Parámetros fisiológicos, curva de extracción de nutrientes y rendimiento de tres variedades de *Cannabis sativa* L. cultivadas en suelo y sustrato

Physiological parameters, nutrient extraction curve and yield of three varieties of *Cannabis sativa* L. cultivated in soil and substrate

Wendy Andrea Ladino Fandiño

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Agronomía

Bogotá D.C., Colombia

2023

Parámetros fisiológicos, curva de extracción de nutrientes y rendimiento de tres variedades de *Cannabis sativa* L. cultivadas en suelo y sustrato

Wendy Andrea Ladino Fandiño

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ciencias Agrarias

Directora:

Ph.D. Liz Patricia Moreno Fonseca

Codirectora:

Ph.D. Ana María Borda Gutiérrez

Línea de Investigación:

Fisiología de cultivos

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Agronomía

Bogotá D.C., Colombia

2023

Dedicatoria

A Dios por permitirme cumplir y alcanzar sueños y metas inimaginables.

A mis familiares por brindarme el apoyo incondicional y amor en cada paso dado

A mi compañero de vida, Camilo Camacho, quien me motiva todos los días, quien me inspira, quien me apoyó en todos los aspectos y quien, a pesar de todas las dificultades, sigue construyendo metas conmigo. Tu apoyo fue fundamental, sin ti no lo habría podido lograr.

A mi hermano Cristian Ladino, por el cariño y amor que alguna vez me brindó.

Agradecimientos

- A la compañía Medcolcanna SAS, por la financiación en su totalidad del proyecto de tesis de maestría y parte de mi sostenimiento durante la parte experimental.
- A la Universidad Nacional de Colombia, por la oportunidad de ingreso por modalidad admisión automática, por la formación académica y por la financiación de parte de los estudios durante el tiempo de formación.
- A mi directora y codirectora, Ph.D Liz Patricia Moreno Fonseca y Ph.D. Ana María Borda Gutiérrez, respectivamente, por el tiempo y la dedicación en mi formación investigativa, y por generar las correcciones pertinentes al documento final.
- A los profesores asociados de la Universidad Nacional de Colombia quienes aportaron los conocimientos teóricos y prácticos para culminar con éxito el proyecto investigativo.
- A los jurados, Ph.D Fagua Álvarez Flórez y Ph.D. Felipe Sarmiento por la evaluación y sugerencias sobre el trabajo investigativo.
- Al personal administrativo y operativo de la compañía Medcolcanna, por su apoyo en la ejecución de labores técnicas y culturales durante toda la etapa experimental.
- Al I.A. MSc. Diego Felipe Conejo por el apoyo y asesoría en la parte de análisis estadístico de los datos.
- Al grupo de investigación de la Facultad de Ciencias Agrarias, “Fisiología y Estrés abiótico en plantas”, por los comentarios y sugerencias realizadas durante las sesiones de seminario para la presentación de resultados.
- Al laboratorio de Aguas y Suelos de la Universidad Jorge Tadeo Lozano, por la ejecución y explicación de los procedimientos experimentales para los análisis del contenido foliar de nutrientes.

Resumen

Parámetros fisiológicos, curva de extracción de nutrientes y rendimiento de tres variedades de *Cannabis sativa* L. sembradas en suelo y sustrato

Cannabis sativa L. es en la actualidad, de las tres especies de Cannabis, la que ha despertado mayor interés por parte de investigadores y productores debido a sus múltiples usos, destacando entre todos el medicinal. En el año 2016, Colombia se convirtió en el cuarto país de América Latina en legalizar el Cannabis con fines medicinales y científicos, lo que ha promovido la constitución de nuevas empresas con el fin de obtener productos aprovechables de esta planta. Sin embargo, dado el historial ilegal de la especie, hay muy poca información con relación a su manejo agronómico bajo las condiciones de Colombia. Así entonces uno de los principales factores a determinar es el medio de establecimiento óptimo del cultivo. Por lo tanto, el objetivo de la investigación fue determinar los parámetros fisiológicos, la curva de extracción de nutrientes y el rendimiento de tres variedades de *Cannabis sativa* L. cultivadas en suelo y sustrato. Para dar cumplimiento al objetivo, la experimentación se llevó a cabo en la finca El Candil, lote Guacachica, la Conejera, Bogotá, Colombia (4°47'02,6" N, 74°06'10,9" O). Se estableció un experimento con un diseño en bloques en parcelas divididas. Se sembraron tres variedades de Cannabis medicinal no psicoactivo (Souce Cauca, Higthcol y Calotoweed), las cuales cuentan con registro ICA y fueron proporcionadas por la compañía Medcolcanna, en condiciones de suelo (propio del invernadero, textura francoarcillosa) y sustrato (Sustracoco Germiplus®), para un total de seis tratamientos que correspondieron a la interacción entre las variedades y el medio de producción. Antes de la siembra se realizó un análisis de los parámetros fisicoquímicos del suelo y del sustrato. Se evaluaron la fenología y grados día para etapas fenológicas principales, parámetros relacionados con el rendimiento fotosintético de la planta, contenido nutricional completo en etapas clave, curvas de extracción de nutrientes foliar, componentes de rendimiento y rendimiento en términos de flor seca y potencia de dos cannabinoides principales. Como resultado se realizó un ajuste a la escala fenológica reportada para cáñamo, con el fin de obtener los estadios fenológicos principales y secundarios para Cannabis medicinal dioico femenino. Se obtuvieron en total cinco estadios fenológicos principales y basados en la codificación BBCH, nueve códigos individuales los cuales se adaptan perfectamente a las condiciones de suelo y sustrato. Con esta información se pudo determinar que las plantas de sustrato presentaron un ciclo significativamente más corto en días comparado con las plantas de suelo ($p \leq 0,01$), lo que en consecuencia generó que en términos de grados día el resultado fuera similar. Así entonces, las plantas de sustrato acumularon menor cantidad de grados día (entre 1367 a 1487 aprox.) comparado con las de suelo (entre 1487 a 1641 aprox.). Se pudo determinar que el sustrato retiene mayor cantidad de iones nutricionales a lo largo del ciclo del cultivo comparado con el suelo. Respecto al contenido de macro y micronutrientes, fue posible establecer que el nitrógeno (N), en sustrato, redujo su contenido foliar hasta niveles inferiores al mínimo reportado (<3,20%). El potasio (K) también disminuyó hasta niveles cercanos al 2% y el fósforo (P) aumentó a niveles cercanos al 0,85%, generando una relación N:P y K:P más baja. El magnesio (Mg) estuvo por encima de los niveles máximos

reportados (>0,61%) y el azufre (S) no presentó variaciones significativas en el tiempo, sin embargo, estuvo por debajo del límite mínimo reportado (<0,16%). En suelo el contenido de N, K y calcio (Ca) disminuyó a través del tiempo, pero nunca estuvo en condiciones deficitarias. Tanto en suelo como en sustrato el contenido de hierro (Fe), cobre (Cu), manganeso (Mn) y zinc (Zn) estuvo por encima de los máximos niveles reportados, pero con diferencias entre suelo y sustrato ($p \leq 0,05$). Con las curvas de extracción foliar fue posible determinar que el orden de extracción de los macronutrientes en suelo y sustrato fue N>Ca>K>Mg>P>S. Para los micronutrientes la extracción foliar en suelo en el orden de extracción fue Fe>Na>Zn>B>Mn>Cu. Sin embargo, en sustrato no fue clara una tendencia del comportamiento de los micronutrientes, pues fue variable entre variedades. En las variables fisiológicas se encontró que, en sustrato, después de iniciada la etapa de floración hubo una reducción en la eficiencia cuántica potencial del PSII (0,6), la tasa de transporte de electrones (0,32) y el rendimiento cuántico fotoquímico (18). En suelo los valores para estas variables se mantuvieron cerca al óptimo reportado para Cannabis. En sustrato fue más baja la conductancia estomática (<500 mmol H_2O $m^{-2}s$) y más alta la temperatura foliar (28°C) respecto a lo obtenido en suelo. Para el contenido relativo de clorofilas, luego de los 50 días después del trasplante, en sustrato los valores fueron menores a 40 SPAD y en suelo por encima de 50 SPAD. El área foliar y la distribución de materia seca en los órganos de la parte aérea fue más baja en sustrato que en suelo con diferencias significativas entre ellos ($p \leq 0,001$). Finalmente, respecto al rendimiento fue posible establecer que los componentes de rendimiento permiten predecir los resultados de rendimiento final. En general, estos componentes fueron significativamente más bajos en las plantas de sustrato que en las de suelo. El rendimiento en flor seca fue mucho más alto en las variedades Souce Cauca (247,83 g/planta) y Higthcol (173,65 g/planta) en suelo, pero presentaron menor porcentaje de cannabidiol (11,11% y 10,76%, respectivamente). En sustrato, tuvieron menor rendimiento de flor seca (122,30 g/planta para Souce Cauca y 114,44 g/planta para Higthcol) pero mayor contenido de cannabidiol (11,52% para Souce Cauca y 12,61% para Higthcol). Calotoweed en sustrato presentó el mayor rendimiento de flor seca (168,69 g/planta) y la mayor potencia o contenido de cannabidiol (10,08% de CBD). En términos de gramos de cannabidiol por planta las que obtuvieron el mayor rendimiento de flor seca, fueron las que presentaron el mayor rendimiento final de cannabinoides. El rendimiento en términos de producción de CBD anual fue más alto en Souce Cauca y Higthcol en suelo (86,71 y 61,46 g/planta/año, respectivamente), y Calotoweed en sustrato (55,93 g/planta al año). En este trabajo es posible mostrar el impacto del medio de cultivo en *Cannabis sativa* L. sobre las variables fisiológicas y nutricionales directamente implicadas en el rendimiento de las plantas y genera bases para la toma de decisiones sobre las condiciones de establecimiento de este cultivo bajo invernadero con propósitos investigativos o productivos.

Palabras clave: Suelo, fibra de coco, cannabinoides, escala fenológica, fisiología del Cannabis, rendimiento flor seca, curva de extracción de nutrientes.

Abstract

Physiological parameters, nutrient extraction curve and yield of three varieties of *Cannabis sativa* L. cultivated in soil and substrate

Cannabis sativa L. is currently, of the three Cannabis species, the one that has aroused the greatest interest on the part of researchers and producers due to its multiple uses, highlighting among all the medicinal ones. In 2016, Colombia became the fourth country in Latin America to legalize Cannabis for medicinal and scientific purposes, which has promoted the establishment of new companies to obtain usable products from this plant. However, given the illegal history of the species, there is very little information regarding its agronomic management under Colombian conditions. Thus, one of the main factors to be determined is the optimum establishment medium for the crop. Therefore, the objective of the research was to determine the physiological parameters, the nutrient extraction curve and the yield of three varieties of *Cannabis sativa* L. grown in soil and substrate. The experimentation was carried out at El Candil farm, Guacachica lot, La Conejera, Bogotá, Colombia (4°47'02.6" N, 74°06'10.9" W). An experiment with a split-plot block design was established. Three varieties of non-psychoactive medicinal Cannabis (Souce Cauca, Highcol and Calotoweed) were planted, which have ICA registration and were provided by the Medcolcanna company, under soil conditions (typical of the greenhouse, clay loam texture) and substrate (Sustracoco Germiplus®), for a total of six treatments that corresponded to the interaction between the varieties and the production medium. Before sowing, an analysis of the physicochemical parameters of the soil and the substrate was carried out. The phenology and degree days for main phenological stages, parameters related to the photosynthetic performance of the plant, complete nutritional content in key stages, foliar nutrient extraction curves, yield and yield components in terms of dry flower and power of two major cannabinoids were evaluated. As a result, an adjustment was made to the phenological scale reported for hemp, in order to obtain the main and secondary phenological stages for female dioecious medicinal Cannabis. A total of five main phenological stages were obtained and based on the BBCH coding, nine individual codes which perfectly adapt to the soil and substrate conditions. With this information it was possible to determine that the substrate plants presented a significantly shorter cycle in days compared to the soil plants ($p<0.01$), which consequently generated that in terms of degree days the result was similar. Thus, the substrate plants accumulated fewer degree days (between 1367 and 1487 approx.) compared to the soil plants (between 1487 and 1641 approx.). It was possible to determine that the substrate retains a greater amount of nutritional ions throughout the crop cycle compared to the soil. Regarding the macro and micronutrient content, it was possible to establish that nitrogen (N) in the substrate reduced its foliar content to levels below the minimum reported (<3.20%). Potassium (K) also decreased to levels close to 2% and phosphorus (P) increased to levels close to 0.85%, generating a lower N:P and K:P ratio. Magnesium (Mg) was above the maximum reported levels (>0.61%) and sulfur (S) did not present significant variations over time, however, it was below the minimum reported limit (<0.16%). In soil, the content of N, K and calcium

(Ca) decreased over time, but it was never in deficient conditions. Both in the soil and in the substrate, the content of iron (Fe), copper (Cu), manganese (Mn) and zinc (Zn) was above the maximum levels reported, but with differences between soil and substrate ($p<0.05$). With the foliar extraction curves it was possible to determine that the order of extraction of macronutrients in soil and substrate was N>Ca>K>Mg>P>S. For micronutrients, foliar extraction in the soil in the order of extraction was Fe>Na>Zn>B>Mn>Cu. However, in the substrate, a trend in the behavior of micronutrients was not clear, since it was variable between varieties. The physiological variables, it was found that, in the substrate, after the flowering stage began, there was a reduction in the potential quantum efficiency of PSII (0.6), the electron transport rate (0.32) and the photochemical quantum yield. (18). In soil, the values for these variables remained close to the optimum reported for Cannabis. In substrate, stomatal conductance was lower (<500 mmol H_2O $m^{-2}s$) and leaf temperature was higher (28°C) compared to obtained in soil. For the relative content of chlorophylls, after 50 days after the transplant, in the substrate the values were less than 40 SPAD and in soil above 50 SPAD. The leaf area and the distribution of dry matter in the organs of the aerial part were lower in substrate than in soil, with significant differences between them ($p<0.001$). Finally, regarding performance, it was possible to establish that the performance components allow predicting the final performance results. In general, these components were significantly lower in substrate plants than in soil plants. The dry flower yield was much higher in Souce Cauca (247.83 g/plant) and Highcol (173.65 g/plant) varieties in soil, but they presented a lower percentage of cannabidiol (11.11% and 10.76 %, respectively). In substrate, it had a lower dry flower yield (122.30 g/plant for Souce Cauca and 114.44 g/plant for Highcol) but higher cannabidiol content (11.52% for Souce Cauca and 12.61% for Highcol). Calotoweed in substrate presented the highest dry flower yield (168.69 g/plant) and the highest potency or cannabidiol content (10.08% CBD). In terms of grams of cannabidiol per plant, those that obtained the highest dry flower yield were the ones that presented the highest final yield of cannabinoids. The yield in terms of annual CBD production was higher in Souce Cauca and Highcol in soil (86.71 and 61.46 g/plant/year, respectively), and Calotoweed in substrate (55.93 g/plant per year). In this work it is possible to show the impact of the culture medium in *Cannabis sativa* L. on the physiological and nutritional variables directly involved in the performance of the plants and generates bases for decision making on the conditions of establishment of this crop under greenhouse with research or production purposes.

Keywords: Soil, coconut fiber, cannabinoids, phenological scale, Cannabis physiology, dry flower yield, nutrient extraction curve.

Contenido

Pág.

