

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA**  
**FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**RENDIMIENTO Y CALIDAD DE FLORES DE CÁÑAMO (*CANNABIS SATIVA*  
L.) SEGÚN CULTIVAR Y FECHA DE TRASPLANTE**

**por**

**Federico Gabriel LLOPIS LEITES**

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

**MONTEVIDEO**  
**URUGUAY**  
**2026**

Este Trabajo Final de Grado se distribuye bajo licencia  
“Creative Commons Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada”.



**PÁGINA DE APROBACIÓN**

Trabajo final de grado aprobado por:

Director: \_\_\_\_\_

Ing. Agr. (Dr.) Santiago Dogliotti

Co-directora: \_\_\_\_\_

Ing. Agr. (Dra.) Cecilia Berrueta

Tribunal:

\_\_\_\_\_

Ing. Agr. (Dr.) Santiago Dogliotti

\_\_\_\_\_

Ing. Agr. (Mag.) Sergio Vázquez

\_\_\_\_\_

Ing. Agr. (Dr.) Guillermo Galván

Fecha: 7 de julio de 2026

Estudiante: \_\_\_\_\_

Federico Gabriel Llopis Leites

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi familia, pareja y amigos que siempre me apoyaron a lo largo de la carrera, su cariño fue el motor en esta gran etapa.

A mis tutores, Ing. Agr. PhD. Santiago Dogliotti e Ing. Agr. PhD. Cecilia Berrueta, quienes me brindaron su conocimiento y paciencia en este camino.

A la empresa Germinare S.A y sus funcionarios, por permitirme realizar el ensayo en su predio y ayudarme en todas las labores necesarias.

Por último, pero no menos importante, a todos los docentes que me formaron como profesional.

A Facultad de Agronomía.

Muchas Gracias

## TABLA DE CONTENIDO

|                                                        |    |
|--------------------------------------------------------|----|
| PÁGINA DE APROBACIÓN.....                              | 3  |
| AGRADECIMIENTOS .....                                  | 4  |
| LISTA DE TABLAS Y FIGURAS .....                        | 8  |
| RESUMEN.....                                           | 10 |
| ABSTRACT .....                                         | 11 |
| 1. INTRODUCCIÓN .....                                  | 12 |
| 2. OBJETIVOS .....                                     | 15 |
| 2.1. HIPÓTESIS DE TRABAJO .....                        | 15 |
| 3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....                         | 16 |
| 3.1. PRODUCCIÓN MUNDIAL.....                           | 16 |
| 3.2. DESCRIPCIÓN DE LA ESPECIE .....                   | 16 |
| 3.2.1. Origen.....                                     | 16 |
| 3.2.2. Taxonomía.....                                  | 17 |
| 3.2.3. Cannabinoides .....                             | 18 |
| 3.2.4. Ciclo anual.....                                | 19 |
| 3.3 SISTEMAS DE PRODUCCIÓN .....                       | 22 |
| 3.4 COMPONENTES DEL RENDIMIENTO .....                  | 24 |
| 3.4.1 Fotoperiodo .....                                | 25 |
| 3.4.2 Temperatura .....                                | 25 |
| 3.4.3 Irrigación y Humedad Relativa .....              | 25 |
| 3.4.4 Genética .....                                   | 26 |
| 3.5 Radiación .....                                    | 28 |
| 3.5.1 Radiación y fotosíntesis.....                    | 28 |
| 3.5.2 Radiación UV y acumulación de cannabinoides..... | 28 |
| 3.5.3 Relación entre radiación y rendimiento.....      | 28 |
| 3.5.4 Radiación y eficiencia en el uso del agua.....   | 29 |
| 3.6 FECHA DE TRASPLANTE .....                          | 29 |
| 3.7 VARIABLES LIMITANTES DEL RENDIMIENTO .....         | 30 |
| 3.7.1 Agua.....                                        | 30 |
| 3.7.2 Suelo .....                                      | 30 |
| 3.7.3 Fertilización.....                               | 30 |
| 3.8 FACTORES REDUCTORES DEL RENDIMIENTO.....           | 31 |

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.8.1 Enfermedades .....                                                 | 31 |
| 3.8.2 Plagas .....                                                       | 32 |
| 3.8.3 Malezas .....                                                      | 33 |
| 3.9 MANEJO DEL CULTIVO.....                                              | 33 |
| 3.9.1 Propagación.....                                                   | 33 |
| 3.9.2 Propagación sexual (por semillas).....                             | 34 |
| 3.9.3 Propagación asexual (clonación, esquejes y cultivo in vitro) ..... | 34 |
| 3.9.4 Densidad de siembra.....                                           | 34 |
| 3.9.5 Determinación del Momento Óptimo de Cosecha .....                  | 35 |
| 3.9.6 Manejo, Secado, Procesamiento y Almacenamiento.....                | 35 |
| 4. MATERIALES Y MÉTODOS .....                                            | 37 |
| 4.1 UBICACIÓN DEL EXPERIMENTO.....                                       | 37 |
| 4.2 SUELOS .....                                                         | 37 |
| 4.2.1 Tipo de suelo .....                                                | 37 |
| 4.2.2 Análisis químico del suelo .....                                   | 39 |
| 4.2.3 Fertilización.....                                                 | 39 |
| 4.3 CULTIVARES UTILIZADOS .....                                          | 40 |
| 4.3.1 Jim's Saparot.....                                                 | 41 |
| 4.3.2 Early Trump .....                                                  | 41 |
| 4.4 Diseño experimental.....                                             | 41 |
| 4.4.1 Manejo del suelo .....                                             | 42 |
| 4.4.2 Manejo del experimento .....                                       | 43 |
| 4.5 MEDICIONES REALIZADAS.....                                           | 43 |
| 4.5.1 Estado fenológico .....                                            | 43 |
| 4.5.2 Crecimiento vegetativo .....                                       | 44 |
| 4.5.3 Determinación del rendimiento total y comercial .....              | 45 |
| 4.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....                                           | 46 |
| 5. RESULTADOS.....                                                       | 47 |
| 5.1 DATOS CLIMÁTICOS .....                                               | 47 |
| 5.2 CICLO DEL CULTIVO .....                                              | 48 |
| 5.3 CRECIMIENTO DEL CULTIVO .....                                        | 49 |
| 5.4 PRODUCCIÓN DE BIOMASA, RENDIMIENTO Y CALDAD.....                     | 54 |
| 5.5 Relaciones entre variables vegetativas y reproductivas .....         | 58 |

|     |                                        |    |
|-----|----------------------------------------|----|
| 6.  | DISCUSIÓN .....                        | 64 |
| 6.1 | Efecto de la variedad .....            | 64 |
| 6.2 | EFFECTO DE LA FECHA DE TRASPLANTE..... | 65 |
| 7.  | CONCLUSIONES .....                     | 68 |
| 8.  | REFERENCIAS.....                       | 69 |
| 9.  | ANEXO .....                            | 82 |

## LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla 1</b> Clasificación taxonómica del Cannabis.....                                                           | 17 |
| <b>Tabla 2</b> Escala temporal de las fases de desarrollo y cantidad de días .....                                  | 19 |
| <b>Tabla 3</b> Estados fenológicos de la planta de Cannabis .....                                                   | 21 |
| <b>Tabla 4</b> Datos de superficie y licencias otorgadas en el periodo 2014-2024 .....                              | 23 |
| <b>Tabla 5</b> Cultivares utilizados en el ensayo .....                                                             | 27 |
| <b>Tabla 6</b> Tabla Análisis químico del suelo .....                                                               | 39 |
| <b>Tabla 7</b> Análisis del compost Urufertil .....                                                                 | 40 |
| <b>Tabla 8</b> Contenido del producto Naturamin-WSP según etiqueta.....                                             | 40 |
| <b>Tabla 9</b> Contenido del producto fertilizante Naturamin-NPK según etiqueta.....                                | 40 |
| <b>Tabla 10</b> Contenido del producto fertilizante Naturafruit según etiqueta.....                                 | 40 |
| <b>Tabla 11</b> Fases y ciclo fenológico de las variedades por fecha de trasplante.....                             | 49 |
| <b>Tabla 12</b> Rendimientos totales de flores y biomasa aérea según variedad .....                                 | 58 |
| <b>Tabla 13</b> Rendimiento, flores categoría A y B por planta según fecha de trasplante ....                       | 58 |
| <b>Tabla 14</b> Correlaciones entre variables de crecimiento vegetativo y reproductivo .....                        | 59 |
| <br>                                                                                                                |    |
| <b>Figura 1</b> Factores que afectan el rendimiento del cultivo .....                                               | 24 |
| <b>Figura 2</b> Número de cultivos según variedad de cáñamo en el sur de Uruguay .....                              | 27 |
| <b>Figura 3</b> Perfil de suelo en el lugar de ensayo.....                                                          | 38 |
| <b>Figura 4</b> Croquis marco de plantación del experimento .....                                                   | 42 |
| <b>Figura 5</b> Registro de precipitaciones acumuladas mensuales 2023-2024 y promedios históricos (1972-2024) ..... | 47 |
| <b>Figura 6</b> Temperaturas máximas, mínimas y medias mensuales en periodos 2023-2024 e históricos .....           | 48 |
| <b>Figura 7</b> Evolución de la altura promedio de las plantas según fecha de trasplante ....                       | 50 |
| <b>Figura 8</b> Evolución de la altura promedio de planta según variedad.....                                       | 50 |
| <b>Figura 9</b> Evolución del diámetro de planta según fecha de trasplante.....                                     | 51 |
| <b>Figura 10</b> Evolución del diámetro de planta según variedad .....                                              | 52 |
| <b>Figura 11</b> Evolución de la fracción PAR interceptada.....                                                     | 53 |
| <b>Figura 12</b> Evolución de la radiación promedio PAR interceptada según variedad .....                           | 54 |
| <b>Figura 13</b> Biomasa aérea total por planta (14% humedad) según variedad .....                                  | 55 |
| <b>Figura 14</b> Biomasa aérea total por planta (14% humedad) según fecha de trasplante ..                          | 55 |
| <b>Figura 15</b> Peso de biomasa, flores categoría A y B (14% humedad) según fecha de trasplante .....              | 56 |
| <b>Figura 16</b> Índice de cosecha por fecha de trasplante .....                                                    | 57 |
| <b>Figura 17</b> Índice de cosecha según variedad .....                                                             | 57 |
| <b>Figura 18</b> Regresión lineal entre biomasa aérea (Kg pl-1 14% H) y PAR interceptada                            | 59 |
| <b>Figura 19</b> Relación entre biomasa aérea total (Kg pl-1 14% H) y diámetro de la canopia final .....            | 59 |
| <b>Figura 20</b> Relación entre biomasa aérea total (Kg pl-1 14% H) y altura final.....                             | 60 |
| <b>Figura 21</b> Regresión lineal entre flores trimmed y categoría A (Kg pl-1 14% H) .....                          | 61 |
| <b>Figura 22</b> Regresión lineal entre flores trimmed y categoría B (Kg pl-1 14% H) .....                          | 61 |

**Figura 23** Relación entre las flores categoría B y PAR interceptada (Kg pl-1 14% H) 62

**Figura 24** Regresión lineal entre flores categoría B (Kg pl-1 14% H) y diámetro final 62

**Figura 25** Regresión lineal entre flores categoría B (Kg pl-1 14% H) y altura final..... 63

## RESUMEN

Conocer la respuesta de las variedades de cáñamo (*Cannabis sativa* L.) ante los múltiples manejos de producción conocidos y los que aún siguen en desarrollo, pueden dar soluciones prácticas a las trabas productivas y comerciales que hoy existen en el rubro. El cannabis en Uruguay presenta limitantes en cuanto a los costos de producción, los cuales hacen que el productor dependa enteramente de la performance en el presente año para poder seguir cultivando en el siguiente. El objetivo de este estudio es generar información de los momentos óptimos de trasplante y/o cosecha de dos variedades Early Trump (Early T) y Jim's Saporot (Jim's S), de ciclos contrastantes como referencia para las que son ampliamente utilizadas en el país. Para esto es que se eligieron tres fechas de trasplante a campo para las dos variedades, 30-11-2023, 20-12-2023 y 10-01-2024 buscando resultados en la respuesta al fotoperíodo en el rendimiento (kg/ha) y la calidad comercial (A/B) de las flores. El ensayo se realizó en el departamento de Canelones, en el predio de la empresa Germinare y las evaluaciones se hicieron durante la zafra 2023-2024. El diseño experimental utilizado fue de bloques completamente al azar (DBCA) con parcelas divididas, en donde las parcelas grandes representaban el tratamiento de fecha de trasplante y las subparcelas de 16 plantas como unidad experimental el tratamiento de variedad. Se midieron variables del crecimiento vegetativo que pudieran estar relacionadas con el rendimiento como, altura de planta, diámetro de canopia e intercepción de radiación solar PAR. De la misma forma en la cosecha, se midieron aspectos de calidad como tamaño de flor y compacidad para determinar las categorías comerciales A y B. En este último caso se evaluó el rendimiento y calidad de las flores de ambas variedades luego del secado, que según normas comerciales debe situarse en el 14% de la humedad del material. Se observó que la variedad de ciclo más largo Jim's S obtuvo rendimientos comerciales superiores en todas las fechas de trasplantes y que además, este factor es explicado en gran medida por la correlación positiva entre las variables altura, diámetro e intercepción de radiación PAR con el rendimiento de las flores de categoría comercial B. A su vez, en la última fecha de trasplante para ambas variedades se pudo notar la mayor proporción de categoría A que B en el rendimiento, acompañado de una menor biomasa aérea en la parte vegetativa. El manejo de la fecha de trasplante y la variedad puede incidir notoriamente en la utilización de la mano de obra para el mantenimiento del cultivo, su cosecha y posterior comercialización, reduciendo costos y aumentando las probabilidades de venta diferenciada por una mayor calidad.

*Palabras clave:* cannabis, variedades, fotoperíodo, rendimiento, calidad

## ABSTRACT

Understanding the response of cannabis varieties (*Cannabis sativa* L.) to different production management practices, both established and under development, may provide practical solutions to current productive and commercial constraints within the sector. In Uruguay, cannabis cultivation faces significant limitations related to production costs, making producers highly dependent on crop performance in each season to ensure continuity of cultivation in subsequent years. The objective of this study was to generate information on the optimal transplanting and/or harvesting periods of two cannabis varieties, Early Trump (Early T) and Jim's Saporot (Jim's S), which have contrasting growth cycles and were used as references for widely cultivated varieties in the country. Three transplanting dates were established for both varieties: November 30, 2023; December 20, 2023; and January 10, 2024, in order to evaluate photoperiod response in terms of yield (kg/ha) and commercial quality (A/B flower categories). The experiment was conducted in the department of Canelones, Uruguay, at the Germinare company's field during the 2023–2024 growing season. A randomized complete block design (RCBD) with split plots was used, with subplots consisting of 16 plants as the experimental unit. Vegetative growth variables potentially related to yield were measured, including plant height, canopy diameter, and photosynthetically active radiation (PAR) interception. At harvest, quality traits such as flower size and compactness were assessed to determine commercial categories A and B. Yield and quality were evaluated after drying, with commercial standards requiring a final moisture content of 14%. Results showed that the longer-cycle variety, Jim's S, achieved higher commercial yields across all transplanting dates. This response was largely explained by the positive correlation between vegetative growth variables—plant height, canopy diameter, and PAR interception—and the yield of category B flowers. Additionally, the latest transplanting date for both varieties showed a higher proportion of category A flowers relative to category B, accompanied by a lower vegetative biomass. Management of transplanting date and varietal selection can significantly influence labor use for crop maintenance, harvest, and post-harvest handling, thereby reducing production costs and increasing the likelihood of commercialization based on quality.

*Keywords:* cannabis, varieties, photoperiod, yield, quality

## 1. INTRODUCCIÓN

El cannabis (*Cannabis sativa* L.) es una planta compleja que se ha utilizado con fines medicinales, recreativos e industriales desde tiempos remotos. La planta contiene más de quinientos compuestos y los cannabinoides son los más estudiados y destacados por su importancia (Uruguay XXI, s.f.).

Se puede afirmar que el cultivo, la producción y el consumo están actualmente globalizados. Según el informe de la United Nations Office on Drugs and Crime (UNODC) el cannabis se produce en 190 países si se consideran tanto indirectos de incautación del cultivo y las tendencias del cultivo en interiores y al aire libre (UNODC, 2022).

Según la Junta Internacional de Fiscalización de Estupefacientes (JIFE), unos 25 países informaron a este organismo sobre la producción de cannabis con fines médicos o científicos (como se cita en Uruguay XXI, s.f.). En 2021, la producción mundial de cannabis destinada a estos fines alcanzó las 764 toneladas. Sin embargo, Canadá, el segundo mayor productor en 2020, no reportó su producción en el último informe. Si se imputa la producción no reportada por Canadá en valores similares a 2020, la cifra de producción mundial de cannabis legal para uso médico o científico alcanzaría las 1.000 toneladas (Uruguay XXI, s.f.). Según estos datos, la producción mundial de cannabis legal para uso medicinal o científico es encabezada por Reino Unido (33%), Canadá (23%) e Italia (15%). El fuerte desarrollo de la industria farmacéutica de Reino Unido, que es el principal productor mundial de extractos de cannabis, y las pioneras políticas de legalización en Canadá explican la importancia de estos países en la producción mundial de cannabis medicinal (UNODC, 2022). Por su parte, Uruguay con el 1% se ubica en el décimo primer puesto del ranking internacional (Junta Internacional de Fiscalización de Estupefacientes [JIFE], 2021; Uruguay XXI, s.f.).

El cannabis en Uruguay tiene su normativa legal en el año 2013 bajo la Ley n° 19.172. En este marco se habilitó el uso, cultivo y producción de la planta con fines comerciales y de investigación. Al mismo tiempo surge un nuevo instituto regulador Instituto de Regulación y Control del Cannabis (IRCCA) encargado de regular las actividades relativas a la producción, comercialización y uso del cannabis para los diversos fines, en cumplimiento de la normativa vigente y contribuyendo desde una perspectiva de derechos humanos al cumplimiento de los objetivos nacionales de salud pública, combate al narcotráfico y seguridad ciudadana. De esta forma, Uruguay se convierte en uno de los países pioneros en la regulación de la planta, así como su venta y distribución. En esta ley se definen los distintos usos de la planta de cannabis, separándolos según su contenido de tetrahidrocannabinol (THC), molécula encargada del efecto psicoactivo. Variedades que cuenten con un contenido superior al 1% de THC serán consideradas psicoactivas, de uso recreativo, y hasta medicinal dependiendo del derivado que se produzca (Uruguay XXI, 2024). En otra categoría se encuentran las variedades con un potencial de producción de esta molécula inferior al 1 %, las cuales se destinan principalmente a usos industriales y a la producción de aceites. En estos casos,

la producción y distribución se encuentran reguladas por el Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP) y el IRCCA (Milanesi et al., 2019).

Las diferencias en los ciclos de cultivo determinan la llegada a la madurez floral y afectan directamente el rendimiento y la calidad del producto final. La elección del cultivar y el manejo agronómico deben ajustarse a los objetivos productivos, ya que factores como el ambiente y la fertilización influyen significativamente en la productividad del cultivo (Maluleke & Thobejane, 2025). En este sentido, el destino comercial condiciona la estrategia productiva, diferenciando sistemas orientados a la obtención de flores de alta calidad de aquellos enfocados en maximizar el rendimiento total.

En el primer caso puede verse como una fortaleza el menor uso de la mano de obra en mantenimiento y cosecha del cultivo, pero, hay que tener en cuenta que las variedades con mayor partición hacia flores de dicha categoría ascienden a un 30% del potencial de producción total. Por otro lado, la producción volcada a industria o mixta, la cual destina una parte a mercado premium y el resto a procesamiento tiene muchas aristas que cubrir, ya que los procesos de cosecha, trimming, secado y logística deben estar muy articulados para no pasarse del momento óptimo de cosecha y tampoco generar pérdidas por excesos de humedad.<sup>1</sup>

En consecuencia, el manejo agronómico debe definirse en función del objetivo productivo. La versatilidad del cáñamo industrial y su potencial para generar productos de alto valor agregado hacen que tanto la elección de la variedad como las prácticas de manejo deban adaptarse al destino final del cultivo, con el fin de maximizar la productividad y la calidad del producto obtenido.

Pese a la legalización en 2014, el cannabis se trata de un rubro nuevo en Uruguay. El mismo cuenta con ensayos por parte de la Universidad de la República- Facultad de Agronomía (Udelar- Fagro) e Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) quienes junto a la voluntad de los productores permiten continuar con la investigación en el cultivo.

La fecha de siembra y trasplante que se utiliza para el cultivo de cannabis tienen gran importancia a la hora de la determinación del rendimiento potencial y calidad del cultivo. De la misma manera, la variedad elegida y su ciclo son aspectos claves que van a determinar el manejo del cultivo, cosecha y postcosecha. Conocer la influencia de estos factores y sus interacciones puede permitir un adecuado manejo de estos, dando un margen de maniobra mucho más grande al productor, pudiendo alinear a su conveniencia el ciclo de la planta y su objetivo de producción.

---

<sup>1</sup> G. Galvão (comunicación personal, 2024).

En el presente trabajo, se analiza la incidencia de estos factores de producción, buscando aportar elementos acerca de la fisiología del cultivo y criterio para la toma de decisiones. También, se pretende contribuir al manejo del cultivo de cannabis con mayor porcentaje de la molécula de cannabidiol (CBD) a través del ajuste de fechas de trasplante para dos materiales genéticos usados en el país. Se buscará generar información acerca del comportamiento y resultado productivo de las variedades Early Trump y Jim'S Saparot trasplantadas en tres fechas (temprana, intermedia y tardía).

## 2. OBJETIVOS

Evaluar el crecimiento, rendimiento y calidad de dos variedades de cannabis CBD usadas en el país, de ciclos contrastantes trasplantadas en tres fechas (temprana, intermedia y tardía) a campo.

### *2.1. HIPÓTESIS DE TRABAJO*

- Al retrasar la fecha de siembra disminuye el rendimiento total de flores debido a que se reduce el área foliar del cultivo a inicio de floración.
- Diferentes cultivares difieren en cuanto a fecha óptima de siembra y trasplante para alcanzar los rendimientos máximos.
- Existe diferencia entre cultivares en la respuesta al atraso de las fechas de siembra y trasplante (interacción cv x fecha).

### 3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. PRODUCCIÓN MUNDIAL

Según la consultora Market Research Future, como se cita en Uruguay XXI (s.f.), más del 70% del mercado medicinal se sustenta en productos con base en CBD y el 30% restante lo ocupan los que utilizan THC. Los productos destinados al manejo del dolor representan en torno al 50% del mercado y los que apuntan al segmento de salud neurológica y mental abarcan casi la totalidad del otro 50%.

La producción mundial de cáñamo viene aumentando en los últimos años debido al crecimiento en la demanda de productos derivados del cáñamo y la legalización de su cultivo en algunos países. En 2022 la United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD) publicó un informe que examina el potencial económico, medioambiental y social del cáñamo. Según el informe, que releva la producción de 40 países, en 2019 se produjeron aproximadamente 275.000 toneladas de cáñamo industrial en bruto o semielaborado en todo el mundo. Los principales productores de fibra de cáñamo son China, Francia, Canadá y Estados Unidos, que juntos concentran más del 50% de la producción mundial (UNCTAD, 2022).

#### 3.2. DESCRIPCIÓN DE LA ESPECIE

##### 3.2.1. Origen

El origen del cannabis en el mundo se remonta a la región de Asia Central, especialmente alrededor de las montañas de la cordillera del Himalaya, en lo que actualmente es el área fronteriza entre Mongolia, el sur de Siberia y el oeste de China. Se cree que esta planta fue domesticada entre 10,000 y 12,000 años, siendo una de las primeras plantas cultivadas por la humanidad. Cannabis Anatolia es considerada una de las variedades de cannabis más antiguas, en parte debido a la rica historia de cultivo y uso del cannabis en la región de Anatolia, que se remonta a miles de años. Esta zona, que abarca gran parte de la actual Turquía, ha sido un cruce de rutas comerciales antiguas que conectaba Asia, Europa y África, lo que permitió el intercambio de plantas, ideas y tradiciones (Clarke & Merlin, 2013). Las variedades de cannabis de Anatolia son especialmente interesantes porque representan un acervo genético ancestral de la planta (Clarke & Merlin, 2013; Small, 2015). Anatolia forma la masa terrestre más occidental de Asia, limitada por el Mar Negro al norte, el Mar Mediterráneo al sur, y el Mar Egeo al oeste, y constituye la mayor parte de la Turquía actual, situada al este del estrecho del Bósforo que conecta el Mar Negro con el Mediterráneo (McPartland & Guy, 2017; Small & Beckstead, 1973).

A lo largo de las estribaciones del Himalaya, en elevaciones templadas, el cannabis se cultiva para la obtención de fibra, semillas y drogas, y abundan las plantas silvestres (Clarke & Merlin, 2013; Small, 2015). Un posible camino para las primeras dispersiones del cannabis pudo haber sido a través de un corredor estrecho desde otro

refugio glacial en el actual suroeste de China, pasando por el norte de Asia del Sur y la Península Arábiga hasta el Medio Oriente (Clarke & Merlin, 2013; Ren et al., 2021). Siglos antes, el clima en las regiones de la estepa de Asia Central era muy similar al actual, y también es probable la dispersión del cannabis a lo largo de las rutas comerciales que cruzan esta región desde China, donde tiene una larga historia como planta alimenticia, de fibra y medicinal (Clarke, 2023).

### 3.2.2. Taxonomía

Según McPartland y Guy (2017), inicialmente el género *Cannabis* fue identificado con un enfoque sistemático en *Species Plantarum* como *Cannabis sativa* por Linnaeus en 1753 como una sola especie. Linnaeus realizó una breve descripción genérica basada en las partes de la flor y las semillas.

**Tabla 1**

*Clasificación taxonómica del Cannabis*

|               |                                    |
|---------------|------------------------------------|
| Reino         | Plantae (plantas)                  |
| Subreino      | Tracheobionta (plantas vasculares) |
| Superdivisión | Espermatofita (planta con semilla) |
| División      | Magnoliofita (planta con flor)     |
| Clase         | Magnoliopsida (dicotiledónea)      |
| Subclase      | Hamamelididae                      |
| Orden         | Urticales                          |
| Familia       | Cannabaceae                        |
| Género        | <i>Cannabis</i>                    |

*Nota.* Adaptado de Chandra et al. (2017).

