamente compensado. Además, disminuye la tasa de acumulación de materia seca (MS) de los granos y acelera la maduración haciendo que estos sean más pequeños (Farias et al., 2007). Si durante la floración y el período temprano de la formación de frutos la disponibilidad hídrica en planta es alta, la producción de frutos es elevada, si las deficiencias son posteriores provocan la caída de frutos en importante proporción (Hanway & Weber, 1971, como se cita en Nakayama, 1980). Por otro lado, Farias et al. (2007) señalan que un exceso de lluvias puede provocar problemas en la fotosíntesis (por una mayor cantidad de días nublados), problemas en la aireación del suelo, en la fijación de nitrógeno y en el desarrollo de las raíces, limitando la obtención de altos rendimientos en grano.

2.4.5 Radiación solar

El crecimiento de un cultivo depende de la división y alargamiento celular de los órganos diferenciados, que dependen de la producción, acumulación y transporte de los fotoasimilados y nutrientes. Los fotoasimilados provienen de la fotosíntesis donde se fija CO_2 , proceso que ocurre en la lámina de las hojas donde se transforma energía solar en química (Cárcova et al., 2003). Uno de los objetivos en los cultivos es lograr que las hojas intercepten la mayor cantidad de RS incidente ya que es la fuente de energía para la producción de MS en las plantas. El índice de área foliar (IAF) crítico es el valor de IAF que permite alcanzar el 95% de la radiación incidente (Gardner et al., 1985, como se cita en Andrade et al., 2000), el cual se busca alcanzarlo cuanto antes para maximizar la producción de MS (Andrade et al., 2000).

La tasa de crecimiento de un cultivo (TCC) resulta del balance entre la fotosíntesis (ganancia de CO_2) y la respiración (pérdida de CO_2). La cantidad de carbono fijado que se destina a la respiración es relativamente constante, por tanto, los aumentos en radiación interceptada por el cultivo se traducen en aumentos en la TCC (Gallagher & Biscoe, 1978, como se cita en Cárcova et al., 2003). La radiación interceptada, depende de la eficiencia con que la radiación incidente es interceptada por el canopeo (Cárcova et al., 2003). Según Toledo (2013), si no se logra alcanzar el IAF crítico, la eficiencia en la captación de la RS es menor, esto lleva a una disminución de la TCC, por lo tanto, se reduce el rendimiento.

Además, Salvagiotti (2009) afirma que es fundamental la interceptación de la RS para que los fotosintatos estén disponibles durante la etapa reproductiva del cultivo donde se van a definir el NG y el PG. Al mejorar la TCC, durante el PC (donde se produce una alta competencia por los asimilados), aumenta el número de vainas y granos establecidos. Si hay buena disponibilidad de agua, nutrientes y sanidad, la única limitación como fuente es la capacidad fotosintética de la variedad (Kantolic & Slafer, 2003), donde la acumulación de biomasa va a depender de la interceptación máxima del área foliar durante los períodos de máxima heliofanía (Melgar et al., 2011).

Según Kantolic (2003), es crucial maximizar la TCC durante el período R1-R6 para lograr altos rendimientos en soja. Esto conlleva a un aumento en la cantidad de nudos por unidad de superficie y un aumento en la fijación de vainas, lo que resultará en una mayor disponibilidad de asimilados para un óptimo llenado de granos. Además, Grasso y Montero (2011) respaldan esta afirmación al establecer una relación directamente proporcional entre la TCC durante el período R1 - R5 y el NG por unidad de superficie. Jiang y Egli (1995), Egli (1998) y Kantolic (2003) también señalan que la cantidad de granos fijados por las plantas está estrechamente relacionada con la TCC durante el período que abarca desde la floración hasta la etapa media del llenado de granos. Además, en cuanto al segundo componente de rendimiento del cultivo, Egli (2004) menciona que el peso

de los granos tiende a aumentar con la duración del período de llenado, pero también depende de la TCC durante ese período.

Es importante resaltar que cualquier tipo de estrés que afecte al cultivo entre el inicio de la floración (R1) y el inicio del llenado de granos (R5) afectará el número potencial de granos. Asimismo, si dicho estrés ocurre entre R5 y la madurez fisiológica (R7), el PG se verá afectado (Salvagiotti et al., 2010). Además, vale destacar que este es particularmente sensible a la disponibilidad de asimilados durante la floración, como lo señalan Alemán y Barrere (2014). Por último, como punto de referencia, Grasso y Montero (2011) informaron resultados de una TCC durante el PC de 250 kg/ha/día en situaciones de bienestar hídrico para alcanzar rendimientos potenciales.

Las prácticas de manejo culturales como la elección de FS y el genotipo, permiten adecuar el ciclo para maximizar el aprovechamiento de la RS incidente. De esta última, sólo la radiación fotosintéticamente activa (PAR) del espectro visible (ubicada entre 400 y 700 nanómetros) es aprovechada por el cultivo (Cárcova et al., 2003). Por su parte, Giménez et al. (2014) afirman que los años donde las PP promedio son muy superiores a los promedios del país, presentan una menor RS incidente durante el ciclo del cultivo por una mayor cantidad de días nublados. Esto impide una mayor fijación de CO₂, por lo tanto, se afecta en forma negativa la producción de biomasa y el rendimiento en grano (Giménez et al., 2014). El rendimiento en grano, tiene una correlación positiva con la RS, si esta es elevada durante la floración se incrementa el rendimiento en grano (Sobko et al., 2020), mientras que Nico et al. (2018) afirman que durante R1-R7 presenta una correlación positiva con la radiación PAR.

Según Foster y Rovegno (2015), al comparar varios ensayos pudieron constatar que hay una relación entre la RS, rendimiento y NG. Cuando la RS diaria promedio durante todo el ciclo se encuentra por encima de 20 MJ m⁻² día⁻¹ existieron rendimientos mayores a 6000 kg ha⁻¹, y por debajo de este valor de RS no superaron los 5000 kg ha⁻¹. Con el NG pasó algo similar, con 20 MJ m⁻² día⁻¹ se lograron 3000 granos por m². Por lo tanto, la RS incidente en cultivos sin limitantes hídricas es un factor determinante en el potencial de rendimiento de la soja, siendo más significativo si la máxima RS coincide con el PC. Entre esos ensayos el máximo rendimiento (7275 kg ha⁻¹) se logró con una RS media de 24,3 MJ m⁻² día⁻¹ y de 23,2 MJ m⁻² día⁻¹ durante el PC.

2.5 COMPONENTES DE RENDIMIENTO

Según Kantolic et al. (2003), los principales componentes de rendimiento en soja son el número de granos (NG) por unidad de área y el peso unitario de los granos. El NV es un subcomponente del NG y se determina por el balance entre las flores producidas por planta y la proporción de estas que se transforman en vainas. En cuanto al NG por vaina, McBlain y Hume (1981) indican que es un

componente que está determinado genéticamente y que presenta poca variación. Sin embargo, según Pandey y Torrie (1973) el peso medio de los granos también está determinado genéticamente, pero a diferencia del NG por vaina, este se ve más influenciado por las condiciones ambientales y, en relación a los componentes numéricos, se encontró una alta correlación entre el rendimiento y el NG, mientras que no se encontró una correlación significativa con el PG. Además, Cepeda y Taran (2008) mencionan que a menor NG mayor es el peso de los mismos. Asimismo, se encontró una correlación alta y positiva entre el NG y el NV, pero no se encontró una correlación significativa con el NG por vaina (Nico et al., 2018).

Según Kantolic y Satorre (2004) existe una fuerte base experimental para poder afirmar que el NG de soja se ha visto limitado por su actividad fotosintética, es decir por su incapacidad para fijar y sostener el crecimiento de las estructuras reproductivas. Temperaturas medias mayores a 25°C durante la etapa R1-R5 generan un menor NV, semillas por vaina y rendimiento (Choi et al., 2016). Se produce un alto número de flores por planta, pero la proporción de estas que quedan fijadas y producen granos aportando al rendimiento es muy baja, por lo tanto, entender la importancia del aborto de flores es necesario para comprender como la planta establece su producción final (Jiang & Egli, 1993). En cuanto al aborto de estructuras reproductivas, se han visto pérdidas entre 27% y 84% (Heitholt et al., 1986; Jiang & Egli, 1993; Sharma et al., 1990).

En distintos experimentos, se ha intentado cuantificar en qué medida las variables post floración como sombreo (Jiang & Egli, 1993), defoliaciones (Board & Tan, 1995), suplementación de luz (Mathew et al., 2000), enriquecimiento con CO₂ (Hardman & Brun, 1971), etc., han incidido sobre el número final de granos por m², resaltando la importancia de la TCC post floración. Para ello es clave destacar la intercepción de RS durante el llenado de granos (Enrico, 2012), ya que el rendimiento de los granos está limitado por la fuente, es decir que depende de la fotosíntesis del canopeo (Egli, 1999). Es de esta forma, que se pudo establecer que el NG está fuertemente relacionado con la fotosíntesis o TCC entre la floración y mediados de llenado de granos, siendo incluso de mayor importancia el período ubicado entre R4 y R5 (Kantolic & Satorre, 2004). Además, el NG por m², tiene una relación positiva con la duración del PC, permitiendo una mayor acumulación de crecimiento durante la etapa de establecimiento de los granos (Kantolic & Slafer, 2005), por una mayor acumulación de RS y recursos por parte del cultivo (Kantolic & Slafer, 2007). A diferencia del NG m², el PG para un genotipo dado bajo diferentes situaciones ambientales se define por variaciones en la tasa de crecimiento aun cuando se modifique la duración del llenado (Egli et al., 1981).

Los meristemas, frutos, semillas y las hojas jóvenes están asociados con las hojas maduras y con la planta en general a través de la relación fuente-destino. Cuando se presenta un estrés moderado debido a altas temperaturas se da una reducción de la fotosíntesis y de la actividad de las fuentes y fosas

simultáneamente (Chaves & Gutiérrez, 2016). Las altas temperaturas resultan en un menor crecimiento, productividad e IC (Taiz & Zaiger, 2006, como se cita en Chaves & Gutiérrez, 2016), debido a que el crecimiento y la respiración de las raíces y demás fosas de la planta decrecen, ya que los asimilados son utilizados para las actividades críticas para sobrevivir al estrés (Chaves & Gutiérrez, 2016).

Según Egli (2010), cuando existen limitaciones por fuente durante las fases iniciales de llenado y el número de semillas no ha sido fijado, la tasa de crecimiento de las semillas se mantiene constante, mientras que el balance de asimilados se regula mediante el aborto de flores y vainas que van apareciendo. Si el NG está fijado y disminuye la producción de asimilados, el balance no logra mantenerse, por lo tanto, el crecimiento de las semillas cae. Además, propone que existen tres mecanismos que actúan cuando se afectan los asimilados lo cual modifica la relación fuente-destino. El primero es el aborto de flores y vainas jóvenes, seguido por el aborto de vainas de máxima longitud, y por último la reducción del crecimiento de las semillas.

En cuanto al PG, según lo expuesto por Molino (2011), la relación fuente-destino durante la etapa de determinación del NG, que se calcula como la TCC por grano fijado, explica el PG. Además, se observó que el PG pudo ser parcialmente explicado por las relaciones fuente-destino establecidas tanto en etapas tempranas (R2-R6) como durante el llenado, mostrando aún más una fuerte asociación con esta última etapa.

2.6 FACTORES DE MANEJO QUE MODIFICAN EL RENDIMIENTO DEL CULTIVO

Las prácticas de manejo más importantes para incrementar el rendimiento son la determinación de la FS ideal y la selección del genotipo más adaptado a la región agroclimática (Ezeaku et al., 2015). La duración del PC aumenta a medida que la planta es expuesta a menores temperaturas y fotoperiodos más largos, siendo la respuesta a esta última variable más dependiente de la sensibilidad fotoperiódica del cultivar utilizado. Es de esta forma entonces, qué variables de manejo como la FS y la selección de cultivares, juegan un rol fundamental a la hora de situar el PC del cultivo en condiciones que beneficien la acumulación de crecimiento durante esta etapa (Kantolic & Satorre, 2004).

2.6.1 Fecha de siembra y su efecto sobre componentes de rendimiento

Según Peixoto et al. (2000) la FS es, probablemente, la práctica cultural más importante en la definición del rendimiento de soja. En las zonas de clima templado las condiciones varían a lo largo del año, por lo que al modificar la FS, se alteran las distintas condiciones ambientales a las que estará expuesto el cultivo durante la estación de crecimiento (Andrade & Cirilo, 2000). Las condiciones que más afectan el rendimiento son la humedad del suelo, la temperatura y el fotoperiodo (Cámara, 1991). Estos dos últimos factores son de suma importancia ya que controlan la duración de los distintos estadios y la

velocidad de varios procesos fisiológicos en la planta (Bodrero, 2003; Tuttolomondo et al., 2006).

Según Andrade y Cirilo (2000), la FS del cultivo de soja deberá ocurrir en una fecha tal que posicione el PC (definido entre R3-R6) ante condiciones ambientales favorables, maximizando la RS incidente y su intercepción, como también la eficiencia de conversión en recursos para la planta. Rodríguez et al. (2015) mencionan que la disponibilidad de recursos va a determinar la TCC. Por su parte, las FS tempranas, podrían generar un mayor rendimiento en comparación a FS tardías, lo que es explicado por el cambio de RS incidente durante el PC (Coll et al., 2011).

Bianchi et al. (2011) sugieren que la siembra tardía de los cultivos puede tener efectos negativos en su desarrollo. Esto se debe a la reducción en la duración de las primeras etapas fenológicas provocada por el acortamiento de los días y el aumento de las temperaturas, donde el cultivo tendrá menos tiempo para interceptar una alta proporción de la RS incidente. Además, el retraso en la FS conduce a una mayor TD durante la etapa vegetativa, lo que resulta en una menor altura de la planta, menos nudos por planta y una disminución significativa en el área foliar y la biomasa del cultivo. Tanto Bhatia et al. (1999), como Chen y Wiatrak (2010) indican que las FS tardías pueden provocar un menor NV por planta, cantidad de ramificaciones, altura de la primera vaina, menor PG y duración de la etapa siembra-floración. Todas estas respuestas del cultivo al atrasar la FS inciden sobre el rendimiento, ya que como mencionan Kantolic y Slafer (2007), el número de semillas y vainas, componentes fuertemente correlacionados con el rendimiento, se ven disminuidos al retrasar la FS.

2.6.2 Grupo de madurez

Según Giménez (2007) el comportamiento fenológico de la soja en diferentes condiciones ambientales es un aspecto relevante a considerar, no solo durante la elección de los cultivares con mayor adaptación a las regiones de producción, sino que también en el ajuste de las prácticas de manejo del cultivo. Asimismo, Egli (1998) sostiene que conocer el comportamiento fenológico de los diferentes GMs permite tener un conocimiento anticipado de la ubicación temporal del PC de determinación del rendimiento.

2.7 IMPORTANCIA DEL AGUA EN EL RENDIMIENTO DE SOJA

2.7.1 Potencial de rendimiento

Se define como rendimiento potencial de una especie, aquel rendimiento que se obtiene en un determinado ambiente en ausencia de estreses abióticos y bióticos. En estas condiciones, el rendimiento potencial depende de la capacidad que tenga la planta de fijar carbono mediante la fotosíntesis, la cual estará regulada por la cantidad de RS que el cultivo sea capaz de interceptar (Otegui,

2009). El rendimiento potencial, no es estático, ni atemporal, por lo cual, varía en el espacio (altitud, latitud y longitud de un lugar con valores determinados de RS y temperatura). Por lo tanto, es un atributo genético que está relacionado directamente con el ambiente, donde materiales de ciclo más corto tienen un mayor potencial de rendimiento por ubicar su PC en momentos de mayor RS (Toledo, 2018).

A su vez Salvagiotti (2009) menciona que los componentes más importantes para lograr estos rendimientos son la cantidad utilizada de agua y la eficiencia en el uso de la misma. A pesar de la propia plasticidad genética de los diferentes GM de la soja, para lograr rendimientos potenciales es imprescindible la ausencia de períodos de estrés hídrico, tanto en la fase vegetativa como en la reproductiva (Otero et al., 2014). Siempre y cuando el agua no sea una limitante, la brecha entre rendimientos potenciales y reales será mínima cuando las variables de manejo como FS y elección cultivar coincidan con períodos donde existan mayor RS incidente y temperaturas óptimas. Para alcanzar la máxima productividad, la oferta de recursos debe estar disponible no solo en la cantidad requerida sino también en el momento en que se están generando los principales componentes de rendimiento (Salvagiotti, 2009).

El rendimiento máximo registrado en soja a nivel mundial fue en Georgia en 2023 y el mismo fue de 13,81 ton/ha (Sents, 2023). En Uruguay, se han logrado rendimientos que oscilan entre 4.500 y 7.892 kg.ha⁻¹ en condiciones donde el agua no fue una limitante (Canosa & Prieto, 2013; Fassio et al., 2016; Giménez, 2014b; Paparcone & Silveira, 2022). Según Álvarez et al. (2015), la brecha entre el rendimiento potencial y real se ve disminuida en cultivos bajo riego, en los cuales se obtiene alrededor del 85 a 95% del rendimiento potencial, mientras que en cultivos sin riego es difícil superar el 50%. En ensayos realizados bajo riego, las FS tempranas de octubre alcanzaron valores de NG.m⁻² entre 3977 y 4478, las FS de noviembre entre 2714 y 3644 NG.m⁻² y en la FS diciembre entre 2483 y 3481 NG.m⁻², lo cual está estrechamente relacionado con el rendimiento (Paparcone & Silveira, 2022; Caracciolo & Rosales, 2023).

2.7.2 Producción de Materia seca

La producción de MS presenta una fuerte relación con la RS y las temperaturas diurnas óptimas para lograr un buen proceso fotosintético de la planta, lo que conlleva a lograr altas TCC y aumenta la duración de las etapas fenológicas (Andrade & Sadras, 2000). En ausencia de limitantes hídricas y nutricionales, el cultivo se debe manejar a modo de que se desarrolle un canopeo que permita a su vez maximizar la intercepción de RS durante la etapa vegetativa (Salvagiotti, 2009). En general, temperaturas elevadas por encima de los 35°C disminuyen la acumulación de biomasa (Ogunkanmi et al., 2022)

Board et al. (1996) señalan que existe una alta correlación entre la MS total acumulada a R5 y el rendimiento, por lo que este parámetro puede ser utilizado como un buen indicador de rendimiento. Esto fue confirmado por diversos autores mediante experimentos donde se evaluó el efecto de diferentes distancias entre hileras (DH), en donde todos concluyeron que a menor DH se incrementaba la acumulación de MS y además, esta mayor acumulación de MS se correlacionó con un mayor rendimiento así como también se observó un aumento en el número de nudos productivos, NV y NG por superficie (Board et al., 1990; Board & Modali, 2004; Martignone et al., 2011).