Introducción 21

1. Objetivos 31
1.1 Objetivo general 31
1.2 Objetivos específicos 31

2. Establecimiento de los estadios fenológicos para *Cannabis sativa* L. medicinal y determinación de los grados día en tres variedades sembradas en suelo y sustrato 33
2.1 Resumen 33
2.2 Introducción 33
2.3 Materiales y Métodos 35
2.3.1 Material vegetal y establecimiento del experimento 35
2.3.2 Fenología y determinación de grados día 37
2.3.3 Análisis estadístico 38
2.4 Resultados 38
2.4.1 Estadios fenológicos principales de Cáñamo ajustados para Cannabis medicinal dioico femenino 38
2.4.2 Estadios fenológicos secundarios de Cáñamo ajustados para Cannabis medicinal dioico femenino. 40
2.4.3 La duración en días de los estadios fenológicos principales es diferencial en suelo y sustrato. 42
2.4.4 Los grados día, acumulados y específicos para cada estadio, muestran diferencias en suelo y sustrato 45
2.5 Discusión 46
2.6 Conclusiones 48
2.7 Referencias 48

3. Contenido nutricional foliar y curvas de extracción de nutrientes en plantas de Cannabis sembradas en suelo y sustrato 53
3.1 Resumen 53
3.2 Introducción 53
3.3 Materiales y Métodos 55
3.3.1 Material vegetal y establecimiento del experimento 55
3.3.2 Análisis fisicoquímico del suelo y de la solución del suelo y del sustrato. 56
3.3.3 Contenido nutricional y curva de extracción de nutrientes foliar 56
3.3.4 Análisis estadístico 57
3.4 Resultados 57

3.4.1 El sustrato retiene iones nutricionales durante el ciclo de cultivo de las plantas de Cannabis 57
3.4.2 El contenido de nutrientes foliar presenta diferencias a través del tiempo entre las plantas de suelo y sustrato 60
3.4.3 Las correlaciones de nutricionales en las plantas de Cannabis varían entre medios de cultivo. 63
3.4.4 Determinación de las curvas de extracción de nutrientes foliar para Cannabis medicinal (*Cannabis sativa* L.) en condiciones de suelo y sustrato. 68
3.5 Discusión 72
3.6 Conclusiones 76
3.7 Referencias 76

4. Establecimiento del desempeño fisiológico de tres variedades de Cannabis medicinal sembradas en condiciones de suelo y sustrato 83
4.1 Resumen 83
4.2 Introducción 83
4.3 Materiales y Métodos 85
4.3.1 Material vegetal y establecimiento del experimento 85
4.3.2 Medición de variables nutricionales y fisiológicas 86
4.3.3 Análisis estadístico 87
4.4 Resultados 88
4.4.1 El contenido nutricional foliar varía a través del tiempo en plantas de Cannabis sembradas en sustrato vs. suelo 88
4.4.2 Las tres variedades de *Cannabis sativa* L. sembradas en suelo y sustrato presentan correlaciones diferenciales respecto a las variables relacionadas con el rendimiento fotosintético 89
4.4.3 La eficiencia fotoquímica de las plantas en sustrato es más baja que las plantas en suelo después de iniciada la etapa de floración 91
4.4.4 Las variables relacionadas con el intercambio gaseoso se modifican en las plantas de sustrato en plena floración. 94
4.4.5 Las plantas de sustrato presentan una disminución en el contenido relativo de clorofilas después de la diferenciación floral. 95
4.4.6 Las plantas en suelo presentan una mayor área foliar y distribución de masa seca aérea después de iniciada la etapa reproductiva 96
4.5 Discusión 98
4.6 Conclusiones 101
4.7 Referencias 101

5. Determinación de los componentes de rendimiento, rendimiento y potencia de tres variedades de *Cannabis sativa* L. sembradas en suelo y sustrato 106
5.1 Resumen 106
5.2 Introducción 106
5.3 Materiales y Métodos 108
5.3.1 Material vegetal y establecimiento del experimento 108
5.3.2 Contenido foliar de nutrientes 110
5.3.3 Parámetros de descripción morfológica en la etapa de floración 110
5.3.4 Componentes de rendimiento 110
5.3.5 Rendimiento 111
5.3.6 Contenido de Cannabinoides 111
5.3.7 Análisis estadístico 111

5.4 Resultados 111
5.4.1 Las variedades en sustrato presentan un menor contenido de N, Ca, Zn y Fe, pero mayor contenido de Mg y Mn comparado con las plantas en suelo. 111
5.4.2 Las variedades sembradas en sustrato presentan una morfología descriptiva diferencial previo a cosecha 113
5.4.3 Los componentes de rendimiento en plantas de Cannabis son diferentes entre suelo y sustrato. 114
5.4.4 El porcentaje de cannabidiol es más alto en plantas sembradas en sustrato, pero el rendimiento final de CBD por planta depende del rendimiento de flor seca 118
5.5 Discusión 118
5.6 Conclusiones 120
5.7 Referencias 121

6. Discusión general 125

7. Conclusiones y recomendaciones 131
7.1 Conclusiones 131
7.2 Recomendaciones 133

8. Tablas suplementarias 135

9. Figuras suplementarias 140

Lista de figuras

Pág.

Figura 3-1. Correlogramas del contenido nutricional de tres variedades de *Cannabis sativa* L. sembradas en sustrato, **A.** Calotoweed, **B.** Higthcol y **C.** Souce Cauca, obtenidos a partir del análisis de correlación de Pearson. Colores en la escala de rojo indican correlaciones positivas, colores en la escala de azul correlaciones negativas. Los valores más cercanos a 1 o -1 son altamente significativos. 64

Figura 3-2. Correlogramas del contenido nutricional de tres variedades de *Cannabis sativa* L. sembradas en suelo, **A.** Calotoweed, **B.** Higthcol y **C.** Souce Cauca, obtenidos a partir del análisis de correlación de Pearson. Colores en la escala de rojo indican correlaciones positivas, colores en la escala de azul correlaciones negativas. Los valores más cercanos a 1 o -1 son altamente significativos. 65

Figura 3-3. PCA Biplot de las variables contenido nutricional en tres variedades de *Cannabis sativa* L. sembradas en **A.** Sustrato y **B.** Suelo. Las variables con las flechas de mayor longitud y en la escala de colores cálidos representan una mayor contribución. Las variedades están representadas con los colores azul (CW), amarillo (HC) y gris (SC). .. 67

Figura 3-4. Curva de extracción de macronutrientes foliar (N, P, K, Ca, Mg, S) para tres variedades de *Cannabis sativa* L. Souce Cauca (SC), Calotoweed (CW) y Higthcol (HC) sembradas en suelo y sustrato. Se presentan los valores para los 15, 30, 46, 60 y 90 ddt (n=3). Las barras se presentan con la desviación estándar. Las ecuaciones de cada una de las curvas se presentan en la Tabla suplementaria 3. 69

Figura 3-5. Curva de extracción de micronutirentes foliar (Na, Fe, Mn, Cu, Zn, B) para tres variedades de *Cannabis sativa* L. Souce Cauca (SC), Calotoweed (CW) y Higthcol (HC) sembradas en condiciones de suelo y sustrato. Se presentan los valores para los 15, 30, 46, 60 y 90 ddt (n=3). Las barras se presentan con el error estándar. Las ecuaciones de cada una de las curvas se presentan en la Tabla suplementaria 3. 71

Figura 4-1. PCA Biplot de las variables fisiológicas relacionadas con el rendimiento fotosintético en tres variedades de *Cannabis sativa* L., Souce Cauca, Calotoweed y Higthcol en suelo y sustrato. **A.** PCA-Biplot para las tres variedades y **B.** PCA-Biplot para los dos medios de cultivo. Las variables con las flechas de mayor longitud y en la escala de colores cálidos representan una mayor contribución. 90

Figura 4-2. Efecto del cultivo de Cannabis en suelo y sustrato sobre **A.** Eficiencia cuántica potencial del PSII (Fv/Fm), **B.** Tasa de transporte de electrones (ETR), **C.** Rendimiento cuántico fotoquímico del PSII (YII) y **D.** Quenching no fotoquímico (NPQ) en tres variedades de *Cannabis sativa* L. (SC: Souce Cauca, HC: Higthcol, CW: Calotoweed). Los datos se presentan como la media de las repeticiones. Las cajas rojas representan la variedad CW, las cajas azules la variedad SC y las cajas verdes la variedad HC. 93

Figura 4-3. Efecto del cultivo de Cannabis en suelo y sustrato sobre **A.** Conductancia estomática (g_s) y **B.** Temperatura foliar (°C) en tres variedades de *Cannabis sativa* L. (SC: Souce Cauca, HC: Higthcol, CW: Calotoweed). Los datos se presentan como la media de las repeticiones. Las cajas rojas representan la variedad CW, las cajas azules la variedad SC y las cajas verdes la variedad HC. 95
Figura 4-4. Efecto del cultivo de Cannabis en suelo y sustrato sobre el contenido relativo de clorofilas en unidades SPAD en tres variedades de *Cannabis sativa* L. (SC: Souce Cauca, HC: Higthcol, CW: Calotoweed). Los datos se presentan como la media de las repeticiones. Las cajas rojas representan la variedad CW, las cajas azules la variedad SC y las cajas verdes la variedad HC. 96
Figura 4-5. Efecto del cultivo de Cannabis en suelo y sustrato sobre **A.** Área foliar y **B.** Distribución de biomasa seca aérea en tres variedades de *Cannabis sativa* L. (SC: Souce Cauca, HC: Higthcol, CW: Calotoweed). Los datos se presentan como la media de las repeticiones (+ Error estándar). Las cajas rojas representan la variedad CW, las cajas azules la variedad SC y las cajas verdes la variedad HC en la primera figura. 97
Figura 5-1. PCA Biplot para los componentes de rendimiento en tres variedades de *Cannabis sativa* L. sembradas en **A.** Sustrato y **B.** Suelo. Las variables con las flechas de mayor longitud y en la escala de colores cálidos representan una mayor contribución a la explicación de los resultados. 115
Figura 5-2. PCA Biplot para contenido de cannabinoides y pesos frescos en cosecha de tres variedades de *Cannabis sativa* L. sembradas en **A.** Sustrato y **B.** Suelo. Las variables con las flechas de mayor longitud y en la escala de colores cálidos representan una mayor contribución a la explicación de los resultados. 117
Figura 7-1. ***Modelo del desempeño fisiológico, contenido nutricional y rendimiento de Cannabis medicinal en suelo y sustrato.*** 133

Lista de tablas

Pág.

Tabla 2-1. Fórmula de fertilización en partes por millón (ppm) para la etapa vegetativa y floración utilizada en los medios de cultivo suelo y sustrato para plantas de Cannabis medicinal. 36

Tabla 2-2. Estadios fenológicos principales determinados para Cannabis medicinal y ajustados con base en la codificación de los estadios fenológicos para cáñamo (*Cannabis sativa* L.) propuesta por Mediavilla *et al.* (1998) y Mishchenko *et al.* (2017. La información es pertinente para condiciones de suelo y de sustrato. 39

Tabla 2-3. Ajuste de los estadios fenológicos de crecimiento y desarrollo para Cannabis medicinal (*Cannabis sativa* L.) dioico femenino. Códigos individuales según la escala BBCH. La información es pertinente para plantas establecidas en condiciones de suelo y sustrato. 40

Tabla 2-4. Días acumulados desde crecimiento vegetativo hasta inicio de floración y cosecha para tres variedades de *Cannabis sativa* L. (SC: Souce Cauca, HC: Higthcol, CW: Calotoweed) sembradas en condiciones de suelo y sustrato. Letras diferentes indican diferencias significativas de acuerdo con el test de Tukey ($p \leq 0.05$). 44

Tabla 2-5. Grados día de desarrollo acumulados y para estadios fenológicos principales de las tres variedades de *Cannabis sativa* L. (SC: Souce Cauca, HC: Higthcol, CW: Calotoweed) sembradas en condiciones de suelo y sustrato. 45

Tabla 3-1. Fórmula de fertilización en partes por millón (ppm) para la etapa vegetativa y floración utilizada en los medios de cultivo suelo y sustrato para plantas de Cannabis medicinal. 56

Tabla 3-2. Resultados del análisis de elementos disponibles en la solución del suelo y sustrato, en tres periodos clave del ciclo de cultivo de tres variedades de *Cannabis sativa* L. (SC, CW, HC). 58

Tabla 3-3. Resultados del análisis convencional de suelo de invernadero, donde se establecieron las tres variedades de *Cannabis sativa* L., Souce Cauca, Calotoweed y Higthcol. 59

Tabla 3-4. Contenido de macronutrientes y micronutrientes en el follaje para las variedades de *Cannabis sativa* L. Souce Cauca (SC), Calotoweed (CW) y Higthcol (HC) sembradas en condiciones de suelo y sustrato. Se presentan los valores para los 15, 30, 46, 60 y 90 ddt (n=3). El color rojo en el mapa de calor indica niveles superiores al máximo reportado, verde en el rango ideal y naranja por debajo del mínimo reportado. 61

Tabla 3-5. MANOVA de los días después de trasplante (ddt) para los seis tratamientos (Variedad x Medio de cultivo) respecto al contenido de macro y micronutrientes. Los valores indican la significancia con un $p \leq 0,05$. 67

Tabla 3-6. MANOVA de los días después de trasplante (ddt) para los seis tratamientos (Variedad x Medio de cultivo) respecto a la extracción de macro y micronutrientes. Los valores indican la significancia con un p≤0,05. 72
Tabla 4-1. Fórmula de fertilización en partes por millón (ppm) para la etapa vegetativa y floración utilizada en los medios de cultivo suelo y sustrato para plantas de Cannabis medicinal. 86
Tabla 4-2. Contenido de macronutrientes y micronutrientes en el follaje para las variedades Souce Cauca (SC), Calotoweed (CW) y Higthcol (HC) sembradas en condiciones de suelo y sustrato. Se presentan los valores para los 15, 46 y 90 ddt (n=3). El color rojo en el mapa de calor indica niveles superiores al máximo reportado, verde en el rango ideal y naranja por debajo del mínimo reportado por Cockson *et al.* 2019. 88
Tabla 5-1. Fórmula de fertilización en partes por millón (ppm) para la etapa vegetativa y floración utilizada en los medios de cultivo suelo y sustrato para plantas de Cannabis medicinal. 109
Tabla 5-2. Contenido de macronutrientes y micronutrientes en el follaje para las variedades Souce Cauca (SC), Calotoweed (CW) y Higthcol (HC) sembradas en condiciones de suelo y sustrato. Se presentan los valores para los 30 y 90 ddt (n=3). El color rojo en el mapa de calor indica niveles superiores al máximo reportado, verde en el rango ideal y naranja por debajo del mínimo reportado. Letras distintas indican diferencias significativas de acuerdo con el test de Tukey (p≤0,05). 112
Tabla 5-3. Componentes de rendimiento cuantitativos relacionados con la morfología de tres variedades de *Cannabis sativa* L. sembradas en suelo y sustrato. Los datos se presentan como la media de las repeticiones (n=50). NS, *, ** o *** no significativo o significativo a p≤ 0,05, 0,01 o 0,001, respectivamente. 113
Tabla 5-4. Variables descriptivas relacionadas con la morfología de tres variedades de *Cannabis sativa* L. sembradas en suelo y sustrato (n=50). 114
Tabla 5-5. No. de Ramas productivas, peso fresco de planta y peso fresco de ramas productivas de tres variedades de *Cannabis sativa* L. sembradas en suelo y sustrato. Los datos se presentan como la media de las repeticiones (n=75). NS, *, ** o *** no significativo o significativo a p≤ 0,05, 0,01 o 0,001, respectivamente. 116
Tabla 5-6. Rendimiento de flor seca, porcentaje de Δ^9-tetrahidrocannabinol (THC)**,** porcentaje de Cannabidiol (CBD) y rendimiento en términos de gramos de CBD por planta de tres variedades de *Cannabis sativa* L. sembradas en suelo y sustrato. NS, *, ** o *** no significativo o significativo a p≤ 0,05, 0,01 o 0,001, respectivamente. 118

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolo	Término
®	Marca Registrada

Abreviatura	Término
°C	Grados centígrados
µmol	Micromoles
AF	Área Foliar
ANOVA	Análisis de varianza
B	Boro
BBCH	Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie
C	Cosecha
Ca	Calcio
CBD	Cannabidiol
CE	Conductividad eléctrica
C. sativa	*Cannabis sativa*
Cu	Cobre
CRC	Contenido Relativo de Clorofilas
CW	Calotoweed
ddt	Días después de trasplante
DF	Diferenciación floral
ETR	Tasa de transporte de electrones
Fe	Hierro
Fo	Rendimiento mínimo de la fluorescencia del estado adaptado a la oscuridad
Fo’	Rendimiento de la fluorescencia mínima del estado adaptado a la luz
Fm	Rendimiento máximo de la fluorescencia del estado adaptado a la oscuridad
Fm’	Rendimiento de la fluorescencia máxima del estado adaptado a la luz
Fv/Fm	Rendimiento cuántico máximo potencial del Fotosistema II
GDC	Grados día de crecimiento
g_s	Conductancia estomática
HC	Higthcol
I	Inicio de floración visible
K	Potasio
MANOVA	Análisis de varianza multivariado
MAX	Máximo
MIN	Mínimo
Mg	Magnesio
Mn	Manganeso
MS	Materia seca
N	Nitrógeno
Na	Sodio

Abreviatura	Término
NPQ	Quenching no fotoquímico
P	Fósforo
PAR	Radiación fotosintéticamente activa
PCA	Análisis de componentes principales
PPFD	Densidad de flujo de fotones fotosintéticos incidente
pH	Potencial de Hidrógeno
ppm	Partes por millón
PS	Peso Seco
PSII	Fotosistema II
S	Azufre
SC	Souce Cauca
T	Trasplante
Tb	Temperatura Base
THC	Delta-9-Tetrahidrocannabinol
W	Watt o vatio
YII	Rendimiento cuántico fotoquímico del fotosistema II
Zn	Zinc

Introducción

Entre todos los géneros pertenecientes a la familia Cannabaceae, *Cannabis sativa* (*C. sativa)* ha despertado un especial interés entre el público por sus efectos psicoactivos (Hartsel *et al.,* 2016). La plasticidad genética del Cannabis ha hecho que sea difícil de catalogar, y todavía hay una discusión en curso sobre su clasificación adecuada (Bonini *et al.,* 2018). En 1737, Carl Linnaeus el padre de la taxonomía moderna describió a *C. sativa* como un género compuesto por una sola especie, *C. sativa* (Linnaeus, 1800). Sin embargo, Jean-Baptiste Lamark, al ver diferencias basadas en tamaño, forma, estructura de la hoja y efectos psicoactivos, clasificó los cultivares procedentes de la India como una especie diferente (Lamarck, 1811). Más adelante Janischevsky revisó el punto de vista politípico (múltiples especies) cuando reconoció que plantas rusas locales no se ajustaban a las características de *C. sativa* o *C. indica*, creando la denominación de *C. ruderalis* (Small, 1975) y dividió el género en tres especies distintas, *C. sativa* L., *C. indica* Lam., y *C. ruderalis* Janisch (Hartsel *et al.,* 2016).