En 1951, Vavilov teorizó que *C. sativa* y *C. indica* descendían de una especie parental, *C. ruderalis*, clasificación que fue apoyada posteriormente por Schultes y Li, quienes propusieron un género de tres especies: *C. sativa*, *C. indica* y *C. ruderalis*. Schultes y sus colegas describieron *C. indica* como una planta originaria de Afganistán, caracterizada por su baja estatura, densa ramificación, forma cónica y hojas lanceoladas anchas, en contraste con la *C. indica* de Lamarck (Lamarck & Poiret, 1783; Li, 1973; Schultes et al., 1974). Este mismo, describió plantas más altas y menos densas de la India, el sudeste y el sur de África, lo cual generó confusión en torno al uso del epíteto específico

“indica” para describir especímenes de diferentes orígenes (Lamarck & Poiret, 1783; McPartland & Guy, 2017; Schultes et al., 1974).

Esto ha contribuido al debate y a la incertidumbre actual sobre la taxonomía de las especies de *Cannabis*. En 1971, Fetterman et al. (1971) midieron el contenido de cannabinoides en nueve variedades de *Cannabis* y propusieron una clasificación química binaria para diferenciar entre los tipos de *C. sativa* para droga y para fibra, basándose en características físicas y químicas combinadas (Fetterman et al., 1971). Posteriormente, Small y Cronquist (1976) propusieron una agrupación taxonómica considerando características físicas, distribución geográfica y contenido de THC. Este modelo establece una clasificación jerárquica en dos etapas. Primero, se distingue entre dos subespecies: *C. sativa* subsp. *sativa* y *C. sativa* subsp. *indica*, según los niveles de THC y CBD. Luego, se clasifica en grupos de plantas salvajes o cultivadas según el estatus de domesticación, categorizándolas en cuatro grupos basados en niveles de cannabinoides (Lapierre et al., 2023). De acuerdo con la clasificación quimiotípica basada en la proporción de THC y CBD (Hillig & Mahlberg, 2004; Small & Cronquist, 1976), se distinguen los siguientes tipos:

1. Tipo no psicoactivo europeo y de Asia occidental: cultivado para fibra y semillas de aceite; bajo en THC y alto en CBD.
2. Tipo no psicoactivo de Asia oriental: cultivado para fibra y algunas veces semillas; contiene bajos a moderados niveles de THC y CBD.
3. Tipo psicoactivo de alta THC: producido principalmente para efectos psicoactivos.
4. Tipo psicoactivo con proporciones balanceadas de THC y CBD: usado tanto para efectos psicoactivos como medicinales.

Según Barlocco Amorin et al. (2021), esta clasificación no es adecuada como criterio taxonómico al estar regulada genéticamente por mecanismos simples, no evolutivos, lo que conlleva, en poblaciones segregantes, a quimiotipos contrastantes en plantas estrechamente emparentadas. Por su parte, Small y Beckstead (1973), así como Meijer et al. (2003, como se cita en Schilling et al., 2020), sostienen que los quimiotipos no constituyen un criterio válido para la clasificación filogenética, ya que no se basan en relaciones evolutivas. Sin embargo, estos autores consideran que este criterio resulta útil y coherente, en conjunto con otras características agronómicas y botánicas, para la clasificación de distintas variedades.

### 3.2.3. *Cannabinoides*

Los cannabinoides son compuestos terpenofenólicos únicos de *Cannabis*. Son producidos por tricomas glandulares que se encuentran en la mayoría de las superficies epidérmicas aéreas de la planta (Dayanandan & Kaufman, 1976; Turner et al., 1980). Se

sabe que existen aproximadamente 61 cannabinoides, aunque algunos de estos son productos de descomposición o artefactos (Turner et al., 1980).

Se encuentran en plantas con flores, hepáticas y hongos, aunque, fueron aislados por primera vez de *Cannabis sativa* L. (Cannabaceae), una planta con una larga y controvertida historia de uso y abuso (Gaoni & Mechoulam, 1964; Gertsch et al., 2010). El cerebro de los mamíferos tiene receptores que responden a los compuestos encontrados en *C. sativa*. En consecuencia, estos receptores fueron denominados receptores cannabinoides (CBx) (Matsuda et al., 1990). Estos constituyen la base del sistema endocannabinoide. Estudios en humanos y animales han demostrado que el sistema endocannabinoide regula una amplia gama de funciones biológicas, incluyendo la memoria, el estado de ánimo, los sistemas de recompensa cerebral y la adicción a las drogas, así como procesos metabólicos como la lipólisis, el metabolismo de la glucosa y el equilibrio energético (Di Marzo et al., 2004).

*C. sativa* produce predominantemente cannabinoides de tipo alquilo que contienen una unidad de monoterpeno isoprenilo (C10) y una cadena lateral pentil (C5). Los constituyentes más abundantes son el trans- $\Delta^9$ -THC, el CBD, el CBC y el CBG (Gülck & Møller, 2020).

Las preparaciones de cannabis se han utilizado como medicamentos desde la antigüedad (Russo, 2007). Han sido investigadas por su actividad antimicrobiana contra bacterias y hongos, demostrando ser efectivas contra diversas enfermedades infecciosas en humanos y actuando como potentes antibióticos (Appendino et al., 2008; Farha et al., 2020).

### 3.2.4 Ciclo anual

El crecimiento y desarrollo del cultivo se resume en la Tabla 2 separándose entre fases de germinación, crecimiento inicial, crecimiento, y floración (1 y 2).

**Tabla 2**

*Escala temporal de las fases de desarrollo y cantidad de días*

| Germinación | Crecimiento inicial                     | Crecimiento                  | Fase floración 1              | Fase floración 2              |
|-------------|-----------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|             | Enraizado/18hs de luz/ 6hs de oscuridad | 18hs de luz/6hs de oscuridad | 12hs de luz/12hs de oscuridad | 12hs de luz/12hs de oscuridad |
| 3-5 días    | 3-4 semanas                             |                              | 10-15 días                    | 5-6 semanas                   |

*Nota.* Adaptado de Clarke y Merlin (2013).

Para la germinación la semilla se embebe en agua, la radícula se hace visible, emerge el hipocótilo y los cotiledones se despliegan por encima de la superficie (Clarke

& Merlin, 2013). Luego, la planta pasa al estado vegetativo en donde el mismo se caracteriza por el crecimiento del tallo y las hojas, siendo lento al principio, cuando se forman hasta cinco pares de hojas verdaderas y sus espacios entrenudos son cortos. Más tarde el tallo crece rápidamente, y los espacios entrenudos aumentan (Bócsa & Karus, 1998). Durante el estado vegetativo, la planta forma entre siete y hasta doce pares de hojas. El primer par de hojas tiene un solo folíolo, el segundo tiene tres, el tercero cinco y así sucesivamente hasta alcanzar usualmente once folíolos. Una hoja se considera desplegada cuando sus folíolos tienen al menos 1 cm de largo (Clarke & Merlin, 2013).

El cambio de filotaxis (posición de las hojas) de opuesta a alternada es un indicador del comienzo de este estadio fenológico principal, y depende básicamente del cultivar y del largo del día (Bócsa & Kraus, 1998).

El cannabis es una planta anual que completa su ciclo de vida en entre 4 y 6 meses (Clarke & Merlin, 2013). Es una planta de día corto, lo que significa que permanece en estado vegetativo con días largos y solo florece tras experimentar un número determinado de días cortos (Small, 2015). El tiempo de floración está regulado por factores internos y señales ambientales como la edad de la planta, el fotoperiodo, el reloj circadiano, la temperatura, la fitohormona, la giberelina y la vía autónoma (Andrés & Coupland, 2012; Halliday et al., 2003). Si bien factores ambientales como la temperatura afectan la floración, el Cannabis es particularmente sensible al fotoperiodo (Spitzer-Rimon et al., 2019). Comprender los factores genéticos que controlan la floración es esencial, ya que influye en el propósito del cultivo: variedades de floración tardía favorecen el crecimiento vegetativo para la producción de fibra, mientras que las variedades de floración temprana maximizan la producción de flores y semillas (Clarke & Merlin, 2013; Schilling et al., 2020).

La fenología estudia la ocurrencia de las fases en el ciclo de vida de las plantas. En este caso, el término “fase” se relaciona con la aparición o desaparición de los órganos vegetales; así, se cuenta, por ejemplo, con la fase de emergencia o la fase de floración, las cuales dependen de factores ambientales (De Marco et al., 2021, como se cita en Candelario-Guerrero et al., 2023). La escala alemana Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie (BBCH) es una forma de codificar las etapas fenológicas de las plantas (Meier, 2018) que fue estandarizada por Mishchenko et al. (2017) para las fases de crecimiento de *C. sativa*, la cual se detalla en la Tabla A1 (anexo). De esta manera se han identificado seis fases para dicha planta: germinación, emergencia, etapa vegetativa, floración, formación de semillas y senescencia (Mediavilla et al., 1998).

**Tabla 3***Estados fenológicos de la planta de Cannabis*

| <b>Fase</b>                                           | <b>Descripción general</b>                                                                            | <b>Características morfológicas principales</b>                                                                      | <b>Criterio para definir la fase</b>                            |
|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Fase Vegetativa I (plántula e inicio del crecimiento) | Germinación y primeras semanas de establecimiento tras el trasplante. Periodo de adaptación en campo. | Porte pequeño, tallo delgado, hojas de color verde claro.                                                            | Etapa inicial desde germinación hasta establecimiento.          |
| Fase Vegetativa II (crecimiento vegetativo activo)    | Crecimiento vigoroso y rápido. Desarrollo de la estructura aérea.                                     | Hojas grandes y palmeadas (7–11 foliolos), tallo engrosado, ramas laterales, aspecto arbustivo, color verde intenso. | ≥70% de las plantas en Vegetativa II.                           |
| Fase Reproductiva I (prefloración)                    | Inicio de la expresión del sexo y transición a fase reproductiva.                                     | Pistilos blancos en nudos; incremento marcado en altura.                                                             | ≥50% de las plantas con pistilos en yemas axilares.             |
| Fase Reproductiva II (floración)                      | Formación activa de flores y aumento de tricomas.                                                     | Flores compactas con pistilos blancos; tricomas abundantes y aspecto resinoso.                                       | ≥70% de las flores compactas con pistilos bronce.               |
| Fase Reproductiva III (maduración y cosecha)          | Máxima densidad floral y madurez de los tricomas.                                                     | Tricomas transparentes → lechosos → ámbar; pistilos marrón/anaranjado; senescencia de hojas grandes.                 | Predominio de tricomas lechosos/ámbar como criterio de cosecha. |

*Nota.* Adaptado de Spitzer-Rimon et al. (2019), Bernstein et al. (2019) y Potter (2009).

### 3.3 SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

En Uruguay, el cultivo de cannabis se desarrolla a través de diferentes sistemas de producción, cada uno adaptado a los objetivos comerciales y a las normativas vigentes (Milanesi et al., 2019; Uruguay XXI, s.f.). En términos generales, la producción puede dividirse en tres enfoques principales: cultivo doméstico, producción para uso medicinal y producción para uso industrial (Uruguay XXI, s.f.). El cultivo doméstico está regulado por IRCCA y permite a los ciudadanos mayores de edad cultivar un número limitado de plantas para consumo personal. Este sistema busca reducir el mercado ilegal y ofrecer a los consumidores una alternativa regulada (Milanesi et al., 2019). Por otro lado, la producción de cannabis con fines medicinales se realiza bajo estrictos controles sanitarios y requiere autorización del Ministerio de Salud Pública (MSP). En este caso, las plantas son cultivadas en condiciones controladas para garantizar la estandarización de los compuestos activos, como el cannabidiol (CBD) y el tetrahidrocannabinol (THC) (Uruguay XXI, s.f.). Estas plantaciones pueden realizarse en invernaderos o en campo abierto dependiendo de la variedad y de las necesidades específicas de cada producto final (Uruguay XXI, s.f.). La producción industrial de cannabis se enfoca en la obtención de fibra y semillas para diversos usos, incluyendo la fabricación de textiles, bioplásticos, alimentos y suplementos (Amaducci et al., 2007; Small, 2015). Este tipo de cultivo, conocido como cáñamo industrial, requiere bajos niveles de THC y suele desarrollarse en grandes extensiones de terreno (Amaducci et al., 2007). En este ámbito, Uruguay ha avanzado en la regulación para fomentar inversiones en la industria y aprovechar su potencial en los mercados internacionales (Uruguay XXI, s.f.). Estos sistemas de producción han posicionado a Uruguay como un referente en la regulación del cannabis, promoviendo un desarrollo agrícola controlado y sostenible (Uruguay XXI, 2024).

En el año 2023 se cumplió el sexto año consecutivo de exportaciones para la industria del cannabis desde su reglamentación en 2013. Con un ecosistema de más de 100 empresas, la oferta exportable de la industria se expandió tanto en el cáñamo industrial como en el cannabis medicinal. Desde 2018 el país exportó una variedad de productos, incluyendo semillas, biomasa y flores de cáñamo para uso no médico, así como flores con alto contenido de THC para uso médico, además de medicamentos y productos terminados (Uruguay XXI, s.f.). Al igual que en años anteriores, las flores continuaron siendo el principal producto exportado, representando más del 80 % del valor total de las exportaciones de la industria en 2023. Esta categoría incluye tanto flores de cáñamo destinadas a usos no médicos como flores con alto contenido de THC para uso medicinal (Uruguay XXI, 2024). Le siguieron las exportaciones de medicamentos, que alcanzaron su valor más alto hasta el momento, y las semillas de cáñamo, que registraron el mayor volumen y valor exportado hasta la fecha (Uruguay XXI, 2024). A nivel de cáñamo industrial, se observó un aumento del 18 % en el valor total exportado en comparación con 2022 (Uruguay XXI, 2024). Aunque las flores de cáñamo para uso no médico continuaron representando el 94% del total de exportaciones, en el 2023 se registró la mayor exportación de semillas hasta la fecha, con 11.5 toneladas (Uruguay XXI, 2024).

En el período analizado, comprendido entre 2014 y 2024, se observa una tendencia hacia sistemas de producción bajo invernáculo, con una superficie creciente hasta el año 2021/22, cuando alcanza su máximo, para luego registrar una leve caída hasta la actualidad. En cuanto al área cultivada a cielo abierto, se observa una tendencia similar, aunque con menor superficie utilizada bajo esta modalidad. No obstante, en el último año analizado (2023/2024) se registra un leve incremento (Uruguay XXI, 2024). Con estos datos podemos suponer que los productores prefieren modelos más tecnificados y controlados, lo que nos da la pauta de una apuesta hacia la calidad de la materia prima (Tabla 3) (Uruguay XXI, 2024).

**Tabla 4**

*Datos de superficie y licencias otorgadas en el periodo 2014-2024*

| <b>Año</b>     | <b>Cielo abierto<br/>(m2)</b> | <b>Invernáculo (m2)</b> | <b>Licencias</b> |
|----------------|-------------------------------|-------------------------|------------------|
| <b>2014/15</b> | 20                            | 0                       | 2                |
| <b>2015/16</b> | 380                           | 1.200                   | 3                |
| <b>2016/17</b> | 480                           | 4.000                   | 5                |
| <b>2017/18</b> | 410                           | 8.630                   | 14               |
| <b>2018/19</b> | 1.330                         | 38.500                  | 39               |
| <b>2019/20</b> | 1.350                         | 40.000                  | 42               |
| <b>2020/21</b> | 580                           | 120.000                 | 80               |
| <b>2021/22</b> | 513                           | 239.782                 | 167              |
| <b>2022/23</b> | 243                           | 80.339                  | 67               |
| <b>2023/24</b> | 342                           | 46.924                  | 36               |

*Nota.* Adaptado de Pizzanelli (2022).

### 3.4 COMPONENTES DEL RENDIMIENTO

Según Van Ittersum y Rabbinge (1997), los factores que afectan el rendimiento de los cultivos pueden agruparse en tres niveles, reflejando distintos escenarios productivos según el tipo de limitación que imponen. En primer lugar, el rendimiento potencial está determinado por factores como la radiación incidente, la temperatura, la humedad relativa y las características del cultivo, las cuales dependen del genotipo (variedad) y del manejo del dosel vegetal (Evans & Fischer, 1999; Van Ittersum & Rabbinge, 1997).

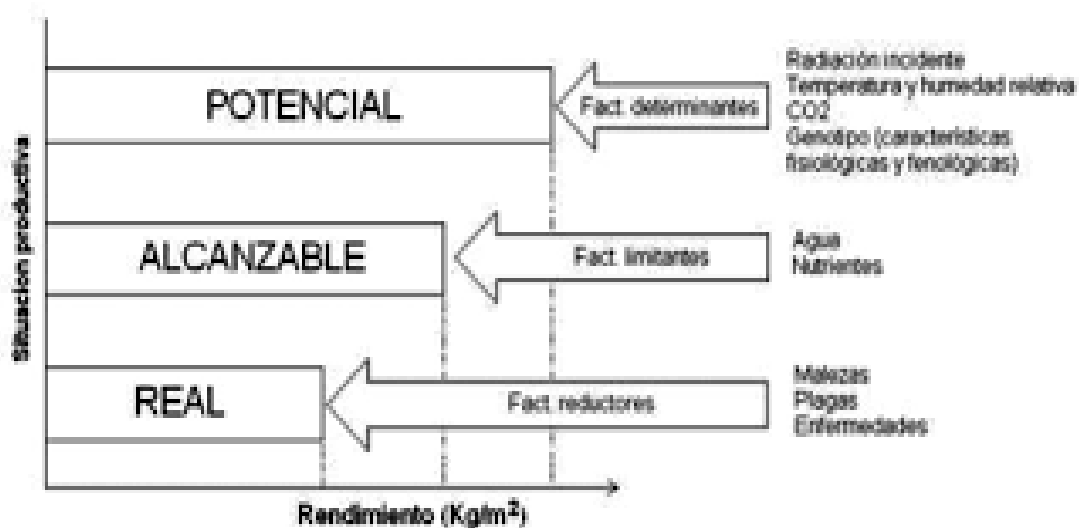
En segundo lugar, el rendimiento alcanzable se ve condicionado por la disponibilidad de agua y nutrientes, así como por su manejo. Esto incluye la fertilización mineral, el momento y la dosis de aplicación de macro y micronutrientes, y la calidad del suelo en términos químicos (pH, conductividad eléctrica, contenido de nutrientes y materia orgánica) (Van Ittersum & Rabbinge, 1997). Además, influyen el manejo del riego y fertirriego (balance hídrico del cultivo) y las propiedades físicas del suelo, como su estructura, profundidad, textura del horizonte A y capacidad de retención de agua (Lobell et al., 2009; Van Ittersum et al., 2013).

Finalmente, el rendimiento real está determinado por factores reductores, como la incidencia de enfermedades, la presencia de plagas y la competencia con malezas, que afectan la productividad final del cultivo (Lobell et al., 2009; Van Ittersum et al., 2013).

El Cannabis cultivado al aire libre requiere plena exposición al sol para crecer de manera óptima. En Uruguay, el cultivo en exteriores comienza a finales de septiembre o principios de octubre, cuando las temperaturas empiezan a elevarse, y puede extenderse a marzo o principios de abril, dependiendo de la variedad (Chandra et al., 2017).

#### Figura 1

*Factores que afectan el rendimiento del cultivo*



*Nota.* Adaptado de Van Ittersum y Rabbinge (1997).

Si el cultivo se inicia a partir de semillas, las plántulas pueden criarse en pequeñas macetas biodegradables (como macetas jiffy de 2") y, posteriormente, las plántulas saludables seleccionadas (o las semillas directamente) se trasplantan al campo. Las flores masculinas comienzan a aparecer entre los 2 y 3 meses de crecimiento (alrededor de mediados de enero), seguidas por las flores femeninas (Chandra et al., 2017). Las plantas masculinas se eliminan del campo porque contienen menos CBD en comparación con las plantas femeninas; su presencia puede inducir la polinización dentro de una variedad, lo que provoca la producción de semillas en la cosecha madura, reduciendo la biomasa total y, en consecuencia, la concentración de THC en comparación con las plantas sin semillas. Por otra parte, la remoción de plantas masculinas impide la polinización cruzada entre variedades, especialmente si se cultivan diferentes genotipos en parcelas cercanas.

Debido a la naturaleza alógama del Cannabis, mantener la consistencia en el perfil químico de genotipos seleccionados con alto contenido de CBD es complicado cuando se cultivan a partir de semillas en condiciones de campo. Por esta razón, el método más utilizado es la propagación vegetativa mediante esquejes de plantas madre seleccionadas, cuya composición química ha sido previamente analizada y certificada (Potter, 2014; Saloner & Bernstein, 2020). De manera similar a la propagación por semilla, los esquejes pueden criarse en macetas jiffy biodegradables y, una vez enraizados, se trasplantan directamente al campo (Chandra et al., 2017).

#### **3.4.1 Fotoperiodo**

Para un crecimiento vigoroso de la biomasa de Cannabis, la calidad, cantidad y duración del fotoperiodo son aspectos fundamentales. La calidad y cantidad de luz tienen una influencia profunda en la fotosíntesis, lo que, en última instancia, afecta el crecimiento y desarrollo de la planta (Devlin, 1975). Se ha informado que el Cannabis se beneficia de una alta densidad de flujo de fotones fotosintéticos para la fotosíntesis y el crecimiento (Chandra et al., 2008). Un fotoperiodo de dieciocho horas o más es ideal para el crecimiento vegetativo, mientras que un fotoperiodo de 12 horas es recomendado para la inducción de la floración (Chandra et al., 2008; Spitzer-Rimon et al., 2019).

#### **3.4.2 Temperatura**

La dependencia de la fotosíntesis respecto a la temperatura ha sido revisada por varios autores en diferentes especies vegetales (Hikosaka et al., 2006; Nagai & Makino, 2009; Sage & Sharkey, 1987). En Cannabis, el desarrollo y crecimiento de las diferentes variedades difiere de acuerdo a su hábitat de origen y composición genética. Sin embargo, se ha determinado que una temperatura de crecimiento entre 25 y 30 °C es óptima para la mayoría de las variedades de Cannabis (Chandra et al., 2008).

#### **3.4.3 Irrigación y Humedad Relativa**

La humedad juega un papel crítico en cada etapa del crecimiento del Cannabis (Caplan et al., 2017; Potter, 2014). En entornos de cultivo cerrados, la acumulación de

humedad o condensación es común debido al riego y la transpiración de las plantas. Para mantener condiciones óptimas, se requiere una adecuada ventilación, circulación de aire y, en algunos casos, deshumidificación (Chandra et al., 2017; Potter, 2014). La cantidad y frecuencia de riego de las plantas de Cannabis varía según la etapa de crecimiento, tamaño de las plantas y recipientes, temperatura de crecimiento, humedad y otros factores (Caplan et al., 2017). El Cannabis requiere una humedad alta en la etapa juvenil (esquejes o plántulas). Los esquejes vegetativos necesitan una pulverización regular de agua en las hojas para mantener una alta humedad en su microclima hasta que desarrollen raíces (Saloner & Bernstein, 2020). Una vez establecidas, la capa superior del suelo debe secarse antes de volver a regar las plantas (Caplan et al., 2017). Se recomienda una humedad del 75 % durante la etapa juvenil y entre el 55-60 % durante las etapas vegetativa activa y de floración (Chandra et al., 2008).

#### 3.4.4 Genética

La genética desempeña un papel fundamental en el rendimiento de *Cannabis sativa*, ya que define su potencial productivo y su capacidad de adaptación a diversas condiciones ambientales. Factores como la producción de biomasa, la eficiencia en el uso de recursos, la síntesis de compuestos bioactivos y el ciclo de crecimiento están determinados en gran medida por el genotipo de la planta (Clarke, 2023). En la actualidad, la mejora genética de *C. sativa* se centra en la selección de variedades con características específicas para aplicaciones médicas y agrícolas, incluyendo resistencia a enfermedades, tolerancia al estrés ambiental y producción optimizada de compuestos bioactivos (Van Bakel et al., 2011).

Distintos genotipos presentan variaciones en su capacidad de absorción de nutrientes, uso eficiente del agua y respuesta a la radiación lumínica, lo que impacta significativamente en el rendimiento. Otro factor clave es la síntesis de cannabinoides y terpenos, compuestos esenciales para las aplicaciones medicinales e industriales de la planta. Según Clarke y Merlin (2016) y Sawler et al. (2015), la selección artificial en el cannabis se ha centrado principalmente en las plantas femeninas, lo que ha tenido un impacto significativo en su evolución durante el proceso de domesticación. Tanto el aumento de rendimiento de las semillas como de las glándulas de resina dependen de una mayor producción de flores femeninas. Los cultivares seleccionados para comercialización de flores presentan inflorescencias más grandes que contienen más flores en comparación con los cultivares de fibra (Clarke & Merlin, 2013; Spitzer-Rimon et al., 2019).