2.7.3 Deficiencias hídricas y sus efectos sobre el rendimiento

Boyer (1982) afirma que el estrés hídrico es la limitación predominante para el crecimiento y el rendimiento de las plantas a nivel global. En el contexto de la producción de soja de secano en Uruguay, las restricciones hídricas son una de las principales limitantes ambientales a considerar (Giménez & García Petillo, 2011). Según Sawchik y Ceretta (2005), como se cita en Medina y Pereira (2018), en las condiciones de Uruguay la principal limitante de producción en los cultivos de verano es la disponibilidad hídrica. La magnitud de las deficiencias hídricas está muy relacionada con la CAAD de los suelos y el volumen que las raíces son capaces de explorar. Es por esto que la variabilidad interanual en los rendimientos de soja se explican principalmente por las PP ocurridas durante el ciclo del cultivo (Castaño et al., 2011; Sawchik & Ceretta, 2005 como se cita en Medina y Pereira, 2018).

Dado que los suelos tienen una baja CAAD en relación con el consumo de los cultivos, se cubre aproximadamente entre el 20 y el 30% de los requerimientos hídricos de la soja (Giménez & García Petillo, 2011; Molfino & Calífra, 2001). Además, durante los meses de verano en Uruguay, las altas demandas atmosféricas provocan que la demanda por ETP supere la disponibilidad de agua para el cultivo, generando así períodos de déficit hídrico (Capurro et al., 2017). Según Ogunkanmi et al. (2022), al aumentar la transpiración por un aumento de ETP se reduce la actividad fotosintética de las plantas, contribuyendo así a la pérdida de biomasa y rendimiento en grano. Este fenómeno mencionado fue corroborado por los estudios llevados a cabo por Agorio et al. (1988), donde concluyeron a través del estudio de balances hídricos, que las deficiencias hídricas son comunes y probables en el Uruguay.

De acuerdo a lo estudiado por García y Ferrarotto (2009) y Dardanelli et al. (2003), el impacto de las deficiencias hídricas sobre el crecimiento y rendimiento de la soja dependerá no solo de la magnitud de la falta de agua, sino también de la etapa del ciclo de crecimiento en que se presente y del cultivo en cuestión. Según Andriani (2002), en soja se pueden distinguir tres sub-períodos que presentan una respuesta diferencial ante la ocurrencia de deficiencias hídricas. El primero de ellos es el período vegetativo, que se extiende desde la emergencia de la planta hasta los inicios de la floración (VE-R1). El segundo

periodo comprende desde el inicio de la floración hasta el llenado de granos (R1-R5), mientras que el último sub-período corresponde al llenado de granos (R5-R7).

En el período vegetativo el cultivo posee una alta plasticidad ya que es capaz de compensar el estrés provocado por el déficit hídrico. A pesar de no provocar reducciones en el rendimiento final, si tiene efectos como la disminución del área foliar y la altura de la planta (Baigorri & Croatto, 2000). Dardanelli et al. (2003) afirman esto indicando que el estrés hídrico en la etapa vegetativa afecta el proceso de expansión foliar, reduciendo así el IAF y la RS incidente interceptada. Además, Giménez (2014a) menciona que las deficiencias hídricas hasta R3 provocaron disminuciones en la acumulación de MS sin afectar de forma significativa el NG. En cuanto a la intensidad de las deficiencias hídricas, Andriani (2002) sugiere que cuando se reduce en un 40-50% la disponibilidad de agua en el suelo, no se observan reducciones de rendimiento en grano. Sin embargo, en casos más severos (20-40% de AD en suelo), se pueden observar reducciones de rendimiento en grano en torno al 10%.

Según Baigorri y Croatto (2000), la ocurrencia de estrés hídrico entre el inicio de floración e inicio de fructificación (R1-R3) no producirá importantes pérdidas de rendimiento ya que el cultivo produce más flores de las que puede fijar y, además, el período de floración es extenso (hasta R5), permitiéndole al cultivo escaparse de periodos cortos de estrés. Sin embargo, en el período comprendido entre fructificación avanzada y llenado de granos (R4.5 y R5.5) el déficit hídrico tiene un importante impacto sobre el rendimiento final ya que en estas etapas el cultivo presenta una menor capacidad de compensación (Baigorri & Croatto, 2000). Ya hacia el final del ciclo del cultivo, Andrade y Sadras (2000) afirman que las deficiencias hídricas posteriores a R6 afectan principalmente el PG y aquellas que ocurren entre R5 y R6 afectan principalmente el NG.

Por otro lado, según Giménez (2014b) el déficit hídrico en la etapa vegetativa tiene posibilidades de ser compensado en las etapas previas al PC, entre R1 y R3. Los efectos sobre el rendimiento son más perjudiciales cuando las deficiencias ocurren solo en el PC, si se lo compara con un cultivo que viene acumulando deficiencias en etapas vegetativas. Esto último se explica debido a que un bienestar hídrico hasta la etapa R3 va a provocar un elevado crecimiento y un alto número potencial de vainas y granos, lo cual produce una gran competencia por los fotoasimilados entre las vainas durante el PC. En el momento que se presentan deficiencias las vainas más pequeñas son susceptibles de aborto y tienen un impacto negativo en el NG y en el rendimiento. A su vez, Sebben et al. (2018) afirman que las deficiencias hídricas fuera del PC pueden reducir la expansión foliar y la fotosíntesis, afectando el rendimiento si estas reducciones en crecimiento persisten y afectan el crecimiento en el PC.

Las deficiencias hídricas durante el PC, provocaron una menor acumulación de MS por unidad de superficie, lo cual afectó negativamente la TCC durante dicha etapa, resultando en reducciones en el NG por m² (Giménez, 2014a). Además, se produce el aborto floral y aborto de vainas pequeñas en formación, las cuales son más susceptibles. Es por esto que el impacto se verá reflejado en un menor NV, menor número de semillas por vaina y reducciones en el PG (Baigorri & Croatto, 2000).

Andriani (2002) señala que las deficiencias hídricas severas durante la fase de llenado de granos pueden tener un impacto significativo en el rendimiento de la soja, provocando pérdidas de hasta el 40% o incluso mayores. Investigaciones realizadas por Giménez (2014a) respaldan esta afirmación, indicando que la falta de agua durante el PC de la soja puede resultar en pérdidas de rendimiento en grano que oscilan entre el 44% y el 50%. En conclusión, según Kross et al. (2015) el estrés hídrico en soja afecta principalmente el área foliar, la fotosíntesis y la biomasa, lo que a su vez determina el rendimiento final del cultivo.

2.7.4 Demanda de agua

El consumo de agua de los cultivos es el valor de la ETP acumulada en el ciclo que depende de la demanda atmosférica, de la duración del ciclo y del área foliar desarrollada. A medida que aumenta el área foliar, aumenta el consumo de agua del cultivo frente a una misma demanda atmosférica ya que aumenta el agua transpirada que pasa a través de la superficie de las hojas, hasta interceptar el 95% de la radiación fotosintéticamente activa. Esto coincide con un IAF de 4 aproximadamente, dependiendo del cultivar, donde se estabiliza el consumo de agua por transpiración y la evaporación, por más que se incremente el área foliar (Andriani, 2000, como se cita en Gerster & Bacigaluppo, 2009).

La denominación más utilizada cuando se habla de consumo de agua de los cultivos es la del proceso de ETP, que se define como el agua transpirada por las plantas y la evaporada directamente del suelo (Allen et al., 2006). Otegui (2009) señala que la demanda atmosférica es inherente a cada ambiente y se caracteriza a través de la evapotranspiración potencial de referencia del cultivo (ET_o), donde la principal fuerza motriz de la demanda, es la cantidad de RS que alcanza la superficie terrestre. Al principio la evaporación del agua del suelo depende de la RS que llega a la superficie y a medida que avanza el ciclo del cultivo y el tapiz sombrea el suelo, la transpiración se convierte en el gasto principal de agua (Allen et al., 2006).

Para el proceso evapotranspirativo se utiliza la sigla ET_c ya que hablamos de la evapotranspiración de cultivo, mientras que la evapotranspiración real se denomina con las siglas ET_r. Bajo condiciones no limitantes de agua en el suelo ET_r es igual a ET_c, por lo tanto, ET_c podría ser considerada como la ET_r máxima (Andriani, 2016). La ET_r depende principalmente de la demanda atmosférica, la

ocurrencia de PP, la CAAD de los suelos y las características morfo-fisiológicas del cultivo (Giménez & García Petillo, 2011). La ET_c hace referencia al consumo de agua del cultivo mediante la exploración radicular, en el rango de la fracción fácilmente extractable (Ritchie, 1981, como se cita en Andriani, 2016). Esta fracción de AD es el contenido de agua en el suelo que va desde capacidad de campo hasta el umbral o límite de estrés (Andriani, 2016).

La disponibilidad de agua para el cultivo, dependerá no solo de las PP, sino de la velocidad con que se infiltra el agua, del desarrollo radicular y de la CAAD (Andriani et al., 2001, como se cita en Gerster y Bacigaluppo, 2009). La mayoría de los suelos en los que se realiza agricultura en el país, presentan una CAAD que varía entre 80 y 160 mm (Molfino & Califra, 2001), donde en las mejores situaciones la capacidad de almacenamiento de agua de los suelos cubre aproximadamente un tercio de las ET_c estimadas para los cultivos de verano (Della Maggiora et al., 2000). Según Giménez y García Petillo (2011) el rango de ET_c de soja varía entre 455 y 836 mm, y en promedio las ET_c variaron entre 463 y 641 mm. Las estimaciones de las ETr fueron menores que las ET_c en la mayoría de las situaciones agroclimáticas planteadas, y con una variabilidad entre años superior. Asimismo, se destacan los años “Niña” y “Niño” con los menores y mayores valores de ETr respectivamente.

Doorenbos y Pruitt (1977), como se cita en Allen et al. (2006), sugieren que se puede obtener el requerimiento de agua de un cultivo (ET_c), multiplicando la ETo por el término que cuantifica las características del cultivo, conocido como coeficiente del cultivo (K_c). La relación entre ET_c y ETo representa el coeficiente de cultivo (K_c), que adquiere valores cercanos o superiores a 1 durante las etapas de máxima cobertura del suelo, y en la mayoría de las especies de interés, estas etapas coinciden con los periodos asociados a la determinación de rendimiento (Otegui, 2009).

2.7.5 Eficiencia en el uso del agua

La eficiencia de uso del agua (EUA) es la relación entre la biomasa o la producción de granos (kg ha⁻¹) y el consumo de agua en milímetros (mm) necesarios para dicha producción (Toledo, 2013). Para la soja, se registran valores entre 5-6 kg ha⁻¹ mm⁻¹ (Della Maggiora et al., 2000), en promedio se toma un EUA de 8 kg ha⁻¹ mm⁻¹ (Toledo, 2013). Así también, Della Maggiora et al. (2000) indican que la cantidad de agua utilizada por un cultivo se relaciona con la producción de MS y con el rendimiento. Además, menciona que la EUA es el cociente entre MS y ETP. La EUA varía entre especies, dependiendo del tipo de metabolismo C3 o C4, de la composición de biomasa, las características del uso de agua y de la demanda atmosférica donde estas se encuentran.

Aloé y Toribio (2008) sostienen que el rendimiento en grano depende de la cantidad de agua que el cultivo pueda transpirar, la eficiencia con la que se usa el

agua para producir MS y la proporción de la MS que es destinada a la formación de grano. Según Andrade y Sadras (2000), la soja presenta una baja eficiencia fotosintética y además un alto contenido energético del grano, y por lo tanto baja EUA respecto a otros cultivos de verano. Los valores máximos y mínimos según Hattendorf et al. (1988), son para soja entre 5 - 11 kg ha⁻¹ mm⁻¹.

2.8 RIEGO

Se han realizado varios estudios en distintos ambientes, los cuales han demostrado que el rendimiento de soja aumenta con el riego (Doss et al., 1974). Según experimentos realizados por Ogunkanmi et al. (2022), se observan reducciones en rendimiento en torno al 66-71% por déficit hídrico. Según Giménez (2012), los rendimientos obtenidos en soja bajo riego estuvieron entre 4,9 y 7,3 t ha⁻¹, dependiendo del régimen pluviométrico del año, ya que en años con excesos de PP los rendimientos potenciales fueron menores. Las pérdidas por deficiencias hídricas durante el PC fueron las más importantes, variando entre 2,5 a 3,2 t ha⁻¹.

Andriani (2000) sostiene que es necesario conocer la cantidad de agua que consume un cultivo en su ciclo para programar las actividades de riego en los diferentes sistemas de producción. Además, bajo condiciones de riego suplementario, se debe de conocer el consumo diario de agua por partes de los cultivos para poder determinar las necesidades hídricas totales en los diferentes momentos del año. Según Allen et al. (2006) es necesario el riego cuando las PP son insuficientes para compensar las pérdidas de agua por ETP. Es por esto entonces que la aplicación de agua en esos precisos momentos con la cantidad necesaria es el objetivo principal del riego.

Las láminas necesarias a aplicar y los momentos de aplicación de agua se podrán calcular mediante un balance hídrico diario en la zona de exploración radicular. De forma de evitar el estrés hídrico, se deberá aplicar la lámina calculada antes o al momento de agotamiento de la lámina de agua fácilmente extraíble del suelo (Allen et al., 2006). Esto es afirmado por García Petillo (2012), quien indica que el riego es el adecuado cuando se aplica la cantidad de agua necesaria en el momento oportuno; lo que sería antes que el contenido hídrico del suelo le genere al cultivo un estrés que impacte sobre el rendimiento.

Según García Petillo (2012) la condición que se da luego de una lluvia abundante, donde el suelo tiene todos sus macro y microporos llenos de agua, se la conoce como suelo saturado. Como el agua de los macroporos no puede ser retenida, luego de 24 a 72 horas si el suelo no presenta impedimentos físicos para el drenaje del agua, los macroporos se vacían. Esta condición donde los microporos quedan llenos de agua, se la conoce como capacidad de campo (CC) y es la situación ideal para la absorción de agua por parte del cultivo. De la misma forma, Allen et al. (2006), mencionan que después de una lluvia importante o riego, el suelo comenzará a drenar agua hasta alcanzar la CC.

A medida que el cultivo va extrayendo agua, esta misma es retenida cada vez más por parte de la matriz del suelo; llega un punto en que el cultivo ya no es capaz de extraer más agua, a pesar de que aún quede agua en el suelo. Esta condición se conoce como punto de marchitez permanente (PMP), situación en la cual el cultivo muere (García Petillo, 2012). Esto es afirmado por Allen et al. (2006) quienes también indican que, en ausencia de una reposición de agua, el contenido de humedad en la zona de exploración radicular se irá reduciendo debido al consumo por parte del cultivo. A medida que este consumo aumenta, el agua irá siendo retenida cada vez con mayor fuerza por las partículas del suelo, lo cual hará cada vez más difícil su extracción por parte del cultivo. Se conoce entonces al PMP como el momento en que la extracción de agua por parte del cultivo es nula.

Según García Petillo (2012), el cultivo entonces puede extraer el agua comprendida entre la CC y el PMP; esa cantidad de agua se la conoce como AD. Sin embargo, hay un momento en que a pesar de que el cultivo sigue extrayendo agua, las cantidades no son las suficientes para satisfacer las demandas atmosféricas. Es en estos momentos donde el cultivo sufre estrés aun con AD en el suelo. El umbral de riego (UR) se define como el contenido de agua en el suelo en el cual la extracción de agua por la planta cambia de condiciones de confort hídrico a condiciones de estrés hídrico. Es decir, es el punto en el cual el contenido de agua en el suelo es bajo y la planta comienza a sufrir los efectos negativos de la falta de agua. El UR también podría expresarse como el porcentaje máximo de agotamiento del AD del suelo para no sufrir ningún estrés (p%).

Allen et al. (2006) indican que el valor de p es resultado del poder evaporante de la atmósfera. Mencionan que se utiliza un valor de p determinado para cada etapa de desarrollo del cultivo, en lugar de variar su valor cada día. Se puede ajustar el valor de p de forma numérica, según la tasa de ETc, $p = 0,5 + 0,04 (5 - ETc)$, en donde p es limitado a $0,1 \leq p \leq 0,8$ y la ETc es en mm d⁻¹. Además, García Petillo (2012) también concluye que el UR y el p% son en función tanto del cultivo como de su etapa de desarrollo, y también dependen del tipo de suelo y la demanda atmosférica. El contenido de humedad entre CC y UR se lo conoce como el agua fácilmente disponible (AFD). En fin, concluye que un riego correcto sin estrés para el cultivo sería dejar disminuir la humedad del suelo hasta llegar al UR, luego en ese momento aplicar una cantidad de agua igual al AFD para llevar nuevamente el suelo a CC. Esa cantidad de agua aplicada con el riego igual a la AFD se la conoce como lámina neta (LN).

Sin embargo, tal y como mencionan Capurro et al. (2017), satisfacer los requerimientos totales de ETc requiere de grandes cantidades de agua. Es por esto, que llevaron a cabo experimentos donde se aplicó la técnica de riego deficitario controlado, esta consiste en aplicar agua por debajo de los requerimientos totales del cultivo. Este experimento concluyó que los riegos con 50% de la ETc hasta el estado fenológico R4, y cubriendo siempre los

requerimientos entre R4 hasta R6, no muestran repercusiones en el rendimiento utilizando menos agua.

Según Montoya et al. (2017), el uso de riego suplementario en el cultivo de soja provocó un aumento tanto en la producción de materia seca total como en el rendimiento en grano. La mejor estrategia de riego, maximizando el rendimiento y el margen económico, fue proveer el 75% de los requerimientos hídricos entre los estadios R1 y R8, siempre y cuando la lluvia en la etapa vegetativa permita un correcto crecimiento y desarrollo. Además, Foroud et al. (1993) concluyeron que si el agua de riego es limitante no aplicarla en el estadio R2 puede ser aceptable, pero es indispensable para alcanzar altos rendimientos potenciales el riego en el estadio R5. Esto fue afirmado por Karam et al. (2005) quienes mencionan que en áreas donde el recurso agua es limitado, no aplicar riego en R2 no afectó el rendimiento significativamente, demostrando la capacidad de compensación de la planta en este estadio.