Según la American Herbal Pharmacopeia, *C. sativa* se usa principalmente para fibra y semilla (Upton *et al*., 2014). Sin embargo, dados los múltiples usos, la siembra de Cannabis en muchos países en la actualidad tiene un nuevo enfoque, el medicinal (Gallo-Molina *et al.,* 2019). El Cannabis medicinal puede ser abundante en el ingrediente psicoactivo delta-9-tetrahidrocannabinol (THC), sin embargo, dadas las restricciones legales, el Cannabis moderno se ha cultivado selectivamente para producir niveles bajos de THC y altos niveles de fibra, semillas y, más recientemente, cannabidiol (CBD). La mayor parte de la Unión Europea y Canadá han reconocido el valor del Cannabis y han definido un límite legal de 0,3% de THC en el material vegetal seco (Small y Marcus, 2003). Aunque alrededor del mundo se produce Cannabis con fines medicinales, recreativos o industriales (Khajuria *et al.,* 2020), fue tan solo hasta el año 2016 que Colombia se convirtió en el cuarto país de America Latina en legalizar el Cannabis con fines medicinales y científicos, siendo una producción enmarcada en la Ley 1787 de 2016, la cual permite el registro y uso científico o medicinal de materiales ya validados mediante pruebas de evaluación agronómica (PEA) (Rodríguez-Yzquierdo *et al.,* 2020). Desde ese momento, y en los próximos años, se espera un aumento del cultivo de *C. sativa* adaptados a los marcos regulatorios en Colombia y todo el mundo, que puedan promover la constitución de nuevas empresas y explotar productos obtenibles del Cannabis (Burgel *et al.,* 2020). Dado lo anterior, el cultivo de Cannabis medicinal en Colombia enfrenta varios desafíos agronómicos relacionados con manejos a nivel del uso del suelo, la nutrición mineral, la densidad de siembra, la luz, las podas, el manejo integrado de plagas y enfermedades, factores que afectan la productividad, calidad y los costos de producción (Magagnini *et al.,* 2018).

En algunos países, las investigaciones sobre los requerimientos agronómicos del Cannabis medicinal han avanzado en los últimos años (Plecas y Diplock, 2007; Burgel *et al.,* 2020; Khajuria *et al.,* 2020). Uno de los principales factores a determinar es el medio de establecimiento del cultivo. En Canadá, el cultivo de Cannabis en suelo generalmente ocurre extramuros en lugares como bosques, parques nacionales o tierras agrícolas privadas (Plecas y Diplock, 2007). El cultivo hidropónico, por el contrario, se realiza en sustratos específicos y requiere instalaciones más sofisticadas que controlen los niveles de luz, la temperatura y el suministro de nutrientes. La mayoría de los cultivos de *C. sativa* con fines medicinales o de investigación se producen en entornos controlados, como invernaderos e instalaciones interiores, que utilizan sistemas de cultivo sin suelo, como sustratos de lana de roca y turba, fertilizados con fuentes de síntesis química (United Nations, 2006; Farag y Kayser, 2015). Con este método se obtienen mejores resultados en el ciclo del cultivo hasta la cosecha (Chadillon-Farinacci *et al.,* 2013; Chadillon-Farinacci *et al.,* 2015), de esta manera las condiciones de producción son determinantes en la eficacia del cultivo. La reducción del ciclo del cultivo permite obtener mayores cosechas al año debido a la modificación de la fisiología de la planta y esto está a su vez relacionado con el manejo de la zona de raíces (Yep *et al.,* 2020), el cual es de gran importancia para el éxito de muchos cultivos bajo invernadero (Heller *et al.,* 2015; Clark y Zheng, 2017; Raviv *et al.,* 2019; Zheng, 2020); sin embargo, en *C. sativa* frecuentemente no se considera como un factor que afecte el desarrollo y rendimiento del cultivo.

La agricultura mundial ha cambiado drásticamente en las últimas décadas, y este cambio continúa, ya que las fuerzas impulsoras de estos cambios aún están presentes (Barret *et al.,* 2016). La demanda de cultivos florícolas, incluidas las flores cortadas, las plantas en maceta y las plantas de parterre, también ha crecido de forma dramática (Raviv *et al.,* 2019). El resultado de estas tendencias fue la expansión del uso de una amplia variedad de sistemas de cultivo protegido, que van desde las pantallas o cubiertas de película plástica hasta los invernaderos completamente controlados (Blok *et al.,* 2009). Inicialmente esta producción se realizaba enteramente en el suelo que había sido modificado para permitir un buen drenaje. Dado que los costos de producción del cultivo protegido son más altos que los de la producción al aire libre, los productores tuvieron que aumentar la intensidad de su producción para seguir siendo competitivos (Bar-Tal, 1999). Esto se logró mediante varias técnicas; entre ellas se destaca el rápido aumento de la producción sin suelo en relación con la producción total de cultivos agrícolas. La causa principal del abandono del uso del suelo fue la proliferación de patógenos transmitidos por este medio de cultivo en los invernaderos de producción intensiva. Se sustituyó la tierra por diversos sustratos, como lana de roca, poliuretano, perlita, escoria, entre otros, ya que están prácticamente libres de plagas y enfermedades debido a sus procesos de fabricación (Evans y Gachukia, 2004).

El cambio continuo hacia el cultivo sin suelo también se debe al hecho de que en estos es posible tener un mejor control sobre varios factores importantes, lo que lleva a un mejor rendimiento de la planta (Barret *et al.,* 2016). Las características físicas e hidráulicas de la mayoría de los sustratos son superiores a las de los suelos (Raviv *et al.,* 2019). Una planta

que crece en el suelo experimenta una disponibilidad de agua relativamente alta inmediatamente después del riego. En este momento, los macroporos se llenan de agua y luego se da un drenaje relativamente lento que va acompañado de la entrada de aire en los macroporos del suelo (Raviv y Blom, 2001). El oxígeno, que consumen las raíces de las plantas y la microflora del suelo, se repone a un ritmo que puede ser más lento que la demanda de las plantas. Cuando se drena y se evapora suficiente agua, la porosidad del suelo es tal que el oxígeno atmosférico se difunde hacia la zona de las raíces (Raviv *et al.,* 2019). Al mismo tiempo, algo de agua es retenida por el aumento gradual de las fuerzas de la matriz del suelo, de modo que la planta tiene que invertir una cantidad considerable de energía para absorber agua suficiente y así compensar las pérdidas por transpiración debidas a la demanda atmosférica (Murray *et al.,* 2004). La mayoría de los sustratos, por otro lado, permiten una optimización simultánea de las disponibilidades de agua y oxígeno. Las fuerzas de matriz que retienen el agua en los sustratos son mucho más débiles que en el suelo (Abad *et al.,* 2005). En consecuencia, las plantas que crecen en medios porosos a la capacidad del contenedor o cerca de ella requieren menos energía para extraer agua. Al mismo tiempo, una fracción significativa de los macroporos está llena de aire y la tasa de difusión de oxígeno es lo suficientemente alta como para que las plantas no experimenten un riesgo de deficiencia de oxígeno, como el que experimentan las plantas que crecen en un suelo cerca de la capacidad de campo (Raviv y Blom, 2001). Otro factor es que la disponibilidad de nutrientes para las raíces de las plantas se puede manipular y controlar mejor en el cultivo sin suelo que en la mayoría de los suelos cultivables (Maher *et al.,* 2008).

El cultivo en suelo o sustrato puede generar modificaciones en la dinámica fotosintética de las plantas (Takahashi y Badger, 2011). La fotosíntesis juega un papel fundamental en el crecimiento y rendimiento de las plantas de Cannabis, ya que existe una estrecha correlación entre la productividad de las plantas y sus tasas fotosintéticas en un entorno determinado (Lefsrud *et al.,* 2019). La fotosíntesis se define como el conjunto complejo de reacciones mediante las cuales las células vegetales y fototróficas recolectan, transfieren y almacenan energía luminosa como potencial químico en los enlaces de carbono de los carbohidratos (Cooper y Hausman, 2004; Takahashi y Badger, 2011). La fotosíntesis ocurre dentro del cloroplasto, un orgánulo plástido que contiene clorofila y se dedica a la producción de energía (Cooper y Hausman, 2004; Mishra, 2004). Las reacciones de fotooxidación-reducción generadoras de energía de la fotosíntesis ocurren en la membrana tilacoidal (Cooper y Hausman, 2004; Park y Runkle*,* 2008) donde están los complejos de proteínas que permiten el transporte de electrones y la síntesis de las moléculas portadoras de energía NADPH y ATP, que van al ciclo de Calvin. Destacan entre estos los dos principales centros fotosintéticos de reacción a la luz, los complejos fotosistema I y II de proteína de membrana (PSI y PSII) (Cooper y Hausman, 2004). Por lo tanto, entender y comprender este proceso en las plantas de Cannabis será un aspecto clave bajo cualquier condición ambiental o de producción que sea modificada.

De otro lado, algunos autores han encontrado que las condiciones ambientales o algunos factores propios del establecimiento del cultivo pueden contribuir a cambios en la fenología

de las plantas (Igwe *et al.,* 2019). La fenología se define como el estudio de la sincronización de eventos biológicos recurrentes, las causas de su sincronización con respecto a las fuerzas bióticas y abióticas, y la interrelación entre fases de la misma o diferente especie (Leith, 1974); y se ha usado para determinar la interacción de los componentes estructurales/funcionales de las plantas con el medio ambiente (Walker *et al.*, 2001). Aunque en Cannabis tipo cáñamo se han establecido etapas fenológicas claras (Farag y Kayser, 2017; Mishchenko *et al.,* 2017; Rimon *et al.,* 2017; Spitzer-Rimon *et al.,* 2019), deben ser estudiadas y establecidas en Cannabis medicinal, lo que sugiere una oportunidad de investigación clara y es la base para la comprensión de la interacción genotipo por ambiente. Se ha demostrado que los factores abióticos y bióticos, incluida la química del suelo y la humedad del suelo, influyen en la fenología de las plantas de Cannabis, encontrando que las plantas que crecen en suelos propensos a la sequía florecen antes que las que crecen en suelos no secos (Sakaguchi *et al.*, 2019). Los cambios en la fenología de las plantas tienen relevantes implicaciones para la reproducción de las plantas (Kudo y Cooper 2019), por lo tanto, es indispensable determinar cómo las diferencias en el medio de cultivo pueden interferir con las etapas fenológicas de las plantas de Cannabis.

Adicionalmente, se ha encontrado que las condiciones propias del medio de cultivo pueden interferir con la disponibilidad de nutrientes y toma por parte de las raíces de las plantas de Cannabis (Trancoso *et al.,* 2022). Esto a su vez podría tener una implicación directa en el rendimiento de fitocannabinoides y flores (Coffman y Gentner, 1977; Trancoso *et al.,* 2022). Mientras que algunos estudios informan que un aumento en el contenido de macronutrientes podría resultar en un aumento en la producción de inflorescencias y fitocannabinoides (Shiponi y Bernstein*,* 2021), otros han reportado que la mayor disponibilidad de NPK disminuye el THC y otros fitocannabinoides en las inflorescencias (Bernstein *et al.,* 2019; Saloner *et al.,* 2021). Sin embargo, los requerimientos nutricionales de las plantas basados en una curva de extracción de nutrientes no han sido determinados en plantas de Cannabis medicinal sembradas en distintos medios de cultivo. Por lo tanto, es necesario desarrollar prácticas investigativas para evaluar cómo la disponibilidad nutricional, la disponibilidad de agua, el tiempo de aplicación de fertilizantes, las fuentes fertilizantes, la toma de fertilizantes por parte de las plantas y otras metodologías de manejo podrían influir en última instancia en los rendimientos de fitocannabinoides para diferentes genotipos (Trancoso *et al.,* 2022)

Finalmente, de acuerdo con un metaánalisis realizado por Backer *et al.* (2019), el medio de establecimiento de cultivo puede tener una implicación en el rendimiento y biosíntesis de cannabinoides, pues cada uno de estos procesos dependen de muchos factores. Se ha caracterizado gran parte de la vía biosintética central de los cannabinoides (Taura *et al.,* 1996; Gagne *et al.,* 2012), encontrando que el proceso inicia en la síntesis del ácido cannabigerólico (CBGA) (Luo *et al.,* 2019), y por lo tanto cualquier modificación sobre este ácido carboxílico tendrá implicaciones directas en el rendimiento de fitocannabinoides (Booth y Bohlmann, 2019). Así entonces, la proporción de cannabinoides producidos en condiciones de suelo y sustrato debe estudiarse aún más para definir el medio de cultivo

ideal para las plantas de Cannabis. Aunque el Cannabis contiene más de 200 metabolitos secundarios, incluidos terpenos y ácidos fenólicos (Andre *et al.*, 2016), las propiedades medicinales se atribuyen principalmente a los cannabinoides, que contienen fracciones de alquilresorcinol y monoterpeno en sus moléculas (Khajuria *et al.,* 2020). Se han aislado más de 100 cannabinoides de *Cannabis sativa* hasta la fecha, que incluyen principalmente Δ9-tetrahidrocannabinol (THC), cannabidiol (CBD), cannabicromeno, ácido cannabinólico, ácido cannabigerólico, ácido cannabicroménico, ácido cannabinodiólico y tetrahidrocannabivarina (Hanuš *et al.,* 2016). La mayoría de las actividades medicinales y farmacológicas se han estudiado con el cannabinoide psicoactivo, el THC, y recientemente con el cannabinoide no psicoactivo, el CBD, lo que llevó a la introducción del primer fármaco derivado del Cannabis aprobado por la FDA para la epilepsia grave (Mullard, 2019).

Así entonces, se plantea la hipótesis de que los efectos del medio de establecimiento sobre la zona de raíces son determinantes del crecimiento, del comportamiento fisiológico, potencia y el rendimiento de *C. sativa*; sin embargo, esto no se ha investigado previamente, pues los cultivadores comerciales de la industria del Cannabis todavía se refieren a la existencia de información poco confiable, dada la falta de artículos revisados por pares sobre la producción de Cannabis (Lefsrud *et al.,* 2019) y este conocimiento es aún más limitado en países con poca experiencia en el cultivo de Cannabis como Colombia. Por tal motivo, el objetivo de este estudio fue determinar algunos parámetros fisiológicos, la curva de extracción de nutrientes foliar, el rendimiento y el contenido de cannabinoides de tres variedades no psicoactivas de *Cannabis sativa* L. cultivadas en suelo y sustrato bajo condiciones de invernadero en la Sabana de Bogotá.

El documento se divide en cuatro capítulos, cada uno de los cuales responden a los objetivos propuestos de la investigación y se elaboraron como un compendio de cuatro artículos. En la primera parte se hace un ajuste a la escala fenológica propuesta por Mediavilla *et al.* (1998) y Mischenko *et al.* (2017) para cáñamo con el fin de obtener el compendio de estadios fenológicos bajo la codificación BBCH para Cannabis medicinal dioico femenino. Con la escala ajustada, se presenta la medición en días y grados día de desarrollo para las variedades sembradas en suelo y sustrato con el fin de evidenciar diferencias en el ciclo fenológico de las plantas bajo los dos medios de cultivo. En la segunda parte se realiza una evaluación nutricional de las plantas objeto de estudio en suelo y sustrato a partir de la determinación nutricional foliar completa. Con esta información y el peso seco de los tejidos foliares, se determinan las curvas de extracción de nutrientes foliar de macro y micronutrientes para cada variedad tanto en suelo como sustrato. Posteriormente, en el siguiente capítulo, se hace una evaluación a nivel fisiológico determinando variables relacionadas con el rendimiento fotosintético y distribución de fotoasimilados como el rendimiento cuántico potencial del PSII, el Quenching no fotoquímico, la conductancia estomática, el contenido de relativo de clorofilas, el área foliar y la distribución de materia seca. Finalmente se hace la determinación de los componentes de rendimiento (cuantitativos y cualitativos) y rendimiento en términos de flor seca y porcentaje de cannabinoides (THC, CBD). Los resultados presentados en cada uno de los

capítulos, al final se integran en un modelo del comportamiento fisiológico de las plantas de *Cannabis sativa* L. sembradas en condiciones de suelo y sustrato que puede ser utilizado como base para futuras investigaciones sobre esta planta.

Referencias

Abad, M., Fornes, F., Carrión, C., Noguera, V., Noguera, P., Maquieira, Á., y Puchades, R. (2005). Physical properties of various coconut coir dusts compared to peat. HortScienc. 40, 2138–2144. *doi: 10.21273/HORTSCI.40.7.2138.*

Backer, R., Schwinghamer, T., Rosenbaum, P., McCarty, V., Eichhorn Bilodeau, S., Lyu, D., Ahmed, M.B., Robinson, G., Lefsrud, M., Wilkins, O., y Smith, D.L. (2019). Closing the yield gap for Cannabis: a meta-analysis of factors determining Cannabis yield. Front. Plant Sci. 10, 1-15. *doi: 10.3389/fpls.2019.00495.*

Barrett, G.E., Alexander, P.D., Robinson, J.S., y Bragg, N.C. (2016). Achieving environmentally sustainable growing media for soilless plant cultivation systems—A review. Sci. Hortic. 212, 220–234. *doi: 10.1016/j.scienta.2016.09.030.*

Bar-Tal, A. (1999). The significance of root size for plant nutrition in intensive horticulture. In Mineral Nutrition of Crops: Fundamental Mechanisms and Implications (Z. Rengel, ed.). New York: Haworth Press, Inc., pp. 115–139.