Las inflorescencias femeninas de mayor tamaño proporcionan una mayor superficie para la producción de tricomas glandulares productores de cannabinoides (Chandra et al., 2017; Small, 2015). Algunas variedades han sido seleccionadas para maximizar la producción de THC, mientras que otras están enfocadas en el CBD o en la obtención de fibra textil (Clarke & Merlin, 2013; Small, 2015). El ciclo de crecimiento y floración también depende de la genética, ya que existen variedades cuya floración se activa según la duración del día, y variedades auto florecientes, que florecen

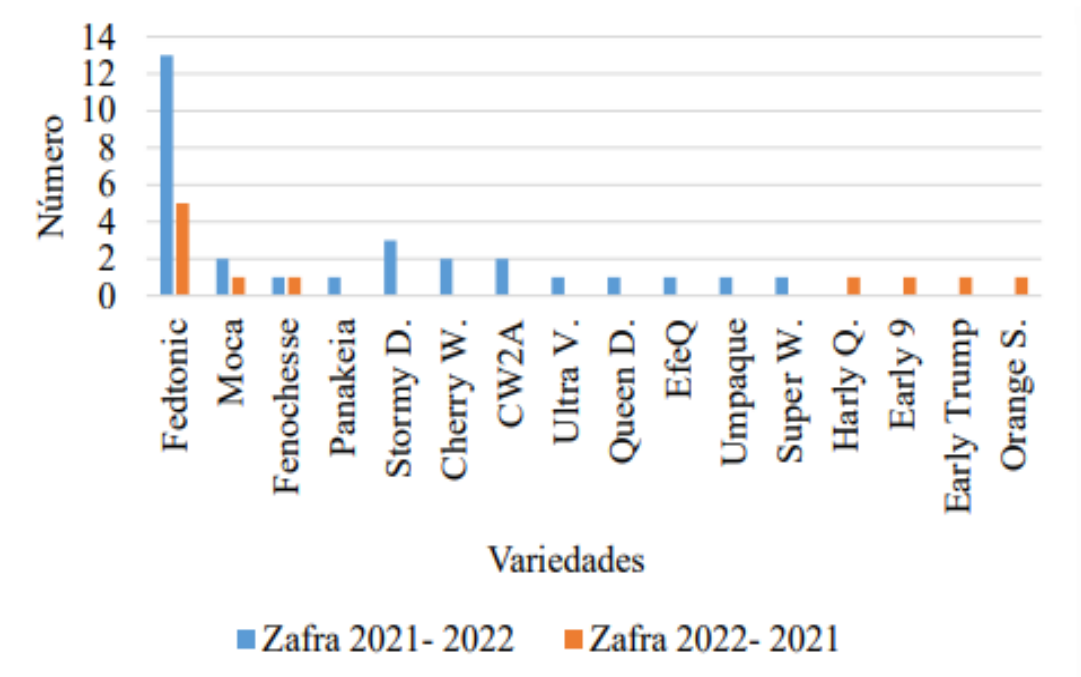
independientemente del fotoperiodo (Saloner & Bernstein, 2020; Spitzer-Rimon et al., 2019). Esta característica genética es determinante para la programación de la cosecha y la posibilidad de realizar múltiples ciclos de cultivo en un año (Clarke, 2023).

Dado que el rendimiento del cultivo resulta de la interacción entre los factores genéticos y las condiciones ambientales, la selección de variedades con características específicas, combinada con un manejo agronómico adecuado, es clave para maximizar la productividad y la calidad del producto final (Clarke, 2023).

**Tabla 5**  
*Cultivares utilizados en el ensayo*

| Cultivar      | Genotipo                     | Especie         | Variedad |
|---------------|------------------------------|-----------------|----------|
| Jim`s Saparot | ‘CT#4’ × ‘CT#4               | Cannabis Sativa | Híbrido  |
| Early Trump   | Trump (T1)’ × ‘Auto Tsunami’ | Cannabis Sativa | Híbrido  |

**Figura 2**  
*Número de cultivos según variedad de cáñamo en el sur de Uruguay*



*Nota.* Tomado de Albín et al. (2024).

### 3.5 Radiación

La radiación incidente es uno de los factores determinantes en el rendimiento del *Cannabis sativa* L., ya que afecta el crecimiento, la biomasa y la producción de metabolitos secundarios como los cannabinoides y terpenos. La cantidad y calidad de la luz recibida por la planta influyen en la tasa fotosintética y en la asignación de recursos energéticos, lo que impacta directamente en la producción de flores y en la concentración de compuestos bioactivos como el THC y el CBD (Chandra et al., 2008).

#### 3.5.1 Radiación y fotosíntesis

La fotosíntesis en el cannabis es altamente dependiente de la radiación fotosintéticamente activa (PAR, por sus siglas en inglés, 400–700 nm). Estudios han demostrado que un aumento en la irradiancia incrementa la tasa de fotosíntesis y, en consecuencia, la producción de biomasa y flores (Potter & Duncombe, 2012). La eficiencia fotosintética del cannabis tiende a saturarse a intensidades lumínicas superiores a 1.500–2.000  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , lo que indica que la planta puede beneficiarse de altos niveles de luz hasta cierto umbral (Vanhove et al., 2011).

#### 3.5.2 Radiación UV y acumulación de cannabinoides

El UV-B (280–315 nm) tiene un efecto importante en la producción de metabolitos secundarios en el cannabis. Se ha observado que la exposición a UV-B incrementa la concentración de THC en flores y hojas, lo que sugiere que los cannabinoides pueden actuar como una barrera protectora contra el daño oxidativo causado por la radiación ultravioleta (Lydon et al., 1987). Sin embargo, la producción de CBD y otros cannabinoides como CBG y CBC no parece verse afectada significativamente por el UV-B.

Además, estudios han mostrado que la exposición a radiación UV-C puede inducir la biosíntesis de otros compuestos fenólicos, como los estilbenos y los derivados del ácido cinámico, aunque su papel en la fisiología del cannabis aún no está completamente comprendido (Marti et al., 2014).

#### 3.5.3 Relación entre radiación y rendimiento

El rendimiento del cannabis está determinado por la biomasa total y la proporción de flores en comparación con el material vegetativo. Un mayor acceso a la luz favorece un crecimiento más vigoroso y una mayor relación flor/hoja, lo que se traduce en un mayor rendimiento de cannabinoides por unidad de área cultivada (Chandra et al., 2015).

Además, se ha encontrado que la variabilidad estacional en la radiación solar afecta la concentración de CBD en plantas cultivadas en exteriores (Latta & Eaton, 1975). De manera similar, se ha observado que las plantas que crecen a mayores altitudes, donde la exposición a UV es más intensa, tienden a producir mayores concentraciones de CBD (Bouquet, 1950).

### 3.5.4 Radiación y eficiencia en el uso del agua

El cannabis es una especie con alta eficiencia en el uso del agua en condiciones de alta radiación. Se ha reportado que el aumento en la irradiancia incrementa la eficiencia fotosintética y la asimilación de CO<sub>2</sub>, lo que optimiza el balance hídrico de la planta (Chandra et al., 2008). Esto sugiere que un manejo adecuado de la luz puede mejorar la productividad sin incrementar significativamente el consumo de agua.

### 3.6 FECHA DE TRASPLANTE

La fecha de trasplante en cultivos a cielo abierto es un factor determinante para el éxito del cultivo de *Cannabis sativa*, ya que influye en el desarrollo vegetativo, la floración y el rendimiento final. En regiones de clima templado, el trasplante suele realizarse en primavera, cuando las temperaturas mínimas superan los 10-12°C y el riesgo de heladas ha disminuido (Amaducci et al., 2012). Un trasplante temprano permite un mayor desarrollo vegetativo antes de la inducción floral, lo que se traduce en plantas más robustas y con mayor producción de biomasa (Lisson et al., 2000). En lo que respecta a la producción de cannabinoides, la fecha de trasplante influye tanto en la biomasa total como en la concentración de estos compuestos en la planta. Trasplantes tempranos favorecen un mayor crecimiento, pero pueden diluir la concentración de cannabinoides, mientras que los trasplantes tardíos, al limitar el desarrollo vegetativo, pueden incrementar la concentración relativa de estos metabolitos (Caplan et al., 2017; Chandra et al., 2017). Un estudio comparativo determinó que plantas trasplantadas en primavera produjeron más biomasa total, pero con un contenido de CBD entre un 15 y un 20% menor en comparación con aquellas establecidas a mediados del verano (Chandra et al., 2017).

La elección del momento óptimo de trasplante depende del fotoperiodo y la variedad cultivada. En variedades de *Cannabis sativa* de días largos, el trasplante temprano (fines de septiembre a noviembre en el hemisferio sur) favorece un mayor crecimiento antes de la floración inducida por la reducción de las horas de luz en otoño (Chandra et al., 2017). En cambio, las variedades autoflorecientes no dependen del fotoperiodo y pueden trasplantarse en cualquier momento con condiciones climáticas favorables (Mediavilla et al., 1998).

Además del clima y el fotoperiodo, la preparación del suelo es clave para un trasplante exitoso. Se recomienda realizar el trasplante en suelos con buen drenaje, ricos en materia orgánica y con una estructura adecuada para el desarrollo radicular. La combinación de una fecha de trasplante óptima con prácticas de manejo como el riego eficiente y la fertilización equilibrada permite maximizar el rendimiento del cultivo a cielo abierto (Amaducci et al., 2012).

### 3.7 VARIABLES LIMITANTES DEL RENDIMIENTO

#### 3.7.1 Agua

El agua es un recurso esencial en el cultivo de cannabis, ya que influye directamente en su crecimiento, metabolismo y producción de compuestos bioactivos. La disponibilidad hídrica adecuada permite el transporte de nutrientes, la regulación térmica y la realización eficiente de la fotosíntesis. En condiciones óptimas, el cannabis responde favorablemente a un riego controlado, logrando maximizar su biomasa y la concentración de metabolitos secundarios, como los cannabinoides y los terpenos (Caplan et al., 2017; Saloner & Bernstein, 2020).

#### 3.7.2 Suelo

El suelo es otro factor determinante en la productividad del cannabis, ya que constituye la base para el anclaje radicular y la absorción de agua y nutrientes. Las propiedades físicas y químicas del suelo influyen en la disponibilidad de elementos esenciales para el desarrollo de la planta, así como en su capacidad para retener humedad y permitir el adecuado drenaje del agua (Chandra et al., 2017).

Las características ideales de un suelo para el cultivo de cannabis incluyen una textura franco-arenosa, que permite un equilibrio adecuado entre retención de agua y drenaje, evitando problemas de anegamiento o estrés hídrico (Cockson et al., 2019). Además, un contenido de materia orgánica entre 3 y 5% mejora la fertilidad del suelo y su capacidad de retención de agua, favoreciendo un crecimiento vigoroso de la planta (Saloner & Bernstein, 2022). El pH también juega un papel clave, ya que valores entre 5.8 y 6.5 optimizan la absorción de nutrientes y previenen la aparición de deficiencias o toxicidades (Caplan et al., 2017).

Los suelos con problemas de compactación pueden representar una limitante importante, ya que restringen el desarrollo del sistema radicular y reducen la eficiencia en la absorción de agua y nutrientes (Bernstein et al., 2019). De manera similar, suelos con drenaje deficiente pueden generar condiciones de hipoxia radicular, afectando la salud de la planta y aumentando la susceptibilidad a enfermedades. La baja fertilidad del suelo también puede comprometer el rendimiento, ya que la deficiencia de nutrientes clave como nitrógeno, fósforo y potasio impacta negativamente la producción de biomasa y cannabinoides (Saloner & Bernstein, 2020).

#### 3.7.3 Fertilización

La fertilización en *Cannabis sativa* L. es un factor clave que influye en el rendimiento y la calidad de la producción, afectando el crecimiento vegetativo, la floración y la acumulación de metabolitos secundarios como los cannabinoides y terpenos. Para optimizar su desarrollo, es fundamental un manejo adecuado de los macronutrientes (Nitrógeno, Fósforo y Potasio, N-P-K) y los micronutrientes esenciales, adaptado a las diferentes fases fenológicas del cultivo (Caplan et al., 2017).

El nitrógeno (N) es uno de los elementos más importantes para el desarrollo vegetativo de *Cannabis sativa*. Su deficiencia se asocia con clorosis en las hojas y un crecimiento reducido, mientras que su exceso puede provocar un retraso en la floración y afectar negativamente la calidad del producto final (Caplan et al., 2017; Cockson et al., 2019; Saloner & Bernstein, 2020). En cultivos destinados a la producción de fibra, una dosis óptima de nitrógeno favorece el crecimiento de los tallos y la acumulación de biomasa, mientras que, en cultivos de cannabinoides, un manejo controlado del N es fundamental para evitar la dilución de compuestos activos (Lisson et al., 2000). Estudios han reportado que dosis entre 100 y 200 kg ha<sup>-1</sup> de N pueden maximizar la producción sin afectar la calidad de la floración (Saloner & Bernstein, 2020).

El fósforo (P) es crucial para el desarrollo radicular y la formación de flores y semillas. Su disponibilidad en el suelo influye en la absorción de otros nutrientes y en la síntesis de ATP, fundamental para la división celular y el transporte de energía en la planta. Niveles bajos de P pueden limitar el desarrollo de raíces y reducir la eficiencia del uso del agua, mientras que un exceso puede generar bloqueos en la absorción de micronutrientes como el zinc (Zn) y el hierro (Fe) (Cockson et al., 2019).

El potasio (K) desempeña un papel fundamental en la regulación osmótica, la resistencia a enfermedades y la síntesis de terpenos y cannabinoides. Su aplicación adecuada mejora la tolerancia al estrés hídrico y térmico, favoreciendo la acumulación de metabolitos secundarios en cultivos destinados a la producción de aceites esenciales y extractos medicinales. Estudios indican que dosis entre 150 y 250 kg ha<sup>-1</sup> de K pueden mejorar significativamente la calidad del cannabis sin efectos negativos sobre el crecimiento (Caplan et al., 2017).

La elección del tipo de fertilización depende del sistema de producción y de los objetivos del cultivo. En sistemas orgánicos, la fertilización se basa en el uso de fuentes naturales como compost, estiércol y otros insumos de liberación lenta, que contribuyen a una disponibilidad sostenida de nutrientes. El manejo de la fertilización influye significativamente en el crecimiento y rendimiento del cultivo, dependiendo de las condiciones ambientales y del sistema productivo (Maluleke & Thobejane, 2025).

### 3.8 FACTORES REDUCTORES DEL RENDIMIENTO

Los cultivos de cannabis en Uruguay se ven afectados por diversas plagas y enfermedades, aunque ninguna de las especies de insectos y ácaros identificadas es específica de esta planta. La mayoría de los organismos detectados son polífagos, es decir, afectan a múltiples cultivos y ya estaban presentes en otros sistemas agrícolas del país (Landi et al., 2019; McPartland et al., 2000).

#### 3.8.1 Enfermedades

Las enfermedades más frecuentes observadas en los cultivos relevados incluyen la pudrición de inflorescencias causada por *Botrytis cinerea*, la pudrición de inflorescencias asociada a *Fusarium* sp., y el cancro de tallos y ramas provocado por

*Neofusicoccum parvum* (Landi et al., 2019; McPartland et al., 2000; Punja et al., 2019). Por otro lado, en las muestras analizadas en laboratorio, se identificaron casos de marchitamiento de plantas asociado a *Sclerotium rolfsii*, pudrición de tallos y ramas causada por *Botrytis cinerea*, y nuevamente el cancro de tallos y ramas provocado por *Neofusicoccum parvum* (Rousserie & Collazo, 2022).

### 3.8.2 Plagas

Entre las principales plagas que afectan el cannabis en Uruguay, según Rousserie y Collazo (2022) destacan:

- Arañuela roja (*Tetranychus urticae*): se posiciona como la plaga de mayor importancia relativa en cultivos de interior, aunque su presencia en campo es menor.
- Ácaro blanco (*Polyphagotarsonemus latus*): su impacto es significativo en invernaderos destinados a la producción de flores, donde puede causar daños severos.
- Moscas blancas (*Trialeurodes vaporariorum* y *Bemisia tabaci*): su incidencia es mayor en cultivos de interior, donde pueden generar grandes pérdidas, especialmente en ausencia de manejo adecuado tras su detección.
- Pulgones (*Aphidoidea*): representan una amenaza considerable debido a su capacidad de reducir la calidad comercial de las flores, debilitar las plantas y transmitir virus.
- Lagartita (*Argyrotaenia sphaleropa*): es una de las plagas más comunes tanto en campo como en invernadero, causando daños significativos.
- Lagartas (Orden Lepidoptera): aunque se registraron diversas especies alimentándose del follaje, en general, los daños observados no fueron de gran magnitud.
- San Antonio verde (*Diabrotica speciosa*): su presencia fue frecuente en los cultivos, aunque los daños observados fueron de baja importancia económica (Rousserie & Collazo, 2022).

El control de estas plagas y enfermedades requiere una estrategia de manejo integrado que incluya monitoreo constante, control biológico y aplicación de medidas preventivas para minimizar pérdidas y garantizar la sanidad del cultivo.

Además de los hongos, las bacterias como *Xanthomonas campestris* pueden provocar manchas foliares y necrosis en los tejidos, mientras que los virus como el Hop latent viroid (HLVd) han sido identificados como una amenaza emergente en cultivos comerciales, causando reducciones en el vigor de la planta y alteraciones en la producción de cannabinoides (Van Gelderen et al., 2018).

Para prevenir estas enfermedades, se recomienda la implementación de buenas prácticas agrícolas, como la desinfección de herramientas y sustratos, el control de la humedad ambiental y la selección de variedades resistentes (Cranshaw et al., 2019; McPartland et al., 2000; Punja et al., 2019). El uso de productos biológicos en base a *Trichoderma* spp. y extractos de plantas con actividad antifúngica ha demostrado ser una alternativa efectiva y sostenible para reducir el impacto de los patógenos en cultivos de cannabis (Scott, 2018).

### **3.8.3 Malezas**

Las malezas representan otro factor que puede reducir el rendimiento del cannabis al competir por recursos esenciales como luz, agua y nutrientes. La presencia de especies invasoras en los campos de cultivo disminuye la disponibilidad de estos insumos, lo que puede llevar a un crecimiento deficiente de la planta y una menor producción de biomasa (Da Silva et al., 2022).

Además del efecto competitivo, algunas malezas pueden actuar como reservorios de plagas y enfermedades. Por ejemplo, especies de los géneros *Amaranthus* spp. y *Chenopodium* spp. pueden albergar poblaciones de insectos fitófagos y hongos patógenos que luego se trasladan al cannabis, incrementando la presión de plagas y enfermedades en el cultivo (Zimdahl, 2018).

El manejo de malezas en el cannabis se basa en estrategias combinadas, incluyendo el uso de coberturas vegetales, la aplicación de mantillo orgánico para reducir la germinación de semillas de malezas y el control mecánico mediante escardas manuales o laboreo superficial (Kaur et al., 2025). En sistemas orgánicos, el uso de extractos de aceites esenciales con actividad herbicida ha mostrado eficacia en la supresión de malezas sin afectar negativamente el desarrollo del cannabis (Scott, 2018).

## **3.9 MANEJO DEL CULTIVO**

### **3.9.1 Propagación**

Según Barlocco Amorin et al. (2021), se utilizan dos métodos de propagación: sexual (semillas) y asexual (esquejes). Para llevar a cabo la propagación vegetativa, se selecciona el genotipo de interés, para luego hacer crecer las plantas (denominadas madres) y mantenerlas en estado vegetativo. A estas plantas madre se le extraen brotes y se enraízan produciéndose esquejes, que luego darán origen a una nueva planta con el mismo genotipo, es decir, clones (Cervantes, 2006). Este método de propagación permite mantener la identidad genética y, por lo tanto, alcanzar una uniformidad fenotípica en comparación a la propagación por semilla. Si bien en la propagación por semilla se necesita cierta infraestructura, para hacer germinar las semillas y criar a los plantines que luego serán llevados al campo, en la propagación por esquejes se necesita una mayor inversión. Esto es debido a que se necesita un ambiente controlado, para poder cultivar

las plantas madre y mantenerlas en estado vegetativo en épocas en donde naturalmente no es posible (Caplan et al., 2017; Chandra et al., 2017).

### **3.9.2 Propagación sexual (por semillas)**

La propagación por semillas es el método más utilizado para la obtención de nuevas variedades y la producción a gran escala. Las semillas pueden ser regulares, feminizadas o autoflorecientes (Chandra et al., 2017; Clarke & Merlin, 2016).

Las semillas regulares producen plantas macho y hembra en proporciones variables, lo que requiere una selección cuidadosa para eliminar las plantas macho en cultivos destinados a la producción de flores. Por otro lado, las semillas feminizadas han sido tratadas genéticamente para producir casi exclusivamente plantas hembra, asegurando un mayor rendimiento en cultivos comerciales. Finalmente, las semillas autoflorecientes florecen de manera independiente al fotoperiodo y tienen un ciclo de vida más corto, lo que permite múltiples cosechas en el año (Chandra et al., 2017).

Uno de los principales beneficios de la propagación sexual es la diversidad genética, lo que permite la selección de rasgos favorables, como mayor producción de cannabinoides o resistencia a enfermedades. Sin embargo, esta variabilidad también puede ser una desventaja en cultivos donde se busca uniformidad en las plantas (Small, 2015).

### **3.9.3 Propagación asexual (clonación, esquejes y cultivo in vitro)**

La propagación asexual permite obtener plantas genéticamente idénticas a la planta madre, asegurando uniformidad en el cultivo (Clarke & Merlin, 2013; Saloner & Bernstein, 2020).

La clonación mediante esquejes es el método más común. Se seleccionan ramas jóvenes de una planta madre de alta calidad y se enraízan en un medio adecuado, como sustrato orgánico o agua con hormonas enraizantes. Este método garantiza la conservación de las características genéticas deseadas, como la producción de compuestos bioactivos y la resistencia a plagas (Lubell & Brand, 2018; Potter, 2014).

El cultivo in vitro es una técnica más avanzada que permite la propagación masiva de plantas en condiciones controladas de laboratorio. Se utilizan tejidos vegetales pequeños (meristemos) que se desarrollan en medios estériles con nutrientes y reguladores de crecimiento (Lata et al., 2016; Rodríguez-Morrison et al., 2021). Este método es ideal para la producción libre de enfermedades y para la conservación genética de variedades élite (Potter, 2014).

### **3.9.4 Densidad de siembra**

Según Fernández Cirigliano y Antúnez Sierra (2023), la densidad de siembra es uno de los factores más importantes que influye en el rendimiento del cultivo. Se refiere a la cantidad de plantas que se cultivan por unidad de superficie generalmente expresada

como plantas por metro cuadrado. La densidad de siembra más adecuada depende de varios factores, como el cultivar, las condiciones ambientales, el sistema de cultivo y el objetivo del cultivo. La densidad de siembra afecta el microclima en el dosel, afectando la disponibilidad de luz del cultivo, temperatura y humedad (Fernández Cirigliano & Antúnez Sierra, 2023)

Una densidad de siembra alta favorece la competencia entre plantas por luz, agua y nutrientes, lo que puede afectar su desarrollo individual. En cultivos destinados a la producción de fibra, una mayor densidad de siembra genera tallos más delgados y rectos, ideales para la obtención de fibras de alta calidad. En cambio, para la producción de flores o aceite de CBD, se requiere un mayor espacio entre plantas para permitir una mejor ramificación y formación de inflorescencias (Amaducci et al., 2015; Campiglia et al., 2017; Small, 2015).

En el estudio de Danziger y Bernstein (2021), se investigó cómo la densidad de siembra afecta la uniformidad de los cannabinoides y el rendimiento por área en el cannabis medicinal. Los resultados indicaron que, al aumentar la densidad de siembra de 1 a 2 plantas por metro cuadrado, se redujo la uniformidad de los cannabinoides en las inflorescencias, aunque el rendimiento total por área aumentó entre un 28% y un 44%. Este hallazgo sugiere que una mayor densidad de siembra puede incrementar la producción total, pero a costa de una menor uniformidad en la concentración de cannabinoides, lo que podría afectar la calidad del producto final.

### ***3.9.5 Determinación del Momento Óptimo de Cosecha***

Identificar el momento óptimo de cosecha es un paso crítico en el cultivo de *Cannabis sativa*, ya que influye directamente en la calidad y concentración de sus compuestos activos. Un monitoreo diario del contenido de THC permite recolectar la planta en el punto exacto en que alcanza la concentración deseada (Aizpurua-Olaizola et al., 2016). Se ha observado que los niveles de THC son más elevados durante las primeras horas de la mañana y disminuyen progresivamente hacia el mediodía y la tarde. Por esta razón, la cosecha es recomendada en la mañana para maximizar la potencia del producto final (Chandra et al., 2017; Potter, 2014).

Dentro de la planta, los cogollos maduros en la parte superior pueden recolectarse primero, permitiendo que los cogollos inmaduros continúen su desarrollo hasta alcanzar el grado de madurez adecuado. Este enfoque escalonado mejora la eficiencia de la cosecha y optimiza el rendimiento del cultivo (Chandra et al., 2017).

### ***3.9.6 Manejo, Secado, Procesamiento y Almacenamiento***

La higiene del material vegetal es de suma importancia durante la cosecha, especialmente si se destina a aplicaciones farmacéuticas. Es fundamental evitar el contacto del material con el suelo para prevenir contaminaciones. Antes del secado, se recomienda eliminar las hojas muertas de los cogollos maduros (European Medicines Agency, 2006; World Health Organization, 2003).

El método de secado varía según la escala del cultivo. En producciones a gran escala se utilizan secadores industriales de aire forzado, que permiten un secado eficiente y uniforme del material vegetal (Chandra et al., 2017; Small, 2015). Para muestras más pequeñas, un horno de laboratorio puede ser suficiente para reducir el contenido de humedad y estabilizar los compuestos presentes en el tejido vegetal (Welling et al., 2016).

Una vez que el material vegetal está completamente seco, se procede al manicurado manual, eliminando las hojas grandes que quedaron tras el recorte previo al secado. Posteriormente, los cogollos pueden tamizarse suavemente a través de mallas de diferentes tamaños para separar pequeños tallos y semillas, asegurando un producto final limpio y de alta calidad. Existen también máquinas automatizadas diseñadas para el procesamiento de biomasa, que optimizan este proceso a gran escala (Small, 2015). Este cuidadoso manejo postcosecha es esencial para preservar la calidad del cannabis, garantizar su estabilidad química y prolongar su vida útil, asegurando que los compuestos activos se mantengan en las mejores condiciones hasta su consumo o procesamiento final (Chandra et al., 2017).