2.9 HIPÓTESIS

Las fechas de siembra de noviembre son las que provocan mejores rendimientos en soja comparado a las FS tempranas de octubre o las tardías de diciembre, en seco.

Las fechas de siembra, de octubre son las que provocan mejores rendimientos en soja comparado a las FS de noviembre o las tardías de diciembre, en condiciones de riego.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO

El experimento se llevó a cabo en el campo experimental de riego de Facultad de Agronomía de la Estación Experimental “Dr. Mario A. Cassinoni”, ubicada sobre la ruta 3, km 363, en el departamento de Paysandú, Uruguay (32°22' S 58 ° 03' O) en el año agrícola 2021/2022. El suelo del campo experimental donde fue realizado en la EEMAC, es clasificado como Brunosol sub-eutríco típico perteneciente a la unidad San Manuel, incluida dentro de la formación Fray Bentos, según la carta de reconocimiento de suelos del Uruguay a escala 1:1000000 (Durán, 1976).

Tabla 1

Características hidrológicas principales del suelo del campo experimental de riego de la EEMAC

Horizonte	Profundidad (cm)	Dap (gr/cm ³)	CC (mm)	PMP (mm)	CAAD (mm)
A	0-20	1,25	54	28	26
B	20-70	1,34	235	150	85
AB	0-70		289	178	111

Nota. Dap: Densidad aparente. CC= Capacidad de campo. PMP= Punto de marchitez permanente. CAAD= Capacidad de almacenaje de agua disponible.

3.1.1. Manejo experimental

La primer FS a evaluar fue el día 9 de octubre, la segunda el 10 de noviembre y la tercera el 11 de diciembre. La variedad utilizada en las tres fechas de siembra DM 50i17 IPRO STS del GM V corto con hábito de crecimiento indeterminado. La población objetivo fue de 350.000 pl.ha⁻¹, utilizando una distancia entre hileras de 0,40 m, se realizó un ajuste manual de población mediante raleo de plantas en V2 logrando de esa manera la población objetivo.

El ensayo se mantuvo libre de malezas, plagas y enfermedades. Para ello se realizaron tres aplicaciones de glifosato, a 2 lt.ha⁻¹ para el control de malezas, mientras que para el control de chinches (*Nezara virídula*) se realizó una aplicación del producto comercial Engeo entre R3 y R4 a una dosis de 0,2 lt.ha⁻¹.

En la Tabla 2, se puede observar las fechas en que se desarrollaron los estadios fenológicos VE, R1, R4, R6 (Fehr & Caviness, 1977) durante el ciclo del

cultivo en los distintos tratamientos, además de esto se presenta la fecha de cosecha para cada ocasión.

Tabla 2

Calendario de los eventos fenológicos para las distintas FS

	FS octubre	FS noviembre	FS diciembre
Siembra	9/10/21	10/11/21	11/12/21
VE	19/10/21	17/11/21	17/12/21
R1	24/11/21	27/12/21	27/1/22
R4	30/12/21	4/2/22	22/2/22
R6	8/2/22	14/3/22	25/3/22
Cosecha	21/3/22	13/4/22	19/4/22

3.1.2. Tratamientos

- 1) Fecha de siembra: 9 de octubre con riego
- 2) Fecha de siembra: 9 de octubre sin riego
- 3) Fecha de siembra: 10 de noviembre con riego
- 4) Fecha de siembra: 10 de noviembre sin riego
- 5) Fecha de siembra: 11 de diciembre con riego
- 6) Fecha de siembra: 11 de diciembre sin riego

En el ensayo se utilizaron 24 unidades experimentales, ya que cada tratamiento tuvo cuatro repeticiones. Cada unidad experimental estuvo constituida por 5 hileras de plantas con un largo de 6 metros y un ancho de 2,8 metros. En los tratamientos bajo riego, se buscó mantener el porcentaje de AD por encima del 40% en las etapas no críticas del cultivo y por encima del 60% durante el período crítico (PC) de forma de asegurar el bienestar hídrico del cultivo.

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. La lámina de riego a aplicar se ajustó mediante un balance hídrico de suelos, simplificado y de paso diario, en el cual se planificó aplicar la lámina correspondiente cada vez que se llegará a los umbrales de riego indicados. Se utilizó la siguiente fórmula: $\Delta H = R + PP - ET_c$, donde ΔH corresponde a la variación de contenido de agua en el suelo (mm), R es el riego (mm), PP ocurridas (mm) y la evapotranspiración del cultivo (ET_c) que se calcula a partir de la evapotranspiración de referencia (ET_o) y el coeficiente del cultivo (K_c). La ET_o se

calculó en base a la ecuación de FAO Penman-Monteith y se usaron los Kc recomendados por FAO (Allen et al., 2006) para las diferentes etapas del cultivo.

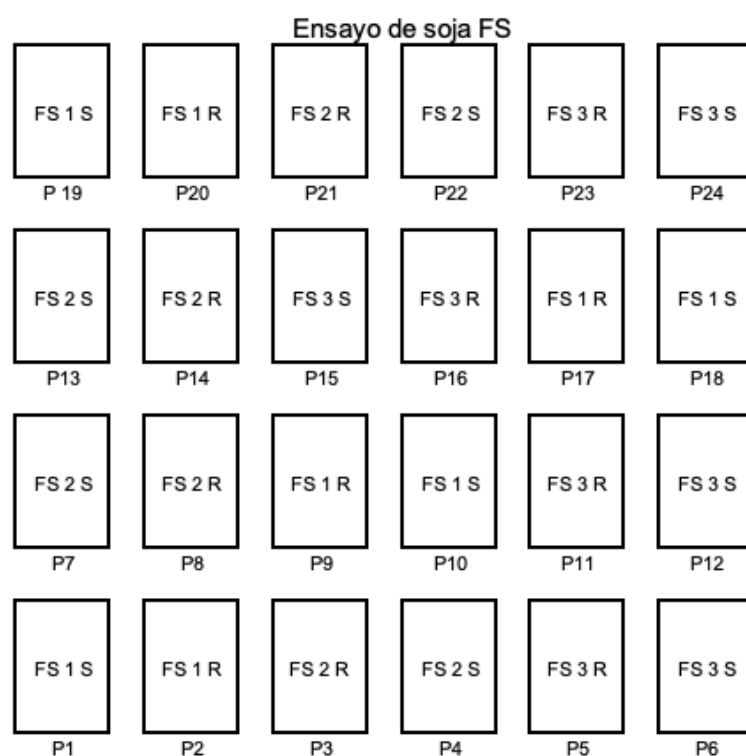
3.2 DISEÑO ESTADÍSTICO DEL EXPERIMENTO

3.2.1 Diseño experimental

Se utilizó un diseño de parcelas divididas donde hay una parcela mayor y una parcela menor. La parcela mayor fue la FS y la menor la disponibilidad hídrica, en condiciones de riego o seco, la cual fue sorteada dentro de la mayor. El diseño tiene dos fuentes de variación: los tratamientos y las repeticiones, donde los tratamientos fueron asignados al azar a las unidades experimentales dentro de cada bloque.

Figura 1

Croquis del diseño experimental



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), fecha de siembra seco (FS3 S). Parcelas de 6m de largo por 2,8m de ancho.

3.2.2 Análisis estadístico

El análisis del experimento se realizó mediante el programa "InfoStat" en su versión estudiantil. Con el mismo se realizaron, análisis de varianza mediante el cual se descompone la variación total en tantos componentes como tenga el modelo, y se realizó una prueba de comparación múltiple (test de Tukey) al 5% para estudiar la significancia de contrastes simples.

3.3 DETERMINACIONES REALIZADAS

3.3.1 Determinaciones durante el ciclo del cultivo

En el ciclo del cultivo, se realizaron muestreos de MS en los estadios R1, R4 y R6 en 2 metros lineales en cada tratamiento, donde se midió peso húmedo, peso seco, tamaño de vainas en R4 y NG por vainas en R6. Para obtener el peso seco, se colocaron las muestras recogidas a campo en una estufa de secado a una temperatura de 60°C. Las mediciones, tuvieron como objetivo evaluar la acumulación de materia seca, el crecimiento y desarrollo de las vainas y la tasa de crecimiento promedio del cultivo durante el período crítico.

3.3.2 Determinaciones a cosecha

Se estimó el rendimiento en cada parcela cosechando 12 metros lineales, en los que se midió el PG, el peso total de cada muestra y el porcentaje de humedad. Para la estimación de los componentes de rendimiento se utilizaron dos metros lineales de hileras centrales para evitar el efecto "borde" y se midió la altura de la planta, número de nudos por planta, número de vainas, número de granos por vainas y número de granos por planta.

3.3.3 Cálculos realizados

Para determinar el número de granos.m⁻² se realizó una estimación mediante el siguiente cálculo:

$$NG.m^{-2} = [\text{Rendimiento (kg. ha}^{-1}) / \text{PG}] \times 100$$

Para la determinación de la suma térmica en grados días (GD) se realizó la sumatoria de los GD con temperatura base 10°C, acumulados durante las diferentes etapas fenológicas del cultivo (VE, R1-R4, R4-R6, R6-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 EN EL PERÍODO DEL CULTIVO

3.4.1 Precipitaciones

Figura 2

Precipitaciones mensuales acumuladas en el periodo 2002-2019 y en el periodo 2021-2022

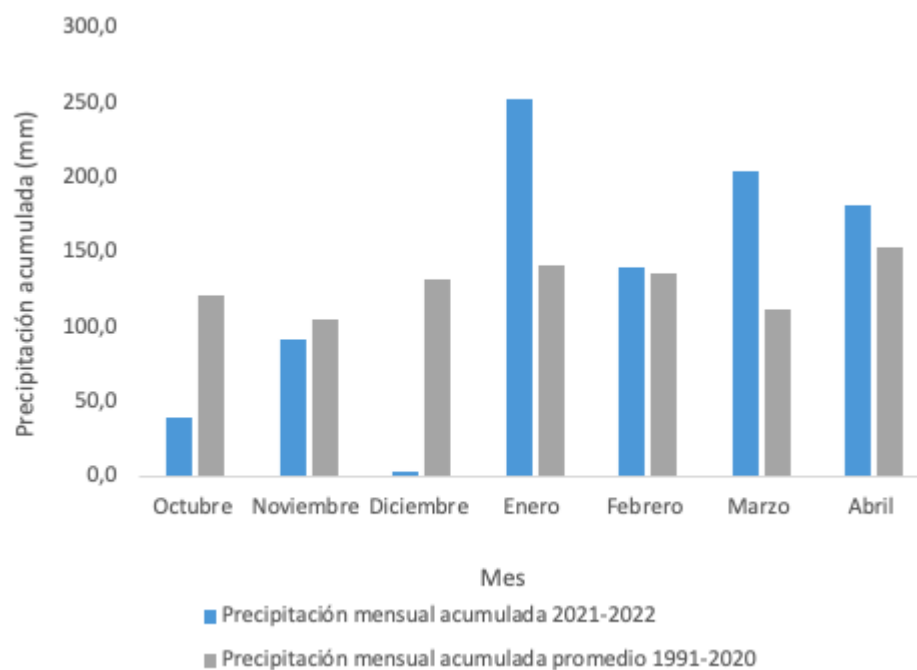


Tabla 3

Precipitaciones acumuladas en cada periodo del cultivo

Fecha de siembra	Precipitación acumulada en el periodo vegetativo (mm)	Precipitación acumulada en el periodo R1-R4 (mm)	Precipitación acumulada en el periodo crítico R4-R6 (mm)	Precipitación acumulada en el período R6-R8 (mm)	Precipitación acumulada en el total del ciclo (mm)
9 de octubre	68	35	253	275	631
10 de noviembre	35	253	262	108	659
11 de diciembre	252	17	285	70	624

3.4.2 Radiación solar

En la Tabla 4 se observa la radiación incidente acumulada para las distintas FS y en cada etapa fenológica del cultivo.

Tabla 4

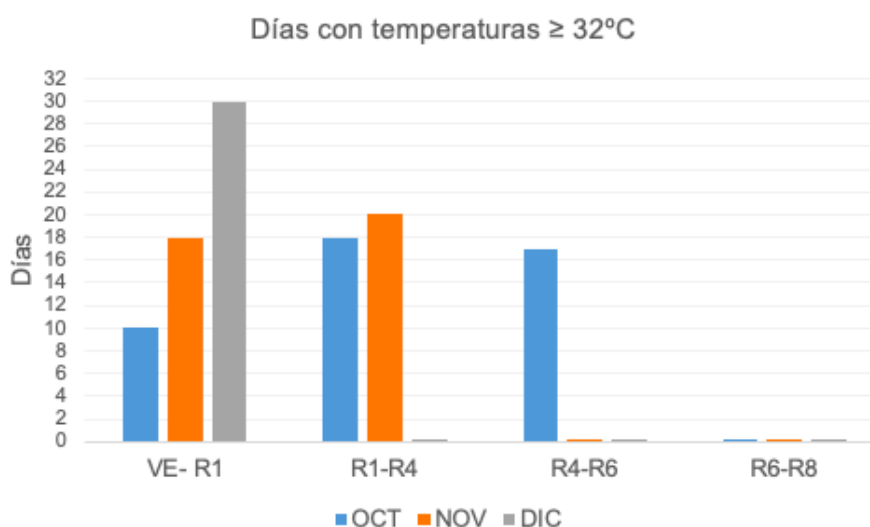
RS acumulada en las diferentes etapas y en el ciclo total para las diferentes FS

Fecha de siembra	Radiación incidente acumulada en el periodo vegetativo (MJ.m ⁻²)	Radiación incidente acumulada en el periodo R1-R4 (MJ.m ⁻²)	Radiación incidente acumulada en el periodo crítico R4-R6 (MJ.m ⁻²)	Radiación incidente acumulada en el período R6-R8 (MJ.m ⁻²)	Radiación incidente acumulada en el total del ciclo (MJ.m ⁻²)
9 de octubre	871	938	839	753	3401
10 de noviembre	1054	883	645	512	3094
11 de diciembre	981	535	497	392	2405

3.4.3 Temperatura

Figura 3

Días con temperaturas mayores o iguales a 32 °C por periodo en cada FS



4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

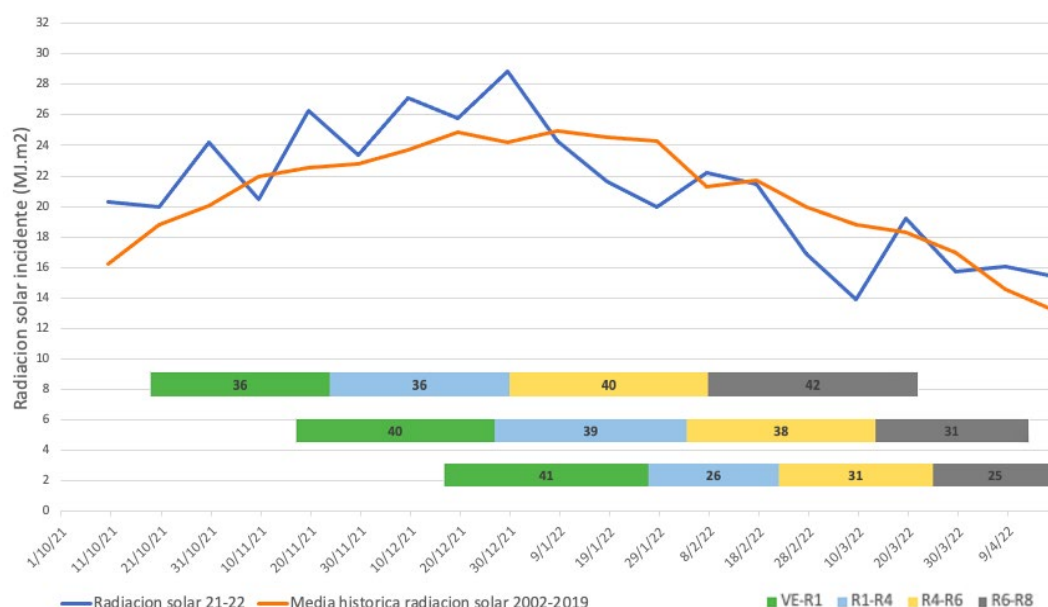
4.1 DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1.1 Radiación solar incidente en las etapas fenológicas del cultivo y duración de las etapas fenológicas según la fecha de siembra

En la Figura 4, se presenta la RS a lo largo del ensayo para el periodo 2021-2022 y la RS incidente acumulada en una media histórica del 2002 al 2019. Además, se presenta la duración de las etapas fenológicas de soja para las tres fechas de siembra evaluadas.

Figura 4

RS por décadas mensuales en las etapas fenológicas para las distintas FS



En la Figura 4, se puede observar que la RS incidente fue mayor para la FS de octubre con un acumulado de 3401 MJ.m^{-2} , siendo 9% superior a noviembre (3094 MJ.m^{-2}) y 30% superior a diciembre (2405 MJ.m^{-2}). Se identificó que al retrasar la FS se produjeron descensos en los niveles de RS incidente en el total del ciclo. La mayor o menor duración del ciclo regulada por la temperatura y por el fotoperiodo (Kantolic, 2008; Toledo, 2018), explican las diferencias de acumulación de RS; la FS de octubre con 154 días acumuló mayor cantidad de RS que noviembre y diciembre, con una duración de 148 y 123 días, respectivamente.

En los estadios reproductivos, la RS incidente acumulada fue de 2530, 2040 y 1424 MJ.m^{-2} para las fechas de octubre, noviembre y diciembre, respectivamente. En el PC se acumularon 839, 645 y 497 MJ.m^{-2} , manteniendo la tendencia mostrada anteriormente, favoreciendo a las FS más tempranas. Una mayor duración de las etapas y del total del ciclo llevaron a que la FS de octubre sea la que recibió mayor RS durante la totalidad del período reproductivo, incluido el PC.

En el período vegetativo la RS incidente acumulada fue 871, 1054 y 981 MJ.m⁻² para las FS de octubre, noviembre y diciembre. La mayor RS recibida por la FS de noviembre, no se explica por un largo mayor de la etapa ya que difieren muy poco en número de días, sino que es explicado por los niveles de RS mayores durante este período superando la media histórica en la totalidad de la fase. La FS de octubre, alcanzó elevados niveles de RS, ya que, en su mayoría, la etapa presentó valores por encima de la media histórica, mientras que en diciembre comenzó con altos niveles de RS y disminuyó hacia el final de la fase vegetativa.