Bernstein, N., Gorelick, J., Zerahia, R., y Koch, S. (2019). Impact of N, P, K, and humic acid supplementation on the chemical profile of medical cannabis (*Cannabis sativa* L). Front. Plant Sci. 10, 1–13. *doi: 10.3389/fpls.2019.00736.*

Blok, C., y Verhagen, J.B.G.M. (2009). Trends in rooting media in dutch horticulture during the period 2001–2005: The new growing media project. Acta Hortic. 819, 47–58.

Bonini, S., Pemoli, M., Tambaro, S., Kumar, A., Maccarinelli, G., Memo, M., y Mastinu, A. (2018). *Cannabis sativa*: A comprehensive ethnopharmacological review of a medicinal plant with a long history. Journal of Ethnopharmacology. 227, 300-315. *doi: 10.1016/j.jep.2018.09.004.*

Booth, J.K., y Bohlmann, J. (2019). Terpenes in *Cannabis sativa* – From plant genome to humans. Plant Science. 284, 67–72. *doi: 10.1016/j.plantsci.2019.03.022.*

Burgel, L., Hartung, J., Schibano, D., y Graeff-Hönninger, S. (2020). Impact of Different Phytohormones on Morphology, Yield and Cannabinoid Content of *Cannabis sativa* L. Plants. 9, 725. *doi: 10.3390/plants9060725.*

Chadillon-Farinacci, V., Apparicioet, P., y Morselli, C. (2013). Géographie du Cannabis au Québec: Du producteur au consommateur. Revue canadienne de sciences regionals. Canadian Journal of Regional Science. 36, 13-22.

Chadillon-Farinacci, V., Apparicioet, P., y Morselli, C. (2015). Cannabis cultivation in Quebec: Between space–time hotspots and coldspots. International Journal of Drug Policy. 26, 311-322.

Clark, M.J., y Zheng, Y. (2017). Effect of topdressed controlled-release fertilizer rates on nursery crop quality and growth and growing substrate nutrient status in the Niagara region, Ontario, Canada. HortScience. 52, 167-173. *doi: 10.21273/HORTSCI11309-16.*

Coffman, C.B., y Gentner, W.A. (1977). Responses of greenhouse-grown *Cannabis sativa* L. To nitrogen, phosphorus, and potassium. Agron. J. 69, 832–836. *doi: 10. 2134/agronj1977.00021962006900050026x.*

Cooper, G. M., y Hausman, R. E. (2004). The cell: a molecular approach. Sunderland, MA: Sinauer Associates.

Evans, M.R., y Gachukia, M. (2004). Fresh Parboiled Rice Hulls Serve as an Alternative to Perlite in Greenhouse Crop Substrates. HortScience. 39, 232–235. *doi: 10.21273/HORTSCI.39.2.232.*

Farag, S., y Kayser, O. (2015). Cultivation and breeding of Cannabis sativa L. For preparation of standardized extracts for medicinal purposes. In: Mathe, A. (Ed.), Medicinal and Aromatic Plants of the World. Springer, Budapest, Hungary, pp. 165–186. *doi: 10.1007/978-94-017-9810-5_9.*

Gagne, S. J., Stout, J. M., Liu, E., Boubakir, Z., Clark, S. M., y Page, J. E. (2012). Identification of olivetolic acid cyclase from Cannabis sativa reveals a unique catalytic route to plant polyketides, Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. 109, 12811–12816. *doi:10.1073/pnas.1200330109*

Gallo-Molina, A., Castro-Vargas, H., Garzón-Méndez, W., Martínez, J., Rivera, Z., King, J., y Parada-Alfonso, F. (2019). Extraction, isolation and purification of tetrahydrocannabinol from the *Cannabis sativa* L. plant using supercritical fluid extraction and solid phase extraction. The Journal of Supercritical Fluids. 146, 208-216. *doi: 10.1016/j.supflu.2019.01.020.*

Hanuš, L.O., Meyer, S.M., Muñoz, E., Taglialatela-Scafati, O., y Appendino, G. (2016) Phytocannabinoids: a unified critical inventory. Nat Prod Rep. 33(12), 1357-1392. *doi: 10.1039/c6np00074f.*

Hartsel, J. A., Eades, J., Hickory, B., y Makriyannis, A. (2016). *Cannabis sativa* and Hemp. Nutraceuticals. 735–754. *doi:10.1016/b978-0-12-802147-7.00053-x*.

Heller, H., Bar-Tal, A., Assouline, S., Narkis, K., Suryano, S., de la Forge, A., Barak, M., Alon, H., Bruner, M., Cohen, S., y Tsohar, D. (2015). The effects of container geometry on water and heat regimes in soilless culture: lettuce as a sase study. Irrig. Sci. 33, 53-65. *doi: 10.1007/s00271-014-0448-y.*

Igwe, A.N., Quasem, B., Liu, N., y Vannette, R.L. (2021). Plant phenology influences rhizosphere microbial community and is accelerated by serpentine microorganisms in Plantago erecta. FEMS Microbiol Ecol. 97,1–12. *doi: 10.1093/femsec/fiab085.*

Khajuria, M., Prakash, V., y Vyasa, D. (2020). Photochemical efficiency is negatively correlated with the Δ9 - tetrahydrocannabinol content in *Cannabis sativa* L. Plant Physiology and Biochemistry. 151, 589-600. *doi: 10.1016/j.plaphy.2020.04.003.*

Kudo, G., y Cooper, E.J. (2019). When spring ephemerals fail to meet pollinators: mechanism of phenological mismatch and its impact on plant reproduction. Proc Biol Sci, 286, 20190573. *doi: 10.1098/rspb.2019.0573.*

Lamarck, J.-B. (1811). Encyclopédie méthodique, botanique: Suppl. 2: Panckoucke.

Laverty, K.U., Stout, J.M., Sullivan, M.J., Shah, H., Gill, N., Holbrook, L., Deikus, G., Sebra, R., Hughes, T.R., Page, J.E., y van Bakel H. (2019). A Physical and genetic map of *Cannabis sativa* identifies extensive rearrangements at the THC/CBD acid synthase loci. Genome Res. 29(1), 146-156. *doi: 10.1101/gr.242594.118.*

Lefsrud, M., Bilodeau, S.E., Wu, B.-S., Rufyikiri, A.-S-, y MacPherson, S. (2019). An Update on Plant Photobiology and Implications for Cannabis Production. Frontiers in plant science. 10, 296. *doi: 10.3389/fpls.2019.00296.*

Leith, H. (1974). Purposes of a phenology book. En: H. Leith (Ed.), Phenology and Seasonality Modeling, Springer-Verlag, pp. 3-19. *doi: 10.1016/B978-044450891-1/50004-9.*

Linnaeus, C. (1800). Species Plantarum, vol. 4. Impensis GC Nauk.

Luo, X., Reiter, M.A., d'Espaux, L., Wong, J., Denby, C., Lechner, A., Zhang, Y., Grzybowsky, A., Harth, S., Lin, W., Lee, H., Yu, C., Shin, J., Deng, K., Benites, V., Wang, G., Baidoo, E., Chen, Y., Dev, I., Petzold, C., y Keasling, J.D. (2019). Complete biosynthesis of cannabinoids and their unnatural analogues in yeast. Nature 567, 123–126. *doi: 10.1038/s41586-019-0978-9.*

Magagnini, G., Grassi, G., y Kotiranta, S. (2018). The effect of light spectrum on the morphology and cannabinoid content of *Cannabis sativa* L. Medical Cannabis and Cannabinoids. 1, 19–27. *doi: 10.1159/000489030.*

Maher, M., Prasad, M., y Raviv, M. (2008). Organic soilless media components. In Soilless Culture; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, pp. 459–504. *doi:10.1016/B978-044452975-6.50013-7.*

Mediavilla, V., Jonquera, M., Schmid-Slembrouck, I., y Soldati, A. (1998). Decimal code for growth stages of hemp (*Cannabis sativa* L.). Journal of the international hemp association. 2(65), 68-74.

Mishchenko, S., Mokher, S., Laiko, I., Burbulis, N., Kyrychenko, H., y 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. *doi: 10.6001/zemesukiomokslai.v24i2.3496.*

Mishra, S. R. (2004). Photosynthesis in plants. New Delhi, India: Discovery Publishing House.

Mullard A. (2019). 2018 FDA drug approvals. Nat Rev Drug Discov. 18(2), 85-89. *doi: 10.1038/d41573-019-00014-x.*

Murray, J.D., Lea-Cox, J.D., y Ross, D. (2004). Time domain reflectometry accurately monitors and controls irrigation water applications in soilless substrates. Acta Hort. (ISHS), 633, 75–82. *doi:10.17660/ActaHortic.2004.633.8.*

Park, Y., y Runkle, E. S. (2018). Far-red radiation and photosynthetic photon flux density independently regulate seedling growth but interactively regulate flowering. Environ. Exp. Bot. 155, 206–216. *doi: 10.1016/j.envexpbot.2018.06.033*

Plecas, D., y Diplock, J. (2007). Marihuana growing operations in Alberta 1997–2003. Centre for Criminal Justice Research (University College of the Fraser Valley).

Raviv, M., y Blom, T.J. (2001). The effect of water availability and quality on photosynthesis and productivity of soilless-grown cut roses. Sci. Hortic. (Amsterdam), 88, 257–276. *doi: 10.1016/S0304-4238(00)00239-9.*

Raviv, M., Lieth, J.H., y Bar-Tal, A. (2019). Growing plants in soilless culture: operational conclusions. In: Raviv, M., Lieth, J.H., Bar-Tal, A. (Eds.), Soilless Culture. Elsevier B.V., pp. 637-669. *doi: 10.1016/B978-044452975-6.50015-0.*

Rimon, V., Lata, H., Chandra, S., Khan, I. A., y ElSohly, M. A. (2017). Chapter 5: Morpho-anatomy of marijuana (*Cannabis sativa* L.) en *Cannabis sativa* L. – Botany and biotechnology. ed. S. Chandra (New York, NY: Springer), 123-136. *doi: 10.1007/978-3-319-54564-6_5.*

Rodríguez-Yzquierdo, G., Patiño, M., y Betancourt, M. (2021). Physiological characterization in medicinal Cannabis plants during different phenological stages under biotic stress. Agron. Mesoam. 32(3), 823-840. *doi:10.15517/am.v32i3.44443.*

Saloner, A., y Bernstein, N. (2021). Nitrogen supply affects cannabinoid and terpenoid profile in medical cannabis (*Cannabis sativa* L.). Industrial Crops & Products. 167, 113516. *doi: 10.1016/j.indcrop.2021.113516.*

Sakaguchi, S, Horie, K, Ishikawa, N. Nishio, S., Woth, J.R.P., Fukushima, K., Yamasaki, M., y Ito, M. (2019). Maintenance of soil ecotypes of Solidago virgaurea in close parapatry via divergent flowering time and selection against immigrants. J Ecol, 107, 418–35. *doi: 10.1111/1365-2745.13034.*

Shiponi, S., y Bernstein, N. (2021). The Highs and Lows of P Supply in Medical Cannabis: Effects on Cannabinoids, the Ionome, and Morpho-Physiology. Front. Plant Sci. *12*, 657323. *doi: 10.3389/fpls.2021.657323.*

Sirikantaramas, S., Morimoto, S., Shoyama, Y., Ishikawa, Y., Wada, Y., Shoyama, Y., y Taura, F. (2004). The gene controlling marijuana psychoactivity: molecular cloning and heterologous expression of delta1-tetrahydrocannabinolic acid synthase from *Cannabis sativa* L. J. Biol. Chem. 279, 39767–39774*. doi: 10.1074/jbc.M403693200.*

Small, E. (1975). American law and the species problem in Cannabis: science and semantics. Bull. Narcot. 27 (3), 1–20. *doi: 10.3109/15563657508988067.*

Small, E., y Marcus, D. (2003). Tetrahydrocannabinol levels in hemp (*Cannabis sativa*) germplasm resources. Econ. Bot. 57(4), 545–558. *https://www.jstor.org/stable/4256739.*

Spitzer-Rimon, B., Duchin, S., Bernstein, N., y Kamenetsky, R. (2019). Architecture and Florogenesis in Female *Cannabis sativa* Plants. Front. Plant Sci. 10:350. *doi: 10.3389/fpls.2019.00350.*

Takahashi, S., y Badger, M. R. (2011). Photoprotection in plants: a new light on photosystem II damage. Trends Plant Sci. 16, 53–60. *doi: 10.1016/j.tplants.2010.10.001.*

Taura, F., Morimoto, S., y Shoyama, Y. (1996). Purification and characterization of cannabidiolic-acid synthase from Cannabis sativa L.: biochemical analysis of a novel enzyme that catalyzes the oxidocyclization of cannabigerolic acid to cannabidiolic acid. J. Biol. Chem. 271, 17411–17416. *doi: 10.1074/jbc.271.29.17411.*

Trancoso, I., de Souza, G.A.R., dos Santos, P.R., dos Santos, K.D., de Miranda, R.M.d.S.N., da Silva, A.L.P.M., Santos, D.Z., García-Tejero, I.F., y Campostrini, E. (2022). *Cannabis sativa* L.: Crop Management and Abiotic Factors That Affect Phytocannabinoid Production. Agronomy. 12, 1492. *doi: 10.3390/agronomy12071492.*

United Nations (2006). Bulletin on Narcotics - Review of the World Cannabis Situation. United Nations Off. Drugs Crime LVIII, pp. 1–113.

Upton, R., Craker, L., ElSohly, M., Romm, A., Russo, E., Sexton, M., Marcu, J., y Swisher, D. (2014). Cannabis Inflorescence: Standards of Identity, Analysis, and Quality Control. En: American Herbal Pharmacopoeia and therapeutic compendium Scott's Valley, CA.

Walker, D. I., Olesen, B., y Phillips, R.C. (2001). Reproduction and phenology in seagrasses. Global Seagrass Research Methods, 59–78. *doi:10.1016/b978-044450891-1/50004-9*.

Yep, B., Gale, N.V., y Zheng Y. (2020). Comparing hydroponic and aquaponic rootzones on the growth of two drugtype *Cannabis sativa* L. cultivars during the flowering stage. Industrial Crops & Products. 157, 112881. *doi: 10.1016/j.indcrop.2020.112881.*

Zheng, Y. (2020). Integrated root-zone management for successful soilless culture. Acta Hortic. 1273, 1–8. *doi: 10.17660/ActaHortic.2020.1273.1.*

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Determinar los parámetros fisiológicos, la curva de extracción de nutrientes y el rendimiento de tres variedades de *Cannabis sativa* L. (Souce Cauca, Higthcol y Calotoweed) cultivadas en suelo y sustrato.

1.2 Objetivos específicos

- Determinar la fenología y grados día de crecimiento de tres variedades de *Cannabis sativa* L. cultivadas en suelo y sustrato.
- Determinar los parámetros fisiológicos relacionados con el rendimiento fotosintético de tres variedades de *Cannabis sativa* L. cultivadas en suelo y sustrato.
- Determinar la curva de extracción foliar de macro y micronutrientes de tres variedades de *Cannabis sativa* L. cultivadas en suelo y sustrato.
- Determinar los componentes de rendimiento, el rendimiento y el contenido de cannabinoides en tres variedades de *Cannabis sativa* L. cultivadas en suelo y sustrato.

2. Establecimiento de los estadios fenológicos para *Cannabis sativa* L. medicinal y determinación de los grados día en tres variedades sembradas en suelo y sustrato

2.1 Resumen

La producción de Cannabis con fines medicinales y recreativos es una industria en expansión en varios países del trópico dadas las últimas regulaciones legales. Sin embargo, no hay información sobre el efecto del sustrato de siembra en la fenología de esta planta. El objetivo de esta investigación fue determinar la fenología de tres variedades de Cannabis medicinal establecidas en suelo y sustrato a partir de la codificación BBCH simplificada y extendida y en términos de grados día de crecimiento (GDC). Las tres variedades, Souce Cauca (SC), Calotoweed (CW) y Higthcol (HC) se sembraron en suelo y sustrato (combinación de fibra de coco y perlita) bajo condiciones de invernadero. Con base en las escalas fenológicas reportadas para cáñamo se hizo un ajuste que permitió establecer cinco etapas de crecimiento principal en Cannabis medicinal: *ii)* inicio de floración visible, *iii)* diferenciación floral, *iv)* cosecha de flores y *v)* desarrollo del fruto. Además, se estableció una codificación de 1 a 8 con estadios secundarios los cuales describen el desarrollo de las plantas de Cannabis medicinal en suelo y sustrato. En la fenología basada en los días calendario se presentaron diferencias ya que las plantas de sustrato mostraron un ciclo total más corto (HC:102, CW:111 y SC:102,6) comparadas con las plantas de suelo (HC:111, CW:123 y SC:116). Los GDC acumulados fueron significativamente diferentes entre tratamientos, sin embargo, también hubo menor acumulación en plantas de sustrato comparado con suelo. En sustrato la acumulación total fue de 1486,93 (HC), 1367,39 (HC) y 1367,34 (SC). En suelo se obtuvo una acumulación de GDC de 1641,18 (HC), 1486,93 (HC) y 1550,87 (SC). La etapa que determina las diferencias en la acumulación de grados día es la diferenciación floral a cosecha. En conclusión, se generó la escala fenológica ajustada para Cannabis medicinal y se determinó la acumulación de grados día para las etapas de crecimiento principales, tanto en suelo como sustrato y se encontró que las plantas de Cannabis medicinal crecidas en sustrato reducen el ciclo total de cultivo.