## 4. MATERIALES Y MÉTODOS

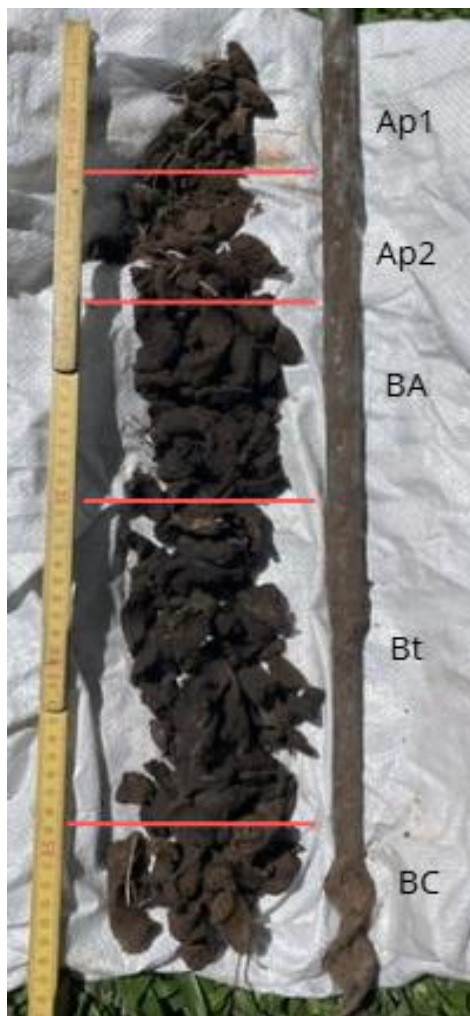
### 4.1 UBICACIÓN DEL EXPERIMENTO

El experimento se llevó a cabo en un predio de la empresa Germinare en la localidad de San Jacinto, departamento de Canelones, Uruguay. El predio, de 59 hectáreas, está ubicado a pocos kilómetros del cruce entre las rutas 7 y 82. La empresa Germinare, se dedica a la producción de cannabis desde 2021. Actualmente, destina 3 hectáreas al cultivo a cielo abierto y 2.000 m<sup>2</sup> al cultivo en invernáculo. El resto del predio se emplea para ganadería vacuna. Cuenta con disponibilidad de agua a través de un pozo semisurgente con un caudal de 20000 litros por hora y un tajamar con una capacidad de 4962 m<sup>3</sup>. El agua del pozo abastece el casco del establecimiento, mientras que el tajamar se destina al área productiva. La historia de uso del suelo en el lugar dónde se instaló el experimento es de campo natural hasta el año 2018 y se cultiva cannabis desde el 2019 a 2023.

### 4.2 SUELOS

#### 4.2.1 Tipo de suelo

El establecimiento se localiza sobre suelos de la formación Tala-Rodríguez, desarrollada sobre rocas de la formación Libertad, según la Carta de suelos de Canelones a escala 1:100.000 (Durán, 1976). Por otro lado, a partir del visualizador de la Dirección General de Recursos Naturales (DGRN), el suelo del padrón donde se ubica el ensayo corresponde al grupo CONEAT 10.8a, con un índice de productividad de 110 (DGRN, s.f.). La topografía es de pendientes suaves menores a 1% y los Brunosoles Eutricos son los suelos dominantes (Durán & García Préchac, 2007). Los Brunosoles Éutricos son suelos bien desarrollados con un horizonte superficial rico en materia orgánica, lo que les otorga una coloración oscura y una elevada capacidad de retención de nutrientes. El suelo del experimento presentó un pH de 6,1 determinado por análisis de laboratorio, lo que favorece el crecimiento de una amplia variedad de cultivos incluyendo el cannabis. Su textura franco-arcillosa otorga una buena estructura y capacidad de drenaje moderada (Durán, 1976) Se realizó una descripción del perfil del suelo con la caracterización de los horizontes identificados (Figura 3).

**Figura 3***Perfil de suelo en el lugar de ensayo*

*Nota.* Ap1; Ap2; BA; Bt; BC= nomenclatura y prefijos de los diferentes horizontes evaluados según estructura y textura del suelo.

Ap1. 0 a 10 cm: Pardo Oscuro (10YR 4/4); Franco a Franco limoso; Estructura en bloques subangulares medios, débiles; Transición gradual a:

Ap2. 10 a 18 cm: Pardo oscuro (10YR 4/3); Franco arcillo limoso; Estructura en bloques subangulares gruesos y moderados; transición clara a:

BA. 18 a 28cm: Pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2); Arcillo limoso; estructura en bloques subangulares gruesos, de moderados a fuertes; transición clara.

Bt. 28 a 40 cm: Pardo grisáceo muy oscuro a pardo oscuro (10YR 2/2); Arcillo limoso; estructura en bloques subangulares gruesos y fuertes; presencia de películas de arcilla; transición clara a:

BC. 40 a 55 cm: Pardo claro (10YR 4/6); Arcillo limoso; estructura en bloques subangulares gruesos y fuertes; transición clara a horizonte C con textura franco-arenoso.

#### 4.2.2 Análisis químico del suelo

El análisis químico de una muestra compuesta de suelo previo al trasplante a una profundidad de 0-15 cm se presenta en la tabla 6. El pH de 6,2 se encuentra dentro del rango óptimo para el cultivo (6,0–7,0), favoreciendo la disponibilidad de nutrientes y el correcto desarrollo radicular. Asimismo, el contenido de materia orgánica (3,4%) es adecuado y contribuye positivamente a la estructura del suelo, la retención de agua y la provisión gradual de nutrientes.

El nivel de fósforo extractable (15 ppm) se ubica en el límite inferior del rango considerado adecuado para cannabis, por lo que, si bien no constituye una deficiencia marcada, puede requerir suplementación durante la etapa inicial para favorecer el establecimiento de las plantas. Por su parte, el potasio intercambiable (0,71 meq/100 g) corresponde a un nivel suficiente y no representa una limitante nutricional para el cultivo dentro del manejo propuesto.

Finalmente, el contenido de nitratos (10 ppm) refleja una disponibilidad inicial baja de nitrógeno mineral en el suelo, lo cual es habitual en sistemas sin fertilización reciente. En consecuencia, será necesario aportar nitrógeno a través del plan de fertilización, especialmente durante las etapas de crecimiento vegetativo y prefloración, donde la demanda del cultivo es mayor.

**Tabla 6**

*Tabla Análisis químico del suelo*

| <b>Muestra</b>       | <b>PBray<br/>(ppm)</b> | <b>K int<br/>(meq/100g)</b> | <b>Materia<br/>orgánica (%)</b> | <b>pH</b> | <b>N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup><br/>(ppm)</b> |
|----------------------|------------------------|-----------------------------|---------------------------------|-----------|-----------------------------------------------|
| <b>Suelo 0-15 cm</b> | 15                     | 0,71                        | 3,4                             | 6,2       | 10                                            |

#### 4.2.3 Fertilización

En cuanto al manejo de la fertilización del suelo en el cultivo, además de la incorporación del abono verde con avena negra se realizó una fertilización a base de compost peletizado de cama de pollo marca Urufertil en el agujero donde luego se colocó cada planta. Luego se realizó fertirriego cada tres días con té de este mismo compost, en una dilución en agua en relación de 10:1 y Naturamin-WSP, 3 veces antes de la etapa vegetativa plena a razón de 5kg/ha repartidas entre todas las aplicaciones. Una vez establecido el cultivo y superada la etapa de estrés post trasplante se comenzó la fertilización con Naturamin-NPK en la etapa vegetativa (dosis de 20L/ha). Para la etapa de floración se aplicó Naturafruit en una dosis total de 30L/ha. *La composición de los productos utilizados para la fertilización se detalla en las tablas 7, 8, 9 y 10.*

**Tabla 7***Análisis del compost Urufertil*

|                | <b>pH</b> | <b>MO<br/>(%)</b> | <b>Materia<br/>seca (%)</b> | <b>C/N</b> | <b>N<br/>(%)</b> | <b>P<br/>(%)</b> | <b>K<br/>(%)</b> | <b>Ca<br/>(%)</b> |
|----------------|-----------|-------------------|-----------------------------|------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| <b>Compost</b> | 6,8       | 40                | 70                          | 13         | 2                | 1                | 2                | 10                |

*Nota.* C/N= Relación carbono nitrógeno.**Tabla 8***Contenido del producto Naturamin-WSP según etiqueta*

|               | <b>AA libres (%)</b> | <b>N total (%)</b> | <b>N org (%)</b> |
|---------------|----------------------|--------------------|------------------|
| Naturamin-WSP | 80                   | 12,8               | 12,8             |

*Nota.* Tomado de *Naturamin® WSP* (s.f.).**Tabla 9***Contenido del producto fertilizante Naturamin-NPK según etiqueta*

| <b>Naturamin<br/>-NPK</b> | <b>pH</b> | <b>N tot (%)</b> | <b>P (%)</b> | <b>K(%)</b> | <b>AA libres<br/>(%)</b> |
|---------------------------|-----------|------------------|--------------|-------------|--------------------------|
|                           | 6,2       | 5                | 5            | 5           | 14                       |

*Nota.* Tomado de *Naturamin® NPK* (s.f.).**Tabla 10***Contenido del producto fertilizante Naturafruit según etiqueta*

| <b>Naturafruit</b> | <b>pH</b> | <b>K20 (%)</b> | <b>AA libres (%)</b> |
|--------------------|-----------|----------------|----------------------|
|                    | 7,5       | 25             | 38                   |

*Nota.* Tomado de *Naturfruit* (s.f.).

#### 4.3 CULTIVARES UTILIZADOS

Para el ensayo comparativo se utilizaron dos cultivares: Early Trump y Jim's Saparot. Estas variedades fueron seleccionadas por experiencia del productor y recomendación del viverista. Ambas variedades tienen ciclos fenológicos contrastantes. A continuación, se describen sus principales características:

### 4.3.1 *Jim's Saporot*

Esta variedad corresponde al linaje 'CT#4' x 'CT#4', una selección mejorada de la familia Fedtonic, caracterizada por su alto contenido de CBD y bajas concentraciones de THC. El período de floración se inicia aproximadamente de 8 a 8.5 semanas después de la inducción, alcanzando la madurez para cosecha a fines de marzo. Durante la fase vegetativa, la planta presenta un crecimiento con entrenudos cortos, lo que favorece una estructura compacta. En la fase reproductiva, desarrolla inflorescencias terminales densas, contribuyendo a una mayor producción de biomasa floral.<sup>2</sup> Los análisis de cannabinoides indican una concentración de CBD entre 11 y 17%, mientras que el contenido de THC se mantiene por debajo de 0.5 - 0.6%, cumpliendo con las regulaciones para cultivos industriales de cáñamo de bajo THC (Genéticas Innvita, s.f.a). Entre las características más relevantes de esta variedad se destacan las asociadas a las características de las flores y la formación de flores compactas y de forma redondeada, lo que favorece su uso en distintos procesos de industrialización (Genéticas Innvita, s.f.a).

### 4.3.2 *Early Trump*

Early Trump es una línea feminizada con respuesta fotoperiódica de día corto, desarrollada a partir del cruce entre 'Trump (T1)' x 'Auto Tsunami'. Su ciclo de cultivo permite la cosecha en la primera quincena de abril, con un período de floración de aproximadamente nueve semanas tras la inducción, la cual comienza a mediados de febrero. Esta variedad presenta un crecimiento compacto y robusto, con una arquitectura que adopta una forma natural de candelabro, favoreciendo una distribución uniforme de la biomasa floral. El perfil de cannabinoides indica una relación CBD: THC de 24:1 a 32:1, con un potencial de concentración total de cannabinoides del 18%.<sup>3</sup> Con un contenido de THC total del 0.3%, la concentración promedio de CBD varía entre 8 y 10%, asegurando el cumplimiento de los estándares legales para el cultivo de cáñamo industrial (Genéticas Innvita, s.f.a). Entre los atributos más relevantes de esta variedad se encuentran: alta resistencia a plagas y enfermedades, lo que la hace adecuada para sistemas de producción con manejo agronómico reducido; perfil aromático distintivo y elevada producción de resina, características deseables para la extracción de compuestos bioactivos; corto período vegetativo en siembras tardías, lo que optimiza su ciclo de producción en diferentes estrategias de manejo agrícola (Genéticas Innvita, s.f.a).

## 4.4 *Diseño experimental*

El diseño experimental fue de parcelas divididas. Dentro de cada bloque la parcela grande correspondió a la fecha de trasplante, y la parcela chica al cultivar. En total se realizaron 6 tratamientos factoriales que surgen de la combinación de tres fechas de trasplante y dos cultivares con tres repeticiones (bloques); totalizando 18 parcelas chicas. Este diseño se recomienda cuando se evalúan dos o más factores experimentales y al

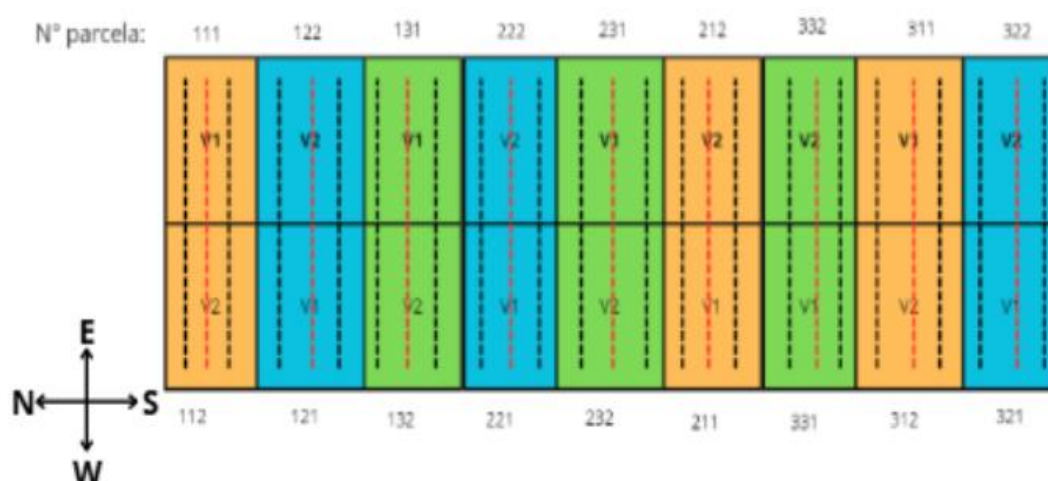
<sup>2</sup> H. Bittencourt (comunicación personal, 2023).

<sup>3</sup> H. Bittencourt (comunicación personal, 2023).

menos uno de ellos es difícil de manejar o aplicar en unidades experimentales pequeñas. Cada parcela estaba compuesta por tres canteros, de los cuales solo se evaluó el central, quedando los laterales como bordes. El cantero central de cada parcela chica estaba constituida por 20 plantas a una distancia de 1 metro entre ellas en fila única, las primeras dos plantas de cada fila evaluada fueron consideradas como bordes. La distancia entre canteros fue de 1,20 m y el ancho de cantero de 0,8 m, dando como resultado un área de 57,6 m<sup>2</sup> por parcela chica. En cuanto a las parcelas grandes, las mismas estaban compuestas por 2 parcelas chicas. Las dimensiones de las parcelas grandes fueron de 273,6 m<sup>2</sup> y en total el tamaño del experimento fue de 942,4 m<sup>2</sup> teniendo en cuenta los caminos entre bloques de 3,20m para pasada del tractor.

**Figura 4**

*Croquis marco de plantación del experimento*



*Nota.* Naranja 30/11/2023; Celeste 20/12/2023; Verde 10/01/2024.

Las fechas de siembra usadas para ambas variedades fueron 15 de octubre, 15 de noviembre y 10 de diciembre de 2023, y las de trasplante fueron 30 de noviembre y 20 de diciembre de 2023, y 10 de enero de 2024.

#### 4.4.1 Manejo del suelo

Previo al cultivo de cannabis se realizó un abono verde de *Avena strigosa* (avena negra) el cual permitió bajar la presión de malezas, prevenir la erosión de suelo y retener nutrientes que luego serían incorporados. Treinta días antes de la primera fecha de trasplante se procedió a enterrar la avena y encanterar solo en el lugar de los canteros, quedando la entrefila empastada. Cinco días antes del trasplante se realizaron pasadas de fresadora para romper terrones y dejar la tierra suelta y preparada para recibir la primera tanda de plantines. Luego se extendió la cinta de riego sobre los canteros y se colocó mulch de polietileno negro de 25 micrones de grosor con una mulchera. Para el trasplante, primero se realizó el agujero en el polietileno, luego se colocó la planta y 5 litros de compost "Urufertil". Por último, se realizó un riego al cuello de las plantas regando desde un tanque con manguera. Cada cantero contó con dos cintas de riego por goteo con

emisores cada 20cm y se regó una lamina de 20mm/ día en etapas juveniles hasta vegetativo pleno. Luego los riegos fueron de 25 a 40mm por día dependiendo de las condiciones ambientales.

#### **4.4.2 Manejo del experimento**

Los almácigos se instalaron en almacigueras con turba estéril. Todos los plantines recibieron el mismo manejo en cuanto a riego y desmalezado. La buena colonización del sustrato por parte de las raíces del plantín fue uno de los factores principales para definir el momento del trasplante. Otro factor considerado fue la cantidad de nudos y hojas verdaderas conjuntamente con el grosor del tallo.

Las plantas trasplantadas en la primera fecha se podaron dos veces, una para romper la dominancia apical y otra para facilitar la aireación e intercepción de la radiación desde las partes inferiores de la canopia. En las podas se registró el peso fresco de biomasa removida (con valores que oscilaron entre 0,05 kg y 0,15 kg pl<sup>-1</sup>). En las otras fechas de trasplante (tardío e intermedio) no se realizó ningún manejo de poda ya que las plantas presentaban buena aireación y se consideró innecesario.

Las malezas en la fila fueron controladas por el mulch y se sacaron de forma manual las malezas emergentes en los agujeros de las plantas. La entrefila estuvo empastada durante el ciclo del cultivo, pero cuidando su largo y volumen mediante cortes mecánicos con bordeadora para mejorar la aireación general del cuadro y evitar refugio de insectos plaga para el cultivo.

En lo que hace al manejo sanitario se hizo énfasis en la prevención. Se realizaron monitoreos semanales de plagas y enfermedades. Previo a la cosecha, se trató de minimizar el impacto de enfermedades fúngicas haciendo deshojes, retirando flores con *Botrytis cinerea* y plantas muertas por *Fusarium* spp. u otros hongos de raíz.

### **4.5 MEDICIONES REALIZADAS**

#### **4.5.1 Estado fenológico**

Para poder determinar el estado de desarrollo del cultivo se evaluaron las 16 plantas centrales de cada parcela, dejando las últimas dos de cada fila como borde. A cada planta se le asignó un estado fenológico de acuerdo con la definición de *Cannabis sativa* L. por Spitzer-Rimon et al. (2019), Bernstein et al. (2019) y Potter (2009) que se detalla a continuación.

Fase Vegetativa I (plántula e inicio del crecimiento): La primera fase vegetativa comprende desde la germinación hasta las primeras semanas del establecimiento en donde se realizó el trasplante a campo y la planta dio comienzo su periodo de adaptación. En esta etapa, la planta mantiene un porte pequeño, con tallo delgado y hojas color verde claro con 3 a 5 foliolos.

Fase vegetativa II (crecimiento vegetativo activo): La segunda etapa vegetativa se caracteriza por un crecimiento vigoroso de la planta, con hojas grandes, palmeadas, que alcanzaron de siete a once folíolos. El tallo se engrosa, aparecieron ramas laterales que otorgan crecimiento en diámetro y aspecto arbustivo. A su vez se observa una coloración verde intensa en las hojas.

Fase reproductiva I (prefloración): La primera etapa reproductiva, denominada prefloración, es el momento en que las plantas comienzan a expresar su sexo en los nudos, se distinguen pistilos blancos “pequeños pelos de color blanquecino”. Simultáneamente, se observa un incremento notable en altura.

Fase reproductiva II (floración): Se forman flores compactas cubiertas de pistilos blancos. Los tricomas, estructuras glandulares que producen metabolitos secundarios, comienzan a acumularse en abundancia, confiriendo a las inflorescencias su aspecto resinoso característico.

Fase Reproductiva III (maduración y cosecha): Los cogollos alcanzan su máxima densidad y contenido de resina, y los tricomas cambian de transparentes a lechosos y finalmente ámbar, parámetro utilizado como criterio de cosecha. Al mismo tiempo, las hojas más grandes se tornan de color amarillo a senescente, ya que la planta redirige nutrientes y energía hacia las inflorescencias. En este punto, la mayoría de los pistilos se observan de color marrón o anaranjado, marcando el momento óptimo de recolección.

En base al número de plantas en cada estado fenológico se determinaron los porcentajes, definiéndose que la parcela se encontraba en fase vegetativa II cuando el 70% de las plantas se encontraba en esa fase, pasando a la fase reproductiva I cuando el 50% de las plantas tenía pistilos en yemas axilares (Amaducci et al., 2007). Y la fase reproductiva II se alcanzaba cuando el 70% de las flores eran compactas y con los pistilos de color bronce.

#### **4.5.2 Crecimiento vegetativo**

En las 16 plantas de cada parcela se evaluó: número de nudos, altura de planta, diámetro de canopia; con una frecuencia de entre 20-25 días arrojando cinco mediciones espaciadas en el desarrollo del cultivo. Luego, los valores obtenidos por planta se promediaron para obtener un valor medio por parcela. Además, se evaluó radiación PAR interceptada y la biomasa total.

Número de nudos: Se contabilizó el número de nudos opuestos en cada planta.

Altura y diámetro en planta: Esta medida fue tomada con cinta métrica, en donde se evaluó la altura desde la base hasta el meristema apical de las plantas. De la misma manera se evaluó el diámetro del dosel vegetal, tomando el tallo principal como epicentro y las puntas de las ramas del nudo central como referencia. Se realizaron 5 medidas en esta evaluación cada 20 días.

Para determinar la radiación incidente del cultivo en los distintos tratamientos, se utilizó un ceptómetro, que mide la radiación PAR. Las mediciones se realizaron entre las 10:00 y 13:00 horas, en 4 oportunidades cada 20-25 días asegurando condiciones de cielo despejado para evitar interferencias en la captura de luz. El procedimiento de medición consideró el cultivo como un dosel continuo a lo largo del camellón. Dado que la barra del ceptómetro no era suficientemente larga como para capturar la intercepción de luz en el cantero y la entrefila, se tomaron dos tipos de mediciones:

- Medición en los caminos entre los canteros: se midió la radiación PAR a 20 cm del suelo y a 100 cm de los lados este y oeste del camellón.
- Medición en el cantero: se realizaron mediciones sobre el suelo y cada 40 cm sobre la superficie del suelo, para registrar la intercepción de radiación PAR sobre el cantero.

Para la determinación de biomasa aérea total, cuando las parcelas alcanzaron la fase reproductiva II, se midió el peso fresco (MF) y peso seco luego del secado tradicional para la comercialización. El cálculo del rendimiento comercial se realizó considerando un contenido de humedad estándar del 14%. Por lo tanto, en el texto y las figuras se utiliza la unidad “Kg pl<sup>-1</sup> 14% H” para distinguirla de la materia seca (0% humedad). Para ello, se procedió a cortar las plantas en la base del tallo principal a unos pocos cm del suelo. Luego, se pesó con una balanza de precisión el peso en fresco de las plantas enteras. Se evaluaron 16 plantas por parcela, las cuales se encontraban en el centro de las líneas de cultivo. Luego se secaron las plantas por el método tradicional, se colgaron las plantas desde la base, con el ápice apuntando al suelo en una sala de secado. Luego de 20 días evaluando la temperatura y humedad de la sala de secado los cuales se tratan de estandarizar a 20 grados y entre 45-55% de humedad relativa en el ambiente; al llegar al 14 % de humedad en las flores medidas con humidímetro, se procedió a realizar el pesaje de cada planta. Luego del proceso de secado en la sala se realizó el trimming, todos los procesos descritos se realizaron en el total de las plantas evaluadas en el ensayo.

#### ***4.5.3 Determinación del rendimiento total y comercial***

Para conocer el rendimiento total de flores se cosechó y pesó el producto en fresco de cada parcela, luego se secaron las plantas por el método tradicional hasta 14% de humedad medidas con humidímetro. Se determinó el peso a 14% de humedad para calcular el rendimiento total por planta y por superficie.

Para cuantificar el rendimiento comercial se calificaron las flores por parámetros de calidad que se detallan a continuación. Se consideraron dentro de la categoría comercial la calidad A, B e industria.

Calidad comercial A: Esencialmente mayores a 6 cm de largo. Flores uniformes, compactas, color verde vívido y aroma característico. Sin enfermedades ni plagas.

Calidad comercial B: Esencialmente menores a 6 cm pero no menos de 4 cm. Flores uniformes, compactas, color verde vívido y aroma característico. Sin enfermedades y plagas.

Calidad comercial “industria” o “pop corn”: Flores iguales o menores de 3 cm de largo. Flores uniformes, compactas, color verde vívido y aroma característico. Sin enfermedades ni plagas.

Descartes: Flores con síntomas de enfermedades o con daño de plagas. También se descartaron flores polinizadas (con presencia de semillas).

#### 4.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para el análisis de los datos recopilados se utilizó el software RStudio (Posit Software), versión 2024.09.0+375. Dentro de los paquetes aplicados, se utilizó *STATS*, que permitió realizar los análisis de varianza (ANOVA), regresiones lineales, correlaciones y pruebas de hipótesis, constituyendo la base de los modelos estadísticos desarrollados. Se utilizó además *AGRICOLAE* (Mendiburu, 2023), específicamente diseñado para ensayos agrícolas diseño de parcelas divididas y pruebas de comparaciones múltiples tales como Tukey, Duncan y Diferencia Mínima Significativa (DMS). A su vez, el paquete *MEANS* (Lenth et al., 2026) fue utilizado para calcular las medias ajustadas o medias marginales estimadas, facilitando la comparación de tratamientos en presencia de interacciones significativas. En complemento, se trabajó con *MULTCOMP* (Hothorn et al., 2008), el cual ofrece herramientas para realizar contrastes múltiples y pruebas de hipótesis simultáneas, lo que permitió corroborar la significancia de interacciones y la asignación de letras en las comparaciones de medias. Finalmente, para la visualización de resultados se aplicó *GGPLOT2* (Wickham et al., 2026), dado que no se encontró interacción significativa entre variedades y fechas de trasplante, se analizó el efecto de cada factor de forma independiente.