La RS promedio, presentó su máximo valor en la última década de diciembre con 28,8 MJ.m⁻², donde se ubicó el período de formación de vainas (R4) para la FS de octubre; fin del estado vegetativo y comienzo del reproductivo para la FS de noviembre y estado vegetativo para la FS de diciembre. La RS interceptada depende de la eficiencia con que el canopeo intercepta a esta (Cárcova et al., 2003), por lo que se puede decir que en la FS de octubre se interceptó con mayor eficiencia esos valores de RS debido al estado fenológico que se encontraba al momento del máximo valor de RS.

En las tres décadas de enero, la RS se encontró por debajo de la media, incluso un 18% inferior a la media histórica en la última década del mes, fecha en la cual el cultivo sembrado en octubre se encontraba entre R5 y R6 viéndose afectados los componentes del rendimiento (Toledo, 2018). Para la FS de noviembre, la RS incidente al principio del PC presenta valores por encima de la media, sin embargo, desde la mitad del PC hacia el final del mismo, tiene un gran descenso llegando a los valores mínimos durante el ensayo, repercutiendo también en los componentes de rendimiento. Por último, en diciembre la RS tuvo un comportamiento por debajo de la media en la mayoría del PC, sin embargo, hacía el final del mismo (llenado de grano), superó los valores medios históricos teniendo un efecto positivo sobre el PG. Dicha RS influyó en el crecimiento ya que existe una correlación positiva entre RS y la TCC en el periodo R1-R7, lo cual afecta los componentes de rendimiento, coincidiendo con lo mencionado por Kantolic (2003), Sobko et al. (2020) y Nico et al. (2018).

En conclusión, la FS de octubre permitió una mayor RS incidente que las FS de noviembre y diciembre, debido a un largo de ciclo mayor. Además, la FS temprana, permitió un mayor aprovechamiento de los valores máximos de RS debido al estado fenológico en que se encontraba el cultivo. Al ubicar el PC, en condiciones de RS más favorables se busca lograr una mayor acumulación de RS, lo cual permite alcanzar rendimientos elevados, sin embargo, la distribución de la misma no es siempre uniforme. En el ensayo, los niveles de RS para la FS de octubre se ubicaron por encima de la media histórica entre VE-R4, pero por debajo de la media durante el periodo de llenado de grano y posterior al mismo.

4.1.2 Temperaturas mínimas, medias y máximas.

En la Tabla 5, se presentan las temperaturas mínimas, medias y máximas del año de estudio y las temperaturas medias de la serie de 2002 a 2019 para las diferentes FS y sus respectivas etapas fenológicas: VE-R1, R1-R4, R4-R6 y R6-R8.

Tabla 5

Temperaturas mínimas, medias, máximas y medias de la serie histórica por FS

Fecha de siembra	Temp. mínima	Temp. media	Temp. máxima	Temp. media serie Histórica 2002-2019
VE- R1				
Octubre	14,9	21,9	28,8	19,9
Noviembre	16,4	23,9	30,9	22,6
Diciembre	20,5	27,1	34,2	24,6
R1-R4				
Octubre	17,2	24,6	31,7	23,1
Noviembre	20,9	26,6	32,6	24,9
Diciembre	20,9	23	25,2	24,2
R4-R6				
Octubre	20,5	25,9	31,6	24,8
Noviembre	19,6	21,9	24,3	23,3
Diciembre	16,6	20,6	24,5	22,1
R6-R8				
Octubre	18,7	21,5	24,2	22,8
Noviembre	13,3	18,5	23,8	20,5
Diciembre	12,4	17,4	22,9	19,9

En relación, al período VE-R1, en todas las FS las temperaturas fueron superiores a la media de la serie histórica, además, en la FS de diciembre el cultivo

se desarrolló a mayores temperaturas que la FS de octubre y noviembre. Según Salvagiotti (2009) las temperaturas óptimas deben estar por encima de 20°C, esto es necesario durante el período vegetativo, para favorecer la germinación de las semillas y un normal crecimiento. Además, a medida que aumenta la temperatura menor es la duración de cada período (Salvagiotti, 2009), sin embargo, en el ensayo no ocurrió lo dicho ya que se da un aumento en VE-R1, lo cual puede verse explicado por una modificación en la sensibilidad al fotoperíodo debido a condiciones subóptimas de temperatura quedando sin respuesta al mismo (Toledo, 2018).

La duración del período reproductivo, se vio afectada principalmente por el fotoperíodo, coincidiendo con lo afirmado por Kantolic (2008), a medida que se acortan los días aumenta la velocidad de desarrollo y se adelanta el inicio de la floración (Toledo, 2018), provocando que la FS de diciembre se acorte más que las FS de octubre y noviembre. Al atrasar la FS, se reduce la duración del ciclo básicamente por el acortamiento de la etapa R1-R8 tal como indica Toledo (2013). A pesar de que la FS de octubre, presentó mayores valores de temperatura, la duración de la etapa reproductiva es mayor debido a que es regulada conjuntamente con el fotoperíodo (Giménez, 2007; Kantolic, 2008).

En cuanto al período entre inicio de floración y plena fructificación (R1-R4), las temperaturas promedio fueron mayores a la media histórica, a excepción de la FS de diciembre. Esto afectó al cultivo debido a que en los estadios reproductivos los órganos presentan mayor sensibilidad al estrés térmico, en comparación a los estadios vegetativos, tal como indican Thuzar et al. (2010). Entre el 17 de diciembre y el 3 de enero, se presentaron 16 días con temperaturas máximas mayores a 32°C, incluso con 4 días consecutivos superando los 38°C llegando a 39,8°C. Este período coincidió con el final de R1-R4 de la FS de octubre y el inicio de R1-R4 para la FS de noviembre. Además, si observamos en la Figura 3 en este periodo se dan 18 y 20 días con temperaturas por encima de 32°C para las FS de octubre y noviembre, respectivamente, viéndose afectados los componentes de rendimiento debido al estrés térmico coincidiendo con Huxley et al. (1976), Dornbos y Mullen (1991), Gibson y Mullen (1996).

No solo hay que hacer referencia a las temperaturas máximas, sino que es de importancia destacar el efecto de las temperaturas medias sobre el desempeño del cultivo. En los últimos 12 días del mes de diciembre, 8 días tuvieron temperaturas medias superiores a 27,5°C, coincidiendo con el final de la etapa R1-R4 de la FS de octubre, lo cual según Heinemann et al. (2006) afecta el NG. Lo mismo ocurre en el mes de enero, durante 10 días la temperatura superó los 27,5°C de media, coincidiendo con el periodo R1-R4 de la FS de noviembre.

Se puede observar que en el PC, la FS de octubre se enfrentó a temperaturas que superaron a la media histórica; no así, las FS de noviembre y

diciembre que estuvieron por debajo de la media. La FS de octubre con temperatura media de 25,9 °C durante el PC, estuvo expuesta a 4 y 5,3°C por encima de las temperaturas medias de las FS de noviembre y diciembre, respectivamente. En la primera mitad del PC de la FS de octubre 11 de 20 días superaron los 26°C de media, viéndose afectado el desarrollo de las vainas, mientras que en la segunda mitad 10 de 20 días superan los 24°C de media por lo que se ve afectado el desarrollo de las semillas (Salvagiotti, 2009). Cabe destacar, que varios días superaron los 30°C de temperatura media, y que durante la etapa R4-R5 transcurrieron cinco días, desde el 11 al 15 de enero, con temperaturas por encima o igual a 39,6 °C. A su vez, fue la única FS que presentó temperaturas máximas superiores a 32° en el PC (Figura 3).

En conclusión, todas las FS presentaron temperaturas por encima de la media histórica para el periodo vegetativo. En la FS de octubre, el cultivo se enfrentó a temperaturas por encima de la media hasta el estadio R6. Por su parte, la FS de noviembre, estuvo sometida a temperaturas por encima de la media únicamente en la etapa reproductiva temprana (R1-R4), mientras que la FS de diciembre se encontró por debajo de la temperatura media durante todo su periodo reproductivo. En cuanto a las temperaturas máximas, la FS de octubre se destaca por presentar 35 días entre R1- R6 con temperaturas superiores a 32°C, mientras que la FS de noviembre presenta 20 días con temperaturas mayores a esta durante la etapa R1-R4, tal como se puede ver en la Figura 3. Por su parte, la FS de diciembre se enfrenta a las temperaturas máximas durante el periodo vegetativo.

4.1.3 Suma térmica de las etapas fenológicas del cultivo según la fecha de siembra

En la Tabla 6, se muestra la suma térmica de las etapas fenológicas VE-R1, R1-R4; R4-R6; R6-R8 (Fehr & Caviness, 1977), para las diferentes FS.

Tabla 6

Sumas térmicas de las etapas fenológicas vegetativas y reproductivas para las distintas FS

Suma térmica	Octubre	Noviembre	Diciembre
VE-R1	427	548	711
R1-R4	520	653	339
R4-R6	643	454	328
R6-R8	482	266	191
Total	2071	1920	1569

Se puede apreciar en la Tabla 6, las diferencias de suma térmica en los diferentes estadios del cultivo en donde las sumas térmicas acumuladas en todo el ciclo son mayores para la FS de octubre, particularmente en el PC. En el ensayo, la suma térmica total de la FS de octubre fue mayor en 151 GD que noviembre y 520 GD mayor que diciembre, asociado a un mayor largo de ciclo de la FS temprana. Si observamos el período vegetativo, se puede ver que la suma térmica fue mayor para la FS de diciembre, seguido por noviembre y por último la de FS de octubre, lo que está asociado a las menores temperaturas medias (Tabla 5) durante esta etapa para las FS de octubre y noviembre con respecto a la FS de diciembre.

En el período reproductivo entre R1-R8, la FS de octubre acumuló 1644 GD, lo cual es 272 GD superior a lo que se registró en noviembre y 786 GD superior a diciembre; esta diferencia en GD se explica por las temperaturas y por el largo del ciclo, el cual está regulado por la respuesta fotoperiódica. Esto se debe al retraso en la FS, el cultivo tiene que completar sus etapas fenológicas en menor período de tiempo dado por la respuesta fotoperiódica, ya que según lo mencionado por Toledo (2013), al atrasar la FS se reduce la duración del ciclo por el acortamiento en días de R1 a R8, no solo en la etapa reproductiva, sino que también hay una reducción en la etapa vegetativa.

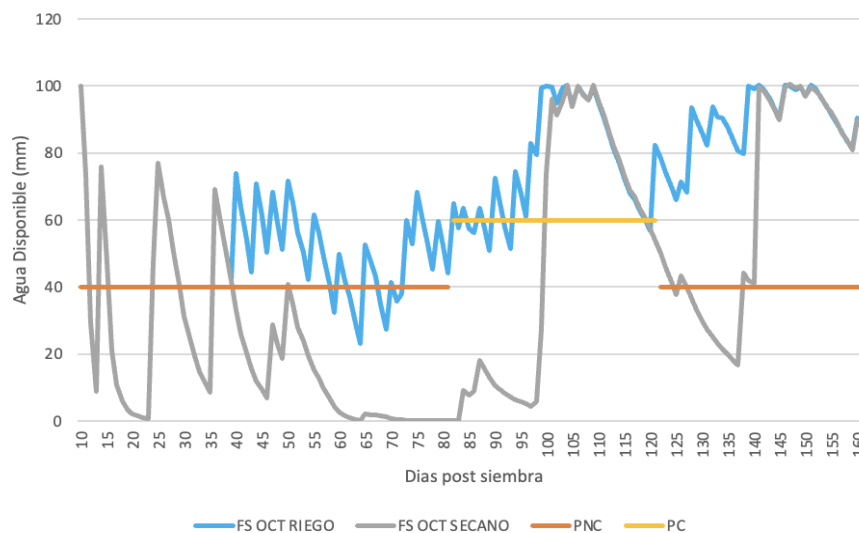
Durante el PC, se aprecia una diferencia en la acumulación de suma térmica cuando se comparan las FS, siendo estas de 189 y 315 GD menos para la FS de noviembre y diciembre, respectivamente, si se compara con la FS de octubre. En la totalidad del ciclo la FS de octubre acumuló 151 GD más que la de noviembre y 502 GD más que la FS de diciembre. Las altas temperaturas por retrasar la FS provocan una reducción de la duración total del ciclo, por ende, la RS interceptada disminuye.

4.1.4 Evolución del agua disponible en el suelo

En las Figuras 5, 6 y 7, se presenta la evolución del agua disponible bajo condiciones de riego y seco para las diferentes FS.

Figura 5

Evolución del agua disponible para la fecha de siembra de octubre



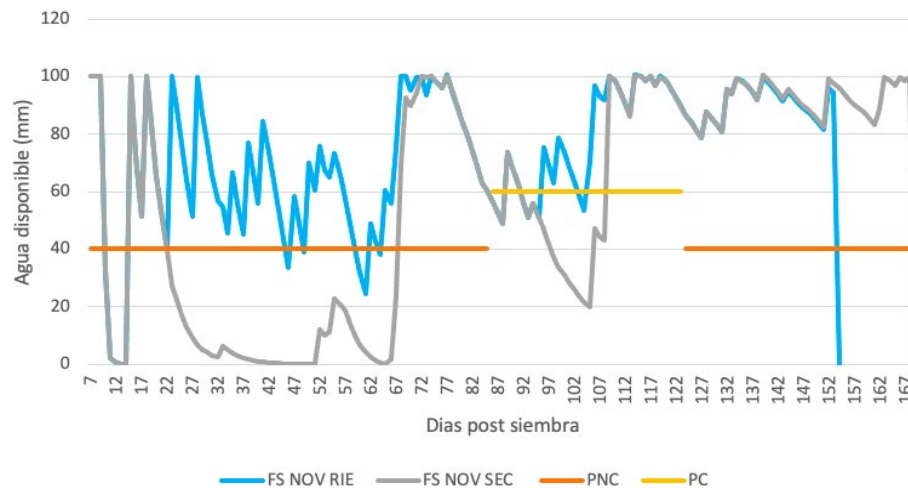
Nota. La línea gris representa la evolución del agua disponible para la fecha de siembra de octubre en seco, mientras que la celeste representa el agua disponible en el cultivo bajo riego. La barra de color naranja representa el periodo no crítico de determinación del rendimiento y la barra amarilla el periodo crítico.

Para la FS de octubre en seco, se puede apreciar que el AD se encontró en momentos por debajo del UR utilizado tanto en el PC como en el período no crítico, 60% y 40% respectivamente. Durante la etapa no crítica, 67 días se encontraron debajo de 40%, mientras que durante el PC 20 días se encontraron por debajo del umbral establecido como óptimo para el desarrollo del cultivo. Los valores por debajo del umbral se explican por las escasas PP, siendo los de mayor impacto los presentados durante el PC de determinación del rendimiento (Baigorri & Croatto, 2000). En el día 91 post siembra comienzan una serie de eventos de lluvia a mediados del PC, donde el AD aumenta por encima del UR, y luego vuelve a descender cuando termina el PC hacia el llenado de grano, fase más crítica en cuanto a la ocurrencia de déficit hídrico (Farias et al., 2007).

En la FS octubre bajo riego tuvo períodos en lo que se encontró por debajo del UR en la fase vegetativa y reproductiva temprana, fases en las cuales el cultivo tiene la capacidad de compensar (Baigorri & Croatto, 2000). Se pueden apreciar diferencias en el AD entre el cultivo de seco y bajo riego principalmente en el final de la fase vegetativa y en la mitad del PC.

Figura 6

Evolución del agua disponible para la fecha de siembra de noviembre

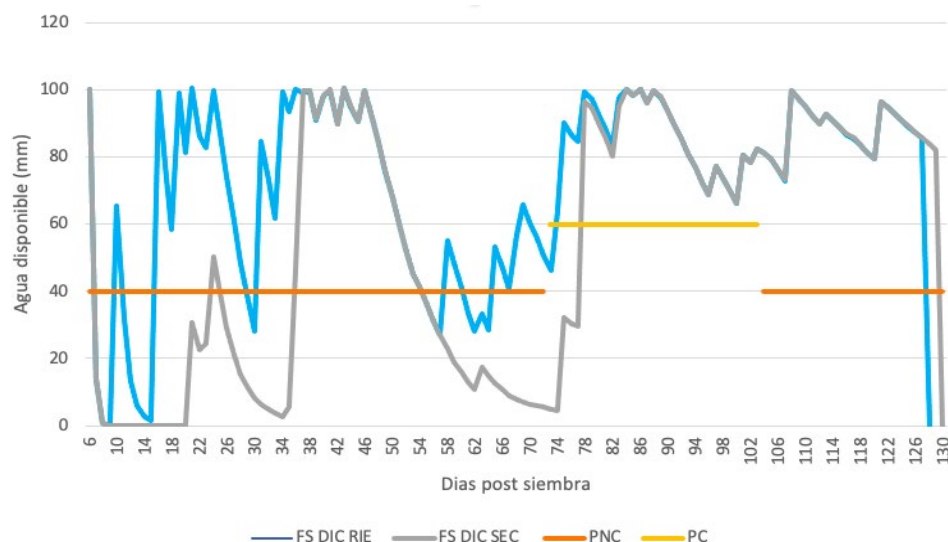


Nota. La línea gris representa la evolución del agua para la fecha de siembra de noviembre en seco, mientras que la celeste representa el cultivo bajo riego. La barra de color naranja representa el periodo no crítico de determinación de rendimiento y la barra amarilla el periodo crítico.

Para la FS de noviembre, en condiciones de seco, se puede apreciar que el AD se encuentra por debajo del UR durante gran parte del periodo reproductivo temprano, 18 días antes de comenzar el PC los niveles de agua superan los UR establecidos debido a la ocurrencia de PP, permitiendo que el cultivo se desarrolle en condiciones de bienestar hídrico. Luego, en la mitad del PC se llegan a niveles de 20% de AD, momento en el cual la capacidad de compensación del cultivo es baja y el déficit hídrico tiene un mayor impacto (Baigorri & Croatto, 2000). A partir del día 108 hacia el final del ciclo del cultivo los niveles de AD estuvieron siempre por encima del UR, abarcando el final del PC, llenado de grano y madurez fisiológica. Por otro lado, los tratamientos con riego se encuentran bajo déficit hídrico durante 5 días, al inicio del ciclo, luego se desarrolla en su mayoría bajo bienestar hídrico, a excepción de escasos días donde se alcanzan niveles por debajo del umbral durante la fase reproductiva temprana y durante el PC.

Figura 7

Evolución del agua disponible para la fecha de siembra de diciembre



Nota. La línea gris representa la evolución del agua para la fecha de siembra de diciembre en secano mientras que la celeste representa el cultivo bajo riego. La barra de color naranja representa el periodo no crítico de determinación de rendimiento y la barra amarilla el periodo crítico.