Palabras Clave: Fenología, Grados día de desarrollo, *Cannabis sativa*, BBCH, suelo y sustrato.

2.2 Introducción

El Cannabis (*Cannabis sativa* L.) es una planta anual herbácea, comúnmente dioica, de día corto, que se cultiva en todo el mundo para obtener grano, fibra y metabolitos secundarios (Campbell *et al.,* 2021). La industria del Cannabis sativa está evolucionando rápidamente en todo el mundo, con una demanda creciente de productos agrícolas para

los mercados medicinal y recreativo (Chouvy, 2019). A pesar del uso prolongado por parte de la humanidad con fines medicinales, comerciales y recreativos, la información científica sobre la planta de Cannabis está limitada por su condición legal (Saloner y Bernstein, 2020). Sin embargo, la comprensión de la biología y fisiología de las plantas es necesaria para apoyar el desarrollo de esquemas de cultivo modernos y productivos.

La fenología es el estudio de los eventos del ciclo de vida de plantas, que son desencadenados por cambios ambientales (Meier *et al.,* 2009). Varios autores han propuesto etapas fenológicas del desarrollo del Cannabis (Farag y Kayser, 2017; Mishchenko *et al.,* 2017; Rimon *et al.,* 2017; Spitzer-Rimon *et al.,* 2019). La progresión del desarrollo incluye el establecimiento del cuerpo vegetativo de la planta bajo un fotoperíodo largo, seguido de una etapa de desarrollo reproductivo bajo un fotoperíodo corto (Saloner y Bernstein, 2020). En la primera etapa bajo fotoperiodo largo, el tallo principal de las plantas de Cannabis se ramifica, produciendo ramas laterales alternas. Las ramas laterales producen ramas de segundo y tercer orden (Danziger y Bernstein, 2021). Después de una transición a un fotoperíodo corto, el desarrollo de los brotes cambia, y las yemas apicales del tallo principal y de las ramas primarias, así como las yemas laterales, desarrollan inflorescencias que son la base del rendimiento comercial en Cannabis psicoactivo y no psicoactivo (Cervantes, 2006; Caplan, 2018; Saloner y Bernstein, 2020).

Dentro de las herramientas más utilizadas para medir la fenología de las plantas, se encuentra la escala fenológica BBCH (Biologische Bundesantalt, Bundessortenamt and Chemische Industrie, Alemania), la cual es un sistema para la codificación uniforme de etapas fenológicamente similares en diferentes especies de plantas dicotiledóneas y monocotiledóneas (Meier, 2001). Se han desarrollado diferentes escalas BBCH específicas para una variedad de especies de plantas (Lancashire *et al*., 1991; Arcila-Pulgarin *et al.,* 2002). La mayoría de las escalas propuestas y descritas para Cannabis están ligadas al Cannabis tipo cáñamo durante la ontogénesis (Mediavilla *et al*., 1998; Vyrovets *et al.,* 2012), sin embargo, un sistema de codificación uniforme de la fenología del Cannabis medicinal es importante tanto para determinar el momento adecuado de prácticas agronómicas, como la aplicación de fertilizantes y, el control de plagas, enfermedades y malezas, como en el estudio de la adaptabilidad a diferentes condiciones climáticas y en el desarrollo de programas de mejoramiento (Mishchenko *et al.,* 2017). Adicionalmente, la escala fenológica ha sido utilizada para caracterizar cultivares y como un indicador de la respuesta de un cultivo al ambiente (Meier *et al*., 2009; Flores-Magdaleno *et al*., 2014; Davidenco *et al.,* 2015; Chandrakant y Upreti, 2019; Kishore, 2019). A pesar de la importancia de las descripciones fenológicas, no hay datos sobre la escala BBCH específica para las etapas de crecimiento y desarrollo de Cannabis medicinal dioico femenino en las fuentes que conocemos, incluida la monografía BBCH (Meier, 2001) y la revisión sobre el uso de la escala para diferentes especies o cultivos (Meier *et al.*, 2009).

A menudo, el tiempo calendario se ha utilizado para la predicción de las etapas de crecimiento y desarrollo de los cultivos (Slafer y Savin, 1991; Mendoza *et al.,* 2004); sin

embargo, algunos autores han propuesto varios modelos para mejorar el uso del tiempo calendario en la predicción del desarrollo, los cuales describen el efecto de la temperatura sobre la fenología (Salazar-Gutierrez *et al.*, 2013; Parra-Coronado *et al.,* 2015). Uno de los métodos más ampliamente utilizado es la acumulación de temperatura media diaria por encima de una temperatura base (Tb), conocido como tiempo térmico, grados-día de crecimiento o desarrollo (GDC), unidades de calor (Ruiz-Corral *et al.*, 2002; López *et al.,* 2010) o tiempo fisiológico, y generalmente se usan para cuantificar los efectos de la temperatura y describir el momento en que se dan los procesos biológicos (Salazar-Gutierrez *et al.*, 2013). Aunque esta herramienta se ha utilizado para diferentes cultivos frutales y hortícolas como papa (Tedesco *et al.,* 2021), algodón (Sharma *et al.*, 2021), feijoa (Parra-Coronado *et al.,* 2015) y pepino (Hoyos *et al*., 2012), en Cannabis establecido bajo las condiciones climáticas de Colombia no hay reportes. Si bien la acumulación de GDC para las diferentes etapas de desarrollo es relativamente constante e independiente de la fecha de siembra, cada híbrido, variedad o cultivar de la especie, puede tener valores específicos para estos parámetros (Phadnawis y Saini, 1992; Qadir *et al*., 2006). Según García y López (2002), las plantas están expuestas a las variaciones térmicas del medio físico y éstas tienen gran influencia en los diferentes procesos fisiológicos, bioquímicos y metabólicos que regulan a su crecimiento y desarrollo. Este proceso de crecimiento está afectado por otros factores además de la temperatura, como son el flujo y duración de la radiación fotosintéticamente activa (PAR), la disponibilidad de nutrientes, agua y la pérdida de tejido fotosintético (Hoyos *et al*., 2012). Así entonces, una condición de siembra diferente en un cultivo sin suelo o en suelo, podría tener una influencia en la acumulación de GDC. De acuerdo con Hoyos *et al.* (2012), en un sistema de producción sin suelo el cual se desarrolla bajo entornos protegidos y en donde de manera permanente hay disponibilidad de nutrientes y agua, se pueden aprovechar otros factores bioclimáticos (temperatura, luminosidad y concentración de CO_2), con el fin de incrementar el rendimiento o mejorar la calidad del producto final. Por otro lado, Chen *et al.* (2019) y Sharma *et al.* (2021) aseguran que las diferencias en la acumulación de grados días en diferentes tipos de suelos y/o sustratos, puede ser ocasionada por las diferencias en la frecuencia de irrigación y la retención de humedad del medio.

Los objetivos de esta fase de la investigación fueron: *i)* Establecer los estadios fenológicos primarios y secundarios para Cannabis medicinal dioico femenino, y *ii)* determinar el tiempo calendario y los grados día de crecimiento para cada etapa fenológica principal en tres variedades de Cannabis medicinal (*Cannabis sativa* L.), Souce Cauca, Calotoweed y Higthcol, establecidas en condiciones de suelo y sustrato.

2.3 Materiales y Métodos

2.3.1 Material vegetal y establecimiento del experimento

La investigación se realizó en la finca El Candil, Lote Guacachica, La Conejera, Bogotá, Colombia (4°47'02,6" N, 74°06'10,9" O). Se emplearon 3 variedades no psicoactivas de

Cannabis medicinal: Souce Cauca (SC), Calotoweed (CW) y Higthcol (HC) (Tabla suplementaria 1) proporcionadas por la compañía Medcolcanna S.A.S. Las plántulas se obtuvieron a partir de esquejes enraizados de 4 semanas de edad y se crecieron bajo invernadero con temperatura promedio de 16,39 °C, humedad relativa de 76,21 %, intensidad de luz diaria promedio de 16,7 mol m^{-2} s^{-1}, radiación fotosintéticamente activa (PAR) promedio de 282,61 µmol $m^{-2}s^{-1}$ (Figura suplementaria 1) y fotoperiodo natural (12/12 h luz/oscuridad). Las tres variedades se sembraron en junio de 2020 en condiciones de suelo y sustrato (Sustracoco Germiplus®, Fibra de coco 70%, perlita 30%), para un total de seis tratamientos que corresponden a la interacción entre las variedades y el medio de producción.

Las plantas se trasplantaron en materas plásticas de 12 L con sustrato o en camas elevadas de 0,80 m de ancho con suelo, bajo una densidad de siembra de 4 plantas m^{-2}. Se estableció un fotoperiodo durante la fase vegetativa de 18/6 luz/oscuridad el cual se suplementó con iluminación artificial haciendo uso de luminarias LED Sylvania ® de 30W durante 38 noches. Posteriormente las plantas crecieron bajo condiciones naturales de fotoperiodo (12/12). Las plantas se regaron y fertirregaron con un sistema de riego por goteo en el suelo y sistema de riego localizado tipo araña con 2 estacas inyectoras cada planta en el sustrato. Se fertilizó 5 días a la semana durante el ciclo de cultivo hasta dos semanas antes de la cosecha. Se estableció una fórmula de fertilización diferencial para las fases vegetativa y floración de acuerdo con lo reportado por Cockson *et al.* (2019) con algunas modificaciones (Tabla 2-1), la cual fue aplicada tanto en suelo como en sustrato. Durante todo el ciclo de cultivo se realizó la medición del potencial de hidrogeniones (pH) y conductividad eléctrica (CE) de drenaje y gotero con un medidor portátil de temperatura y pH/EC/TDS HI 9813-6 (distribuido por Hanna Instruments, Bogotá, Colombia). Se realizó poda bajera de los tres nudos basales a los 54 ddt y 80 ddt.

Cada tratamiento se estableció en un área de 72,53 m^2 en 5 camas de manera aleatoria, utilizando un diseño en bloques (medio de cultivo) completos al azar con parcelas divididas (variedades). Se realizaron 5 repeticiones por tratamiento y la unidad experimental consistió en 37 plantas.

Tabla 2-1. Fórmula de fertilización en partes por millón (ppm) para la etapa vegetativa y floración utilizada en los medios de cultivo suelo y sustrato para plantas de Cannabis medicinal.

Nutriente	Vegetativo	Floración 1*	Floración 2
N	161	37	53
P	64	35	51
K	224	176	251
Ca	144	46	65
Mg	77	45	64
Mn	6	5	6
Fe	6	5	6
Cu	6	7	11

Zn	1,7	7	11
B	0,7	0,5	0,7
S	107	111	157

*Fórmula utilizada durante 5 días después de iniciada la fase de floración. Posteriormente se utilizó la fórmula floración 2.

2.3.2 Fenología y determinación de grados día

2.3.2.1 Fenología

Semanalmente a partir de los 8 días después de trasplante (ddt) y hasta el final del ciclo de cultivo, se determinó la fenología con base en la codificación de los estadios fenológicos para cáñamo (*Cannabis sativa* L.) propuesta por Mediavilla *et al.* (1998) y Mishchenko *et al.* (2017) realizando algunos ajustes basados en la revisión de literatura para obtener los estadios fenológicos de Cannabis medicinal para variedades dioicas (específicamente hembras). Cada estadio fenológico se determinó cuando el 50%+1 de la población se encontraba en el estado de desarrollo específico.

Para cada estadio fenológico en las tres variedades, se realizaron tomas fotográficas y diagramación visual de la escala fenológica.

2.3.2.2 Estimación de los Grados día de crecimiento

De acuerdo con Salazar-Gutierrez *et al.* (2013), los grados día de crecimiento (GDC) se expresan como el número de unidades de calor necesarias para completar el desarrollo. Aunque las temperaturas y los días pueden variar, el tiempo fisiológico permanece relativamente constante. Es el modelo más simple para tener en cuenta el efecto de la temperatura sobre el desarrollo vegetativo y reproductivo. Un grado día se acumula cuando la temperatura diaria promedio es un grado por encima de la temperatura base (Tb) durante un período de 24 horas. Como punto de inicio de la determinación de los grados día se tomó la fecha de trasplante de las tres variedades (04 de junio de 2020). La Tb tomada para las plantas de Cannabis fue de 3°C (Amaducci *et al.,* 2008).

Los grados día son un promedio diario de la función de temperatura apta para la planta (ver ecuación 2.1), a esta función se denominó Ta(t) donde t es el tiempo en horas y T(t) la función de temperatura del día; Ta(t) está dentro de unos rangos óptimos (límite inferior y superior) donde la planta se encuentra activa fisiológicamente.

$$Ta(t) = \begin{cases} T(t) - LimiteInferior, \ \ LimiteInferior \ \leq T(t) \ \leq LimiteSuperior \\ 0, LimiteSuperior \ < T(t) < LimiteInferior \end{cases} \tag{2.1}$$

Cuando la temperatura en el tiempo “T(t)” se encuentra dentro del rango óptimo, la función de temperatura apta se definió como la temperatura menos el límite inferior. Por el contrario, cuando la temperatura está fuera de los rangos es igual a cero. Los grados día de un día especifico se definieron mediante la ecuación 2.2.

$$G(d) = \frac{\int_0^{24}(Ta(x))dx}{24} \tag{2.2}$$

Esta integral se determinó a través del método discreto de Simpson. El método de Simpson (ver ecuación 2.3) es el más utilizado y opera mediante parámetros como n (cantidad de datos o muestreos en el día), b (horas del día) y h (b-a/n).

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{h}{3}\left[f(x_0) + 2\sum_{j=1}^{\left(\frac{n}{2}\right)-1} f\left(x_{2j}\right) + 4\sum_{j=1}^{n/2} f\left(x_{2j-1}\right) + f(x_n)\right] \tag{2.3}$$

Finalmente, los grados día acumulados se definieron como la sumatoria de grados día en un periodo de tiempo (ver ecuación 2.4).

$$Ga(díaInferior, diaSuperior) = \sum_{d=díasInferior}^{díaSuperior} G(d) \tag{2.4}$$

2.3.3 Análisis estadístico

Los resultados de días y grados día se analizaron con el software estadístico R (versión 4.1.0). Se elaboró un ANOVA en dos vías, con verificación de supuestos de normalidad y homocedasticidad y efecto de los tratamientos mediante la prueba de comparación múltiple de Tukey (p≤0,05).

2.4 Resultados

2.4.1 Estadios fenológicos principales de Cáñamo ajustados para Cannabis medicinal dioico femenino

Para las tres variedades en suelo y sustrato se determinaron los estadios fenológicos clave o principales que permiten establecer las etapas más importantes del cultivo (Tabla 2-2). Tanto en suelo como en sustrato las tres variedades mostraron una morfología similar que podría ser usada de manera general para genotipos de Cannabis de tipo medicinal. Se definieron cinco etapas de crecimiento principal*: i)* crecimiento vegetativo, *ii)* inicio de floración visible, *iii)* diferenciación floral, *iv)* cosecha de flores, y *v)* formación del fruto (Tabla 2-2). Algunas de estas etapas fenológicas principales ocurren simultáneamente como por ejemplo inicio de floración visible y diferenciación floral. Durante el crecimiento bajo un fotoperíodo largo (18/6), el tallo principal de las plantas de Cannabis se ramificó monopodialmente, produciendo brotes ramificados alternos. La planta monopodial presentaba un gran número de fitómeros, cada uno de los cuales incluía un entrenudo con una hoja grande compuesta palmeada y un fitómero secundario de brote axilar. Se ubicaron dos brácteas a cada lado de la base del pecíolo de la hoja, cada una subtendiendo una flor solitaria. La producción de brácteas subyacentes y primordios florales mostró claramente que las plantas estaban entrando en una etapa reproductiva. El crecimiento y el desarrollo del tallo principal estuvieron acompañados por cambios drásticos en la morfología de las hojas, las cuales disminuyeron en tamaño, longitud del pecíolo y número

de lóbulos. En la etapa de plena floración, las inflorescencias principales se ubicaron en la parte apical de las ramas principales, y de segundo y tercer orden (Figura suplementaria 2). En la etapa de floración, las flores solitarias en el eje de la hoja estaban completamente desarrolladas y los estigmas de los pistilos eran visibles. La floración de la inflorescencia se definió como la etapa en la que uno o dos pares de estigmas eran visibles en la parte apical de la inflorescencia principal. Cada flor femenina individual se ubicó en la axila de una bráctea subyacente que se desarrolló en la base del peciolo de la hoja. Adicionalmente, se desarrolló un segundo tipo de bráctea, una bráctea con forma de hoja perigonal (llamada también bráctea envolvente). A medida que la flor maduró, dos estigmas se alargaron (por lo general de manera desigual) y emergieron de la bráctea perigonal. Durante el desarrollo de la flor, y antes del alargamiento del estigma, se desarrollaron numerosos tricomas glandulares en la bráctea perigonal que envuelve el ovario, en las brácteas subyacentes, hojas reducidas e incluso en el tallo. Al final se presentó una madurez de los pistilos y tricomas, identificada por el cambio de color a marrón y ámbar, respectivamente (Figura suplementaria 2). No se evidenció formación de frutos ya que esto sucede cuando hay población de plantas macho entre o cercan a los cultivos hembras.