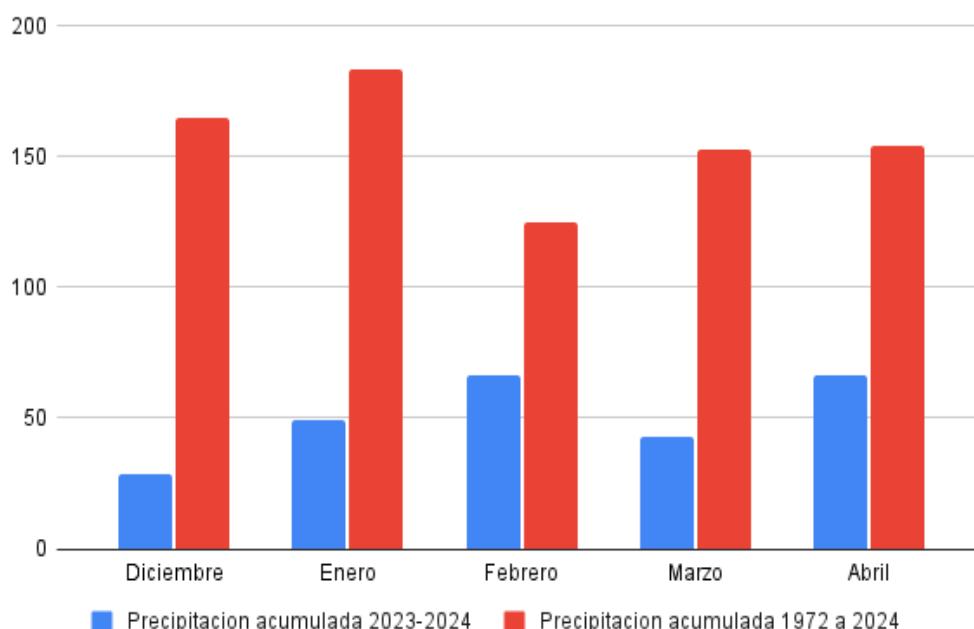
## 5.RESULTADOS

### 5.1 DATOS CLIMÁTICOS

En la Figura 5 se muestran los registros de las precipitaciones acumuladas en los meses de crecimiento del cultivo del experimento (2023-2024) y el registro promedio histórico para esos meses (1972-2024). El acumulado en el periodo del ensayo fue de 287.5 mm. En los meses de la zafra 2023/24 las precipitaciones fueron muy escasas en comparación con el promedio histórico, ya que fue una zafra con valores por debajo de 50 mm mensuales en noviembre, diciembre, enero y marzo.

**Figura 5**

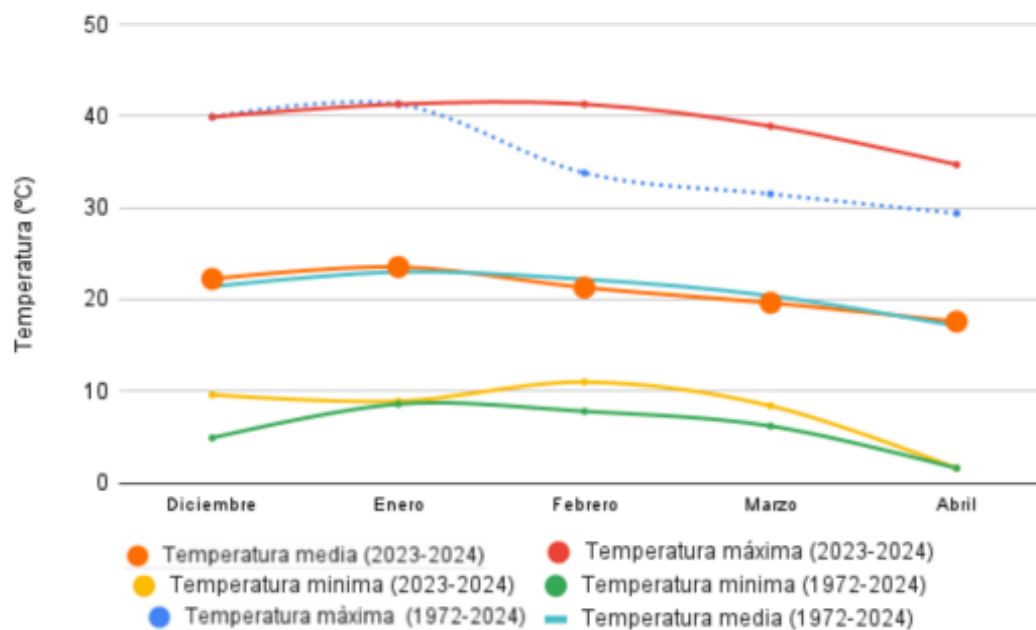
*Registro de precipitaciones acumuladas mensuales 2023-2024 y promedios históricos (1972-2024)*



En la figura 6, se comparan las temperaturas máximas, mínimas y medias de la zafra 2023-2024 y los datos históricos (1972-2024). Durante la zafra de estudio las temperaturas máximas estuvieron por encima de los promedios históricos principalmente en febrero, marzo y abril. Las temperaturas máximas medias de la zafra 2023-2024 se ubicaron por encima de 37-38 °C hasta el mes de abril. También se registraron temperaturas mínimas más altas con respecto al promedio histórico desde enero hasta abril.

**Figura 6**

*Temperaturas máximas, mínimas y medias mensuales en periodos 2023-2024 e históricos*



## 5.2 CICLO DEL CULTIVO

En la tabla 11 se presenta la duración del ciclo de los cultivos y sus fases según fecha de trasplante y variedad. Las mismas se diferencian por variedades ya que, Early T presentó un ciclo más corto y Jim's S un ciclo más largo. La duración total del ciclo varió significativamente según la fecha de trasplante siendo más largo para las fechas más tempranas (Figura 8). El ciclo total duró 134, 108 y 100 días para Early T, y 151, 124 y 110 para Jim's S en las fechas de trasplante 30 noviembre y 20 de diciembre del 2023 y 10 de enero del 2024, respectivamente. La mayor duración del ciclo en las fechas de trasplante tempranas se explica por un mayor período vegetativo y reproductivo como se observa en la figura 8 y 9. En la variedad Jim's S se reduce mayormente la duración de la fase vegetativa (Figura 9) y en Early T se reduce mayormente la duración de la fase reproductiva, a medida que se atrasa la fecha de trasplante (Figura 10).

**Tabla 11***Fases y ciclo fenológico de las variedades por fecha de trasplante*

| Var     | Fase | Etapa | Fecha 1      |       | Fecha 2      |      | Fecha 3     |       |
|---------|------|-------|--------------|-------|--------------|------|-------------|-------|
|         |      |       | Periodo      | Largo | Periodo      | Días | Periodo     | Largo |
| EarlyT  | Veg  | I     | 20/11 - 6/12 | 16    | 20/12-10/01  | 20   | 10/01-20/02 | 20    |
|         |      | II    | 6/12 - 10/01 | 34    | 10/01-06/02  | 26   | 10/02-01/03 | 20    |
|         | Rep  | I     | 10/01- 06/02 | 26    | 06/02-28/02  | 22   | 20/02-05/03 | 15    |
|         |      | II    | 06/02- 01/03 | 24    | 28/02-15/03  | 17   | 05/03-20/03 | 15    |
|         |      | III   | 01/03- 05/04 | 34    | 15/03-05/04  | 23   | 20/03-20/04 | 30    |
|         | Ct   |       | 20/11- 05/04 | 134   | 20/12- 05/04 | 108  | 10/01-20/04 | 100   |
| Jim's S | Veg  | I     | 20/11-06/12  | 16    | 20/12-30/12  | 10   | 10/01-20/01 | 11    |
|         |      | II    | 06/12-30/01  | 54    | 30/12-05/02  | 36   | 20/01-01/03 | 32    |
|         | Rep  | I     | 30/01-15/02  | 16    | 05/02-01/03  | 19   | 01/03-15/03 | 16    |
|         |      | II    | 15/02-05/03  | 20    | 01/03-20/03  | 24   | 15/03-10/04 | 26    |
|         |      | III   | 05/03-20/04  | 46    | 20/03-25/04  | 35   | 10/04-01/05 | 22    |
|         | Ct   |       | 20/11-20/04  | 151   | 20/12-25/04  | 124  | 10/01-01/05 | 110   |

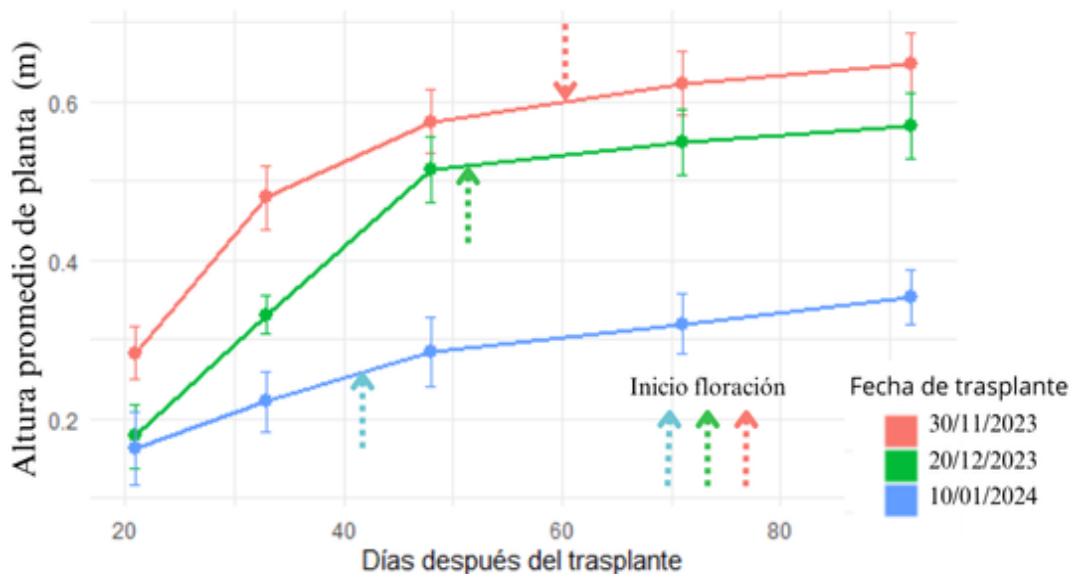
*Nota.* EarlyT: Early Trump; Jim's S: Jim's Sapatot. Fecha de trasplante 1:30/11/23; Fecha 2: 20/12/23; Fecha 3: 10/01/24, Veg: Vegetativa, Repr: Reproductiva, Ct: Ciclo total; Fase vegetativa I: plántula e inicio de crecimiento; Fase vegetativa II: crecimiento vegetativo activo; Fase reproductiva I: diferenciación floral; Fase reproductiva II: crecimiento pleno de flores; Fase reproductiva III: maduración.

### 5.3 CRECIMIENTO DEL CULTIVO

Los resultados de la figura 7 muestran la evolución de las alturas promedio de las plantas según cada fecha de trasplante sin discriminar la variedad. Las plantas alcanzan una altura máxima promedio de 0,65, 0,56 y 0,35 m para la primera, segunda y tercera fecha de trasplante respectivamente. La última fecha de trasplante presentó una altura significativamente menor con respecto a las fechas más tempranas, entre las cuales no se observaron diferencias significativas. Se observó un mayor incremento en la altura de planta durante la fase vegetativa comparado con la fase reproductiva.

**Figura 7**

*Evolución de la altura promedio de las plantas según fecha de trasplante*

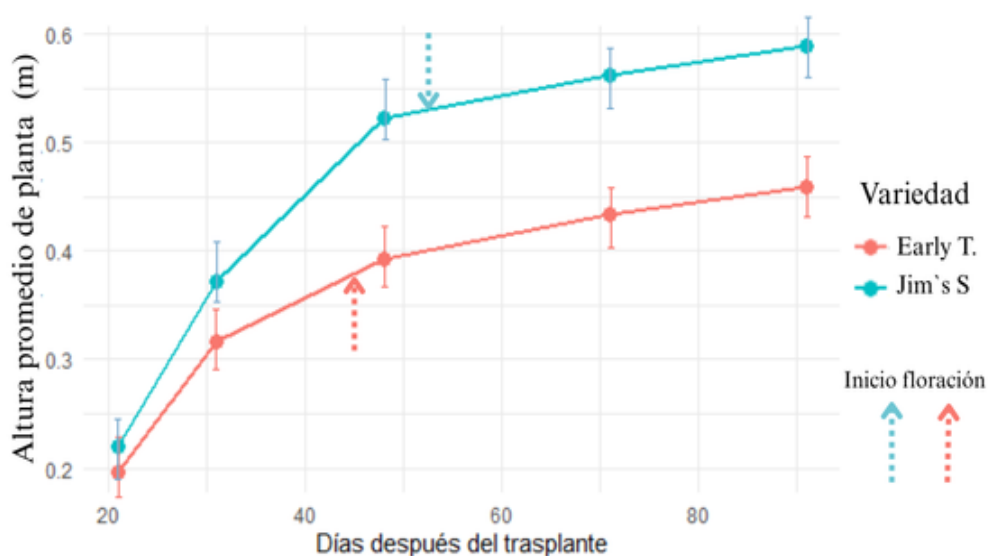


*Nota.* Las flechas punteadas indican el momento de pasaje a la fase reproductiva I. Las barras en cada medida indican el error estándar.

La variedad Jim's S presentó una altura significativamente mayor que la variedad Early T alcanzando valores de 0,59 m y 0,45m al final del ciclo respectivamente (Figura 8).

**Figura 8**

*Evolución de la altura promedio de planta según variedad*

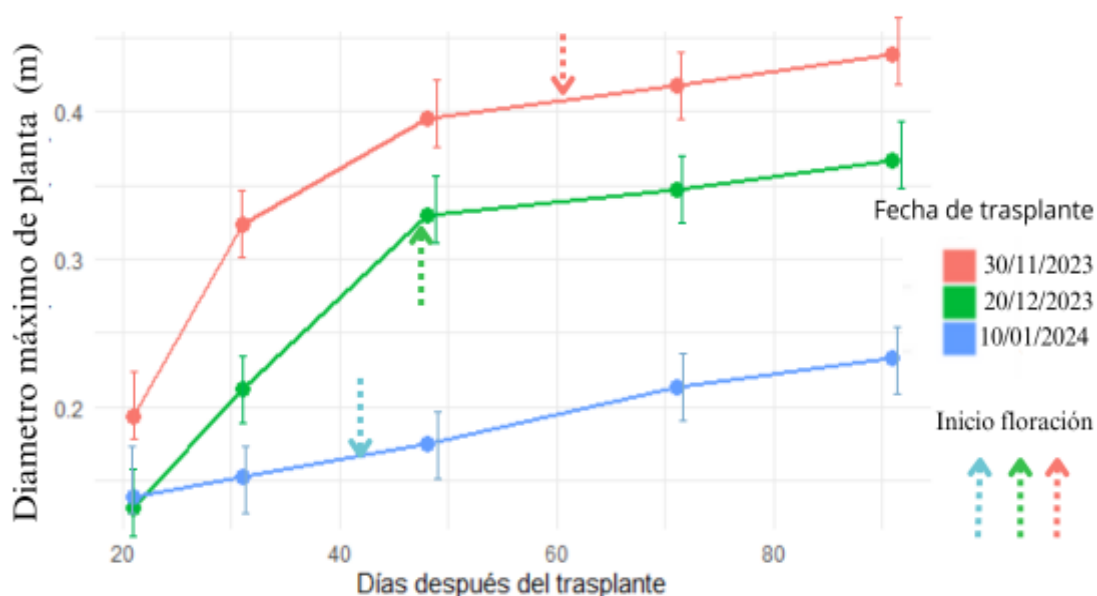


*Nota.* Las flechas punteadas indican el momento de pasaje a la fase reproductiva I. Las barras en cada medida indican el error estándar.

En la figura 9, se puede ver la evolución del diámetro promedio de la canopia de la planta por fecha de trasplante. Se observaron diferencias significativas entre las fechas de trasplante, con mayor diámetro de la canopia de la planta para la fecha más temprana y el menor diámetro para la fecha más tardía. Esto concuerda con lo observado en la altura promedio de planta (Figura 8).

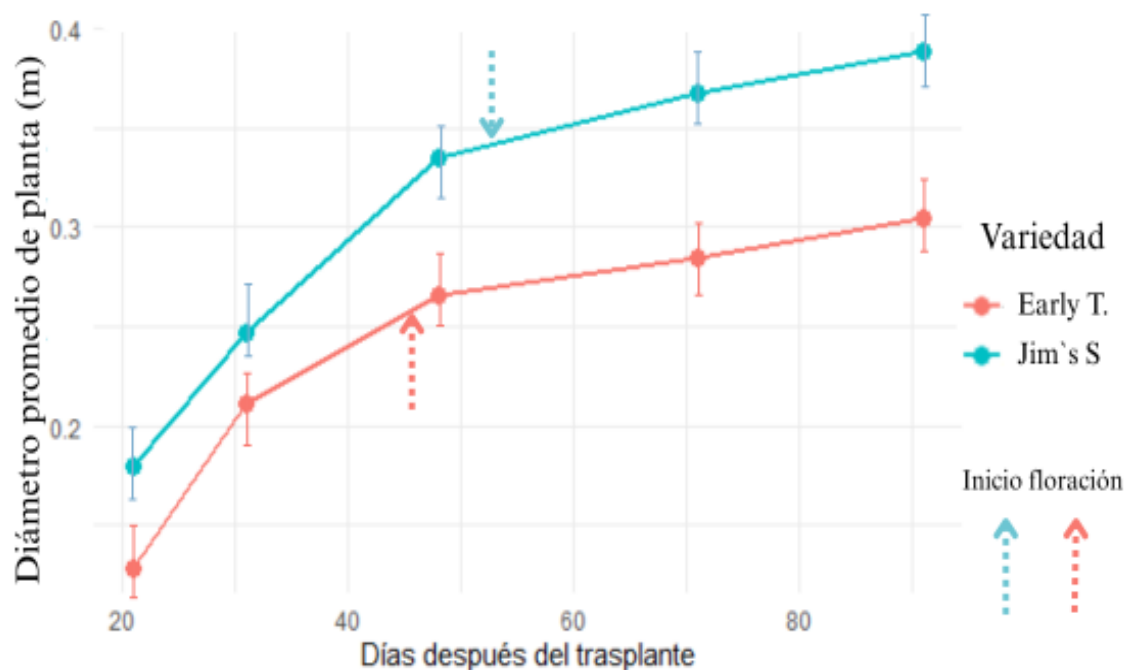
**Figura 9**

*Evolución del diámetro de planta según fecha de trasplante*



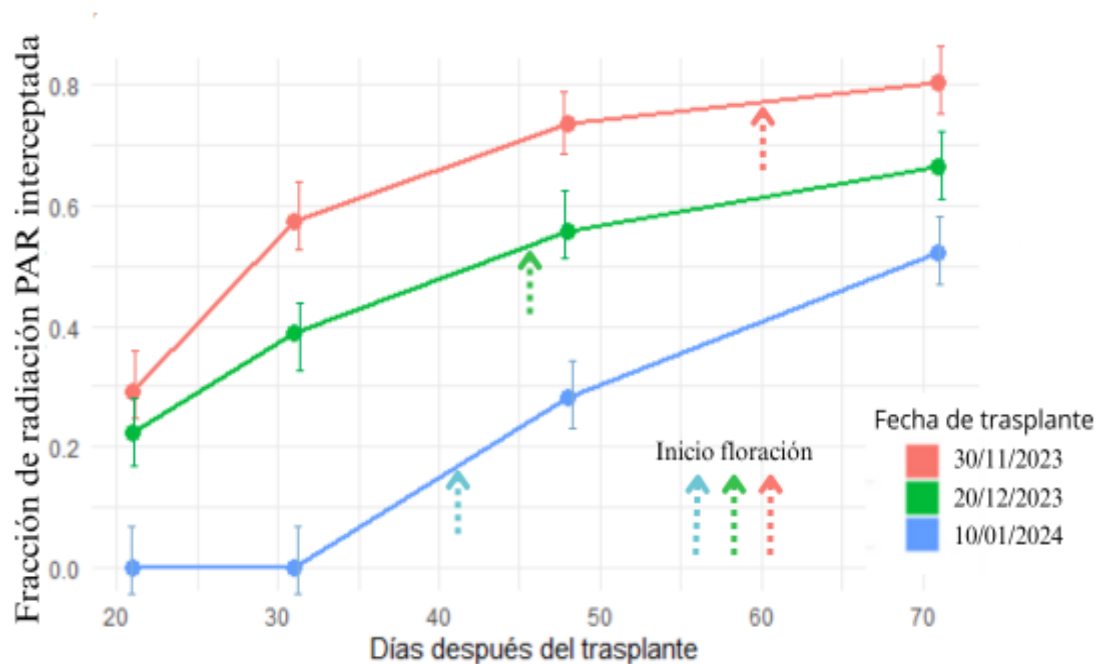
*Nota.* Las flechas punteadas indican el momento de pasaje a la fase reproductiva I. Las barras en cada medida indican el error estándar.

La figura 10 presenta la evolución del diámetro promedio de la canopia de la planta según variedad. En la misma se puede observar que la variedad Jim's S presentó mayor diámetro de la canopia de la planta en comparación con Early T durante todo el ciclo del cultivo.

**Figura 10***Evolución del diámetro de planta según variedad*

*Nota.* Las flechas punteadas indican el momento de pasaje a la fase reproductiva I. Las barras en cada medida indican el error estándar.

También se observaron diferencias significativas en la fracción de radiación PAR interceptada por la canopia entre las fechas de trasplante, así como entre las variedades (Figura 14). La fecha temprana, con mayor altura y diámetro de planta, presentó mayor fracción PAR interceptada, reduciéndose para las fechas intermedia y tardía. En el caso de la fecha de trasplante temprano, se alcanzó una fracción PAR interceptada de 0,8, por lo cual el cultivo estaba interceptando el 80% de la PAR incidente. En cambio, en la fecha intermedia, se alcanzó un máximo de 0,67 y en la fecha tardía fue el máximo fue 0,5.

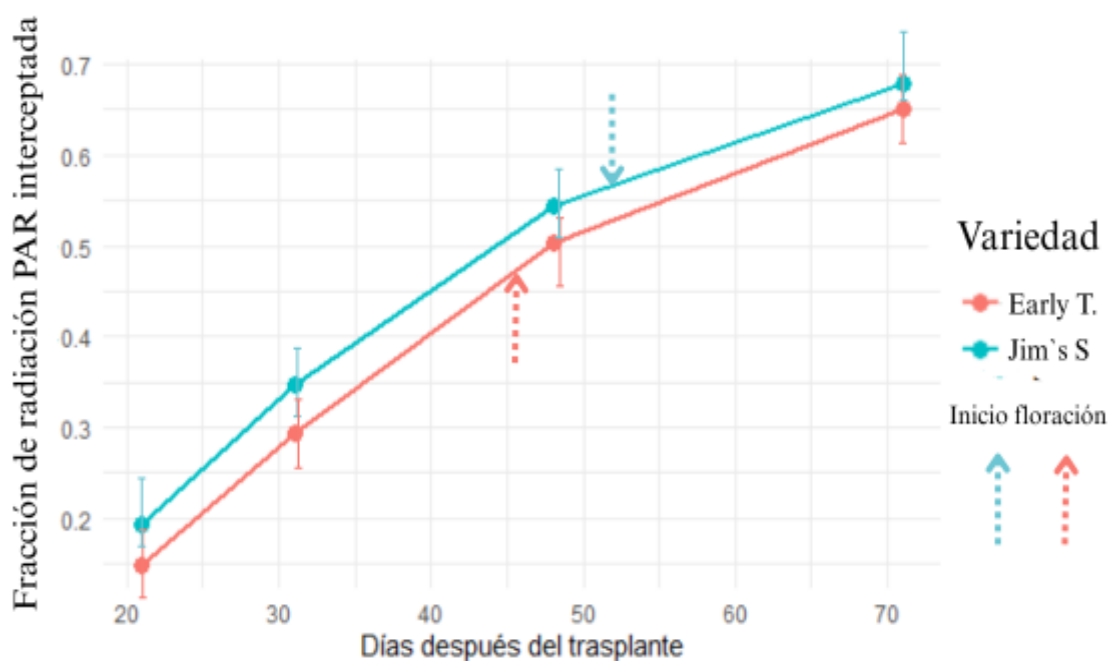
**Figura 11***Evolución de la fracción PAR interceptada*

*Nota.* Las flechas punteadas indican el momento de pasaje a la fase reproductiva I. Las barras en cada medida indican el error estándar.

Las variedades no presentaron diferencias significativas en la fracción PAR interceptada durante todo el ciclo (Figura 12).

**Figura 12**

*Evolución de la radiación promedio PAR interceptada según variedad*



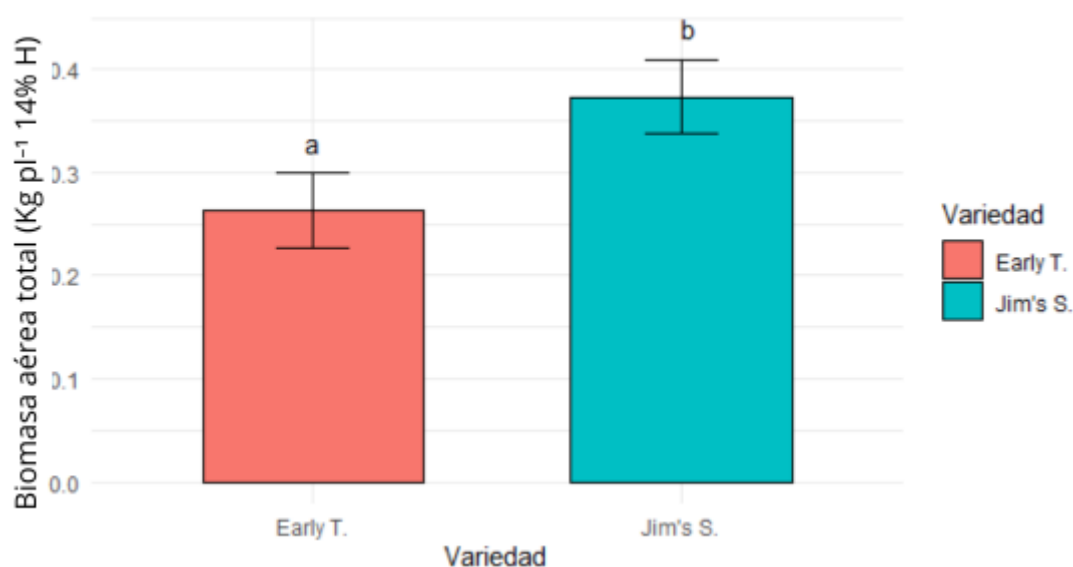
*Nota.* Las flechas punteadas indican el momento de pasaje a la fase reproductiva I. Las barras en cada medida indican el error estándar.