En el caso de la FS de diciembre, en condiciones de secano, ocurre lo opuesto a lo ocurrido en la FS de noviembre; el cultivo sufrió condiciones de estrés hídrico en el período vegetativo y reproductivo temprano, afectando así la expansión foliar y la captura de RS (Baigorri & Croatto, 2000; Dardanelli et al., 2003). A medida que transcurre el ciclo y las condiciones hídricas mejoran, el AD durante la mayor parte del PC se encuentra por encima del UR. A esto, se le suma que las condiciones hídricas durante el llenado de grano fueron óptimas ya que nunca se encontró por debajo del UR, logrando así condiciones de bienestar hídrico para el llenado.

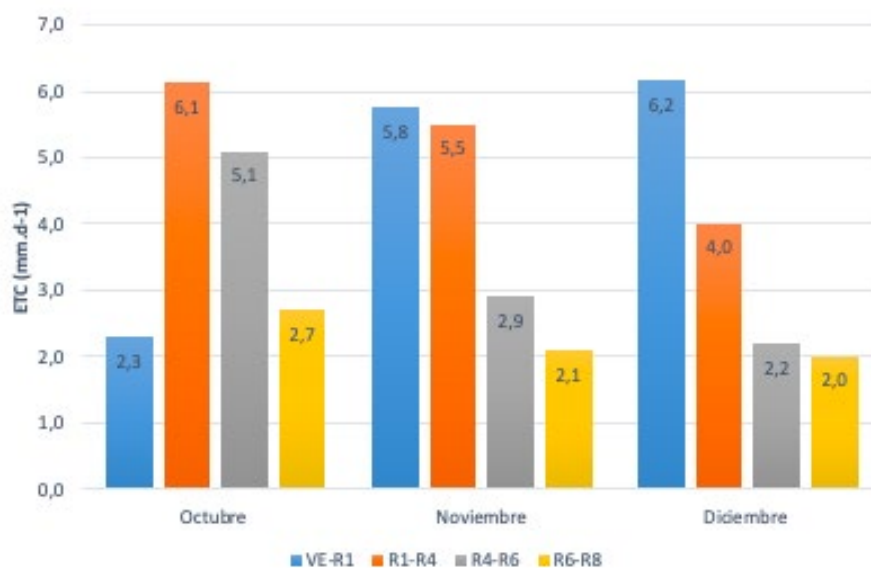
En la FS de diciembre con riego, las condiciones, en comparación con el secano, se diferencian principalmente en las primeras etapas del cultivo donde las PP fueron bajas, además también estuvieron bajo déficit hídrico en los estadios reproductivos previos a R4. Luego se observa que las curvas registran el mismo porcentaje de AD en relación al secano, principalmente luego de comenzado el PC, haciendo que las condiciones hídricas en el período de mayor importancia en la determinación del rendimiento fueran superiores a los UR.

4.1.5 Evapotranspiración del cultivo

En la Figura 8, se puede apreciar la evapotranspiración del cultivo (ETc) diario promedio durante el ciclo de crecimiento en las FS de octubre, noviembre y diciembre para las etapas fenológicas VE-R1, R1-R4, R4-R6, R6-R8 (Fehr & Caviness, 1977).

Figura 8

Evapotranspiración de cultivo diaria promedio según etapa fenológica, para las distintas FS



La FS de octubre, presenta una ETc acumulada de 633 mm, 627 mm para la FS de noviembre y 491 mm para la FS de diciembre; coincidiendo con Giménez y García Petillo (2011), los cuales reportaron que las ETc promedio variaron aproximadamente en esos valores en todo el ciclo. Se puede interpretar que para la FS de octubre y noviembre se obtuvieron mayores valores de ETc por el mayor largo del ciclo en comparación con la FS de diciembre.

En la etapa vegetativa, la ETc diaria se ve influenciada por la demanda atmosférica y la duración del ciclo, tal como indica Andriani (2000), como se cita en Gerster y Bacigaluppo (2009). Entonces la temperatura, la RS y el largo del día tienen un papel importante, donde a medida que aumentan estos factores, la demanda de agua por parte del cultivo se ve incrementada. Estas son las principales razones por la cual la ETc diaria de la FS de diciembre fue mayor a la de noviembre y octubre; siendo 6,2, 5,8 y 2,3 mm día⁻¹, respectivamente, explicado principalmente por un mayor largo de la fase vegetativa (Figura 4) y mayores valores de temperatura (Tabla 5). Si bien el largo de ciclo de noviembre y diciembre en la fase vegetativa son similares y los valores de RS acumulados son superiores en noviembre, hay una notoria diferencia a favor de la FS diciembre de 4°C en cuanto a la temperatura media, provocando así mayores valores de ETc durante la etapa vegetativa.

Entre R1-R4, se puede observar que la ETc diaria promedio para la FS de octubre es 6,1 mm.día⁻¹, siendo levemente superior a la ETc de la FS de noviembre (5,5 mm.día⁻¹) y muy superior a la ETc de la FS de diciembre (4 mm.día⁻¹). Esto se ve explicado por la exposición a mayores niveles de RS (Tabla 4) de la FS de octubre respecto a las demás. Estos valores de RS se vieron limitados en la FS

de diciembre por la corta duración de la fase R1-R4 y en noviembre por una mayor cantidad de PP (Tabla 3) provocando una mayor cantidad de días nublados, haciendo que la RS disminuya (Giménez et al., 2014), a pesar de presentar una fase más larga. Esa mayor duración en días y niveles superiores de temperatura (Tabla 5) permiten a la FS de noviembre aproximarse a los valores de ETc de la FS de octubre, siendo superiores a los valores presentados en la FS de diciembre.

En el PC, la ETc de la FS de octubre fue muy superior a las demás, siendo 5,1 mm día⁻¹. Por tanto, la demanda de agua se vio incrementada por la exposición a las elevadas temperaturas (Tabla 5) y a mayores niveles de RS (Tabla 4) durante esta etapa en comparación a las demás FS, elevando los requerimientos de agua. Además de los mayores niveles de RS para la FS de octubre por el momento del año en que se ubicó el PC, para las FS de noviembre y diciembre, la disminución de la RS se explica por una mayor cantidad de días nublados o con PP en el transcurso de este periodo. A su vez la FS de octubre, presentó un mayor largo del PC lo cual elevó los niveles de ETc total.

4.1.6. Materia seca acumulada a inicios de floración, inicios y final del periodo crítico

En la Tabla 7, se presenta la MS acumulada a R1 (MS a R1 kg.ha⁻¹), a R4 (MS a R4 kg.ha⁻¹) y a R6 (MS a R6 kg.ha⁻¹) según la FS evaluada, octubre, noviembre y diciembre, y disponibilidad hídrica.

Tabla 7

MS acumulada a R1, R4 y R6 según FS y disponibilidad hídrica

	MS a R1 (kg. ha ⁻¹)	MS a R4 (kg. ha ⁻¹)	MS a R6 (kg. ha ⁻¹)
Fecha de siembra			
Octubre	1091 b	6999 a	12781 a
Noviembre	2115 a	7785 a	13641 a
Diciembre	1922 a	5049 a	9030 b
Disponibilidad hídrica			
Riego	2005 a	8326 a	14976 a
Secano	1413 b	4896 b	8658 b

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

En la Tabla 7, se puede observar la acumulación de MS en los diferentes estadios reproductivos para las FS evaluadas. En relación al periodo a R1, la MS

acumulada es mayor en las FS de noviembre y diciembre. Esto se explica debido a la mayor RS acumulada (Tabla 4) durante la etapa vegetativa de las FS de noviembre y diciembre. La producción de MS tiene una fuerte relación con la RS y las temperaturas óptimas para poder lograr altas tasas de crecimiento (Andrade & Sadras, 2000). Por ejemplo, para el caso de diciembre, la MS acumulada en promedio es menor, por tanto, existe una tendencia a una menor acumulación de MS en el estadio reproductivo al atrasar la FS, debido a los menores valores de RS incidente, menores GD acumulados y menor duración de esta etapa.

En el transcurso de R1 a R4, la FS de octubre acumuló 5908 kg.ha⁻¹ de MS en un período de 36 días, la FS de noviembre acumuló 5670 kg.ha⁻¹ en 39 días y la FS de diciembre logró acumular 3127 kg.ha⁻¹ en 26 días. Cabe destacar que la RS acumulada para las distintas FS fue diferente, en donde se registraron valores de 938, 883, 535 MJ.m⁻² para las FS de octubre, noviembre y diciembre, respectivamente. Por lo tanto, se puede concluir que, en la FS de octubre, se logró una mayor acumulación de MS debido a una mayor RS acumulada.

En lo que refiere, a la MS a R4, se puede observar que no presentó diferencias entre las distintas FS, mientras que la RS incidente en la etapa fue mayor para la FS de octubre donde se obtuvo valores de 938 MJ.m⁻² para el período de R1-R4. Además, se puede ver que a medida que se atrasa la FS la RS incidente acumulada en el PC tiende a ser menor (Tabla 4), lo que conlleva a reducir la biomasa acumulada en el cultivo, ya que según Toledo (2013) el atraso en la FS reduce la duración del ciclo básicamente por el acortamiento en días de R1 a R8. La tendencia mostrada es que las FS de octubre y noviembre con un mayor largo de ciclo lograron una mayor acumulación de MS que la FS de diciembre a R4.

En relación a la MS acumulada a R6 (Tabla 7), si se presentaron diferencias respecto al atraso de la FS en este caso para diciembre, lo que generó una reducción del 32% en relación a las FS de octubre y noviembre, en promedio. Esto es debido a la baja RS incidente acumulada (Tabla 4), ya que para el período de R4-R6 en la FS de diciembre se acumularon 497 MJ.m⁻², mientras que, para la FS de octubre y noviembre, los valores fueron de 839 y 645 MJ.m⁻², respectivamente.

En lo que refiere a la MS acumulada en seco, se puede observar que se presentaron diferencias en los tres estadios reproductivos analizados respecto a los cultivos bajo riego, alcanzando diferencias entre 50 y 60% tanto para R4 como para R6. En la fase vegetativa a pesar de la plasticidad de la soja, el proceso de expansión foliar se vio afectado por el déficit hídrico, tal como mencionan Dardanelli et al. (2003), principalmente en la FS de octubre y noviembre. Durante la fase de R1 a R6, la evolución del agua para las diferentes FS (Figura 5, 6 y 7) provocaron diferencias en cuanto a la acumulación de MS, donde en los periodos

en los cuales los cultivos se encontraron bajo déficit hídrico la acumulación de esta fue menor. A su vez, el efecto del déficit hídrico en los tratamientos en secano sobre la acumulación de MS se vio acentuado por los efectos de las temperaturas extremas (Tabla 5).

En los resultados obtenidos, observamos que la acumulación de MS en todo el ciclo del cultivo fue mayor para la FS de noviembre con 13641 kg.ha⁻¹, seguido por la FS de octubre 12781 kg.ha⁻¹ y por último la FS de diciembre con 9030 kg.ha⁻¹. Estos valores obtenidos reafirman lo mencionado anteriormente por varios autores, donde el atraso en la FS fue el principal factor que influyó en la acumulación de la MS, ya que esto afecta la RS incidente, fotoperiodo y temperatura, repercutiendo en el largo del ciclo principalmente en las etapas reproductivas.

4.1.7. Materia seca depositada a inicios y finales del PC y tasa de crecimiento del cultivo.

En la Tabla 8, se presenta la MS (kg.ha⁻¹) depositada a inicios del PC, MS (kg.ha⁻¹) depositada al final del PC y TCC (kg.ha⁻¹.d⁻¹) durante el PC según FS y disponibilidad hídrica.

Tabla 8

MS a R4, R6 y TCC en PC según FS y disponibilidad hídrica

Tratamientos	MS a R4 (kg.ha ⁻¹)	MS a R6 (kg.ha ⁻¹)	TCC en PC (kg.ha ⁻¹ .d ⁻¹)
Octubre - R	9198 a	15712 ab	163
Noviembre - R	9590 a	18291 a	229
Diciembre - R	6191 b	10927 abc	153
Octubre - S	4801 bc	9850 bc	126
Noviembre - S	5979 b	8991 bc	79
Diciembre - S	3907 c	7134 c	104

Nota. La letra S corresponde a tratamientos en secano y la letra R a riego. Valores con diferente letra dentro de la misma columna para cada variable difieren entre sí ($p < 0.05$, Tukey).

Los factores que influyen sobre la TCC de un cultivo son la RS, la temperatura y el agua. Está comprobada la importancia de la TCC durante las etapas R4 y R6, donde a medida que aumenta esta mayor es el NV y el NG fijados (Salvagiotti, 2009). A partir de los datos de RS presentados en la Tabla 4, se puede

observar que, durante el PC del cultivo, el correspondiente a la FS de octubre estuvo sometido a mejores condiciones de RS, siendo esta ampliamente superior a la FS de noviembre y diciembre. Sin embargo, la TCC de la FS de noviembre bajo riego durante el PC fue la mayor, por lo que la temperatura jugó un rol fundamental para que esto suceda.

Según los datos obtenidos, la FS de octubre se vio expuesta a 14 días con temperaturas máximas por encima de 35°C durante el PC, lo que según Ogunkanmi et al. (2022) y corroborado por nuestras mediciones, disminuyó la acumulación de biomasa. Esto permitió una mayor TCC para el cultivo de FS de noviembre, a pesar de que las condiciones de RS fueron menores a las esperadas para dicha etapa del año, no se enfrentó a dichas temperaturas en el PC. En relación a la FS de diciembre, la TCC durante el PC fue muy similar a la de octubre bajo condiciones de bienestar hídrico. Si bien las condiciones de RS fueron diferentes (Tabla 4), la FS de diciembre no se vio sometida a altas temperaturas en dicha etapa (Figura 3 y Tabla 5), logrando una TCC esperada para dicha FS.

En conclusión, como se puede observar en la Tabla 8, la TCC de los tratamientos bajo riego estuvieron por encima de los tratamientos no regados, remarcando la importancia del agua para alcanzar altas tasas fotosintéticas y por ende altas TCC. Sin embargo, los rendimientos alcanzados por los cultivos bajo bienestar hídrico estuvieron por debajo de los potenciales debido a las menores TCC alcanzadas (Grasso & Montero, 2011).

4.1.8. Rendimiento, componentes principales del rendimiento e índice de cosecha promedio según fecha de siembra y disponibilidad hídrica

En la Tabla 9, se muestra el rendimiento, los componentes numéricos principales, NG. m⁻² y el PG promedio, e índice de cosecha (IC) para las FS de octubre, noviembre y diciembre, en condiciones de riego y secano.

Tabla 9

Rendimiento, componentes del rendimiento e IC en promedio para las FS y según disponibilidad hídrica

	Rendimiento (kg.ha ⁻¹)	NG. m ²	PG (g)	IC (%)
Fecha de siembra				
Octubre	3177 b	2275 a	138 c	24,7
Noviembre	3489 b	2073 a	172 b	25,4
Diciembre	4442 a	2343 a	190 a	48,9
Disponibilidad hídrica				
Riego	4665 a	2844 a	165 a	31
Secano	2741 b	1617 b	168 a	31,5

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 puede apreciar la diferencia en rendimiento entre los tratamientos bajo riego y en secano. La FS de octubre en secano, estuvo bajo déficit hídrico (Figura 5) durante la mayor parte del ciclo (88 días), incluyendo la primera mitad del PC y parte del llenado de grano. Con respecto a la FS noviembre, este se encontró por debajo del UR durante 70 días en la totalidad del ciclo, incluyendo los primeros 20 días del PC. Por último, en la FS de diciembre, el tratamiento en secano estuvo en mejores condiciones hídricas, principalmente en el PC donde 26 de los 31 días se encontraron por encima del UR. Durante el PC de la FS de diciembre, las lluvias alcanzaron los 285 mm (Tabla 3), mientras que para las FS de octubre y noviembre las lluvias fueron 253 mm y 263 mm, respectivamente. Si bien no hay una gran diferencia en cuanto a los milímetros acumulados, la importancia de la distribución de las mismas como remarcan Farias et al. (2007), permitió al cultivo de FS de diciembre crecer en mejores condiciones ambientales.

En las FS de octubre y noviembre estuvo limitada la producción de granos, reflejado en el NG.m² (Tabla 9), explicado no solo por la magnitud de las deficiencias hídricas, sino por la etapa en el ciclo donde ocurrieron (Dardanelli et al., 2003; García & Ferrarotto, 2009), fundamentalmente durante el PC. Además, el hecho de que la FS de octubre y noviembre se desarrollen bajo condiciones de mayor RS (Tabla 4), las elevadas temperaturas (Tabla 5) y la exposición a días más largos provocan que estos tengan mayores requerimientos hídricos con respecto a la FS de diciembre debido a una mayor ETc (Figura 8).

A partir de los datos presentados en la Tabla 9, se puede observar que el PG fue un factor determinante en el rendimiento, ya que el $NG.m^{-2}$ no presentó diferencias entre las FS evaluadas. Si bien las FS de octubre y noviembre ubicaron su PC ante situaciones más favorables de RS incidente (Tabla 4), lo cual en ausencia de estrés hubiera beneficiado una mayor formación de granos, las elevadas temperaturas (mayores a $32^{\circ}C$) en etapas en las que el cultivo se encontraba bajo estrés hídrico no permitieron que se exprese el rendimiento potencial, coincidiendo con lo expresado por Molino (2011). Se pudo observar un descenso marcado del PG en la FS de octubre, la cual fue sometida a mayores temperaturas en el PC (Tabla 5), etapa en la cual los órganos reproductivos presentan una alta sensibilidad, mostrando una correlación negativa coincidiendo con Alsajri et al. (2020) y Burroughs et al. (2023).

Independientemente de la FS, el rendimiento fue mayor en condiciones de riego que en secano, ya que la principal limitante de la producción fueron las restricciones hídricas, tal como indican Giménez y García Petillo (2011). La utilización de riego permite ubicar, con menor riesgo, el PC ante situaciones más favorables de RS. Si lo relacionamos con la acumulación de MS, Board et al. (1996) reportan una interacción entre la acumulación de MS y el rendimiento, lo cual para el año experimental no se vio reflejado dadas las condiciones ambientales. La FS de noviembre la cual presenta el mayor valor de MS a R6 (Tabla 7), presenta valores mínimos de RS en el periodo R5-R6 (Figura 4), lo cual afectó la fotosíntesis de la planta y el PG, tal como indica Enrico (2012), afectando así el rendimiento final (Tabla 9). La FS de octubre a pesar de presentar mayor MS a R6, no se destacó frente a la FS de diciembre debido a que durante el PC se enfrentó a mayores temperaturas medias, superando la temperatura media óptima indicada por Salvagiotti (2009). Al efecto de las altas temperaturas medias y máximas, se le suma que la RS interceptada por la FS de octubre se vio disminuida en la fase R5 (comienzos del llenado de grano).