Tabla 2-2. Estadios fenológicos principales determinados para Cannabis medicinal y ajustados con base en la codificación de los estadios fenológicos para cáñamo (*Cannabis sativa* L.) propuesta por Mediavilla *et al.* (1998) y Mishchenko *et al.* (2017). La información es pertinente para condiciones de suelo y de sustrato.

Dígito inicial	Definición	Referencias
Etapa de crecimiento principal: Crecimiento vegetativo		
1	Desarrollo de hojas	Mishchenko *et al.,* (2017); Mediavilla *et al*., (1998)
2	Formación de brotes laterales	Mishchenko *et al.,* (2017); Spitzer-Rimon *et al.,* (2019)
3	Elongación del tallo	Mishchenko *et al.,* (2017); Spitzer-Rimon *et al.,* (2019)
Etapa de crecimiento principal: Inicio de floración visible		
4	Formación de primordios florales, brácteas perigonales y hojas reducidas	Reed (1914); Teichmann y Murh (2015); Cervantes (2006); Spitzer-Rimon *et al.,* (2019)
Etapa de crecimiento principal: Diferenciación floral		
5	Desarrollo de pistilos y formación de tricomas glandulares	Dayanandan y Kaufman (1976); Lanyon *et al.,* (1981); Rimon *et al.*, (2017); Moher *et al.,* (2021);
Etapa de crecimiento principal: Cosecha de flores		
6	Madurez de pistilos y tricomas	Rimon *et al.*, (2017); Bernstein *et al.,* (2019)
Etapa de crecimiento principal: Formación del fruto*		
7	Desarrollo del fruto	Mishchenko *et al.,* (2017)
8	Maduración del fruto	Mishchenko *et al.,* (2017)

*No evidenciado durante la investigación, así que se toma como referencia lo reportado en la bibliografía.

2.4.2 Estadios fenológicos secundarios de Cáñamo ajustados para Cannabis medicinal dioico femenino.

Con el fin de estandarizar la codificación de las etapas fenológicas de Cannabis medicinal dioico hembra, se presenta una descripción de crecimiento y desarrollo a través de códigos individuales de acuerdo con la escala BBCH (Tabla 2-3). La primera y segunda etapa es el desarrollo de hojas (código 1) y la formación de brotes laterales (código 2); aquí es claramente visible el crecimiento del tallo y las hojas. Al comienzo de la etapa vegetativa, la planta crece lentamente formando hojas verdaderas y entrenudos cortos, posteriormente en la etapa de elongación del tallo (código 3), este proceso se vuelve más rápido y los entrenudos son más largos (Figura suplementaria 2).

En la etapa de aparición de primordios de flores (código 4), al inicio éstos son difíciles de distinguir. En este periodo, la elongación del tallo se hace más lenta y las hojas apicales de cada rama se juntan entre sí. Posteriormente, aparecen de las primeras brácteas perigonales (código 4) sin estilos indicando una pronta floración. La inflorescencia de las plantas femeninas es frondosa y compacta y la flor femenina está oculta dentro de la bráctea perigonal. En esta etapa se presenta de manera simultánea la aparición de hojas reducidas alrededor de la inflorescencia. Dentro de las fases de desarrollo más importantes se encuentran el desarrollo de los pistilos (estigmas visibles y sobresalientes) y la formación de tricomas glandulares (código 5) alrededor de toda la inflorescencia, hojas, ramas y tallo. Dependiendo del propósito productivo de las plantas de Cannabis medicinal, la última etapa corresponde a la madurez de pistilos y tricomas (código 6), diferenciada por los cambios de color (Figura suplementaria 2). El desarrollo (código 7) y madurez (código 8) del fruto no fue evidenciado, pero podría suceder si se genera polinización con plantas dioicas masculinas.

Tabla 2-3. Ajuste de los estadios fenológicos de crecimiento y desarrollo para Cannabis medicinal (*Cannabis sativa* L.) dioico femenino. Códigos individuales según la escala BBCH. La información es pertinente para plantas establecidas en condiciones de suelo y sustrato.

Código	Descripción
1 Desarrollo de hojas[1]	
11	1 par de hojas verdadera desplegado
12	2 pares de hojas verdaderas desplegadas
13	3 pares de hojas verdaderas desplegadas
14	4 pares de hojas verdadera desplegadas
15	5 pares de hojas verdaderas desplegadas
16	6 pares de hojas verdaderas desplegadas
17	7 pares de hojas verdaderas desplegadas
18	8 pares de hojas verdaderas desplegadas
19	9 pares o más de hojas verdaderas desplegadas

2 Formación de brotes laterales[2]	
21	Primer brote lateral visible
25	Varios brotes laterales en la base de la hoja
3 Elongación del tallo[3]	
31	Tallo con el 10% de la longitud final
32	Tallo con el 20% de la longitud final
33	Tallo con el 30% de la longitud final
34	Tallo con el 40% de la longitud final
35	Tallo con el 50% de la longitud final
36	Tallo con el 60% de la longitud final
37	Tallo con el 70% de la longitud final
38	Tallo con el 80% de la longitud final
39	Tallo con el 90% de la longitud final
4 Formación de primordios florales, brácteas perigonales y hojas reducidas	
41	Aparición de primera flor solitaria
42	Se disminuye la tasa de elongación del tallo
43	Aparición de primera flor solitaria en los entrenudos 4to a 6to
44	40% de las brácteas perigonales formadas
45	50% de las brácteas perigonales formadas
46	60% de las brácteas perigonales formadas
47	70% de las brácteas perigonales formadas
48	80% de las brácteas perigonales formadas
49	90% de las brácteas perigonales formadas y hojas apicales de las ramas presentan compactación
5 Desarrollo de pistilos y formación de tricomas glandulares	
51	Se visualiza levemente formación de pistilos en la inflorescencia principal
53	30% de los pistilos de la inflorescencia principal formados, 30% de las brácteas perigonales cubiertas por tricomas transparentes
55	50% de los pistilos de la inflorescencia principal formados, 50% de las brácteas perigonales cubiertas por tricomas transparentes
57	70% de los pistilos de la inflorescencia principal formados, 70% de las brácteas perigonales cubiertas por tricomas transparentes
59	Todos los pistilos de la inflorescencia principal formados, la totalidad de las brácteas perigonales cubiertas por tricomas transparentes
6 Madurez de pistilos y tricomas	
63	30% de los pistilos en la inflorescencia principal presentan coloración café, 10% de los tricomas en la inflorescencia principal son de color ámbar
65	50% de los pistilos en la inflorescencia principal presentan coloración café, 20% de los tricomas en la inflorescencia principal son de color ámbar

69	La totalidad de los pistilos en la inflorescencia principal presentan coloración café, 30% de los tricomas en la inflorescencia principal son de color ámbar
7 Desarrollo del fruto[4]	
71	10% de los frutos han alcanzado tamaño y coloración final
72	20% de los frutos han alcanzado tamaño y coloración final
73	30% de los frutos han alcanzado tamaño y coloración final
74	40% de los frutos han alcanzado tamaño y coloración final
75	50% de los frutos han alcanzado tamaño y coloración final
76	60% de los frutos han alcanzado tamaño y coloración final
77	70% de los frutos han alcanzado tamaño y coloración final
78	80% de los frutos han alcanzado tamaño y coloración final
79	Casi todos los frutos han alcanzado tamaño y coloración final
8 Maduración del fruto[4]	
81	Inicio de madurez
83	30% de frutos maduros
85	50% de frutos maduros
87	70% de frutos maduros
89	Completamente maduro, comienzo de la abscisión del fruto

[1] La etapa de crecimiento 1 ocurre simultáneamente con la etapa de crecimiento 3.
[2] La etapa de crecimiento 2 ocurre simultáneamente con las etapas secundarias 15 en adelante.
[3] Las etapas secundarias 36 en adelante ocurren simultáneamente con la etapa de crecimiento 4.
[4] Las etapas de crecimiento 7 y 8 no se evidenciaron en la investigación. Se encuentran basadas en lo reportado por Mishchenko *et al.,* (2017). Idealmente no debe haber formación de frutos, únicamente debe presentarse con fines de hibridación.

2.4.3 La duración en días de los estadios fenológicos principales es diferencial en suelo y sustrato.

Se observaron diferencias entre variedades ($p \leq 0{,}001$), tratamientos ($p \leq 0{,}001$) y la interacción conjunta ($p \leq 0{,}01$) en la duración en días de cada una de las etapas fenológicas (Figura 2-1). Las plantas en sustrato presentaron un ciclo vegetativo[1] hasta diferenciación floral más corto comparado con las plantas en suelo para las tres variedades (Figura 2-2). Las variedades en sustrato que mostraron menor número de días en la etapa vegetativa hasta diferenciación floral[2] fueron SC (62,6) y HC (65,8), seguida de CW (66,2) (Tabla 2-4). En suelo, se observó algo similar siendo SC (65,4) la que presentó un ciclo vegetativo hasta diferenciación más corto, seguida de HC (67,8) y CW (76,2) (Tabla 2-4). Lo mismo se observó para floración hasta diferenciación floral. En los días de diferenciación floral a cosecha[3] (Figura 2-2), en sustrato, HC presentó la menor duración (36,2), seguida de SC

[1] Entendido como los estadios principales 1, 2 y 3.
[2] Entendido como el estadio 51 descrito en la Tabla 2-3.
[3] Entendido como el estadio 69 descrito en la Tabla 2-3.

(40) y finalmente CW (44,8). Por el contrario, en suelo, CW presentó menor duración (41,8), seguida de HC (43,2) y SC (50,6). En el ciclo total de cultivo, las variedades en sustrato presentaron un ciclo más corto en comparación con las que fueron sembradas en suelo (Tabla 2-4).

Figura 2-1. Estadios fenológicos principales para las tres variedades (Souce Cauca, Higthcol, Calotoweed) cultivadas en suelo y sustrato con base en la escala fenológica ajustada. De acuerdo con estos estados se definió el momento en el que se presentó cada etapa de desarrollo; crecimiento vegetativo, diferenciación floral, cosecha.

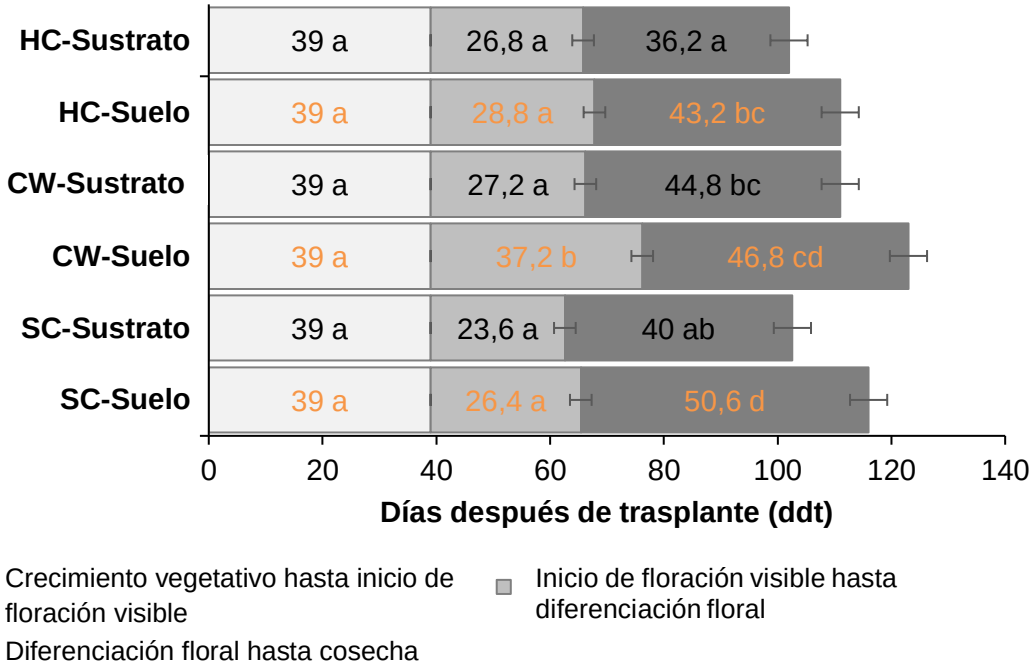


Figura 2-2. Duración en días de los estadios fenológicos principales de las tres variedades de *Cannabis sativa* L. (SC: Souce Cauca, HC: Higthcol, CW: Calotoweed) sembradas en suelo y sustrato. Letras distintas indican diferencias significativas de acuerdo con el test de Tukey (p≤0,05). Cada barra representa la media de los datos ± error estándar (n= 112). Las barras con datos color naranja se usaron para resaltar los resultados obtenidos en las variedades en suelo.

Tabla 2-4. Días acumulados desde crecimiento vegetativo hasta inicio de floración visible y cosecha para tres variedades de *Cannabis sativa* L. (SC: Souce Cauca, HC: Higthcol, CW: Calotoweed) sembradas en condiciones de suelo y sustrato. Letras diferentes indican diferencias significativas de acuerdo con el test de Tukey (p ≤ 0.05).

Tratamiento / Etapas	SC-Suelo	SC-Sustrato	CW-Suelo	CW-Sustrato	HC-Suelo	HC-Sustrato
Crecimiento vegetativo hasta inicio floración visible	39 a	39 a	39 a	39 a	39 a	39 a
Crecimiento vegetativo hasta diferenciación floral	65,4 a	62,6 a	76,2 b	66,2 a	67,8 a	65,8 a
Crecimiento vegetativo hasta cosecha	116 c	102,6 a	123 d	111 b	111 b	102 a

Variedad (p≤0,001); Tratamiento (p≤0,001); Variedad*Tratamiento (p≤0,01).

2.4.4 Los grados día, acumulados y específicos para cada estadio, muestran diferencias en suelo y sustrato.

Se observaron diferencias entre variedades ($p \leq 0{,}001$), tratamientos ($p \leq 0{,}001$) y la interacción conjunta ($p \leq 0{,}01$) referente a los GDC acumulados y específicos para cada etapa. Los grados día acumulados y específicos (Tabla 2-5) muestran que las tres variedades sembradas en suelo acumularon más grados día de trasplante a diferenciación floral y de trasplante a cosecha, sin embargo, sólo es posible evidenciar diferencias significativas en la acumulación total en todo el ciclo de cultivo. La variedad que requiere una mayor acumulación de GDC tanto en suelo como en sustrato es la variedad CW. Las variedades SC y HC presentan una acumulación muy similar en sustrato, sin embargo, en suelo, muestran diferencias significativas. La etapa que marca los cambios en la acumulación de grados día es la fase reproductiva (Tabla 2-5), en donde hay desarrollo de inflorescencias, alargamiento de pistilos, formación de brácteas y tricomas glandulares, y por lo tanto es la fase que determina la duración total del ciclo de cultivo. Las variedades sembradas en sustrato requieren una menor acumulación de GDC en comparación con las sembradas en suelo.

Tabla 2-5. Grados día de desarrollo acumulados y para estadios fenológicos principales de las tres variedades de *Cannabis sativa* L. (SC: Souce Cauca, HC: Higthcol, CW: Calotoweed) sembradas en condiciones de suelo y sustrato.

		Acumulados			**Para cada estadio principal**		
Tratamiento	**Variedades**	**T a I**	**T a DF**	**T a C**	**T a I**	**I a DF**	**DF a C**
		NS	*	**	NS	*	***
Suelo	CW	559,56 a	1034,128 c	1641,18 d	559,56 a	474,57 c	607,05 cd
	HC	559,56 a	926,280 b	1486,93 b	559,56 a	366,72 b	560,65 bc
	SC	559,56 a	895,208 a	1550,87 c	559,56 a	335,65 b	655,66 d
Sustrato	CW	559,56 a	905,558 a	1486,93 b	559,56 a	345,99 b	581,37 c
	HC	559,56 a	897,734 a	1367,39 a	559,56 a	338,17 b	469,66 a
	SC	559,56 a	852,264 a	1367,34 a	559,56 a	292,70 a	515,08 ab

T: Trasplante, I: Inicio de floración visible, DF: Diferenciación floral, C: Cosecha.
Variedad ($p \leq 0{,}001$); Tratamiento ($p \leq 0{,}001$); Variedad*Tratamiento ($p \leq 0{,}01$)
Letras diferentes indican diferencias significativas de acuerdo con el test de Tukey ($p \leq 0{,}05$). NS, *, ** o *** no significativo o significativo a $p \leq 0{,}05$, 0,01 o 0,001, respectivamente.