#### 5.4 PRODUCCIÓN DE BIOMASA, RENDIMIENTO Y CALDAD

En la biomasa aérea total se encontraron diferencias significativas entre las fechas de trasplante y las variedades. Para la variedad Early T se obtuvo un promedio de 0,263 kg pl<sup>-1</sup> de biomasa aérea luego del secado tradicional, alcanzando 14 % de humedad, con un mínimo de 0,173 kg pl<sup>-1</sup> y un máximo de 0,354 kg pl<sup>-1</sup>. En cambio, Jim's S alcanzó un promedio más alto con 0,373 kg pl<sup>-1</sup> (Figura 13).

**Figura 13**

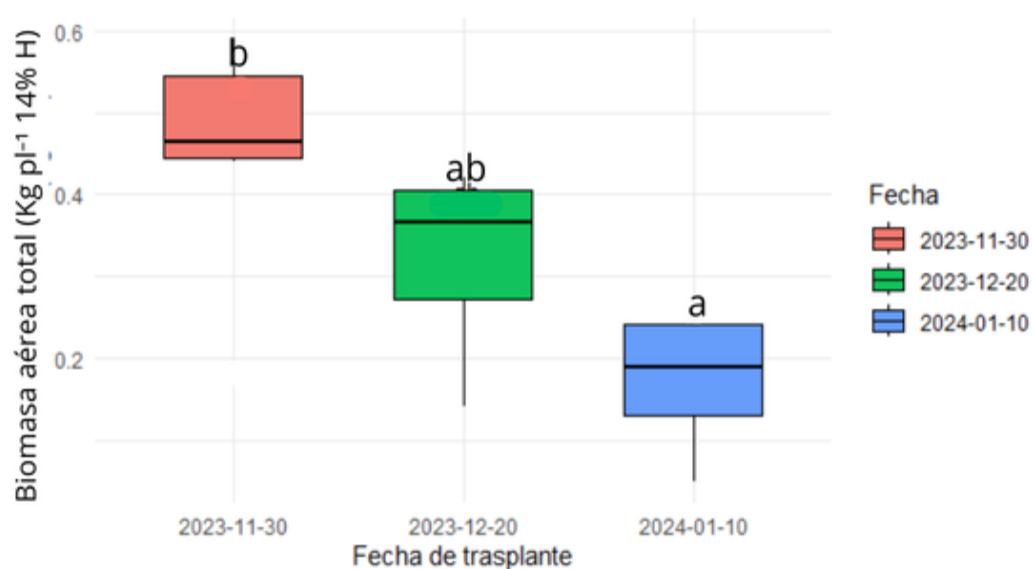
*Biomasa aérea total por planta (14% humedad) según variedad*



Además, se encontraron diferencias significativas en la biomasa aérea total (14% de humedad) según fecha de trasplante. La primera fecha de trasplante (30-11-2023) presentó el mayor promedio de peso (0,453 kg pl<sup>-1</sup>), con valores entre 0,300 kg pl<sup>-1</sup> y 0,607 kg pl<sup>-1</sup>. La tercera fecha de trasplante presentó una biomasa por planta significativamente menor con un promedio de 0,177 kg pl<sup>-1</sup>. La segunda fecha de trasplante (20-12-2023) obtuvo un rendimiento intermedio (0,325 kg pl<sup>-1</sup>), sin diferencias significativas con las otras fechas.

**Figura 14**

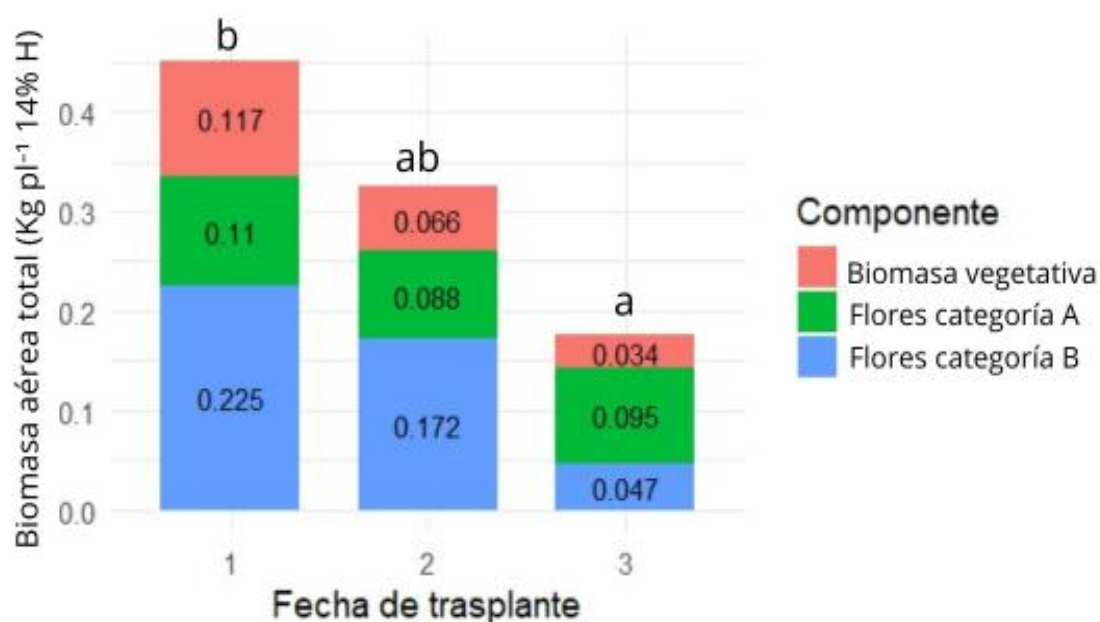
*Biomasa aérea total por planta (14% humedad) según fecha de trasplante*



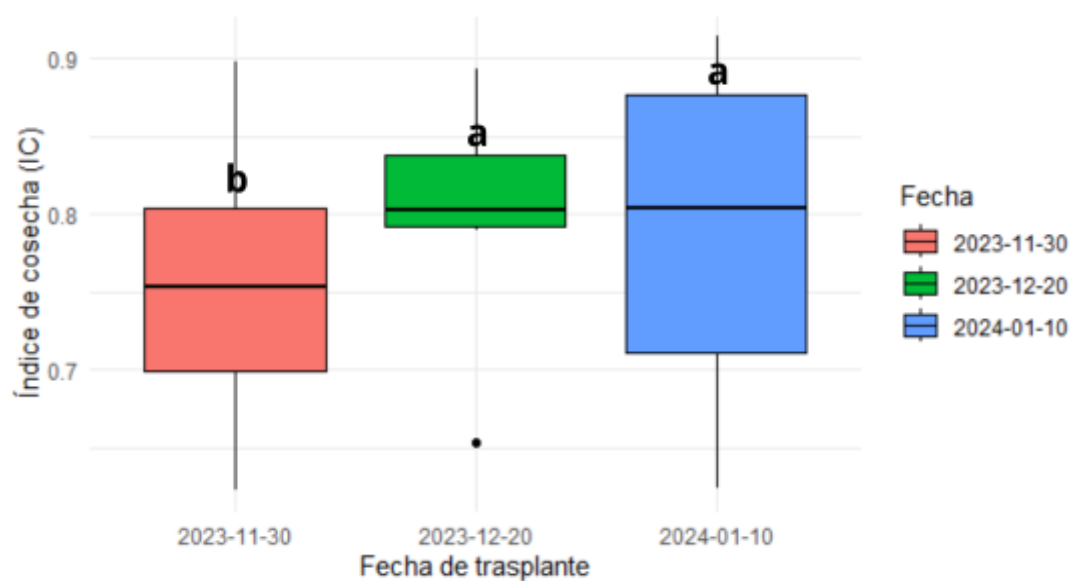
En la figura 15, se presentan los datos de distribución de la biomasa total según fracción vegetativa y reproductiva, discriminando entre flores categoría A y B para cada fecha de trasplante. En la primera fecha (30-11-2023) la partición se da en mayor medida hacia la parte vegetativa de la planta (50% de la biomasa total). En el caso de la segunda fecha (20-12-2023), se reduce la partición a la fracción vegetativa y se incrementa a la parte reproductiva, especialmente a la fracción de flores categoría B (53% de la biomasa total). En la última fecha (10-01-2024), se reduce la partición a la fracción vegetativa con respecto a la primera fecha, pero aumenta la proporción de flores categoría A (54 % de la biomasa total por planta) con respecto a la segunda fecha de trasplante.

**Figura 15**

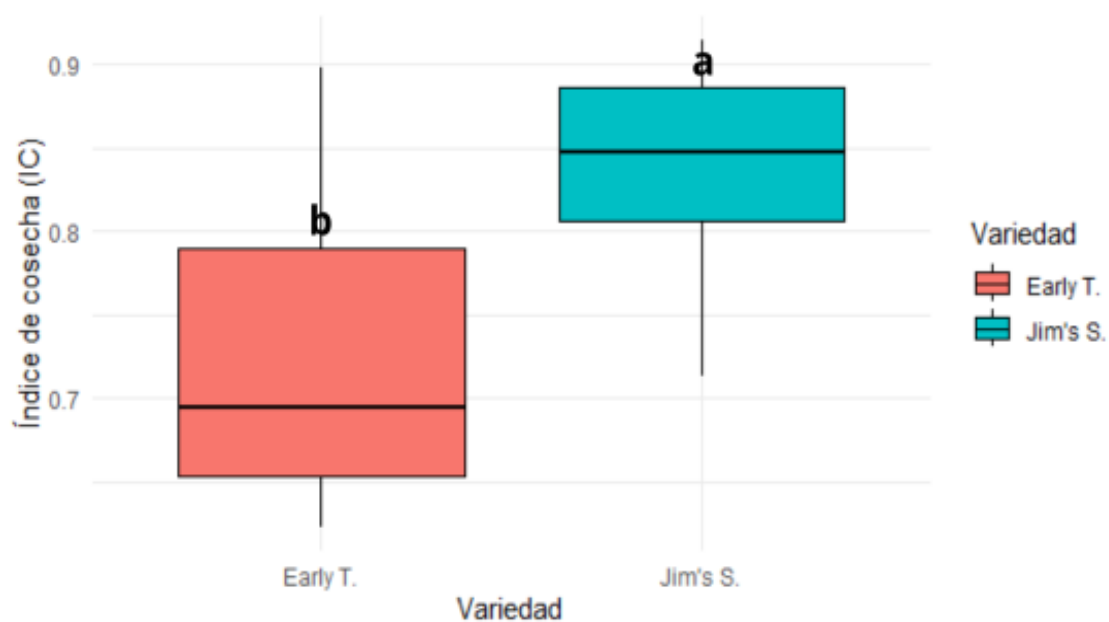
*Peso de biomasa, flores categoría A y B (14% humedad) según fecha de trasplante*



En la figura 16 se presenta el índice de cosecha el cual se obtiene a partir de la suma de la biomasa de flores categoría A y B en relación con la biomasa total, por fecha de trasplante. La primera fecha de trasplante presentó menor índice de cosecha comparada con la segunda y la tercera fecha.

**Figura 16***Índice de cosecha por fecha de trasplante*

La variedad Jim's S tuvo un mayor índice de cosecha en comparación con Early T con valores promedio de 0,84 y 0,7 respectivamente (Figura 17).

**Figura 17***Índice de cosecha según variedad*

Las tablas 12 y 13 presentan los rendimientos obtenidos en el ensayo, considerando las distintas variedades y fechas de trasplante evaluadas. La variedad Jim's S presentó un rendimiento de flores con secado tradicional (14 % de humedad) significativamente mayor que Early T. Jim's S presentó mayor rendimiento de flores categoría A y B. La primera fecha de trasplante presentó un rendimiento de flores significativamente mayor que la fecha más tardía (Tabla 13). Mientras que la fecha de trasplante intermedia no presentó diferencias significativas con el resto de las fechas.

**Tabla 12**

*Rendimientos totales de flores y biomasa aérea según variedad*

| <i>Variedad</i> | Flores categoría A<br>(g a 14% H /ha) | Flores categoría B (kg a 14% H /ha) | Rendimiento comercial (kg a 14% H /ha) | <i>Rendimiento total/planta/ha (kg a 14% H)</i> |
|-----------------|---------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------|
| <i>Early T</i>  | 148,5 a                               | 311,7 a                             | 460,2 a                                | 657,5 a                                         |
| <i>Jim's S</i>  | 199,9 b                               | 424,8 b                             | 624,7 b                                | 932,5 b                                         |

**Tabla 13**

*Rendimiento, flores categoría A y B por planta según fecha de trasplante*

| <i>Fecha de trasplante</i> | Flores categoría A<br>(kg/ha 14% H) | Flores categoría B<br>(kg/ha 14% H) | Rendimiento comercial/ha<br>(kg a 14% H /ha) | Rendimiento total//ha<br>(kg a 14% H) |
|----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------|
| 3                          | 220,0 a                             | 125,0 a                             | 345,0 a                                      | 440 a                                 |
| 2                          | 220,0 a                             | 437,5 ab                            | 657,5 ab                                     | 815 b                                 |
| 1                          | 287,5 b                             | 562,5 b                             | 850,0 b                                      | 1130 c                                |

### *5.5 Relaciones entre variables vegetativas y reproductivas*

Se observaron correlaciones positivas significativas entre el rendimiento total con: las flores categoría A, B por planta, biomasa aérea total, altura, diámetro de planta, y fracción de radiación interceptada al final del ciclo. Sin embargo, las flores categoría A por planta no se correlacionaron significativamente con las variables relacionadas al crecimiento vegetativo como altura de planta, diámetro de planta y fracción de radiación interceptada, mientras que las flores categoría B por planta si presentaron correlaciones positivas significativas con dichas variables vegetativas (Tabla 14). Para el IC, se observaron correlaciones negativas significativas pero bajas con la biomasa aérea total y el diámetro de la planta.

**Tabla 14**

*Correlaciones entre variables de crecimiento vegetativo y reproductivo*

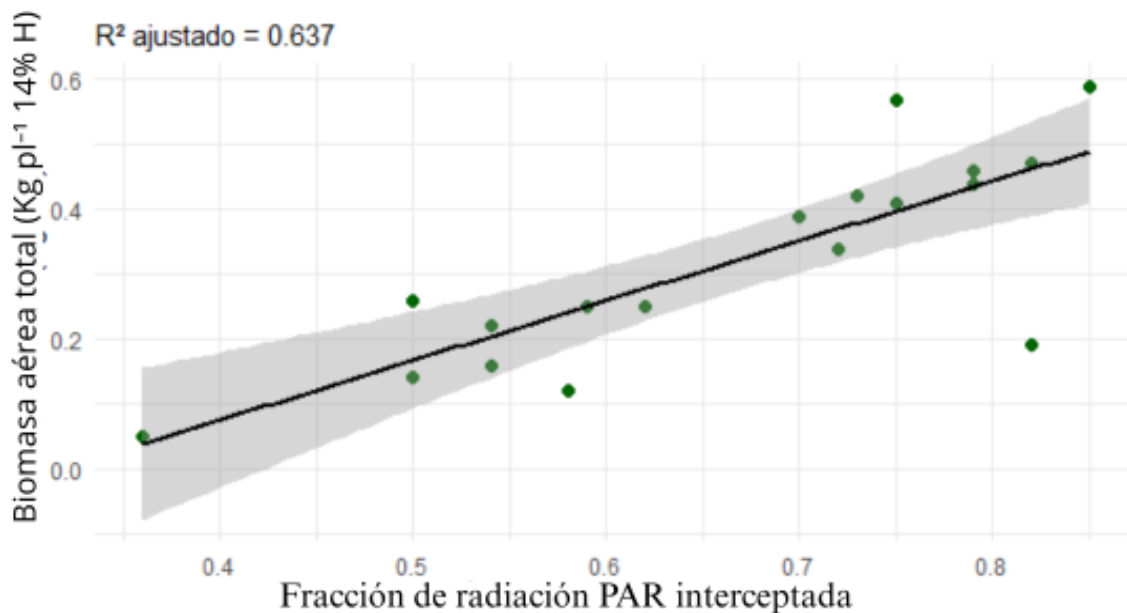
| Variables | IC           | Flores Cat B | Flores Cat A | Trim_pl     | BMA 14%     | Diam5       | Alt5        | PAR |
|-----------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----|
| IC        | 1            |              |              |             |             |             |             |     |
| Cat B     | -0,02        | 1            |              |             |             |             |             |     |
| Cat A     | 0,02         | <b>0,53</b>  | 1            |             |             |             |             |     |
| Trim_pl   | -0,07        | <b>0,95</b>  | <b>00,76</b> | 1           |             |             |             |     |
| Biomasa   | <b>-0,16</b> | <b>0,95</b>  | <b>00,66</b> | <b>0,97</b> | 1           |             |             |     |
| Diámetro  | <b>-0,07</b> | <b>0,90</b>  | 00,46        | <b>0,85</b> | <b>0,87</b> | 1           |             |     |
| Altura    | 0,02         | <b>0,85</b>  | 00,32        | <b>0,76</b> | <b>0,75</b> | <b>0,88</b> | 1           |     |
| PAR       | -0,02        | <b>0,84</b>  | 00,39        | <b>0,79</b> | <b>0,81</b> | <b>0,70</b> | <b>0,66</b> | 1   |

*Nota.* En color correlaciones significativas: positivas (rojo); negativas (violeta); considerando una significancia de  $p < 0,05$ . IC= índice de cosecha; Flores Cat B= flores categoría B; Flores Cat A= flores categoría A; trim\_pl= rendimiento total por planta; peso de las hojas en ramas florales; BMA 14%= biomasa aérea total peso al 14% humedad; Diámetro= diámetro de planta final; Altura= altura de planta final; PAR= Fracción de radiación PAR interceptada final.

Existe una regresión lineal significativa y positiva entre la biomasa aérea total y la fracción de radiación PAR interceptada final (Figura 18). A mayor fracción de radiación PAR interceptada por el cultivo, mayor es la biomasa aérea total obtenida.

**Figura 18**

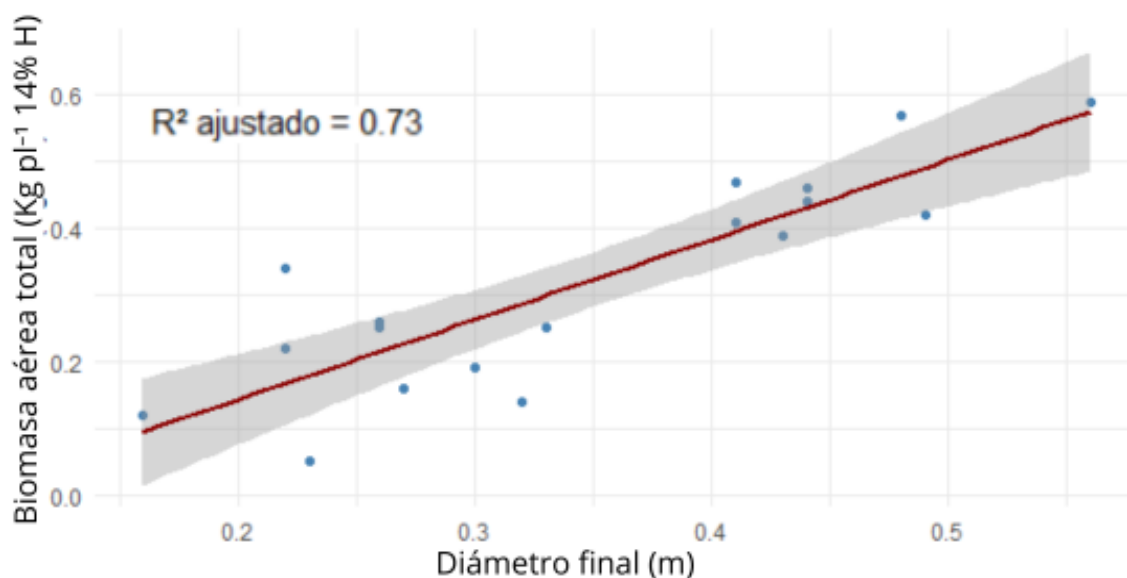
*Regresión lineal entre biomasa aérea (Kg pl<sup>-1</sup> 14% H) y PAR interceptada*



En la figura 19 se presenta la regresión lineal positiva significativa y alta entre la biomasa total expresada en kg pl<sup>-1</sup> 14% H y el diámetro final de planta.

**Figura 19**

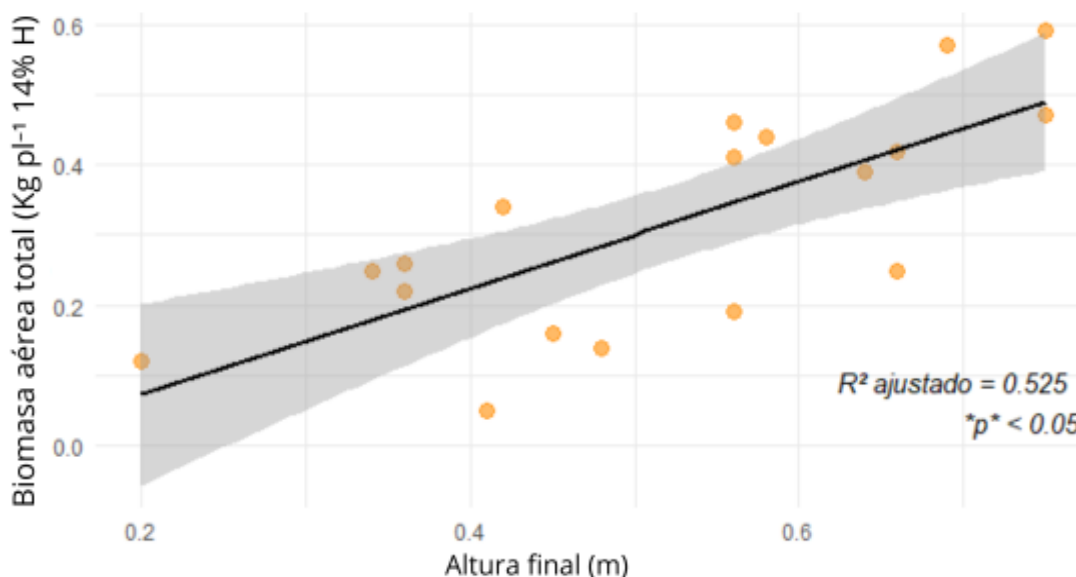
*Relación entre biomasa aérea total (Kg pl<sup>-1</sup> 14% H) y diámetro de la canopia final*



En la Figura 20 se grafica la relación entre la altura final de la planta y la biomasa aérea total en  $\text{kg pl}^{-1}$  a 14% H. Si bien la regresión entre las variables es positiva y significativa, el  $R^2$  ajustado es más bajo (0,52) comparado con la regresión obtenida entre la biomasa y el diámetro de la canopia de la planta (Figura 21).

### Figura 20

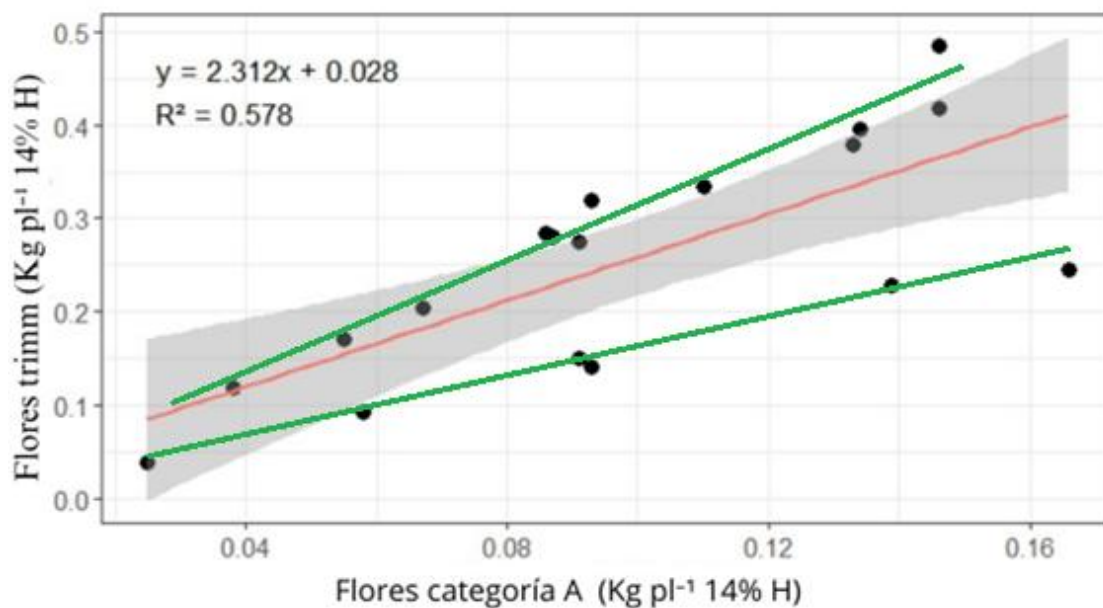
*Relación entre biomasa aérea total ( $\text{Kg pl}^{-1}$  14% H) y altura final*



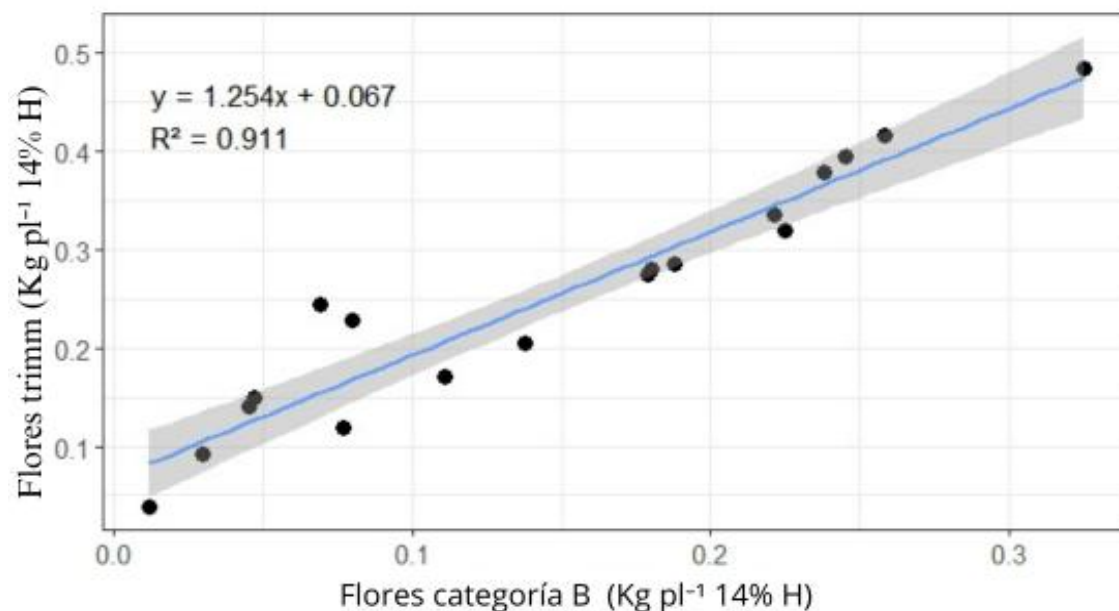
En la figura 21 y 22 se muestran las regresiones lineales entre las flores trimmeadas por planta en  $\text{kg pl}^{-1}$  14% de H y las categorías A y B. En ambos casos se obtuvo un ajuste lineal positivo, con pendientes mayores a cero, lo que indica un incremento del rendimiento de flores comerciales por planta a medida que aumenta el peso de cada categoría. Para la categoría A, el modelo de regresión explicó el 57,8 % de la variabilidad total ( $R^2 = 0,578$ ), observándose una mayor dispersión de los datos en torno a la recta de ajuste. Esta dispersión puede deberse a factores biológicos que no están contemplados como ataques puntuales de patógenos y/o factores de manejo como cintas de riego obstruidas o fertilizantes mal aplicados. En contraste, la regresión correspondiente a la categoría B presentó un ajuste más elevado, con un coeficiente de determinación de 0,911, evidenciando una menor dispersión de los puntos y una relación lineal más estrecha entre las variables evaluadas.