Por su parte, la FS de diciembre se desarrolló bajo temperaturas menores lo que según Alsajri et al. (2020) y Burroughs et al. (2023) favorece el PG. A su vez este se define por la relación fuente-destino, previo al llenado de grano los niveles de RS llegaron al mínimo (Figura 4) lo cual repercutió en la fijación de granos y vainas, mientras que durante el llenado de grano los niveles de RS aumentaron incluso superando los valores medios históricos, favoreciendo la actividad fotosintética y aumentando la relación fuente-destino, viéndose favorecido el PG (Tabla 9).

En cuanto al IC para las tres FS bajo riego fue variable. El aumento del IC para la FS de diciembre se debió principalmente a que la MS acumulada en promedio fue menor que las otras dos FS evaluadas y el rendimiento fue mayor debido a las mejores condiciones de temperatura y disponibilidad hídrica (en secano), por lo tanto, generó un cociente superior a las demás FS. Las mayores temperaturas a las que se enfrentaron las FS de octubre y noviembre dieron como

resultado un menor IC respecto a la FS de diciembre, lo que coincide con lo dicho por Chaves y Gutierrez (2016), Roján Herrera et al. (2022), y Burroughs et al. (2023). Si comparamos los tratamientos por disponibilidad hídrica, el IC presentó valores muy similares tanto bajo riego como en secano.

4.1.9 Subcomponentes del rendimiento según fecha de siembra y disponibilidad hídrica

En la Tabla 10, se presentan los subcomponentes del rendimiento, número de granos por planta (NG.pl⁻¹), número de vainas por planta (NV.pl⁻¹), número de granos por vaina (NG. vaina⁻¹). Además, se presenta el número de abortos de vainas por planta (NAV.pl⁻¹), para las diferentes FS bajo riego y en condiciones de secano.

Tabla 10

NG/planta, NV/planta, NG/vaina, abortos de vainas/planta según FS y disponibilidad hídrica

	NG. planta ⁻¹	NV. planta ⁻¹	NG. vainas ⁻¹	NAV. planta ⁻¹
Octubre - R	97 a	46 a	2,08 ab	3,45 ab
Noviembre - R	104 a	46 a	2,24 a	1,71 b
Diciembre - R	79 ab	35 ab	2,19 ab	1,37 b
Octubre - S	64 bc	33 ab	1,88 b	2,57 b
Noviembre - S	38 c	27 b	1,46 c	5,78 a
Diciembre - S	73 ab	36 ab	2,01 ab	2,19 b

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

4.1.9.1 Subcomponentes de rendimiento en condiciones de riego

En relación al NG por planta, no se detectaron diferencias entre las FS para el cultivo, esto puede verse explicado principalmente por las condiciones ambientales de RS y temperatura que se describieron anteriormente en la Tabla 9. El NG está limitado por la actividad fotosintética, es decir para fijar y sostener el crecimiento de las estructuras reproductivas (Kantolic & Satorre, 2004), por lo que si la actividad se ve disminuida debido a que la planta se encuentra en situación de estrés, el NG disminuye. A pesar de acumular mayor RS, la FS de octubre se enfrenta a 25,9°C de temperatura media durante el PC, lo cual según Burroughs et al. (2023), disminuye el NG viéndose limitado el rendimiento. El NG.planta⁻¹ se encontró por debajo del valor alcanzado en Paparcone y Silveira (2022), donde se lograron 119 granos/planta bajo las mismas condiciones experimentales en esta FS.

Los valores de RS se situaron por debajo de la media histórica (Figura 4), provocando que las FS de octubre y noviembre no puedan diferenciarse significativamente de la FS de diciembre, que a pesar de no presentar las mejores condiciones de RS, si tuvo mejores condiciones de temperatura (Tabla 5). En la FS de diciembre ocurre que entre R2 y R3 sigue la tendencia de los valores medios y luego tiene un gran descenso hacia R5, pero vuelve a valores medios históricos incluso superándolos en R6, sin presenciar las temperaturas críticas que se dieron en las demás FS. Sin embargo, esa disminución en la RS para la FS de diciembre resultó en una menor fijación de granos (Tabla 10) por una menor actividad fotosintética, lo que disminuye la disponibilidad de asimilados, tal como indican Kantolic (2003) y Grasso y Montero (2011). Las FS de octubre y noviembre, se enfrentaron a situaciones de estrés calórico, tal como se muestra tanto en la Figura 3 como en la Tabla 5. El NG por planta disminuye con las temperaturas medias diarias de 22,8°C (Burroughs et al., 2023), y para el año experimental 2021/2022 se presentan 23,5°C de media para la FS de octubre, 23°C para la FS de noviembre y 22,7°C en la FS de diciembre.

En relación al NV por planta, no se presentan diferencias en ninguno de los tratamientos. La FS de octubre no se destaca sobre las demás debido al estrés térmico sufrido durante el período reproductivo, donde se afectó la tasa de fijación de vainas coincidiendo con Burroughs et al. (2023) y Choi et al. (2016), lo cual se ve reflejado en una mayor cantidad de abortos por planta en términos numéricos (3,45 NAV.pl⁻¹). Durante el PC, momento más sensible del cultivo ante situaciones de estrés (Toledo, 2013), semillas y vainas abortaron bajo condiciones ambientales (de temperatura y RS) no favorables. Las situaciones de estrés térmico, temperaturas por encima de 32°C (Ergo et al., 2018), provocan una disminución en la fotosíntesis y crecimiento de las plantas, lo cual se ve reflejado en una disminución de la TCC en el PC (Tabla 8), donde al disminuir la disponibilidad de asimilados disminuye la producción de vainas coincidiendo con Grasso y Montero (2011).

En relación al NG por vaina, este no sufre cambios significativos bajo condiciones de estrés. Bajo riego las diferentes FS, presentaron valores muy similares debido a que es un componente que está determinado genéticamente y presenta poca variación tal como indican McBlain y Hume (1981).

4.1.9.2 Subcomponentes de rendimiento en condiciones de secano

En secano, además de las ya comentadas situaciones de temperatura y RS debemos sumarle la limitante del agua. Para los cultivos es clave la distribución del agua principalmente en las fases de mayor demanda (floración) y las más críticas en cuanto a la ocurrencia de déficit (llenado de grano). La ocurrencia de cualquier estrés entre R1-R5 va a estar afectando el NG, mientras que si ocurren durante R5-R7 se va a afectar el PG, tal como indican Salvagiotti et al. (2010).

Para la FS de octubre, el cultivo recibió solo 35 mm de PP durante R1-R4 lo cual limitó la floración y la formación de vainas en condiciones de secano. A su vez, las elevadas temperaturas en R3 (mayores a 32°C), limitaron el NV producidas y fijadas debido a un menor suministro de asimilados, lo cual se correlaciona directamente con el NG (Kavanová et al., 2017). Luego durante la fase R4-R6 recibió 253 mm de PP, cubriendo las necesidades hídricas del cultivo, las cuales fueron 204 mm para dicho periodo según la ETP calculada (Figura 8), sin embargo, se vio limitada la RS incidente durante el PC por una mayor cantidad de días nublados tal como mencionan Giménez et al. (2014). Además de esto, se pudo corroborar que las temperaturas extremas luego sufridas entre R4-R5 con 5 días consecutivos con máximas promedio de 40,5 °C provocaron el aborto de vainas (Egli & Bruening, 2006), sumado al efecto de las temperaturas medias ya mencionado en la descripción en secano.

En cuanto a la FS noviembre, desde R1-R4 el cultivo recibió 253 mm de PP acumulados mayormente desde la mitad de este periodo, mientras que durante R4-R6 acumuló 263 mm (Tabla 3). A partir de estos datos, interpretamos que no hubo problemas de deficiencias hídricas, ya que se reportan requerimientos de 120 a 300 mm entre R1 y R6 de acuerdo a lo indicado por Farias et al. (2007). Se observa un menor NG por planta, menor NG por vaina y una mayor cantidad de abortos, lo cual estuvo explicado por una menor RS incidente y por las elevadas temperaturas principalmente durante la fase R1-R4.

La FS de diciembre, recibió 17 mm de PP desde R1-R4 y en el periodo R4-R6 284mm, aproximándose a los valores obtenidos en octubre, tanto en los milímetros acumulados como en los subcomponentes de rendimiento, no presentando diferencias. Se puede concluir que los subcomponentes de rendimiento en condiciones de secano no solo dependen de las PP acumuladas, sino también de la RS y temperatura recibida en las diferentes fases del cultivo.

Por último, si nos referimos al NG por vaina en secano, las FS de octubre y diciembre se diferencian con respecto a noviembre, siendo esta FS la de menor valor. Esto puede deberse a que los niveles de RS fueron bajos, por una mayor cantidad de días nublados debido a las PP durante el periodo reproductivo de la planta, sumado a que la temperatura media del ciclo es de 23 °C, la cual supera los 22°C que según Burroughs et al. (2023) provocan disminuciones en el NG por vaina.

4.1.10. Rendimiento y componentes principales del rendimiento según fecha de siembra y disponibilidad hídrica

Tabla 11

Rendimiento, NG.m⁻² y PG según FS en condiciones de riego y seco

Fecha de siembra	Rendimiento (kg.ha ⁻¹)	NG. m ⁻²	PG (g)
Octubre - R	4277 bc	3002 a	142 c
Noviembre - R	4701 ab	2880 a	164 b
Diciembre - R	5016 a	2650 a	190 a
Octubre - S	2076 d	1549 bc	134 c
Noviembre - S	2277 d	1267 c	180 ab
Diciembre- S	3869 c	2036 b	190 a

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

En la Tabla 11, se puede apreciar que en el año de estudio hubo interacción entre la FS y el rendimiento, ya que se observaron diferencias entre las FS tanto en bienestar hídrico como en seco. La FS de diciembre fue la que presentó mayores valores en términos numéricos si comparamos los tratamientos bajo riego y seco por separado.

En relación a los principales componentes del rendimiento como se observa en la Tabla 11, el NG.m⁻² no mostró diferencias entre las FS bajo riego, mientras que en el PG sí se observaron. Sin embargo, en términos numéricos el NG.m⁻² aumentó al adelantar la FS, mientras que el PG mostró una tendencia inversa; la FS de octubre al situar el periodo de llenado de grano ante temperaturas más elevadas (Tabla 5) presentó un menor PG (Alsajri et al., 2020; Burroughs et al., 2023). En cuanto al cultivo en seco, el NG.m⁻² correspondiente a la FS de diciembre fue mayor que el de la FS de noviembre, mientras que no se observaron diferencias con la FS de octubre.

Las razones por las cuales se dieron estos resultados son varias. En el caso de los tratamientos bajo riego, debido a las condiciones de elevadas temperaturas ya mencionadas (Tabla 5) como también la RS por debajo del promedio histórico en el PC (Figura 4). Las FS de octubre y noviembre, no lograron capitalizar las mejores condiciones de crecimiento durante dicho periodo, la RS incidente y su intercepción así como la eficiencia de conversión en recursos para la planta (Salvagiotti, 2009). Esto resultó en menores rendimientos (Tabla 11),

similares a los alcanzados en FS tardías de diciembre, las cuales presentan un menor potencial de rendimiento (Coll et al., 2011). Por otro lado, para los cultivos en secano, las condiciones adversas mencionadas se vieron acentuadas para las FS de octubre y noviembre por marcados déficit hídricos (Figuras 5 y 6) en distintos momentos de la etapa vegetativa y reproductiva.

4.1.10.1 Interacción entre la FS de octubre y los componentes de rendimiento

Para la FS de octubre, las condiciones del año en estudio como las elevadas temperaturas en días consecutivos durante el PC (Figura 3), además de la menor RS en comparación a la media histórica (Figura 4), afectaron los componentes NG m⁻² y PG.

En relación al efecto de las temperaturas, la media del total del ciclo fue de 23,4°C (Tabla 4), viéndose afectado el NG por planta tal como se indica en Burroughs et al. (2023). En el período R1-R6, la FS de octubre se vio sometida a temperaturas medias por encima de la media histórica, además de las altas temperaturas ya mencionadas en la descripción de la Tabla 4 y representadas en la Figura 3. Según la bibliografía (Egli, 1998; Ergo et al., 2018; Molino et al., 2007 como se cita en Arrocha Rodríguez, 2019; Molino, 2011) y los datos obtenidos, se puede concluir que las temperaturas extremas ocurridas en el final del periodo R1-R4 y entre R4-R6, afectaron de forma sustantiva el componente NG.m⁻², lo cual se refleja claramente en el número de abortos (Tabla 10). Si el NG.m⁻² se compara con los resultados obtenidos con Paparcone y Silveira (2022), y Caracciolo y Rosales (2023), ambos bajo riego y en FS de octubre, vemos que el NG.m⁻² estuvo por debajo de los valores alcanzados.

En relación al PG, según la tendencia observada (Tabla 11), se puede observar que el estrés térmico previo y durante el PC pudo disminuir el tamaño de los mismos. Temperaturas medias superiores a 23°C en el periodo reproductivo van a estar incidiendo sobre el PG, tal como sostienen Thomas et al. (2010). En la Tabla 5, se presentan temperaturas mayores o iguales a 35°C en el periodo R4-R6, las cuales según Gibson y Mullen (1996), Puteh et al. (2013) y Egli y Wardlaw (1980) disminuyen el PG.

Además de la temperatura, la RS tampoco permitió alcanzar rendimientos elevados para la FS de octubre, ya que la RS acumulada durante el PC, la cual tiene una correlación positiva con el rendimiento (Nico et al., 2018), fue menor a la media histórica para dicho periodo (Tabla 4). En la Figura 4, se puede observar como la curva de RS se ubicó por encima de la media histórica hasta finalizar el periodo R3, pero luego durante el PC del cultivo (R4-R6) la RS estuvo muy por debajo de la media (25 MJ m⁻² día⁻¹). Si comparamos la RS diaria en el PC del año experimental 2021/2022 con la reportada por Giménez (2014a) (23,2 MJ m⁻² día⁻¹) y por Paparcone y Silveira (2022) (25,4 MJ m⁻² día⁻¹), los cuales alcanzan rendimientos elevados, el año cuestión presenta valores de 21 MJ m⁻² día⁻¹.

Las reducciones en la RS interceptada durante el llenado de granos provoca disminuciones en la relación fuente-destino por una menor cantidad de asimilados, provocando una menor TCC y una menor tasa de crecimiento de las semillas, tal como indican Enrico (2012) y Board et al. (1994). El hecho de que la FS de octubre, haya presentado una disminución en la tasa fotosintética de la planta por una menor RS incidente, y el efecto de las altas temperaturas (Kantolic, 2003), provocó una disminución en el suministro de asimilados por grano, provocando que el PG se vea afectado negativamente, por lo tanto, se redujo la posibilidad de alcanzar rendimientos mayores.

En condiciones de bienestar hídrico, nutrientes y sanidad la única limitante es la capacidad fotosintética del cultivo tal como indican Melgar et al. (2011). La producción de granos y la cantidad de granos fijados está directamente relacionado con la TCC entre R1 y R5 coincidiendo con Jiang y Egli (1995), Egli (1998) y Kantolic (2003), por lo tanto, las bajas condiciones de RS durante el PC provocaron una disminución en la TCC del cultivo, lo que repercutió en el rendimiento.

Cabe destacar que el cultivo en secano, en la FS de octubre aparte de sufrir los efectos de la temperatura y RS estuvo sometido a estrés hídrico hasta mediados de la etapa R4-R6. Esto operó mediante distintos mecanismos en detrimento de la concreción de los componentes principales del rendimiento, como pueden ser una menor tasa fotosintética durante el PC del cultivo, afectando la TCC y por ende el NG. m^{-2} . Además, según lo observado y de acuerdo a Farias et al. (2007), el déficit hídrico durante el llenado de grano disminuye la tasa de acumulación de MS de los mismos y acelera la maduración provocando un menor PG (g).

4.1.10.2 Interacción entre la FS de noviembre y los componentes de rendimiento

En la FS de noviembre, las condiciones de RS (Figura 4) y temperatura (Tabla 5) del año en estudio, fueron también el motivo por el cual no se lograron alcanzar los rendimientos elevados para esta FS, tanto en riego como en secano. A diferencia de la FS de octubre, este cultivo se enfrentó a las temperaturas más extremas durante la etapa R1-R4, y con una temperatura promedio que estuvo por encima de la media histórica. Además de esto, la RS incidente durante el PC del cultivo estuvo también muy por debajo de la media alcanzando los niveles mínimos de radiación. A continuación, analizaremos el efecto de ambas variables y cómo repercutieron en los componentes de rendimiento NG. m^{-2} y PG de distinta manera (Tabla 11).

Con respecto al efecto de la temperatura sobre los componentes mencionados, la ocurrencia de temperaturas extremas promediando $35^{\circ}C$ de máxima durante los primeros 27 de los 39 días de la etapa R1-R4, e incluso con temperaturas que superaron los $40^{\circ}C$, atentaron contra la concreción de

rendimientos altos. Se redujo el NG a cosecha tal como indican Egli (1998) y Molino et al. (2007) como se cita en Arrocha Rodríguez (2019), y además se pudo ver afectada la floración coincidiendo con lo dicho por Djanaguiraman et al. (2013) como se cita en Alsajri et al (2020). Si lo comparamos con Paparcone y Silveira (2022), ensayo en el cual se obtuvieron elevados rendimientos bajo las mismas condiciones experimentales, el NG.m⁻² para la FS de noviembre fue notoriamente inferior. Estas condiciones de estrés severo también afectaron el PG (Gibson & Mullen, 1996; Puteh et al., 2013).

En relación al efecto de la RS, se puede observar que, durante el PC, en R4 los valores de RS acompañan e incluso superan los valores medios, pero durante el estadio R5 se alcanzan los valores mínimos de RS (14 MJ m⁻² día⁻¹) durante el ciclo (Figura 4). El mayor valor de TCC en la FS de noviembre bajo riego comparado con las demás FS se explica por las mejores condiciones de RS y la ausencia de estrés térmico (Figura 3) durante la primera parte del PC. Sin embargo, los menores niveles de RS alcanzados durante la segunda mitad del PC (llenado de grano) afectaron la capacidad fotosintética de la planta tal como indican Kantolic y Slafer (2005), comprometiendo el rendimiento a pesar de que el valor de la TCC de la FS de noviembre haya sido el más elevado en comparación con las demás FS. Al igual que lo que ocurre en la FS de octubre, la disminución en la RS durante el llenado de granos se traduce en caídas en PG por una menor TCC y tasa de crecimiento de las semillas, sin embargo, el PG no disminuye en la misma magnitud dado a que no se enfrenta a temperaturas extremas durante R4-R6.