2.5 Discusión

Las investigaciones actuales en el cultivo de *C. sativa* han tenido como objetivo mejorar la eficiencia y productividad en el sector industrial y medicinal. Uno de los aspectos poco evaluados y, por lo tanto, poco entendidos es el medio de establecimiento de cultivo bajo condiciones de invernadero y su efecto sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas. En este estudio se ajustó la escala fenológica de cañamo a Cannabis medicinal teniendo en cuenta las variaciones morfológicas que presenta esta planta, lo cual permite tener una escala de referencia para describir materiales de Cannabis medicinal. Con base en la escala ajustada se encontró que el medio de cultivo en el cual crece la planta, sustrato o suelo, modifica la fenología de las tres variedades evaluadas.

De acuerdo con Meier *et al.* (2009), la fenología es el estudio de los eventos del ciclo de vida de plantas, que son desencadenados por cambios ambientales. Se ha demostrado que los factores abióticos y bióticos, incluida la química del suelo, medio de crecimiento y la retención de humedad que esta puede tener, influyen en la fenología de las plantas (Igwe *et al.,* 2021). Para las tres variedades se identificaron cuatro etapas fenológicas principales y se establecieron cinco ajustando a la escala fenológica reportada por Mishchenko *et al.* (2017) (Tabla 2-2). Dentro de cada etapa se establecieron estadios fenológicos secundarios obteniendo así una escala fenológica extendida y ajustada a lo que usualmente se ha trabajado para cáñamo (Mediavilla *et al.,* 1998; Mishchenko *et al.,* 2017). Las plantas de las tres variedades presentaron la arquitectura típica de las plantas de Cannabis, la cual comprende un sistema ramificado jerárquico el cual es importante entender para optimizar su manejo (Spitzer-Rimon *et al.,* 2019). Lo encontrado aquí para Cannabis sucede también en otras plantas herbáceas dicotiledóneas, donde la planta adulta porta numerosas unidades modulares individuales repetitivas (fitómeros) que consisten en un entrenudo y un nodo (Teichmann y Muhr, 2015) que están regulados por la dominancia apical (Danziger y Bernstein, 2021). El tipo de crecimiento de las tres variedades de Cannabis en suelo y sustrato puede deberse a que el meristemo apical del tallo extiende el eje de crecimiento primario, mientras que, en las axilas de las hojas, los meristemos laterales se diferencian para formar estructuras morfológicas de órdenes superiores, como lo describen Spitzer-Rimon *et al.* (2019). Esta configuración permite la división del cuerpo de la planta en tallo principal, 'ramas primarias' que se derivan del tallo principal, 'ramas secundarias' que se derivan de las ramas primarias, y así sucesivamente (Danziger y Bernstein, 2021). Cuando las plantas de Cannabis se trasladaron de un fotoperiodo largo a un fotoperíodo corto, se desarrollaron inflorescencias comprimidas en la parte superior del tallo principal y las ramas de segundo y tercer orden, lo cual ha sido descrito anteriormente para Cannabis medicinal (Spitzer-Rimon *et al.,* 2019; Kocjan Ačko *et al.*, 2019; Danziger y Bernstein, 2021). Sin embargo, cabe anotar que también pueden presentarse flores no diferenciadas en el tallo principal durante fotoperiodos no inductivos (Spitzer-Rimon *et al.,* 2019). Cada inflorescencia consiste en hojas reducidas, brácteas, una o dos flores solitarias y un brote axilar (Benlloch *et al*., 2007; Prenner *et al*., 2009; Endress, 2010; Park *et al.,* 2014, Spitzer-Rimon *et al.,* 2019). De manera similar a lo

encontrado aquí, la estructura de la inflorescencia femenina del Cannabis se ha descrito como flores pistiladas desarrolladas de dos en dos en las axilas de las hojas (Reed, 1914).

La mayor diferencia entre el Cannabis tipo cáñamo y el Cannabis medicinal es el propósito o uso de las plantas. En relación con su uso, el Cannabis puede clasificarse como grupo de medicamentos trans-Δ-9-tetrahidrocannabinol (THC), grupo de cáñamo de fibra o grupo de aceite de semilla (Gallo Molina *et al.,* 2019). De esta manera, el tipo de manejo y cosecha de las plantas es diferente, y por lo tanto se hace necesaria una forma específica de medición del crecimiento y desarrollo de las plantas. Esta escala ajustada no se había desarrollado hasta ahora y podrá ser usada en otros estudios del Cannabis tipo medicinal. Cada uno de los cinco estadios fenológicos principales establecidos se ajusta a lo reportado por Amaducci *et al.* (2008) y Tang *et al*. (2016) donde para la evaluación de la fenología del cáñamo establecieron tres fases clave: la fase vegetativa básica, la fase de inducción del fotoperíodo y la fase de desarrollo floral.

Con la determinación de los estadios fenológicos principales se establecieron los días (tiempo calendario) y los GDC. Aquí se encontró que las tres variedades (SC-HC-CW) presentaron un ciclo menor en días en sustrato comparado con las plantas de suelo. Esto se debe probablemente a las diferencias en los medios de cultivo, ya que en el suelo o sustrato la temperatura difiere de la ambiental por la composición, humedad y profundidad del medio de producción (Jaramillo-Robledo, 2005), lo que puede directamente modificar la fenología de las plantas. Adicionalmente, se observaron diferencias entre las variedades, siendo SC la que se cosechó en menor tiempo, seguida de HC y CW en sustrato. En suelo, fue algo diferente siendo HC la que se cosechó en menos días calendario, seguido de SC y finalmente CW. Estas diferencias entre variedades y medios de cultivo pueden deberse a la morfología típica de cada variedad y a que en condiciones ambientales diferenciales los genotipos de *C. sativa* pueden modificar su morfología y rendimiento debido a la duración de las etapas fenológicas principalmente la etapa vegetativa y la floración como lo reportó Faux *et al.* (2013). Adicionalmente, en condiciones de sustrato es muy posible que la zona radical presente limitaciones en el crecimiento debido al tamaño de la matera (Yep *et al.,* 2020), lo que pudo interferir además con la toma de nutrientes generando así una concentración más baja de los elementos en follaje lo que hizo que la planta madurara más temprano (Gorelick y Bernstein, 2017). Se ha reportado que factores ambientales como el estrés por sequía (Caplan *et al.,* 2019), el estrés por nutrientes y/o el estrés por temperatura (Gorelick y Bernstein, 2017) aceleran los procesos de crecimiento y desarrollo en Cannabis (Yep *et al.,* 2020).

Además de los días calendario, se realizó la determinación de los grados día de crecimiento, los cuales son una unidad de medida que combina la temperatura y el tiempo de tal manera que la duración del desarrollo del ciclo de vida de un organismo, o cualquier etapa o parte del ciclo de vida, disminuye a medida que aumenta la temperatura (Salazar-Gutiérrez *et al.,* 2013). Se obtuvieron resultados similares a los obtenidos en días calendario, es decir, menor acumulación de GDC en las plantas de sustrato comparadas con las de suelo, y esto se debe a que no se presentó un cambio o variación en la temperatura ambiental (McMaster y Wilhem, 1997), generando así resultados similares

entre días calendario y GDC. Sin embargo, ya que los GDC corresponden a una cuantificación de la energía térmica recibida por un organismo durante un intervalo de tiempo diario (Mc Master y Wilhem, 1997) puede ser de utilidad para predecir los momentos de madurez de cosecha o en modelos de predicción de rendimiento (Khan *et al*., 2013) de las plantas de Cannabis, pues los grados día permanecen constantes, pero si hay menor acumulación de grados día en un periodo de tiempo específico, se van a generar alteraciones en los días calendario.

2.6 Conclusiones

En este estudio se estableció la escala fenológica con los estadios de crecimiento y desarrollo principales y se ajustó la escala fenológica con codificación BBCH para Cannabis medicinal dioico femenino. Esto permitirá el uso de un mismo lenguaje, tanto en investigación como a nivel técnico, lo que a su vez facilitará el desarrollo productivo de esta especie. Con la generación de la escala, fue posible establecer un ciclo fenológico claro a través de la herramienta de grados día de desarrollo, encontrando que, para completar el ciclo productivo, SC, HC y CW acumulan menor cantidad de grados día en sustrato que cuando son sembradas en suelo. Las tres variedades de Cannabis medicinal sembradas en suelo y sustrato respondieron diferencialmente a la acumulación de grados día y al número de días para completar el ciclo de cultivo. La etapa clave que determina el cambio en la acumulación de grados día y por lo tanto permite que una variedad tenga el ciclo fenológico más largo en suelo que en sustrato, es a partir de la diferenciación floral y todo el proceso de desarrollo de inflorescencias, pistilos, tricomas y cannabinoides, etapas clave en el proceso reproductivo de Cannabis medicinal. Las dos herramientas establecidas para evaluar el desarrollo, escala fenológica ajustada y GDC, serán de gran utilidad para la evaluación de Cannabis medicinal en diferentes condiciones climáticas de crecimiento, proceso clave en las pruebas de evaluación agronómica (PEA) y registro de nuevas variedades.

2.7 Referencias

Arcila-Pulgarin, J., Buhr L., Bleiholder, H., Hack, H., Meier, U., y Wicke H. (2002). Application of the extended BBCH scale for the description of the growth stages of coffee (*Coffea* spp.). Annals of Applied Biology. 141, 19-27. *doi: 10.1111/j.1744-7348.2002.tb00191.x*.ç

Amaducci, S., Colauzzi, M., Bellocchi, G., y Venturi, G. (2008). Modelling post-emergent hemp phenology (*Cannabis sativa* L.): Theory and evaluation. Europ. J. Agronomy. 28, 90–102. *doi: 10.1016/j.eja.2007.05.006.*

Bernstein, N., Gorelick, J., Zerahia, R., y Koch, S. (2019). Impact of N, P, K, and Humic Acid Supplementation on the Chemical Profile of Medical Cannabis (*Cannabis sativa* L). Front. Plant Sci. 10:736. *doi: 10.3389/fpls.2019.00736*.

Benlloch, R., Berbel, A., Serrano-Mislata, A., y Madueno, F. (2007). Floral initiation and inflorescence architecture: a comparative view. Ann. Bot. 100, 659–676. *doi: 10.1093/aob/mcm146*

Campbell, S.M., Anderson, S.L., Brym, Z.T., y Pearson, B.J. (2021). Evaluation of substrate composition and exogenous hormone application on vegetative propagule rooting success of essential oil hemp (*Cannabis sativa* L.). PLoS One.16(7):e0249160. *doi: 10.1371/journal.pone.0249160.*

Caplan, D.M. (2018). Propagation and Root Zone Management for Controlled Environment Cannabis Production. Ph.D. Thesis. Guelph, ON: University of Guelph.

Caplan, D., Dixon, y M., Zheng, Y. (2019). Increasing inflorescence dry weight and cannabinoid content in medical Cannabis using controlled drought stress. HortScience. 54, 964-969. *doi: 10.21273/HORTSCI13510-18.*

Cervantes, J. (2006). Marijuana horticulture: The Indoor/Outdoor Medical Grower's Bible. (Vancouver: Van Patten Publishing).

Chandrakant, M., y Upreti, K.K. (2019). Phenological growth stages in mangosteen (*Garcinia mangostana* L.) according to the extended BBCH scale. Annals Applied Biology. 176(1), 16–25. *doi: 10.1111/aab.12552.*

Chen, X., Qi, Z., Gui, D., Gu, Z., Ma, L., Zeng, F., Li, L. (2019). Simulating impacts of climate change on cotton yield and water requirement using RZWQM2. Agric. Water Manag. 222, 231–241. *doi:10.1016/j.agwat.2019.05.030.*

Chouvy, P. A. (2019). Cannabis cultivation in the world: heritages, trends and challenges. EchoGéo 48, 1–20. *doi: 10.4000/echogeo.17591*

Cockson, P., Landis, H., Smith, T., Hicks, K., y Whipker, B.E. (2019). Characterization of Nutrient Disorders of *Cannabis sativa*. Appl. Sci. 9, 4432. *doi: 10.3390/app9204432.*

Danziger, N., y Bernstein, N. (2021) Plant architecture manipulation increases cannabinoid standardization in 'drug-type' medical Cannabis. Industrial Crops & Products. 167, 113528. *doi: 10.1016/j.indcrop.2021.113528.*

Davidenco, V., Vega, C., Viccardi, M., y Arguello, J. (2015). Development in *Origanum* sp.: A simple phenological scale to determine thermal time requirements to critical reproductive events. Scientia Horticulturae, 186. 70-76. *doi: 10.1016/j.scienta.2015.02.012.*

Dayanandan, P., y Kaufman, P. B. (1976). Trichomes Of *Cannabis Sativa* L. (Cannabaceae). American Journal of Botany. 63(5), 578-591. ISSN/ISBN: 0002-9122.

Endress, P.K. (2010). Disentangling confusions in inflorescence morphology: patterns and diversity of reproductive shoot ramification in angiosperms. J. Syst. Evol. 48, 225–239. *doi: 10.1111/j.1759-6831.2010.00087.x*.

Farag, S., y Kayser, O. (2015). Cultivation and breeding of *Cannabis sativa* L. For preparation of standardized extracts for medicinal purposes. In: Mathe, A. (Ed.), Medicinal and Aromatic Plants of the World. Springer, Budapest, Hungary, pp. 165–186. *doi: 10.1007/978-94-017-9810-5_9.*

Faux, A.M., Draye, X., Lambert, R., d'Andrimont, R., Raulier, P., y Bertin, P. (2013). The relationship of stem and seed yields to flowering phenology and sex expression in monoecious hemp (*Cannabis sativa* L.). European Journal of Agronomy. 47. 11–22. *doi: 10.1016/j.eja.2013.01.006.*

Flores-Magdaleno, H., Flores-Gallardo, H., y Ojeda-Bustamante, W. (2014). Phenological prediction of potato crop by means of thermal time. Revista Fitotecnia Mexicana. 37(2), 149–157. *ISSN 0187-7380*.

Gallo-Molina, A., Castro-Vargas, H., Garzón-Méndez, W., Martínez, J., Rivera, Z., King, J., y Parada-Alfonso, F. (2019). Extraction, isolation and purification of tetrahydrocannabinol from the *Cannabis sativa* L. plant using supercritical fluid extraction and solid phase extraction. The Journal of Supercritical Fluids. 146, 208-216. *doi: 10.1016/j.supflu.2019.01.020.*

García, A.D., y López, C. (2002). Temperatura base y tasa de extensión foliar del maíz. Revista Fitotecnia Mexicana. 25(4), 381-386. *doi:10.35196/rfm.2002.4.281.*

Gorelick, J., y Bernstein, N. (2017). Chemical and Physical Elicitation for Enhanced Cannabinoid Production in Cannabis. En: S. Chandra et al. (eds.), Cannabis sativa L. - Botany and Biotechnology, pp. 439-456. *doi: 10.1007/978-3-319-54564-6_21.*

Hoyos, D., Morales, J.G., Chavarría, H., Montoya, A.P., Correa, G., y Jaramillo, S. (2012). Acumulación de Grados-Día en un Cultivo de Pepino (*Cucumis sativus* L.) en un Modelo de Producción Aeropónico. Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín. 65(1), 6389-6398.

Igwe, A.N., Quasem, B., Liu, N., y Vannette, R.L. (2021) Plant phenology influences rhizosphere microbial community and is accelerated by serpentine microorganisms in Plantago erecta. FEMS Microbiol Ecol. 97,1–12. *doi: 10.1093/femsec/fiab085.*

Jaramillo-Robledo, A. (2005). Clima andino y café en Colombia. Cenicafe.

Khan, M., Van-Eck, H.,y Striuk, P. (2013). Model-Based Evaluation of Maturity Type of Potato Using a Diverse Set of Standard Cultivars and a Segregating Diploid Population. Potato Research, 56(1), 127-146. *doi: 10.1007/s11540-013-9235-z.*

Kocjan Ačko, D., Flajšman, M., Trdan, S. (2019). Apical bud removal increased seed yield in hemp (Cannabis sativa L.). Acta Agric. Scand. Sect. B Soil Plant Sci. 69, 317–323. *doi: 10.1080/09064710.2019.1568540*

Kishore, K. (2019). Phenological growth stages and heat unit requirement of Indian blackberry (*Syzygium cumini* L., Skeels). Scientia Horticulturae, 249, 455-460. *doi: 10.1016/j.scienta.2019.02.032.*

Lancashire, P.D., Bleiholder, H., Langelüddecke, P., Stauss, R., Van Den Boom, T., Weber, E., y Witzenberger, A. (1991). An uniform decimal code for growth stages of crops and weeds. Ann. appl. Biol. 119, 561-601. *doi: 10.1111/j.1744-7348.1991.tb04895.x*.

Lanyon, V.S., Turner, J.C., y Mahlberg, P.G. (1981). Quantitative Analysis of Cannabinoids in the Secretory Product from Capitate-Stalked Glands of *Cannabis sativa* L. (Cannabaceae). Botanical Gazette. *142*(3), 316-319. *ISSN : 0006-8071.*

López, M.A., Chaves, B., Flórez, V.J., y Salazar M.R. (2010). Modelo de aparición de nudos en clavel (*Dianthus caryophyllus* L.) cv. Delphi cultivado en sustratos. Agron Colomb. 28(19), 47-54. *ISSN 0120-9965.*

McMaster, G., y Wilhem, W. (1997). Growing degree-days: one equation, two interpretations. Agricultural and Forest Meteorology, 87(4), 291-300. *doi: 10.1016/S0168-1923(97)00027-0*.