**Figura 21**

*Regresión lineal entre flores trimmed y categoría A (Kg pl<sup>-1</sup> 14% H)*

**Figura 22**

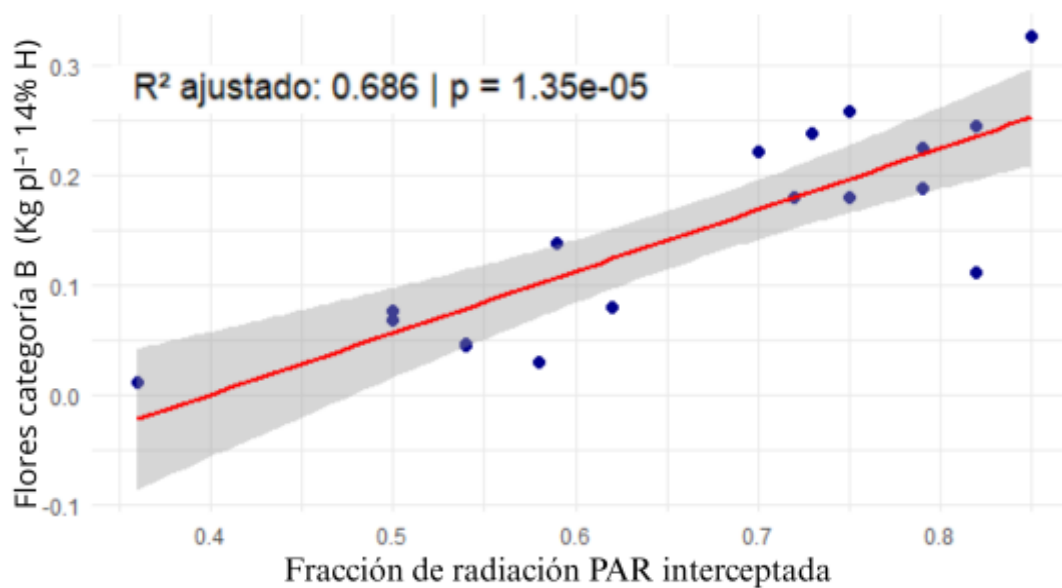
*Regresión lineal entre flores trimmed y categoría B (Kg pl<sup>-1</sup> 14% H)*



La regresión entre la categoría comercial B de flores y la radiación interceptada al final del cultivo se muestra en la figura 23. En la misma se puede ver como estas variables se relacionan de forma significativa y positiva ( $R^2$  ajustado: 0,69) por lo que podemos inferir que, ante una mayor radiación interceptada en el ciclo del cultivo, mayor será el porcentaje de flores categoría B cosechada por planta.

**Figura 23**

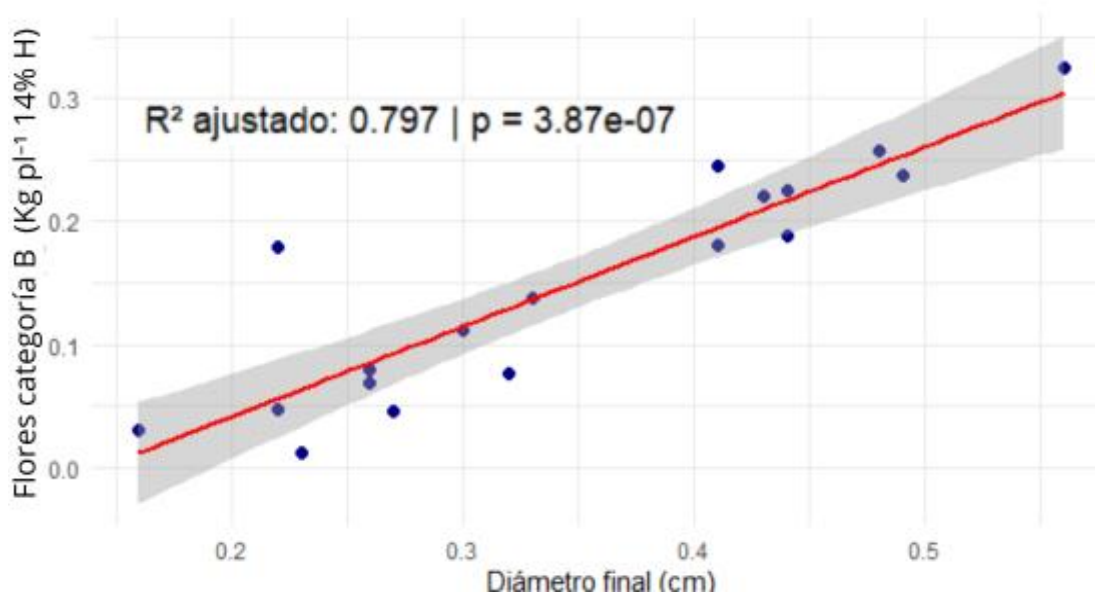
*Relación entre las flores categoría B y PAR interceptada (Kg pl<sup>-1</sup> 14% H)*



En la figura 24 y 25 se muestra la regresión lineal significativa entre el diámetro y la altura final de planta con el peso de flores categoría B (Kg pl<sup>-1</sup> 14% H) ( $R^2$  ajustado: 0,8 y 0,7, respectivamente). A mayor diámetro y altura de planta, mayor es el peso de flores categoría B (Kg pl<sup>-1</sup> 14% H) obtenido.

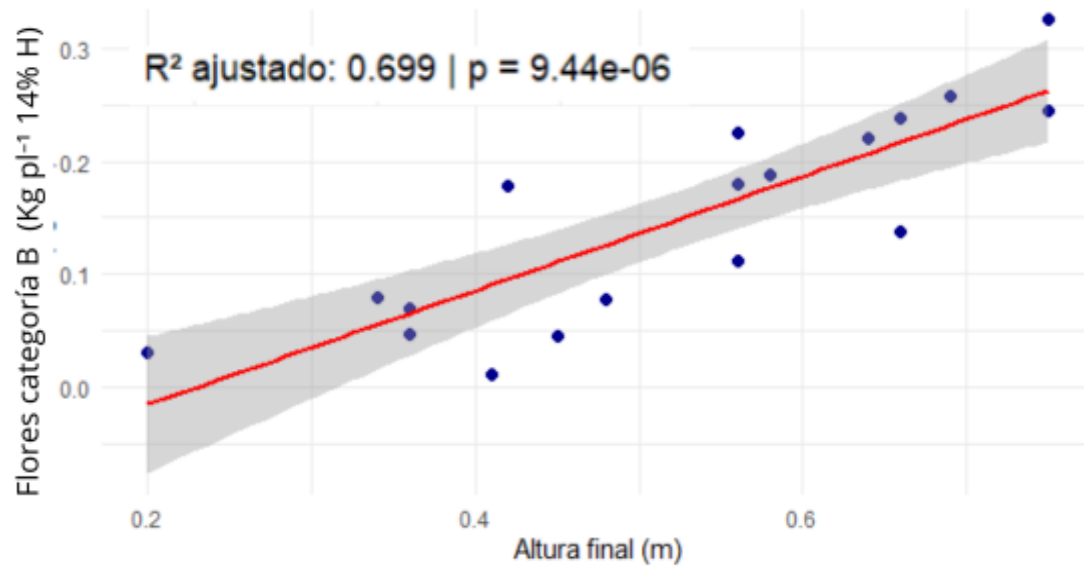
**Figura 24**

*Regresión lineal entre flores categoría B (Kg pl<sup>-1</sup> 14% H) y diámetro final*



**Figura 25**

*Regresión lineal entre flores categoría B (Kg pl<sup>-1</sup> 14% H) y altura final*



## 6.DISCUSIÓN

### 6.1 Efecto de la variedad

En este trabajo se evaluó el efecto de la fecha de trasplante de dos variedades sobre el desarrollo, crecimiento y la producción de flores comerciales en el cultivo de cáñamo. Las condiciones ambientales del año se caracterizaron por precipitaciones acumuladas muy bajas y temperaturas máximas y mínimas superiores a los registros históricos. En este contexto, los ciclos en los que se desarrollaron las variedades fueron de 134, 108 y 100 días para las fechas de trasplante 1, 2 y 3, respectivamente, en la variedad Early T., y de 151, 124 y 110 días en el mismo orden de fechas para la variedad Jim's S. Esto coincide con la descripción de las Genéticas Innvita (s.f.b) donde Early T se presenta como una variedad de ciclo más corto.

Las dos variedades evaluadas mostraron diferencias significativas en las variables de crecimiento vegetativo y reproductivo. La altura de las plantas y el diámetro de la canopia a lo largo del ciclo fueron mayores en la variedad Jim's S en comparación con Early T. Esto condujo a una mayor biomasa aérea total para la variedad Jim's S. A su vez, estas variables se correlacionaron positivamente con la intercepción de radiación fotosintéticamente activa (PAR) por parte de la canopia. Este mayor crecimiento de planta para la variedad Jim's S condujo a un mayor rendimiento de flores totales (14% de humedad), con mayor producción de flores categoría A y B en comparación con Early T. El mayor crecimiento vegetativo y productividad que mostró Jim's S puede estar relacionado al ciclo más largo que muestra esta variedad. Diversos estudios han demostrado que, en *Cannabis sativa L.*, las variedades con ciclos más extensos presentan un mayor potencial de crecimiento vegetativo y rendimiento floral, debido a una mayor capacidad fotosintética acumulada y a una partición más eficiente de asimilados hacia los órganos reproductivos (Amaducci et al., 2015; Lisson et al., 2000; Small, 2015). Asimismo, la prolongación del ciclo favorece un mayor número y tamaño de inflorescencias comerciales, lo que impacta positivamente en la proporción de flores de mayor calidad comercial (Mediavilla et al., 1998). Un inicio de floración más tardío extiende el período vegetativo, lo que permite una mayor elongación de tallos, un incremento en el desarrollo de follaje y, en consecuencia, una mayor intercepción de luz. Este conjunto de efectos favorece una mayor producción de materia seca, la cual es un determinante clave del rendimiento final en especies herbáceas (Potter & Duncombe, 2012). Las fases vegetativas prolongadas se asocian a un incremento en la acumulación de biomasa vegetativa, dado que la fotosíntesis neta se mantiene activa por más tiempo, permitiendo una mayor asimilación de carbono y su partición hacia los órganos de interés productivo (Amaducci et al., 2015; Lisson et al., 2000).

La elongación de tallos también incrementa el número de nudos, que son sitios anatómicos potenciales para el desarrollo de yemas reproductivas. Un mayor número de nudos predispone a una mayor cantidad de inflorescencias, y por ende, una mayor capacidad de partición de fotosintatos hacia las flores (Small, 2015). Esta relación entre características vegetativas (como altura de planta y número de nudos) y rendimiento

reproductivo ha sido documentada en varios cultivos; en *Cannabis*, se ha observado que plantas con mayor desarrollo vegetativo presentan un mayor índice de cosecha y un mayor rendimiento de flores comerciales (Chandra et al., 2017; Mediavilla et al., 1998). Lo cual no coincide del todo con lo observado en este trabajo final, ya que las fechas de trasplante más tardías obtuvieron un mayor índice de cosecha en comparación con la fecha más temprana. Desde el punto de vista comercial, se diferenciaron dos categorías de flores, denominadas A y B, en función de parámetros de tamaño y compacidad, tal como se describe en la metodología. Bajo este sistema de categorización, la variedad Jim's S presentó mayor producción de flores de ambas categorías y también mayor índice de cosecha.

## 6.2 EFECTO DE LA FECHA DE TRASPLANTE

La fecha de trasplante condicionó la duración del ciclo y el crecimiento vegetativo y reproductivo del cultivo al determinar las condiciones ambientales, particularmente el fotoperíodo, al que las plantas estuvieron expuestas durante su desarrollo. En *Cannabis sativa* L., especie cuantitativamente sensible a días cortos, el inicio de la floración se induce cuando la duración del día descende por debajo de un fotoperíodo crítico, generalmente entre 12 y 14 horas, lo que hace que trasplantes más tardíos adelanten la floración y reduzcan el período vegetativo disponible para la acumulación de biomasa (Lisson et al., 2000; Small, 2015). Por el contrario, trasplantes más tempranos prolongan la fase vegetativa, favoreciendo una mayor elongación de tallos, desarrollo foliar e interceptación de radiación, lo que se traduce en una mayor producción de materia seca y rendimiento reproductivo (Amaducci et al., 2015; Mediavilla et al., 1998). La respuesta al fotoperíodo puede variar entre variedades debido a diferencias genéticas en el fotoperíodo crítico y en la sensibilidad a la duración de la noche, lo que explica variaciones en la longitud del ciclo y en el rendimiento entre genotipos implantados en una misma fecha (Chandra et al., 2017; Small, 2015). En este estudio se observó una mayor duración del ciclo en las fechas de trasplante tempranas lo que se explicó por un mayor período vegetativo y reproductivo. En la variedad Jim's S, de ciclo más largo, se redujo mayormente la duración de la fase vegetativa y en Early T se redujo mayormente la duración de la fase reproductiva, a medida que se atrasó la fecha de trasplante.

Estos cambios a lo largo del ciclo y fases del desarrollo condujeron a rendimientos significativamente diferentes entre las fechas de trasplante. Las plantas trasplantadas en la primera fecha (30/11/2023) alcanzaron un rendimiento promedio de  $1125 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ , seguidas por valores de 800 y  $450 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  para la segunda (20/12/2023) y tercera fecha (10/01/2024), respectivamente. Esta caída en el rendimiento en las fechas de trasplante más tardías se asoció a una menor biomasa aérea total, fracción de radiación PAR interceptada, altura y diámetro de la canopia de la planta.

Los valores mínimos de rendimiento oscilaron entre  $125$  y  $475 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  según la fecha, mientras que los máximos se ubicaron entre  $650$  y  $1475 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ , para una densidad de siembra constante de  $1 \text{ plantas} \cdot \text{m}^{-2}$  en todas las fechas y variedades.

Resultados similares fueron reportados por Barlocco Amorin et al. (2021), quienes registraron rendimientos individuales expresados en peso seco por planta con valores mínimos y máximos de 325 y 425 kg·ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Asimismo, García-Tejero et al. (2014) informaron rendimientos de 375, 300 y 225 kg·ha<sup>-1</sup> para densidades de 1, 2 y 4 plantas·m<sup>-2</sup>, respectivamente, en condiciones de campo.

La interacción entre el ciclo fenológico, el momento de floración y el control del fotoperíodo afecta directamente el desarrollo de la planta. El período de floración se encuentra estrechamente relacionado con el fotoperíodo, y una floración temprana suele asociarse con una reducción del rendimiento final, ya que, una vez iniciada, la planta reduce su desarrollo vegetativo y detiene su elongación (Amaducci et al., 2000, 2008; Cosentino et al., 2013).

En el presente trabajo, los resultados reflejan esta dinámica, dado que la variedad de ciclo más largo y las fechas de trasplante más tempranas lograron mayor crecimiento vegetativo e interceptación de radiación con mayor rendimiento total y comercial. Cuando los cultivos se desarrollan en condiciones óptimas, sin limitaciones hídricas ni nutricionales, la producción de biomasa se encuentra directamente relacionada con la cantidad de radiación interceptada por el cultivo (Monteith, 1977). Asimismo, se ha observado que los rendimientos por planta tienden a ser mayores en individuos de mayor altura, debido a un mayor desarrollo vegetativo previo (Fernández Cirigliano & Antúnez Sierra, 2023). El mayor crecimiento vegetativo en la fecha temprana, generó la necesidad de realizar podas del dosel para mejorar ventilación y entrada de radiación a la canopia, aumentando los costos de mano de obra para el manejo de las plantas.

En cuanto a la calidad de las flores cosechadas, trasplantes más tardíos redujeron ambas categorías de flores, pero en mayor medida la categoría B. Sin embargo, la categoría A incrementó su proporción en el rendimiento expresado en kg a 14% de humedad en la última fecha de trasplante. El rendimiento total tuvo mayor correlación con el rendimiento de flores categoría B en comparación con el rendimiento de categoría A, aunque ambas correlaciones fueron significativas.

El trasplante más temprano mostró un menor índice de cosecha en relación a las siguientes fechas. Este resultado sugiere que, en plantas con alta sensibilidad al fotoperíodo, las fechas de trasplante tardías, caracterizadas por ciclos vegetativos más cortos, favorecen una mayor partición de los recursos hacia las yemas reproductivas. Este proceso promueve la formación de flores de mayor calidad comercial, en concordancia con lo señalado por Lisson et al. (2000). Esto se verificó en este estudio, ya que la fecha más tardía tuvo menor biomasa total pero una mayor proporción de flores categoría A (54% de la biomasa total) en comparación con la fecha más temprana (24% de la biomasa total).

Desde un punto de vista productivo y de gestión de la cosecha, la combinación de diferentes fechas de trasplante constituye una estrategia que permite extender el período de recolección y distribuir la demanda de mano de obra e infraestructura de poscosecha.

En este estudio, la diferencia en la duración de los ciclos entre fechas de trasplante generó una separación temporal en la madurez de las plantas, posibilitando escalonar las cosechas en lugar de concentrarlas en un único momento. Esta práctica puede resultar especialmente ventajosa en sistemas de producción de cannabis para flor, donde la cosecha, el secado y el acondicionamiento requieren una elevada intensidad de trabajo y capacidad operativa. Asimismo, la utilización simultánea de fechas de trasplante tempranas y tardías con variedades de ciclos contrastantes permitieron combinar mayores rendimientos obtenidos en los trasplantes tempranos con una mayor proporción de flores de categoría A observada en los trasplantes más tardíos, contribuyendo a optimizar tanto la productividad como la calidad comercial del cultivo.

## 7. CONCLUSIONES

Los resultados del presente trabajo confirman que tanto la variedad como la fecha de trasplante ejercen un rol determinante sobre el ciclo fenológico, el crecimiento vegetativo y el rendimiento del cultivo de cáñamo. La variedad y la fecha de trasplante afectaron la duración del ciclo y sus fases y el crecimiento vegetativo del cultivo, expresando diferencias en el crecimiento del dosel, la capacidad de interceptar radiación y la eficiencia en la conversión de biomasa aérea en rendimiento comercial, lo que evidencia la importancia del componente genético y el ambiente regulado por la fecha de trasplante en la definición del potencial productivo. No se observó interacción entre la variedad y la fecha de trasplante para las variables analizadas. Los trasplantes más tempranos causaron una expansión de los ciclos de cultivo que favorecieron un mayor crecimiento vegetativo e intercepción de radiación, generando mayor acumulación de biomasa aérea y mayor rendimiento total y comercial. La variedad Jim 's S de ciclo más largo también mostró mayor crecimiento del dosel, acumulación de biomasa y rendimiento. La elección varietal y la definición del momento de trasplante constituyen herramientas clave para ajustar el equilibrio entre crecimiento vegetativo, rendimiento y calidad en sistemas productivos de cáñamo.

## 8. REFERENCIAS

- Aizpurua-Olaizola, O., Soydaner, U., Öztürk, E., Schibano, D., Simsir, Y., Navarro, P., Etxebarria, N., & Usobiaga, A. (2016). Evolution of the cannabinoid and terpene content during the growth of *Cannabis sativa* plants from different chemotypes. *Journal of Natural Products*, 79(2), 324-331.
- Albín, A., Arismendes, I., Berrueta, C., Borges, M., Cianelli, E., Collazo, D., Dogliotti, S., Giménez, G., Morales, G., Pizzanelli, M., & Rousserie, G. (2024). *Cáñamo en Uruguay: Primer diagnóstico agronómico*. MGAP.
- Amaducci, S., Amaducci, M. T., Benati, R., & Venturi, G. (2000). Crop yield and quality parameters of four fibre hemp (*Cannabis sativa* L.) cultivars in northern Italy. *Industrial Crops and Products*, 11(2-3), 179-186.  
[https://doi.org/10.1016/S0926-6690\(99\)00063-1](https://doi.org/10.1016/S0926-6690(99)00063-1)
- Amaducci, S., Colauzzi, M., Bellocchi, G., Cosentino, S. L., Pahkala, K., Stomph, T. J., Westerhuis, W., Zatta, A., & Venturi, G. (2012). Evaluation of a phenological model for strategic decisions for hemp (*Cannabis sativa* L.) biomass production across European sites. *Industrial Crops and Products*, 37(1), 100-110.  
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.11.012>
- Amaducci, S., Colauzzi, M., Bellocchi, G., & Venturi, G. (2008). Modelling post-emergent hemp phenology (*Cannabis sativa* L.): Theory and evaluation. *European Journal of Agronomy*, 28(2), 90-102.  
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.05.006>
- Amaducci, S., Scordia, D., Liu, F., Zhang, Q., Guo, H., Testa, G., & Cosentino, S. L. (2015). Key cultivation techniques for hemp in Europe and China. *Industrial Crops and Products*, 68, 2-16. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.06.041>
- Amaducci, S., Zatta, A., Pelatti, F., & Venturi, G. (2007). Influence of agronomic factors on yield and quality of hemp (*Cannabis sativa* L.) fibre and implication for an innovative production system. *Field Crops Research*, 107(2), 161-169.  
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.02.002>
- Andrés, F., & Coupland, G. (2012). The genetic basis of flowering responses to seasonal cues. *Nature Reviews Genetics*, 13, 627-639.  
<https://doi.org/10.1038/nrg3291>

- Appendino, G., Gibbons, S., Giana, A., Pagani, A., Grassi, G., Stavri, M., Smith, E., & Rahman, M. (2008). Antibacterial cannabinoids from *Cannabis sativa*: A structure-activity study. *Journal of Natural Products*, 71(8), 1427-1430.  
<https://doi.org/10.1021/np8002673>
- Barlocco Amorin, S., Lust Álvarez, J., & Urioste Panissa, M. (2021). *Desarrollo y rendimiento de cannabis medicinal CW2a en siembras tardías de día corto* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri.  
<https://hdl.handle.net/20.500.12008/36857>
- Bernstein, N., Gorelick, J., Zerahia, R., & Koch, S. (2019). Impact of N, P, K, and humic acid supplementation on the chemical profile of medical cannabis (*Cannabis sativa* L.). *Frontiers in Plant Science*, 10, Artículo e736.  
<https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00736>
- Bócsa, I., & Karus, M. (1998). *The cultivation of hemp: Botany, varieties, cultivation and harvesting*. Hemptech.
- Bouquet, R. J. (1950). Cannabis. *Bulletin on narcotics*, 2(4), 14-30.
- Campiglia, E., Radicetti, E., & Mancinelli, R. (2017). Plant density and nitrogen fertilization affect agronomic performance of *Cannabis sativa* L. *Industrial Crops and Products*, 100, 246-254.  
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.02.022>
- Candelario-Guerrero, D. A., Calabria Parodi, L. E., Pardey-Rodríguez, C., & Vargas-Sánchez, J. J. (2023). Fenología de diez cultivares de *Cannabis sativa* L. bajo las condiciones ambientales de Palomino Guajira. *Intropica*, 18(1), 65-78.  
<https://doi.org/10.21676/23897864.4672>
- Caplan, D., Dixon, M., & Zheng, Y. (2017). Optimal rate of organic fertilizer during the vegetative stage for cannabis grown in two coir-based substrates. *HortScience*, 52(9), 1307-1312. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI11903-17>
- Cervantes, J. (2006). *Marijuana horticulture: The indoor/outdoor medical grower's bible*. Van Patten.
- Chandra, S., Lata, H., & ElSohly, M. A. (Eds.). (2017). *Cannabis sativa* L.: Botany and biotechnology. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-54564-6>