En lo que refiere a secano, la reducción en el NG.m⁻² (Tabla 11), fue diferencial respecto a la FS de noviembre bajo bienestar hídrico, esto es, explicado por el ya mencionado estrés causado por las extremas temperaturas, sumado al déficit hídrico existente hasta mediados de la etapa R1-R4 (Figura 6). Tal y como mencionan Ogunkanmi et al. (2022) los efectos combinados de ambos factores luego de la floración, resultaron ser más graves que los efectos de cada uno de ellos de manera individual. Esto afectó de forma directa tanto la producción como la fijación de vainas, aumentando la tasa de aborto (Tabla 10) y repercutiendo en un menor NG.m⁻². Además, las condiciones de RS fueron mínimas durante la segunda mitad del PC afectando entonces la producción y el llenado de granos. Si bien el PG no presenta diferencias, en términos numéricos el PG es mayor en secano lo que pudo ser explicado por una menor cantidad de fosas con respecto a la FS de noviembre bajo riego, afectando la relación fuente-destino, donde actúan los mecanismos mencionados por Egli (2010).

4.1.10.3 Interacción entre la FS de diciembre y los componentes de rendimiento

En la Tabla 11, se puede observar que el componente PG sin dudas fue el determinante para lograr estos rendimientos. Según lo observado, la producción de MS se ve afectada, y como se puede ver en los datos obtenidos en la Tabla 8, la MS a inicios del PC es menor para esta FS, tanto en riego como en secano. Sin

embargo, a pesar de esta menor producción de MS causada por retrasar la FS, el rendimiento fue mayor a las demás FS, siendo el PG el responsable de este resultado posiblemente por una mayor eficiencia en la translocación de los asimilados a los granos.

La RS a mitad del PC se encuentra en los valores mínimos durante el ciclo lo que pudo haber provocado una menor fijación de granos. Por su parte, el PG es un componente que se relaciona de forma directa con las condiciones ambientales y de la planta durante el subperíodo R5-R7 (Dornbos & Mullen, 1991; Prasad et al., 2008). Durante este período la RS incidente ascendió y tuvo un pico en pleno llenado de granos (Figura 4), lo cual incide positivamente sobre la disponibilidad de asimilados del cultivo, ya que el cultivo responde hasta muy avanzado el llenado de grano tal como indica (Enrico, 2012).

En relación al efecto de la temperatura, el cultivo se benefició debido a que durante el periodo reproductivo se desarrolló en ausencia de estrés térmico (Figura 3), y con temperaturas menores a las presentadas en las demás FS. A medida que el periodo R4-R7 se enfrenta a mayores temperaturas, el PG disminuye, coincidiendo con Alsajri et al. (2020) y Burroughs et al. (2023).

Para finalizar, en los tratamientos con riego y en seco, el PG fue superior para la FS de diciembre. Cabe destacar que las condiciones de seco para la FS de diciembre fueron muy favorables para la determinación de rendimiento, tal como se explica en la descripción de la Tabla 9. Se puede concluir que, tanto el efecto de las menores temperaturas (Alsajri et al., 2020; Burroughs et al., 2023), como el aumento de RS durante el llenado de grano, provocaron que la FS de diciembre sea más eficiente en la translocación de asimilados generando el mayor IC y un elevado PG, siendo este el principal componente al que se le atribuye las diferencias observadas en rendimiento en valores absolutos (Tabla 11).

5. CONCLUSIONES

Las hipótesis planteadas en el ensayo fueron rechazadas. Los resultados indicaron que, en condiciones de secano, la soja sembrada en diciembre superó en rendimiento a las siembras realizadas en octubre y noviembre. En condiciones de riego, se pudo observar que la FS de diciembre, logró un rendimiento igual al obtenido en la FS de noviembre y ambos fueron mayores al de la FS octubre en términos numéricos, sin embargo, las diferencias se presentaron solo entre la FS de octubre y diciembre.

Las temperaturas máximas mayores a 32°C durante el periodo reproductivo, especialmente durante el PC, tuvieron un impacto negativo en el rendimiento del cultivo, independientemente de la FS. El efecto de la temperatura durante la fase reproductiva afectó tanto el NG como el PG dependiendo del momento en que ocurrieron los periodos de estrés térmico. En el caso de que las temperaturas elevadas ocurrieron durante las etapas R1-R4, se vio afectado principalmente el NG y cuándo ocurrieron en el periodo R4-R6, se afectó tanto el NG como el PG.

Las temperaturas medias de 26 °C durante el PC mostraron un impacto negativo en el NG y en el PG. A medida que las temperaturas medias durante el periodo reproductivo aumentaron, el PG disminuyó, afectando el rendimiento. Esto se observó para todas las FS. El PG jugó un rol fundamental en la determinación del rendimiento final bajo bienestar hídrico, ya que el NG no presentó diferencias entre las distintas FS.

El rendimiento de la FS de octubre fue limitado por las altas temperaturas durante el PC, así como por la RS interceptada durante el llenado de grano. La RS baja en fases avanzadas del llenado de grano afectó el PG, independientemente de la RS acumulada durante el ciclo. El rendimiento se vio limitado por la capacidad de fuente de la planta, la cual se afectó por una menor acumulación de MS y una disminución en la capacidad fotosintética por una menor RS durante el llenado de grano.

Las FS de octubre y noviembre bajo riego, lograron una mayor acumulación de MS a R6 con respecto a la FS de diciembre. Además, en cuanto a la TCC en el PC, la FS de noviembre fue superior a las demás. Sin embargo, esto no se reflejó en el rendimiento final como consecuencia de un PG menor debido a que los valores de RS durante el llenado de grano fueron bajos afectando en forma negativa a dicho componente. La FS de diciembre fue más eficiente en la conversión de MS a grano, donde logró capitalizar un PG mayor respecto a las demás FS. A pesar de que la FS de diciembre, presentó un rendimiento mayor respecto a la FS de octubre, los rendimientos alcanzados no se aproximan a los rendimientos logrados en FS tempranas en otros experimentos, en similares

condiciones. Por lo que se concluye que el rendimiento para las FS tardías estuvo limitado por los menores valores de RS que acumulan durante el PC.

A partir de los resultados obtenidos en este estudio, se derivan conclusiones en cuanto a la FS de soja en condiciones de riego. La FS de octubre ubicó el PC en mejores condiciones de RS, pero la ocurrencia de temperaturas extremas en este periodo limitó el rendimiento. Las temperaturas extremas pueden equiparar el rendimiento obtenido en FS tempranas a los de FS más tardías.

En relación a secano, la FS temprana en octubre podría proporcionar un entorno más propicio para el PC en términos de RS. Sin embargo, el desarrollo del cultivo bajo estas condiciones va a depender de la disponibilidad hídrica que depende de las PP siendo la ocurrencia de estas impredecible. Ante la ocurrencia de escasas PP tanto en enero como en febrero, al enfrentarse a mayores temperaturas, la demanda atmosférica del PC de la FS de octubre va a ser superior a la demanda de las FS de noviembre y diciembre. En cambio, cuando las PP son similares, las condiciones para lograr altos rendimientos serán mejores para la FS de octubre.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Agorio, C., Cardellino, G., Corsi, W., & Franco, J. (1988). *Estimaciones de las necesidades de riego en Uruguay: Vol I. Magnitud y frecuencia de la lámina neta total*. MGAP.
- Alemán, G., & Barrere, F. (2014). *Soja: Estructura del cultivo para reducir el impacto del estrés hídrico* [Trabajo final de grado, Universidad Nacional de la Pampa]. Repositorio Digital de Acceso Abierto UNLPam. <https://repo.unlpam.edu.ar/handle/unlpam/1382>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. FAO. <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>
- Aloé, J. M., & Toribio, M. (2008). Cómo mejorar la eficiencia de uso del agua. *Profertil, Investigación y Desarrollo*, (14), 1-8. <https://www.profertil.com.ar/wp-content/uploads/2020/08/bt-n-14-como-mejorar-la-eficiencia-en-el-uso-del-agua.pdf>
- Alsajri, F. A., Wijewardana, C., Irby, J. T., Bellaloui, N., Krutz, J., Golden, B., Gao, W., & Reddy, K. R. (2020). Developing functional relationships between temperature and soybean yield and seed quality. *Agronomy Journal*, 112(1), 194-204. <https://doi.org/10.1002/agj2.20034>
- Álvarez, C., White, M., Bagnato, R., Quiroga, A., Lienhard, C. P., & Noellemeyer, E. (2015). *Manejo del cultivo de soja por ambiente: Efecto sobre la dinámica de agua*. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo.
- Andrade, F. H., Aguirrezabal, L., & Rizzalli, R. (2000). Crecimiento y rendimiento comparado. En F. H. Andrade & V. O. Sadras (Eds.), *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja* (pp. 61-96). INTA.
- 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.
- Andrade, F. H., & Sadras, V. O. (2000). Efectos de la sequía sobre el crecimiento 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. 173-206). 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. (2002). Estrés hídrico en soja. *Idia XXI*, 2(3), 48-51. <https://es.slideshare.net/daniotecasurco/eh-en-soja-x-andriani-inta>
- Andriani, J. M. (2016). Lo que hay que saber del "consumo de agua de los cultivos". *Para Mejorar la Producción*, (55), 99-108.
- Arbeletche, P. (2020). El agronegocio en Uruguay: Su evolución y estrategias cambiantes en el siglo XXI. *RIVAR*, 7(19), 113-114. <https://dx.doi.org/10.35588/rivar.v7i19.4355>

- Arbeletche, P., & Gutiérrez, G. (2010). Crecimiento de la agricultura en Uruguay: Exclusión social o integración económica en redes. *Pampa*, (6), 113-138. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2314-02082010000100006&lng=es&tlng=es
- Arrocha Rodríguez, A. (2019). *Efecto del grupo de madurez y la distancia entre hileras en soja con riego* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.
- Baigorri, H. E. J., & Croatto, D. R. (2000). *Manejo del cultivo de la soja en Argentina*. INTA.
- Bhatia, V. S., Tiwari, S. P., & Joshi, O. P. (1999). Yield and its attributes as affected by planting dates in soybean (*Glycine max*) varieties. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 69(10), 696-699. <https://epubs.icar.org.in/index.php/IJAgS/article/view/26997/12270>
- Bianchi, J., Rosbaco, I., Tuttolomondo, G., Romagnoli, M., & Martignone, R. (2011). ¿Es factible sembrar soja en fechas de siembra muy tardías? *Agromensajes*, (32), 1-7. <https://fcagr.unr.edu.ar/Extension/Agromensajes/32/2AM32.html>
- Board, J. E., Harville, B. G., & Saxton, A. M. (1990). Growth dynamics of determinate soybean in narrow and wide rows at late planting dates. *Field Crops Research*, 25(3-4), 203-213.
- Board, J. E., & Modali, H. (2004). Dry matter accumulation predictors for optimal yield in soybean. *Crop Science*, 45(5), 1790-1799.
- Board, J. E., & Tan, Q. (1995). Assimilatory capacity effects on soybean yield components and pod number. *Crop Science*, 35(3), 846-851. <https://doi.org/10.2135/cropsci1995.0011183X003500030035x>
- Board, J. E., Wier, A. T., & Boethel, D. J. (1994). Soybean yield reductions caused by defoliation during mid to late seed filling. *Agronomy Journal*, 86(6), 1074-1079.
- Board, J. E., Zhang, W., & Harville, B. G. (1996). Yield Rankings for soybean cultivars grown in narrow and wide rows with late planting dates. *Agronomy Journal*, 88(2), 240-245. <https://doi.org/10.2134/agronj1996.00021962008800020020x>
- Bodrero, M. (2003). Algunos factores genéticos y ambientales que influyen sobre el rendimiento de la soja. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Jornada Nacional de Soja* (pp. 1-13).
- Boote, K. J., Jones, J. W., & Hoogenboom, G. (1998). Simulation of crop growth: CROPGRO model. En R. M. Peart & R. B. Curry (Eds.), *Agricultural systems modeling and simulation* (pp. 651-692). CRC.
- Boyer, J. S. (1982). Plant productivity and environment. *Science*, 218(4571), 443-448. <http://dx.doi.org/10.1126/science.218.4571.443>

- Burroughs, C. H., Montes, C. M., Moller, C. A., Mitchell, N. G., Michael, A. M., Peng, B., Kimm, H., Pederson, T. L., Lipka, A. E., Bernacchi, C. J., Guan, K., & Ainsworth, E. A. (2023). Reductions in leaf area index, pod production, seed size, and harvest index drive yield loss to high temperatures in soybean. *Journal of Experimental Botany*, 74(5), 1629-1641. <https://doi.org/10.1093/jxb/erac503>
- Câmara, G. M. S. (1991). *Efeito do fotoperíodo e da temperatura no crescimento, florescimento e maturação de cultivares de soja (Glycine max (L.) Merrill.)* [Disertación doctoral, Universidade Federal de Viçosa]. *Locus*. <https://locus.ufv.br/handle/123456789/30615>
- Canosa, G., & Prieto, C. (2013). *Estudio del efecto de las deficiencias hídricas sobre el rendimiento de soja* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.
- 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. http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2301-15482017000200065&lng=es&tlng=es
- Caracciolo, A., & Rosales, F. (2023). *Efecto de la fecha de siembra y la disponibilidad hídrica sobre el rendimiento de soja* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Correcciones bibliográficas de Trabajos finales de grado. <http://tesis.fagro.edu.uy/index.php/tg/catalog/book/153>
- Cárcova, J., Borrás, L., & Otegui, M. E. (2003). Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en maíz. 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. 133-163). FAUBA.
- Castaño, J., Giménez, A., Ceroni, M., Furest, J., & Aunchayna, R. (2011). *Caracterización agroclimática del Uruguay-1980-2009*. INIA. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2538/1/18429021211104157.pdf>
- Cepeda, C., & Taran, S. (2008). *Impacto de la población, distancia entre hileras y cultivar en el rendimiento de soja* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/27384/1/CepedaBanchoCarlaSabrina.pdf>
- Chaves, N. F., & Gutiérrez, M. V. (2016). Crop physiological responses to high temperature stress: I. Molecular, biochemical and physiological aspects. *Agronomía Mesoamericana*, 28(1), 237-253. <https://doi.org/10.15517/am.v28i1.21903>

- Chen, G., & Wiatrak, P. (2010). Soybean development and yield are influenced by planting date and environmental conditions in the Southeastern Coastal Plain, USA. *Agronomy Journal*, 102(6), 1731-1737.
<http://doi.org/10.2134/agronj2010.0219>
- Choi, D. H., Ban, H. Y., Seo, B. S., Lee, K. J., & Lee, B. W. (2016). Phenology and seed yield performance of determinate soybean cultivars grown at elevated temperatures in a temperate region. *PLOS ONE*, 11(11), Artículo e0165977.
<https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0165977>
- Coll, L., Caviglia, O., & Van Opstal, V. (2011). Rendimiento de soja de segunda sobre diferentes antecesores invernales. En O. Paparotti (Ed.), *Actualización técnica soja* (pp. 75-82). INTA.
- Corsi, W. C. (1982). *Regionalización agroclimática de Uruguay para cultivos*. CIAAB. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/6079/1/CIAAB-Miscelanea-40-1982.pdf>
- Dardanelli, J., Collino, D., Otegui, M. E., & Sadras, V. O. (2003). Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción 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. 375-442). FAUBA.
https://www.researchgate.net/publication/230626240_Bases_funcionales_para_el_manejo_del_agua_en_los_cultivos_de_grano
- 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.
- Djanaguiraman, M., & Prasad, P. V. V. (2010). Ethylene production under high temperature stress causes premature leaf senescence in soybean. *Functional Plant Biology*, 37(11), 1071-1084.
<https://doi.org/10.1071/FP10089>
- Dornbos Jr, D. L., & Mullen, R. E. (1991). Influence of stress during soybean seed fill on seed weight, germination, and seedling growth rate. *Canadian Journal of Plant Science*, 71(2), 373-383. <https://doi.org/10.4141/cjps91-052>
- Doss, B., Pearson, R., & Rogers, H. (1974). Effect of soil water stress at various growth stages on soybean yield. *Agronomy Journal*, 66(2), 297-299.
- Durán, A. (Coord.). (1976). *Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay* [Mapa]. MGAP.
<http://bibliotecadigital.bibna.gub.uy:8080/jspui/handle/123456789/5486>
- Egli, D. B. (1998). *Seed biology and the yield of grain crops* (2nd ed.). CABI.
<https://doi.org/10.1079/9781780647708.0000>
- Egli, D. B. (1999). Variation in leaf starch and sink limitations during seed filling in soybean. *Crop Science*, 39(5), 1361-1368.
<https://doi.org/10.2135/cropsci1999.3951361x>

- Egli, D. B. (2004). Seed-fill duration and yield of grain crops. *Advances in Agronomy*, 83, 243-279. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(04\)83005-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(04)83005-0)
- Egli, D. B. (2010). Soybean reproductive sink size and short-term reductions in photosynthesis during flowering and pod set. *Crop Science*, 50(5), 1971-1977. <https://doi.org/10.2135/cropsci2009.09.0518>
- Egli, D. B., & Bruening, W. P. (2006). Fruit development and reproductive survival in soybean: Position and age effects. *Field Crops Research*, 98(2-3), 195-202. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.01.005>
- Egli, D. B., & Bruening, W. P. (2007). Accumulation of nitrogen and dry matter by soybean seeds with genetic differences in protein concentration. *Crop Science*, 47(1), 359-366. <https://doi.org/10.2135/cropsci2006.02.0096>
- Egli, D. B., Fraser, J., Leggett, J. E., & Poneleit, C. G. (1981). Control of seed growth in soya beans [*Glycine max* (L) Merrill]. *Annals of Botany*, 48(2), 171-176. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a086110>
- Egli, D. B., & Wardlaw, I. F. (1980). Temperature response of seed growth characteristics of soybeans. *Agronomy Journal*, 72(3), 560-564.
- Enrico, J. M. (2012). *Alteración de la relación fuente/destino en etapas tardías del desarrollo reproductivo y su influencia en el rendimiento de la soja [Glycine max (L.) Merr]* [Tesis de maestría, Universidad de Buenos Aires]. FAUBA Digital. <http://ri.agro.uba.ar/files/download/tesis/maestria/2012enricojuanmartin.pdf>
- Ergo, V., Lascano, H., Vega, C., Parola, R., & Carrera, C. (2018). Heat and water stressed field-grown soybean: A multivariate study on the relationship between physiological - biochemical traits and yield. *Environmental and Experimental Botany*, 148, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.12.023>
- Ezeaku, I. E., Mbah, B. N., & Baiyeri, K. P. (2015). Planting date and cultivar effects on growth and yield performance of cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp). *African Journal of Plant Science*, 9(11), 439-448. <https://doi.org/10.5897/AJPS2015.1353>
- Farias, J. R. B., Nepomuceno, A. L., & Neumaier, N. (2007). *Ecofisiología da soja*. EMBRAPA.
- 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. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/6396/1/Rev.INIA-2016-No47-p.22-26.pdf>
- 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>