- Chandra, S., Lata, H., Khan, I. A., & Elsohly, M. A. (2008). Photosynthetic response of *Cannabis sativa* L. to variations in photosynthetic photon flux densities, temperature and CO<sub>2</sub> conditions. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 14(4), 299-306. <https://doi.org/10.1007/s12298-008-0027-x>
- Chandra, S., Lata, H., Mehmedic, Z., Khan, I. A., & ElSohly, M. A. (2015). Light dependence of photosynthesis and water vapor exchange characteristics in different high Δ9-THC yielding varieties of *Cannabis sativa* L. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 2(2), 39-47. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2015.03.002>
- Clarke, R. C. (2023). Anatolian hemp (*Cannabis sativa* L.) cultivation, processing, and production. *Agrociencia Uruguay*, 27, Artículo e1166. <https://agrocienciauruguay.uy/index.php/agrociencia/article/view/1166/1482>
- Clarke, R., & Merlin, M. (2013). *Cannabis: Evolution and ethnobotany*. University of California Press.
- Clarke, R. C., & Merlin, M. D. (2016). Cannabis domestication, breeding history, present-day genetic diversity, and future prospects. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 35(5-6), 293-327. <https://doi.org/10.1080/07352689.2016.1267498>
- Cockson, P., Landis, H., Smith, T., Hicks, K., & Whipker, B. E. (2019). Characterization of nutrient disorders of *Cannabis sativa*. *Applied Sciences*, 9(20), Artículo e4432. <https://doi.org/10.3390/app9204432>
- Cosentino, S. L., Riggi, E., Testa, G., Scordia, D., & Copani, V. (2013). Evaluation of European developed fibre hemp genotypes (*Cannabis sativa* L.) in semi-arid Mediterranean environment. *Industrial Crops and Products*, 50, 312-324. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.07.059>
- Cranshaw, W., Schreiner, M., Britt, K., Kuhar, T. P., McPartland, J., & Grant, J. (2019). Developing insect pest management systems for hemp in the United States: A work in progress. *Journal of Integrated Pest Management*, 10(1), Artículo e26. <https://doi.org/10.1093/jipm/pmz023>

- Da Silva, E. M. G., de Aguiar, A. C. M., Mendes, K. F., & da Silva, A. A. (2022). Weed competition and interference in crops. En K. F. Mendes & A. da Silva (Eds.), *Applied weed and herbicide science* (pp. 55-96). Springer.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-031-01938-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-01938-8_2)
- Danziger, N., & Bernstein, N. (2021). Plant architecture manipulation in medical cannabis. *Industrial Crops and Products*, 167, Artículo e113528.  
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113528>
- Dayanandan, P., & Kaufman, P. B. (1976). Trichomes of *Cannabis sativa* L. (Cannabaceae). *American Journal of Botany*, 63(5), 578-591.  
<https://doi.org/10.2307/2441821>
- Devlin, R. M. (1975). *Plant physiology* (3<sup>rd</sup> ed.). Van Nostrand.
- Di Marzo, V., Bifulco, M., & De Petrocellis, L. (2004). The endocannabinoid system and its therapeutic exploitation. *Nature Reviews Drug Discovery*, 3, 771-784.  
<https://doi.org/10.1038/nrd1495>
- Dirección General de Recursos Naturales. (s.f.). *CONEAT, carta de suelos y cartografía de campo natural*. MGAP. <http://dgrn.mgap.gub.uy/js/visores/dgrn/>
- Durán, A. (Coord.). (1976). *Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay, escala 1:1.000.000* [Mapa]. MGAP.  
[https://descargas.mgap.gub.uy/DGRN/Comunicaciones/1619\\_carta\\_de\\_reconocimiento\\_de\\_suelos\\_del\\_uruguay\\_1.1.000.000\\_imprimir\\_a0\\_0.pdf](https://descargas.mgap.gub.uy/DGRN/Comunicaciones/1619_carta_de_reconocimiento_de_suelos_del_uruguay_1.1.000.000_imprimir_a0_0.pdf)
- Durán, A., & García Prechac, F. (2007). *Suelos del Uruguay: Origen, clasificación, manejo y conservación* (Vol. 2). Hemisferio Sur.
- European Medicines Agency. (2006). *Guideline on good agricultural and collection practice (GACP) for starting materials of herbal origin*.  
[https://www.ema.europa.eu/en/documents/comments/overview-comments-received-draft-guideline-good-agricultural-collection-practice-gacp-starting-materials-herbal-origin-superseded\\_en.pdf](https://www.ema.europa.eu/en/documents/comments/overview-comments-received-draft-guideline-good-agricultural-collection-practice-gacp-starting-materials-herbal-origin-superseded_en.pdf)
- Evans, L. T., & Fischer, R. A. (1999). Yield potential: Its definition, measurement, and significance. *Crop Science*, 39(6), 1544-1551.  
<https://doi.org/10.2135/cropsci1999.3961544x>

- Farha, M. A., El-Halfawy, O. M., Gale, R. T., MacNair, C. R., Carfrae, L. A., Zhang, X., Jentsch, N. G., Magolan, J., & Brown, E. D. (2020). Uncovering the hidden antibiotic potential of cannabis. *ACS Infectious Diseases*, 6(3), 338-346. <https://doi.org/10.1021/acsinfecdis.9b00419>
- Fernández Cirigliano, A., & Antúnez Sierra, J. A. (2023). *Efectos de la densidad de siembra sobre el desarrollo y rendimiento del cultivo de cannabis para flor medicinal* [Trabajo final de grado, Universidad de la República.] Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/44379>
- Fetterman, P., Keith, E., Waller, W., Guerrero, O., Doorenbos, N., & Quimby, M. (1971). Mississippi-grown *Cannabis sativa* L.: Preliminary observation on chemical definition of phenotype and variations in tetrahydrocannabinol content versus age, sex, and plant part. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 60(8), 1246-1249. <https://doi.org/10.1002/jps.2600600832>
- Gaoni, Y., & Mechoulam, R. (1964). Isolation, structure, and partial synthesis of an active constituent of hashish. *Journal of the American Chemical Society*, 86(8), 1646-1647. <https://doi.org/10.1021/ja01062a046>
- García-Tejero, F., Durán-Zuazo, V., Pérez-Álvarez, R., Hernández, A., Casano, S., Morón, M., & Muriel-Fernández, L. (2014). Impact of plant density and irrigation on yield of hemp (*Cannabis sativa* L.) in a Mediterranean semi-arid environment. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 16(4), 887-895.
- Genéticas Innvita. (s.f.a). *Guía técnica para el cultivo y manejo de Cannabis sativa L. en Uruguay*.
- Genéticas Innvita. (s.f.b). *Productos: Genéticas Innvita*. <https://innvita.uy/productos/>
- Gertsch, J., Pertwee, R., & Di Marzo, V. (2010). Phytocannabinoids beyond the cannabis plant: Do they exist? *British Journal of Pharmacology*, 160(3), 523-529. <https://doi.org/10.1111/j.1476-5381.2010.00745.x>
- Gülck, T., & Møller, B. L. (2020). Phytocannabinoids: Origins and biosynthesis. *Trends in Plant Science*, 25(10), 985-1004. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2020.05.005>

- Halliday, K. J., Salter, M. G., Thingnaes, E., & Whitelam, G. C. (2003). Phytochrome control of flowering is temperature sensitive and correlates with expression of the floral integrator FT. *The Plant Journal*, 33(5), 875-885.  
<https://doi.org/10.1046/j.1365-313X.2003.01674.x>
- Hikosaka, K., Ishikawa, K., Borjigidai, A., Muller, O., & Onoda, Y. (2006). Temperature acclimation of photosynthesis: Mechanisms involved in the changes in temperature dependence of photosynthetic rate. *Journal of Experimental Botany*, 57(2), 291-302. <https://doi.org/10.1093/jxb/erj049>
- Hillig, K. W., & Mahlberg, P. G. (2004). A chemotaxonomic analysis of cannabinoid variation in Cannabis (*Cannabaceae*). *American Journal of Botany*, 91(6), 966-975. <https://doi.org/10.3732/ajb.91.6.966>
- Hothorn, T., Bretz, F., & Westfall, P. (2008). Simultaneous inference in general parametric models. *Biometrical Journal*, 50(3), 346-363.  
<https://doi.org/10.1002/bimj.200810425>
- Junta Internacional de Fiscalización de Estupefacientes. (2022). *Informe de la Junta Internacional de Fiscalización de Estupefacientes correspondiente a 2021*. ONU. [https://www.incb.org/documents/Publications/AnnualReports/AR2021/Annual\\_Report/E\\_INCB\\_2021\\_1\\_spa.pdf](https://www.incb.org/documents/Publications/AnnualReports/AR2021/Annual_Report/E_INCB_2021_1_spa.pdf)
- Kaur, N., Kumar, A., Malik, T., Girdhar, M., Singh, M., Singh, R., Tariq, M., & Mohan, A. (2025). Herbicide use and weed management strategies in hemp cultivation. *Journal of Cannabis Research*, 7, Artículo e27. <https://doi.org/10.1186/s42238-025-00280-0>
- Lamarck, J. B., & Poiret, J. L. M. (1783). *Encyclopédie méthodique: Botanique. Vol. 3. Dictionnaire encyclopédique de botanique*. Plomteux.  
<https://doi.org/10.5962/bhl.title.824>
- Landi, S., Berni, R., Capasso, G., Hausman, J.-F., Guerriero, G., & Esposito, S. (2019). Impact of nitrogen nutrition on *Cannabis sativa*: An update on the current knowledge and future prospects. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(22), Artículo e5803. <https://doi.org/10.3390/ijms20225803>

- Lapierre, É., Monthony, A. S., & Torkamaneh, D. (2023). Genomics-based taxonomy to clarify cannabis classification. *Genome*, 66(8), 202-211.  
<https://doi.org/10.1139/gen-2023-0005>
- Lata, H., Chandra, S., Khan, I. A., & ElSohly, M. A. (2016). In vitro propagation of *Cannabis sativa* L. and evaluation of regenerated plants for genetic fidelity and cannabinoids content for quality assurance. En S. M. Jain & H. Häggman (Eds.), *Protocols for in vitro cultures and secondary metabolite analysis of aromatic and medicinal plants* (2<sup>nd</sup> ed., pp. 275-288). Springer.  
[https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3332-7\\_19](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3332-7_19)
- Latta, R. P., & Eaton, B. J. (1975). Seasonal fluctuations in cannabinoid content of Kansas marijuana. *Economic Botany*, 29(2), 153-163.  
<https://doi.org/10.1007/BF02863315>
- Lenth, R. V., Piaskowski, J., Banfai, B., Bolker, B., Buerkner, P., Giné-Vázquez, I., Hervé, M., Jung, M., Love, J., Miguez, F., Riebl, H., & Singmann, H. (2026). *emmeans: Estimated marginal means, aka least-squares means* (Versión 2.0.3) [Software]. <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>
- Ley n° 19.172. *Regulación y control del cannabis*. (2013). IMPO.  
<https://www.impo.com.uy/bases/leyes/19172-2013>
- Li, H.-L. (1973). An archaeological and historical account of cannabis in China. *Economic Botany*, 28, 437-448. <https://doi.org/10.1007/BF02862859>
- Lisson, S. N., Mendham, N. J., & Carberry, P. S. (2000). Development of a hemp simulation model I: General introduction and the effect of temperature on the pre-emergent development of hemp (*Cannabis sativa* L.). *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 40(3), 405-411.
- Lobell, D., Cassman, K., & Field, C. (2009). Crop yield gaps: Their importance, magnitudes and causes. *Annual Review of Environment and Resources*, 34, 179-204. <https://doi.org/10.1146/annurev.envIRON.041008.093740>
- Lubell, J. D., & Brand, M. H. (2018). Foliar sprays of silver thiosulfate produce male flowers on female hemp plants. *HortTechnology*, 28(6), 743-747.  
<https://doi.org/10.21273/HORTTECH04188-18>

- Lydon, J., Teramura, A. H., & Coffman, C. B. (1987). UV-B radiation effects on photosynthesis, growth and cannabinoid production of two *Cannabis sativa* chemotypes. *Photochemistry and Photobiology*, 46(2), 201-206.  
<https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.1987.tb04757.x>
- Maluleke, M. K., & Thobejane, K. R. (2025). Physiology, yield and nutritional contribution of hemp (*Cannabis sativa* L.) grown under different fertiliser types and environments. *Journal of Cannabis Research*, 7, Artículo e17.  
<https://doi.org/10.1186/s42238-025-00273-z>
- Marti, G., Schnee, S., Andrey, Y., Simoes-Pires, C., Carrupt, P.-A., Wolfender, J.-L., & Gindro, K. (2014). Study of leaf metabolome modifications induced by UV-C radiations in representative *Vitis*, *Cissus* and *Cannabis* species by LC-MS based metabolomics and antioxidant assays. *Molecules*, 19(9), 14004-14021.  
<https://doi.org/10.3390/molecules190914004>
- Matsuda, L., Lolait, S., Brownstein, M., Young, A., & Bonner, T. (1990). Structure of a cannabinoid receptor and functional expression of the cloned cDNA. *Nature*, 346, 561-564. <https://doi.org/10.1038/346561a0>
- McPartland, J. M., Clarke, R. C., & Watson, D. P. (2000). *Hemp diseases and pests: Management and biological control*. CABI.  
<https://doi.org/10.1079/9780851994543.0000>
- McPartland, J. M., & Guy, G. W. (2017). Models of cannabis taxonomy. *The Botanical Review*, 83(3), 327-381. <https://doi.org/10.1007/s12229-017-9187-0>
- Mediavilla, V., Jonquera, M., Schmid-Slembrouck, I., & Soldati, A. (1998). Decimal code for growth stages of hemp (*Cannabis Sativa* L.). *Journal of the International Hemp Association*, 5(2), 68-74.  
<http://www.internationalhempassociation.org/jiha/jiha5201.html>
- Meier, U. (Ed.). (2018). *Growth stages of mono- and dicotyledonous plants: BBCH monograph*. Julius Kühn-Institute. <https://doi.org/10.5073/20180906-074619>
- Mendiburu, F. (2023). *agricolae: Statistical procedures for agricultural research* (Versión 1.3-5) [Software]. <https://CRAN.R-project.org/package=agricolae>

- Milanesi, A., Zeballos, C., & Repetto, L. (2019). *Informe de regulación y gobernanza*. IRCCA; CIESU. <https://ircca.gub.uy/wp-content/uploads/2022/09/Informe-regulacion-gobernanza-2020.pdf>
- Mishchenko, S., Mokher, J., Laiko, I., Burbulis, N., Kyrychenko, H., & Dudukova, S. (2017). Phenological growth stages of hemp (*Cannabis sativa* L.): Codification and description according to the BBCH scale. *Žemės Ūkio Mokslai*, 24(2), 31-36.
- Monteith, J. L. (1977). Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, 281(980), 277-294. <https://doi.org/10.1098/rstb.1977.0140>
- Nagai, C., & Makino, A. (2009). Differences between rice and wheat in temperature responses of photosynthesis and plant growth. *Plant and Cell Physiology*, 50(4), 744-755. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcp029>
- Naturamin® NPK: Bioestimulante: Aplicación foliar y edáfico (fertirriego). (s.f.). Daymsa. [https://agriandes.com/wp-content/uploads/2023/09/NATURAMIN-NPK\\_ECUADOR.pdf](https://agriandes.com/wp-content/uploads/2023/09/NATURAMIN-NPK_ECUADOR.pdf)
- Naturamin® WSP. (s.f.). Daymsa. [https://www.almacenrural.com.uy/contentdoc/21010/1/d/Naturamin-WSP\\_ESP\\_Ficha-tecnica\\_V1.pdf](https://www.almacenrural.com.uy/contentdoc/21010/1/d/Naturamin-WSP_ESP_Ficha-tecnica_V1.pdf)
- Naturfruit. (s.f.). Daymsa. [https://agroinsumos.cl/modules/ains\\_producto/pdf/0414NATURFRUIT\\_FC.pdf](https://agroinsumos.cl/modules/ains_producto/pdf/0414NATURFRUIT_FC.pdf)
- Pizzanelli, M. (2022). Caracterización de la estructura de costos del cultivo de cannabis para CBD en Uruguay, zafra 2021-2022. En *Anuario OPYPa 2022*. MGAP. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-opypa-2022/estudios/caracterizacion-estructura-costos-del>
- Potter, D. J. (2009). *The propagation, characterization and optimization of Cannabis sativa L. as a phytopharmaceutical* [Disertación doctoral]. King's College London.

- Potter, D. J. (2014). A review of the cultivation and processing of cannabis (*Cannabis sativa* L.) for production of prescription medicines in the UK. *Drug Testing and Analysis*, 6(1-2), 31-38. <https://doi.org/10.1002/dta.1531>
- Potter, D. J., & Duncombe, P. (2012). The effect of electrical lighting power and irradiance on indoor-grown cannabis potency and yield. *Journal of Forensic Sciences*, 57(3), 618-622. <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2011.02024.x>
- Punja, Z. K., Collyer, D., Scott, C., Lung, S., Holmes, J., & Sutton, D. (2019). Pathogens and molds affecting production and quality of *Cannabis sativa* L. *Frontiers in Plant Science*, 10, Artículo e1120. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01120>
- Ren, G., Zhang, X., Li, Y., Ridout, K., Serrano-Serrano, M. L., Yang, Y., Liu, A., Ravikanth, G., Nawaz, M. A., Mumtaz, A. S., Salamin, N., & Fumagalli, L. (2021). Large-scale whole-genome resequencing of cannabis reveals genetic diversity and selection. *Nature Plants*, 7(29), 297-307. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abg2286>
- Rodriguez-Morrison, V., Llewellyn, D., & Zheng, Y. (2021). Cannabis inflorescence yield and cannabinoid concentration are not increased with exposure to short-wavelength ultraviolet-B radiation. *Frontiers in Plant Science*, 12, Artículo e725078. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.725078>
- Rousserie, P., & Collazo, S. (2022). *Prospección de plagas, hongos y oomicetos asociados a enfermedades en Cannabis sativa L. en el sur de Uruguay* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/36676>
- Russo, E. (2007). History of cannabis and its preparations in saga, science, and sobriquet. *Chemistry & Biodiversity*, 4(8), 1614-1648. <https://doi.org/10.1002/cbdv.200790144>
- Sage, R. F., & Sharkey, T. D. (1987). The effect of temperature on the occurrence of O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> insensitive photosynthesis in field grown plants. *Plant Physiology*, 84(3), 658-664. <https://doi.org/10.1104/pp.84.3.658>

- Saloner, A., & Bernstein, N. (2020). Response of medical cannabis (*Cannabis sativa* L.) to nitrogen supply under long photoperiod. *Frontiers in Plant Science*, 11, Artículo e572293. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.572293>
- Saloner, A., & Bernstein, N. (2022). Effect of potassium (K) supply on cannabinoids, terpenoids, and plant function in medical cannabis. *Agronomy*, 12(5), Artículo e1242. <https://doi.org/10.3390/agronomy12051242>
- Sawler, J., Stout, J. M., Gardner, K. M., Hudson, D., Vidmar, J., Butler, L., Page, J. E., & Myles, S. (2015). The genetic structure of marijuana and hemp. *PLoS ONE*, 10(8), Artículo e0133292. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133292>
- Schilling, S., Melzer, R., & McCabe, P. F. (2020). Cannabis sativa. *Current Biology*, 30(1), R8-R9. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.10.039>
- Schultes, R. E., Klein, W. M., Plowman, T., & Lockwood, T. E. (1974). Cannabis: An example of taxonomic neglect. *Botanical Museum Leaflets, Harvard University*, 23(9), 337-367. <https://doi.org/10.5962/p.168565>
- Scott, C. (2018). *Disease management approaches for Cannabis sativa* L. [Tesis de maestría, Simon Fraser University]. Summit. <https://summit.sfu.ca/item/35390>
- Small, E. (2015). Evolution and classification of Cannabis sativa (marijuana, hemp) in relation to human utilization. *The Botanical Review*, 81(3), 189-294. <https://doi.org/10.1007/s12229-015-9157-3>
- Small, E., & Beckstead, H. D. (1973). Common cannabinoid phenotypes in 350 stocks of cannabis. *Lloydia*, 36(2), 144-165.
- Small, E., & Cronquist, A. (1976). A practical and natural taxonomy for cannabis. *Taxon*, 25(4), 405-435. <https://doi.org/10.2307/1220524>
- Spitzer-Rimon, B., Duchin, S., Bernstein, N., & Kamenetsky, R. (2019). Architecture and florogenesis in female Cannabis sativa plants. *Frontiers in Plant Science*, 10, Artículo e350. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00350>
- Turner, C. E., ElSohly, M. A., & Boeren, E. G. (1980). Constituents of Cannabis sativa L. XVII: A review of the natural constituents. *Journal of Natural Products*, 43(2), 169-234. <https://doi.org/10.1021/np50008a001>

- United Nations Conference on Trade and Development. (2022). *Commodities at a glance: Special issue on industrial hemp*. UN.  
<https://unctad.org/publication/commodities-glance-special-issue-industrial-hemp>
- United Nations Office on Drugs and Crime. (2022). *World drug report 2022*. UN.  
<https://www.unodc.org/unodc/en/data-and-analysis/world-drug-report-2022.html>
- Uruguay XXI. (s.f.). *Legislación de avanzada: 1er país del mundo en legalizar integralmente la producción de cannabis*.  
<https://www.uruguayxxi.gub.uy/es/quiero-exportar/sector/cannabis-4>
- Uruguay XXI. (2024). *Sector cannabis en Uruguay*.  
<https://www.uruguayxxi.gub.uy/uploads/informacion/0750cc9cb92a1af17373efce4443ee0d0be3538d.pdf>
- Van Bakel, H., Stout, J. M., Cote, A. G., Tallon, C. M., Sharpe, A. G., Hughes, T. R., & Page, J. E. (2011). The draft genome and transcriptome of *Cannabis sativa*. *Genome Biology*, 12(10), Artículo eR102. <https://doi.org/10.1186/gb-2011-12-10-r102>
- Van Gelderen, K., Kang, C., & Pierik, R. (2018). Light signaling, root development, and plasticity. *Plant Physiology*, 176(2), 1049-1060.  
<https://doi.org/10.1104/pp.17.01079>
- Van Ittersum, M. K., Cassman, K. G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P., & Hochman, Z. (2013). Yield gap analysis with local to global relevance. *Field Crops Research*, 143, 4-17. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>
- Van Ittersum, M. K., & Rabbinge, R. (1997). Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Research*, 52(3), 197-208. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(97\)00037-3](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00037-3)
- Vanhove, W., Van Damme, P., & Meert, N. (2011). Factors determining yield and quality of illicit indoor cannabis (*Cannabis* spp.) production. *Forensic Science International*, 212(1-3), 158-163. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2011.06.006>
- Vavilov, N. I. (1951). *The origin, variation, immunity and breeding of cultivated plants*. Chronica Botanica.

- Welling, M. T., Shapter, T., Rose, T. J., Liu, L., Stanger, R., & King, G. J. (2016). A belated green revolution for *Cannabis*: Virtual genetic resources to fast-track cultivar development. *Frontiers in Plant Science*, 7, Artículo e1113.  
<https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01113>
- Wickham, H., Chang, W., Henry, L., Pedersen, T. L., Takahashi, K., Wilke, C., Woo, K., Yutani, H., Dunnington, D., & Posit Software, PBC. (2026). *ggplot2: Create elegant data visualisations using the grammar of graphics* (Version 4.0.3) [Software]. <https://CRAN.R-project.org/package=ggplot2>
- World Health Organization. (2003). *WHO guidelines on good agricultural and collection practices (GACP) for medicinal plants*.  
<https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/a00d3219-ed33-436a-be13-e3f00763f874/content>
- Zimdahl, R. L. (2018). *Fundamentals of weed science* (5<sup>th</sup> ed.). Academic Press.  
<https://www.sciencedirect.com/book/9780128111437/fundamentals-of-weed-science>

## 9. ANEXO

**Tabla A1**

*Estados fenológicos de Cannabis Sativa L.*

| Código                                                     | Descripción                                                       |
|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| <b>Estado fenológico 1: Desarrollo foliar</b>              |                                                                   |
| 1.0                                                        | Cotiledones completamente desarrollados. Primeras hojas separadas |
| 1.1                                                        | 1er. par de hojas (simples)                                       |
| 1.2                                                        | 2º. par de hojas (compuestas)                                     |
| 1.3                                                        | 3er. par de hojas (compuestas)                                    |
| 1.4                                                        | 4º. par de hojas (compuestas)                                     |
| 1.5                                                        | 5º. par de hojas (compuestas)                                     |
| 1.6                                                        | 6º. par de hojas (compuestas)                                     |
| 1.7                                                        | 7º. par de hojas (compuestas)                                     |
| 1.8                                                        | 8º. par de hojas (compuestas)                                     |
| 1.9                                                        | 9º. par de hojas (compuestas)                                     |
| <b>Estado fenológico 2: Formación de brotes laterales</b>  |                                                                   |
| 2.1                                                        | Primer brote lateral visible                                      |
| 2.5                                                        | Numerosos brotes laterales en la base de las hojas                |
| <b>Estado fenológico 3: Elongación del tallo principal</b> |                                                                   |
| 3.1                                                        | 10% del largo final del tallo                                     |
| 3.2                                                        | 20% del largo final del tallo                                     |
| 3.3                                                        | 30% del largo final del tallo                                     |
| 3.4                                                        | 40% del largo final del tallo                                     |
| 3.5                                                        | 50% del largo final del tallo                                     |

|     |                               |
|-----|-------------------------------|
| 3.6 | 60% del largo final del tallo |
| 3.7 | 70% del largo final del tallo |
| 3.8 | 80% del largo final del tallo |
| 3.9 | 90% del largo final del tallo |

#### **Estado fenológico 5: Emergencia de la inflorescencia**

|     |                                                                         |
|-----|-------------------------------------------------------------------------|
| 5.1 | Primer botón de flor individual visible                                 |
| 5.5 | Numerosos botones florales visibles                                     |
| 5.9 | Hojas del perianto caliciforme separadas, pero botón floral aún cerrado |

#### **Estado fenológico 6: Floración**

|     |                                                  |
|-----|--------------------------------------------------|
| 6.0 | Primera flor individual abierta                  |
| 6.2 | 20% de las flores abiertas                       |
| 6.3 | 30% de las flores abiertas                       |
| 6.4 | 40% de las flores abiertas                       |
| 6.5 | Plena floración: 50% de las flores abiertas      |
| 6.7 | Floración terminando: 70% de las flores abiertas |
| 6.9 | Fin de la floración                              |

---

*Nota.* Adaptado de Mishchenko et al. (2017).

#### **Referencia bibliográfica de Anexo**

Mishchenko, S., Mokher, J., Laiko, I., Burbulis, N., Kyrychenko, H., & Dudukova, S. (2017). Phenological growth stages of hemp (*Cannabis sativa* L.): Codification and description according to the BBCH scale. *Zemes Ukio Mokslai*, 24(2), 31-36. <https://doi.org/10.6001/zemesukiomokslai.v24i2.3496>