- Figueredo, S., Guibert, M., & Arbeletche, P. (2019). Ciclo sojero y estrategias de los actores de la producción agropecuaria en el litoral uruguayo. *Eutopía*, (16), 99-118. <https://doi.org/10.17141/eutopia.16.2019.4103>
- Foroud, N., Mündel, H. H., Saindon, G., & Entz, T. (1993). Effect of level and timing of moisture stress on soybean plant development and yield components. *Irrigation Science*, 13, 149-155. <https://doi.org/10.1007/BF00190029>
- Foster, P., & Rovegno, F. (2015). *Efectos de diferentes disponibilidades hídricas en distintas etapas fisiológicas de soja sobre el rendimiento* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.
- García, H., & Ferrarotto, M. (2009). Efecto del déficit hídrico sobre la acumulación de biomasa y nitrógeno en soja (*Glicine max* (L.) Merr.) inoculada con *Bradirhizobium japonicum*. *Revista Facultad de Agronomía*, 35(1), 21-27. http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_agro/article/view/130/108
- 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: 2^{do} Seminario Internacional* (pp. 23-32). <http://inia.uy/en/Publicaciones/Documentos%20compartidos/18429080413094411.pdf>
- Gaso, D., & Nuñez, A. (2015). Herramientas de manejo para el cultivo de soja. *Revista INIA*, (42), 13-18. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/5008/1/revista-INIA-42.p.13-18-GASO-NUNEZ.pdf>
- Gerster, G., & Bacigaluppo, S. (2009). Cómo alcanzar altos rendimientos en soja. *Para Mejorar la Producción*, (42), 63-67.
- Gibson, L. R., & Mullen, R. E. (1996). Influence of day and night temperature on soybean seed yield. *Crop Science*, 36(1), 98-104. <https://doi.org/10.2135/cropsci1996.0011183X003600010018x>
- Giménez, L. (2007). Comportamiento fenológico de diferentes grupos de madurez de soja (*Glycine max*) en Uruguay: Ubicación temporal del período crítico. *Agrociencia (Uruguay)*, 11(2), 1-9. <https://doi.org/10.31285/AGRO.11.751>
- Giménez, L. (2010). Efectos de la disponibilidad hídrica en diferentes etapas de desarrollo de maíz y soja. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Potencial del riego extensivo en cultivos y pasturas: 1^{er} Seminario Internacional* (pp. 29-37). <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/4514/1/Libro-1-Seminario-Internacional-de-Riego-en-Cultivos-y-Pasturas.pdf>
- Giménez, L. (2012). ¿Cuánto estamos perdiendo por no regar cultivos en Uruguay? En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *2^{do} Riego en cultivos y pasturas: 2^{do} Seminario Internacional* (pp. 33-41).

- 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.), *Riego en cultivos y pasturas: 3^{er} Seminario Internacional* (pp. 22-34).
- Giménez, L., Canosa, G., Prieto, C., Grasso, J. P., Montero, A., Rameau, M., Rosa, A., & Arévalo, R. (2014). Respuesta al riego suplementario en cultivos de verano y evaluación de pérdidas de rendimiento por deficiencias hídricas. En L. Giménez (Ed.), *Riego suplementario en cultivos y pasturas* (pp. 9-28). INIA.
- Giménez, L., & García Petillo, M. (2011). Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*, 15(2), 100-108. http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2301-15482011000200012
- Grasso, J. P., & Montero, J. A. (2011). *Efecto de diferentes disponibilidades hídricas sobre el rendimiento de soja* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.
- Hardman, L. L., & Brun, W. A. (1971). Effect of atmospheric carbon dioxide enrichment at different developmental stages on growth and yield components of soybeans. *Crop Science*, 11(6), 886-888. <https://doi.org/10.2135/cropsci1971.0011183X001100060037x>
- Hattendorf, M. J., Reedelfs, M. S., Amos, B., Stone, L. R., & Gwin, R. E. (1988). Comparative water use characteristics of six row crops. *Agronomy Journal*, 80(1), 80-85. <https://doi.org/10.2134/agronj1988.00021962008000010019x>
- Heinemann, A. B., Maia, A., 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>
- Heitholt, J. J., Egli, D. B., & Leggett, J. E. (1986). Characteristics of reproductive abortion in soybean. *Crop Science*, 26(3), 589-595. <https://doi.org/10.2135/cropsci1986.0011183X002600030034x>
- Hicks, D. (1983). Crecimiento y desarrollo. En G. Norman (Ed.), *Fisiología, mejoramiento, cultivo y utilización de la soja* (pp. 19-46). Hemisferio Sur.
- Huxley, P. A., Summerfield, R. J., & Hughes, P. (1976). Growth and development of soybean CV-TK5 as affected by tropical day lengths, day/night temperatures and nitrogen nutrition. *Annals of Applied Biology*, 82(1), 117-133. [10.1111/j.1744-7348.1976.tb01679.x](https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1976.tb01679.x)
- Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. (s.f.). *Banco datos agroclimáticos*. <http://www.inia.uy/gras/Clima/Banco-datos-agroclimatico>

- Jiang, H., & Egli, D. B. (1993). Shade induced changes in flower and pod number and flower and fruit abscission in soybean. *Agronomy Journal*, 85(2), 221-225. <https://doi.org/10.2134/agronj1993.00021962008500020011x>
- Jiang, H., & Egli, D. B. (1995). Soybean seed number and crop growth rate during flowering. *Agronomy Journal*, 87(2), 264-267. <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/agronj1995.00021962008700020020x>
- Kantolic, A. G. (2003). *Ecofisiología del cultivo de soja: Bases para el manejo y el aumento del rendimiento potencial*. Slideshare. <https://es.slideshare.net/daniotecasurco/soja-ecofisiologa-kantolic>
- 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., 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. 167-201). FAUBA.
- Kantolic, A. G., Peralta, G. E., & Slafer, G. A. (2013). Seed number responses to extended photoperiod and shading during reproductive stages in indeterminate soybean. *European Journal of Agronomy*, 51, 91-100.
- Kantolic, A. G., & Satorre, E. (2004). Elementos centrales de ecofisiología del cultivo de soja. En M. Díaz-Zorita & G. Duarte (Eds.), *Manual práctico para la producción de soja* (pp. 19-37). Hemisferio Sur.
- Kantolic, A. G., & Slafer, G. (2003). Número de granos en soja y la sensibilidad al fotoperiodo 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. (2005). Reproductive development and yield components in indeterminate soybean as affected by post-flowering photoperiod. *Field Crops Research*, 93(2-3), 212-222. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.10.001>
- Kantolic, A. G., & Slafer, G. (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>
- Karam, F., Masaad, R., Sfeir, T., Mounzer, O., & Roupael, Y. (2005). Evapotranspiration and seed yield of field grown soybean under deficit irrigation conditions. *Agricultural Water Management*, 75(3), 226-244. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.12.015>

- Kavanová, M., Rey, E., Montaña, M., Sastre, M., & Ceretta, S. (2017). Efecto de estrés térmico sobre la producción y aborto de vainas en soja. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Día de Campo de Soja* (pp. 9-11). <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/7531/1/SAD-773-2017.p.9-12-Kavanova.pdf>
- Kross, A., Lapen, D. R., McNairn, H., Sunohara, M., Champagne, C., & Wilkes, G. (2015). Satellite and in situ derived corn and soybean biomass and leaf area index: Response to controlled tile drainage under varying weather conditions. *Agricultural Water Management*, 160, 118-213. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.06.007>
- Martignone, R. A., Bacigaluppo, S., Enrico, J. M., & Bodrero, M. L. (2011). Cultivos estivales. *Para Mejorar la Producción*, (46), 49-52.
- Mathew, J. P., Herbert, S. J., Zhang, S., Rautenkranz, A. A. F., & Litchfield, G. V. (2000). Differential response of soybean yield components to the timing of light enrichment. *Agronomy Journal*, 92(6), 1156-1161. <https://doi.org/10.2134/agronj2000.9261156x>
- McBlain, B. A., & Hume, D. J. (1981). Reproductive abortion, yield components and nitrogen content in three early soybean cultivars. *Canadian Journal of Plant Science*, 61(3), 499-505. <https://doi.org/10.4141/cjps81-072>
- Medina, M., & Pereira, 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]. Colibri. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/28841/1/MedinaLasagaMarianaLorena.pdf>
- Melgar, R., Vitti, G., & Melo Benites, V. (2011). *Fertilizando para altos rendimientos: Soja en Latinoamérica*. Instituto Internacional de la Potasa. <https://www.ipipotash.org/uploads/udocs/328-IIP-Boletin-No20.pdf>
- Molfino, J., & Califra, A. (2001). *Agua disponible en las tierras del Uruguay: Segunda aproximación*. MGAP. <http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/111219220807174344.pdf>
- Molino, J. (2011). *Estrés térmico por alta temperatura en soja (Glycine max (L.) Merr.): Análisis de la dinámica de producción y fijación de vainas y su efecto sobre la determinación del rendimiento* [Tesis de maestría, Universidad de Buenos Aires]. FAUBA Digital. <http://ri.agro.uba.ar/greenstone3/library/collection/tesis/document/2011molinojosefina>
- Montoya, F., García, C., Pintos, F., & Otero, A. (2017). Effects of irrigation regime on the growth and yield of irrigated soybean in temperate humid climatic conditions. *Agricultural Water Management*, 193, 30-45. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.08.001>
- Nakayama, F. (1980). Los componentes fisiológicos del rendimiento en la soja. *Revista de Facultad de Agronomía*, 1(1), 97-107.

- 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>
- Nico, M., Miralles, D. J., & Kantolic, A. G. (2018). Natural post-flowering photoperiod and photoperiod sensitivity: Roles in yield-determining processes in soybean. *Field Crops Research*, 231, 141-152. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.10.019>
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2022). *Anuario estadístico agropecuario 2022*. MGAP. https://descargas.mgap.gub.uy/DIEA/Anuarios/Anuario2022/O_MGAP_Anuario_estad%C3%ADstico_%202022-DIGITAL.pdf
- Ogunkanmi, L., MacCarthy, D. S., & Adiku, S. G. K. (2022). Impact of extreme temperature and soil water stress on the growth and yield of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill). *Agriculture*, 12(1), Artículo e43. <https://doi.org/10.3390/agriculture12010043>
- Onat, B., Bakal, H., Gulluoglu, L., & Arioglu, H. (2017). The effects of high temperature at the growing period on yield and yield components of Soybean [*Glycine max* (L.) merr] varieties. *Turkish Journal of Field Crops*, 22(2), 178-186. <https://doi.org/10.17557/tjfc.356210>
- Otegui, M. E. (2009). Bases ecofisiológicas para el manejo del agua en cultivos para grano conducidos en secano. *Informaciones Agronómicas*, (44), 16-20. <https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2009/12/16.pdf>
- Otero, A., Gaso, D., Capurro, M. C., Berger, A., Pérez, O., García, C., Terra, J., & Sawchik, J. (2014). Construyendo los componentes de un sistema productivo con la inclusión del riego. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Riego en cultivos y pasturas: 3^{er} Seminario internacional* (pp. 43-52). <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/11771/1/Riego-en-cultivos-y-pasturas-2014.-Otero-A.-et-al.pdf>
- Pandey, J. P., & Torrie, J. H. (1973). Path coefficient analysis of seed yield components in soybeans (*Glycine max* (L.) Merr.). *Crop Science*, 13(5), 505-507. <https://doi.org/10.2135/cropsci1973.0011183X001300050004x>
- 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.
- Peixoto, C. P., Câmara, G. M. de S., Martins, M. C., Marchiori, L. F. S., Guerzoni, R. A., & Mattiazzi, P. (2000). Épocas de semeadura e densidade de plantas de soja: I. Componentes da produção e rendimento de grãos. *Scientia Agricola*, 57(1), 89-96. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162000000100015>

- Prasad, P. V. V., Craufurd, P. Q., & Summerfield, R. J. (2000). Effect of high air and soil temperature on dry matter production, pod yield and yield components of Groundnut. *Plant and Soil*, 222, 231-239.
<https://doi.org/10.1023/A:1004793220787>
- Prasad, P. V. V., Staggenborg, S. A., & Ristic, Z. (2008). Impacts of drought and/or heat stress on physiological, developmental, growth, and yield processes of crop plants. En L. R. Ahuja, V. R. Reddy, S. A. Saseendran, & Q. Yu (Eds.), *Response of crops to limited water: Understanding and modeling water stress effects on plant growth processes* (pp. 301-355). ASA; CSSA; SSSA. <https://doi.org/10.2134/advagricsystmodel1.c11>
- Puteh, A. B., Thuzar, M., Mondal, M. M. A., Abdullah, A. P., & 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.
<https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.618691733672149>
- Ritchie, S. W., Hanway, J. J., Thompson, H. E., & Benson, G. O. (1985). *How a soybean plant develops*. Iowa State University of Science and Technology Cooperative Extension Service.
<http://publications.iowa.gov/14855/1/1985%20How%20a%20Soybean%20Plant%20Develops.pdf>
- Rodríguez, H., De Battista, J., Arias, N., García, E., Sosa, F., Alaluf, C., & Rochás, M. (2015). *Efectos de la reducción de la densidad de siembra en soja*. INTA.
- Roján Herrera, O., Maqueira López, L. A., Santana Ges, I., Miranda Sierra, C. A., & Núñez Vázquez, M. (2022). Productividad de cultivares de soja en dos épocas de siembra. *Cultivos Tropicales*, 43(1), Artículo e05.
<https://ediciones.inca.edu.cu/index.php/ediciones/article/view/1641>
- Sadras, V. O., Ferreiro, M., Gutheim, F., & Kantolic, A. (2000). Desarrollo fenológico y su respuesta a temperatura y fotoperiodo. En F. H. Andrade & V. O. Sadras (Eds.), *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja* (pp. 29-60). INTA.
- Salvagiotti, F. (2009). Manejo de soja de alta producción. *Para Mejorar la Producción*, (42), 57- 62.
- Salvagiotti, F., Enrico, J. M., Bodrero, M., & Bacigaluppo, S. (2010). Producción de soja y uso eficiente de los recursos. *Para Mejorar la Producción*, (45), 151-153. https://www.researchgate.net/profile/Fernando-Salvagiotti/publication/265804710_Produccion_de_soja_y_uso_eficiente_de_los_recursos/links/55e1324208aecb1a7cc62dc9/Produccion-de-soja-y-uso-eficiente-de-los-recursos.pdf

- Sancho, D., Oyhançabal, G., & Narbondo, I. (2008). Manejo tecnológico predominante y sus impactos ambientales y en la salud humana. En M. I. Cárcamo (Eds.), *Soja transgénica y sus impactos en Uruguay: La nueva colonización* (pp. 59-137). RAP-AL.
https://www.researchgate.net/publication/242549566_Soja_transgenica_y_sus_impactos_en_Uruguay_La_nueva_colonizacion
- Sebben, G., Friza, S., & Tejera, M. (2018). *Efecto de distintas estrategias de riego deficitario sobre el rendimiento y el uso del agua en soja* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.
- Sents, N. (2023, 24 de agosto). New soybean yield record set at 206 bushels. *Successful Farming*. https://www.agriculture.com/new-soybean-yield-record-set-at-206-bushels-7852613?hid=4daffddd47fc3b6490f6cda6173a87263bebff69&did=10085926-20230825&utm_campaign=todays-news_newsletter&utm_source=ag&utm_medium=email&utm_content=082523&lctg=4daffddd47fc3b6490f6cda6173a87263bebff69
- Sharma, K. P., Dybing, C. D., & Lay, C. (1990). Soybean flower abortion: Genetics and impact of selection on seed yield. *Crop Science*, 30(5), 1017-1022.
<https://doi.org/10.2135/cropsci1990.0011183X003000050013x>
- Sinclair, T. R., Kitani, S., Hinson, K., Bruniard, J., & Horie, T. (1991). Soybean flowering date: Linear and logistic models based on temperature and photoperiod. *Crop Science*, 31(3), 786-790.
<https://doi.org/10.2135/cropsci1991.0011183X003100030049x>
- Sobko, O., Stahl, A., Hahn, V., Zikeli, S., Claupein, W., & Gruber, S. (2020). Environmental effects on soybean (*Glycine Max* (L.) Merr) production in Central and South Germany. *Agronomy*, 10(12), Artículo e1847.
<https://doi.org/10.3390/agronomy10121847>
- Thomas, J. M. G., Boote, K. J., Pan, D., & Allen Jr., L. H. (2010). Elevated temperature delays onset of reproductive growth and reduces seed growth rate of soybean. *Journal of AgroCrop Sciences*, 1(1), 19-32.
- Thuzar, M., Puteh, A. B., Abdullah, N. A. P., Lassim, M. M., & Jusoff, K. (2010). The effects of temperature stress on the quality and yield of soybean. *Journal of Agricultural Science*, 2(1), 172-177.
<https://doi.org/10.5539/jas.v2n1p172>
- Toledo, R. E. (2013). *Soja: Su ecofisiología y manejo*. Universidad Nacional de Córdoba. <https://docplayer.es/73441708-Soja-su-ecofisiologia-y-manejo.html>
- Toledo, R. E. (2018). *Ecofisiología, rendimiento y calidad de soja*. FCA-UNC.
<https://ansenuza.ffyh.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086.1/1266/Ecofisiologia,%20rendimiento%20y%20calidad%20en%20soja.pdf?sequence=5>

- Tuttolomondo, G., Romagnoli, M., Rosbasco, I., & Martignone, R. (2006). Respuesta de variedades de soja de los GM II al VIII en distintas fechas de siembra en el área de influencia de Zavalla. *Agromensajes*, (20), 47-56. <http://hdl.handle.net/2133/528>
- Whigham, D. K., & Minor, H. C. (1978). Agronomic characteristics and environmental stress. En G. Norman (Ed.), *Soybean Agronomy, physiology and utilization* (pp. 78-118). Academic Press.