Mediavilla, V., Jonquera, M., Schmid-Slembrouck, I., y Soldati, A. (1998). Decimal code for growth stages of hemp (*Cannabis sativa* L.). Journal of the international hemp association. 2(65), 68-74.

Meier U. (ed.). 2001. Growth Stages of Mono- and Dicotyledonous Plants: BBCH-Monograph. 158 p.

Meier, U., Bleiholder, H., Buhr, L., Feller, C., Hack, H., Heb, M., Lancanshire, P., Schnock, U., Staub, R., Van der Boom, T., Weberand, E., y Zwerger, P. (2009). The BBCH system to coding the

phenological growth stages of plants – history and publications. Journal für kulturpflanzen. 61(2), 41-52. *ISSN 0027-7479.*

Mendoza M.R., Aguilar L.A., Castillo S.F. (2004). Guayaba (*Psidium guajava* L.) su cultivo en el oriente de Michoacan. Centro de Investigaciones del Pacífico Centro. Campo experimental Uruapan. Folleto técnico No. 4. Uruapan, Michoacan, p. 49.

Mishchenko, S., Mokher, S., Laiko, I., Burbulis, N., Kyrychenko, H., y 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. *doi: 10.6001/zemesukiomokslai.v24i2.3496.*

Moher, M., Jones, M., y Zheng, Y. (2021). Photoperiodic Response of *In Vitro Cannabis sativa* Plants. Hortscience. 56(1),108-113. *doi: 10.21273/HORTSCI15452-20*.

Park S. J., Eshed Y., y Lippman Z.B. (2014). Meristem maturation and inflorescence architecture–lessons from the Solanaceae. Curr. Opin. Plant Biol. 17, 70–77*. doi: 10.1016/j.pbi.2013.11.006.*

Parra-Coronado, A., Fischer, G., y Chaves-Cordoba, B. (2014). Thermal time for reproductive phenological stages of pineapple guava (*Acca sellowiana* (O. Berg) Burret). Acta Biologica Colombiana. 20(1), 163-173. *doi: 10.15446/abc.v20n1.43390.*

Phadnawis, N.B. y Saini, A.D. (1992). Yield models in wheat based on sowing time and phenological development. Annals of Plant Physiology. 6, 52-59.

Prenner, G., Vergara-Silva, F., y Rudall, P. J. (2009). The key role of morphology in modelling inflorescence architecture. Trends Plant Sci. 14, 302–309. *doi: 10.1016/j.tplants.2009.03.004*.

Qadir, G., Ahmad, S., Hassan, F., y Cheema, M.A. (2006). Oil and fatty acid accumulation in sunflower as influenced by temperature variation. Pakistan Journal of Botany. 38(4), 1137-1147.

Rimon, V., Lata, H., Chandra, S., Khan, I. A., y ElSohly, M. A. (2017). Chapter 5: Morpho-anatomy of marijuana (*Cannabis sativa* L.) en *Cannabis sativa* L. – Botany and biotechnology. ed. S. Chandra (New York, NY: Springer), 123-136. *doi: 10.1007/978-3-319-54564-6_5.*

Reed, J. (1914). Morphology of *Cannabis sativa* L. Tesis de maestría. (Iowa: State University of Iowa).

Ruiz-Corral, J., Flores-López, H., Ramírez-Díaz. J., González- Equiarte, D. (2002) Temperaturas cardinales y duración del ciclo de madurez del híbrido de maíz H-311 en condiciones de temporal. Agrociencia. 36, 569-577. *ISSN: 1405-3195.*

Salazar-Gutierrez, M.R., Johnson, J., Chaves-Cordoba, B., y Hoogenboom, G. (2013) Relationship of base temperature to development of winter wheat. Int J Plant Prod. 7(4), 741-762. *doi: 10.22069/IJPP.2013.1267.*

Saloner, A., y N. Bernstein. (2020) Response of Medical Cannabis (*Cannabis sativa* L.) to Nitrogen Supply Under Long Photoperiod. Front. Plant Sci. 11:572293. *doi: 10.3389/fpls.2020.572293.*

Sharma, A., Deepa, R., Sankar, S., Pryor, M., Stewart, B., Johnson, E., y Anandhi, A. (2021). Use of growing degree indicator for developing adaptive responses: A case study of cotton in Florida. Ecological Indicators. 124, 107383. *doi:10.1016/j.ecolind.2021.107383.*

Slafer, G.A., y Savin R. (1991) Developmental base temperature in different phonological phases of wheat *(Triticum aestivum*). J Exp Bot. 42,1077-1082*. doi: 10.1093/jxb/42.8.1077*.

Spitzer-Rimon, B., Duchin, S., Bernstein, N., y Kamenetsky, R. (2019) Architecture and Florogenesis in Female *Cannabis sativa* Plants. Front. Plant Sci. 10:350. *doi: 10.3389/fpls.2019.00350.*

Tang, K., Struik, P.C., Yin, X., Thouminot, C., Bjelková, M., Stramkale, V., y Amaducci, S. (2016). Comparing hemp (*Cannabis sativa* L.) cultivars for dual-purpose production under contrasting environments. Industrial Crops and Products, 87, 33–44. *doi: 10.1016/j.indcrop.2016.04.026.*

Tedesco, D., de Oliveira, M. F., dos Santos, A. F., Costa Silva, E. H., de Souza Rolim, G., y da Silva, R. P. (2021). Use of remote sensing to characterize the phenological development and to predict sweet potato yield in two growing seasons. European Journal of Agronomy, 129, 126337. *doi:10.1016/j.eja.2021.126337*.

Teichmann, T., y Muhr, M. (2015). Shaping plant architecture. Front. Plant Sci. 6:233. *doi: 10.3389/fpls.2015.00233.*

Vyrovets V. H., Kyrychenko H. I., Laiko I. M., Myhal M. D., Shcherban I. I., Bohuslavskyi R. L. (2012). Classification of Signs in Hemp Plants – *Cannabis sativa* L. Sumy. 27 p. (in Ukrainian).

Yep, B., Gale, N.V., y Zheng Y. (2020). Comparing hydroponic and aquaponic rootzones on the growth of two drugtype *Cannabis sativa* L. cultivars during the flowering stage. Industrial Crops & Products. 157, 112881. *doi: 10.1016/j.indcrop.2020.112881.*

3. Contenido nutricional foliar y curvas de extracción de nutrientes en plantas de Cannabis sembradas en suelo y sustrato

3.1 Resumen

La nutrición mineral y los estudios de demanda nutricional son factores importantes que permiten establecer prácticas agronómicas óptimas en el cultivo de *Cannabis sativa* L. Debido a las restricciones legales sobre la investigación del Cannabis, hay poca información disponible sobre la dinámica nutricional en diferentes sustratos. El objetivo fue determinar las curvas de extracción de nutrientes foliar a partir del contenido de nutrientes completos en épocas clave del desarrollo del cultivo. Tres variedades de Cannabis medicinal fueron utilizadas y sembradas en dos medios de cultivo: suelo (de la zona de estudio) y sustrato (Sustracoco Germiplus®). Como resultado se encontró que el sustrato retiene iones nutricionales durante la etapa de crecimiento, debido a un incremento de la conductividad eléctrica, por el contrario, el suelo pierde el contenido de iones a lo largo del ciclo de cultivo, debido a la toma de todos los nutrientes disponibles. Tomando como referencia los valores máximos y mínimos reportados para Cannabis, se encontró que, en sustrato, el contenido de N y K disminuyó y el P aumentó en el ciclo total de cultivo. El Mg aumentó a los 90 ddt y el S se mantuvo estable bajo niveles deficitarios. En suelo, el contenido de N, K y Ca disminuyó en el ciclo, pero nunca estuvo en condiciones deficitarias. En suelo y sustrato el contenido de Fe, Cu, Mn y Zn se presentó en niveles excesivos. Estos contenidos generaron una correlación de nutrientes diferente entre suelo y sustrato. Se determinaron las curvas de extracción nutricional foliar de macro y micronutrientes para las tres variedades encontrando mayores extracciones de N, K, Ca y Fe en las tres variedades tanto en suelo como en sustrato. La extracción en Kg/ha de macronutrientes en sustrato y suelo fue N>Ca>K>Mg>P>S. Los micronutrientes no mostraron una tendencia específica en suelo y sustrato. En conclusión, se generaron las curvas de extracción foliar para tres variedades de Cannabis medicinal en suelo y sustrato y se observó los efectos del medio de cultivo sobre el contenido nutricional foliar.

Palabras Clave: Cannabis medicinal, suelo, sustrato, nutrientes, curvas de extracción de nutrientes foliar.

3.2 Introducción

Los nutrientes minerales, se encuentran entre los principales factores ambientales que afectan el desarrollo, la fisiología y el metabolismo de las plantas (Lea y Morot-Gaudry, 2001; Hawkesford *et al.*, 2012). El conocimiento de las necesidades nutricionales y las respuestas fisiológicas y morfológicas de las especies medicinales a la nutrición mineral permiten mejorar los esquemas de suministro de nutrientes y por lo tanto la función biológica de la planta (Saloner y Bernstein, 2020). Dentro de las especies medicinales de

mayor interés en la actualidad se encuentra el Cannabis medicinal (*Cannabis sativa* L.) debido a la demanda de productos con fines terapéuticos y un nuevo marco legislativo y regulatorio que permite la producción y comercialización de productos de Cannabis (Baker *et al*., 2003; UNODC, 2013; Hazekamp *et al.,* 2016; Bridgeman y Abazia, 2017).

Dentro de los nutrientes minerales que han sido mayormente estudiados en Cannabis se encuentra el nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), debido a que son los tres elementos minerales que las plantas toman en mayor cantidad y juegan un papel clave en muchos aspectos del metabolismo de las mismas (Bernstein *et al.,* 2019), y además existe alguna evidencia que respalda la influencia de la nutrición mineral, y especialmente de los principales macronutrientes N, P y K sobre los metabolitos secundarios (Rioba *et al.,* 2015). Sin embargo, los nutrientes esenciales, son necesarios en concentraciones específicas a través del ciclo de cultivo para obtener un crecimiento o rendimiento óptimos (Cockson *et al.,* 2019). A pesar de ello pocos estudios han investigado los factores que influencian la disponibilidad de nutrientes en las plantas de Cannabis (Deng *et al.,* 2019) como el tipo de fertilizante, las fuentes, las dosis o el medio de cultivo. Esto representa un problema porque el suministro deficiente o excesivo de nutrientes puede reducir el rendimiento (Caplan *et al.,* 2017a, 2017b) o provocar la contaminación ambiental por la escorrentía del exceso de nutrientes (Beerling *et al*., 2014; Zheng, 2018) dañando suelos y aguas.

La elección adecuada del medio de crecimiento es esencial para la producción de cultivos como Cannabis porque afecta directamente la disponibilidad y el equilibrio del agua, el aire y los nutrientes en la zona de las raíces (Zheng, 2016). Si bien no hay datos experimentales sobre medios de cultivo para el Cannabis en la zona del trópico, la información en otras zonas indica que muchos productores de Cannabis están utilizando sustratos a base de fibra de coco o turba, o sustratos inertes como la lana de roca (Caplan *et al*., 2017b; Nemati *et al.,* 2021). Cada sustrato tiene propiedades físicas y químicas específicas; por lo tanto, es esencial fertirrigar las plantas teniendo en cuenta el sustrato para para garantizar un ambiente óptimo y disponibilidad de nutrientes en la zona de raíces (Zheng, 2016). La fibra de coco es uno de los sustratos que en la actualidad se ha usado en investigaciones de Cannabis medicinal (Caplan *et al.,* 2017a, 2017b; Nemati *et al.,* 2021), y se han encontrado efectos favorables sobre el rendimiento y el perfil de cannabinodes (Yep *et al.,* 2020), sin embargo, no ha sido evaluado el perfil completo de cannabinoides y la demanda de nutrientes en las plantas sembradas en este medio de cultivo.

Los estudios de demanda de nutrientes determinan los requerimientos cuantitativos de cosecha, la extracción total o el consumo de nutrientes que efectúa un cultivo en particular para completar su ciclo de producción (Quesada-Roldán y Bertsch-Hernández, 2013). Las curvas de extracción son parte de estos estudios y permiten el conocimiento de la demanda de nutrientes de acuerdo con la etapa fenológica de un cultivo y se utilizan para establecer programas de fertilización a través de un ajuste más preciso con el fin de maximizar la eficiencia de la fertilización en el ciclo del cultivo (Bertsch-Hernández, 2003), especialmente por fertirriego (Sandoval *et al.,* 2007). Se han establecido las curvas de extracción de nutrientes para especies de importancia económica como tomate (Quesada-

Roldán y Bertsch-Hernández, 2013), sandía (Salas y Vega, 2021), caña de azúcar (González *et al.,* 2018) y maralfalfa (López-Astilleros *et al.,* 2020), sin embargo, en Cannabis no se han encontrado estudios al respecto.

El objetivo de este estudio fue determinar las curvas de extracción de nutrientes foliar de macro y micronutrientes de tres variedades de Cannabis medicinal sembradas en condiciones de suelo y sustrato a partir del contenido de nutrientes foliar completo en distintas etapas fenológicas clave del cultivo.

3.3 Materiales y Métodos

3.3.1 Material vegetal y establecimiento del experimento

La investigación se realizó en la finca El Candil, Lote Guacachica, La Conejera, Bogotá, Colombia (4°47'02,6" N, 74°06'10,9" O). Se emplearon 3 variedades no psicoactivas de Cannabis medicinal: Souce Cauca (SC), Calotoweed (CW) y Higthcol (HC) (Tabla suplementaria 1) proporcionadas por la compañía Medcolcanna S.A.S. Las plántulas se obtuvieron a partir de esquejes enraizados de 4 semanas de edad y se crecieron bajo invernadero con temperatura promedio de 16,39 °C, humedad relativa de 76,21 %, intensidad de luz diaria promedio de 16,7 mol m^{-2} s^{-1}, radiación fotosintéticamente activa (PAR) promedio de 282,61 µmol $m^{-2}s^{-1}$ (Figura suplementaria 1) y fotoperiodo natural (12/12 h luz/oscuridad). Las tres variedades se sembraron en junio de 2020 en condiciones de suelo y sustrato (Sustracoco Germiplus®, Fibra de coco 70%, perlita 30%), para un total de seis tratamientos que corresponden a la interacción entre las variedades y el medio de producción.

Las plantas se trasplantaron en materas plásticas de 12 L con sustrato o en camas elevadas de 0,80 m de ancho con suelo, bajo una densidad de siembra de 4 plantas m^{-2}. Se estableció un fotoperiodo durante la fase vegetativa de 18/6 luz/oscuridad el cual se suplementó con iluminación artificial haciendo uso de luminarias LED Sylvania ® de 30W durante 38 noches. Posteriormente las plantas crecieron bajo condiciones naturales de fotoperiodo (12/12). Las plantas se regaron y fertirregaron con un sistema de riego por goteo en el suelo y sistema de riego localizado tipo araña con 2 estacas inyectoras cada planta en el sustrato. Se fertilizó 5 días a la semana durante el ciclo de cultivo hasta dos semanas antes de la cosecha. Se estableció una fórmula de fertilización diferencial para las fases vegetativa y floración de acuerdo con lo reportado por Cockson *et al.* (2019) con algunas modificaciones (Tabla 3-1), la cual fue aplicada tanto en suelo como en sustrato. Durante todo el ciclo de cultivo se realizó la medición del potencial de hidrogeniones (pH) y conductividad eléctrica (CE) de drenaje y gotero con un medidor portátil de temperatura y pH/EC/TDS HI 9813-6 (distribuido por Hanna Instruments, Bogotá, Colombia). Se realizó poda bajera de los tres nudos basales a los 54 ddt y 80 ddt.

Cada tratamiento se estableció en un área de 72,53 m^2 en 5 camas de manera aleatoria, utilizando un diseño en bloques (medio de cultivo) completos al azar con parcelas divididas

(variedades). Se realizaron 5 repeticiones por tratamiento y la unidad experimental consistió en 37 plantas.

Tabla 3-1. Fórmula de fertilización en partes por millón (ppm) para la etapa vegetativa y floración utilizada en los medios de cultivo suelo y sustrato para plantas de Cannabis medicinal.

Nutriente	Vegetativo	Floración 1*	Floración 2
N	161	37	53
P	64	35	51
K	224	176	251
Ca	144	46	65
Mg	77	45	64
Mn	6	5	6
Fe	6	5	6
Cu	6	7	11
Zn	1,7	7	11
B	0,7	0,5	0,7
S	107	111	157

*Fórmula utilizada durante 5 días después de iniciada la fase de floración. Posteriormente se utilizó la fórmula floración 2.

3.3.2 Análisis fisicoquímico del suelo y de la solución del suelo y del sustrato.

Se realizó la determinación de las características fisicoquímicas, los elementos disponibles en la solución de suelo y sustrato a partir del contenido iónico, y el análisis convencional de suelo para determinar la concentración total de elementos intercambiables en tres etapas de cultivo: *i)* Antes de la siembra, *ii)* Terminada la etapa vegetativa, al momento de retiro de luces o inicio de la etapa de floración visible, y *iii)* Al terminar el ciclo de cultivo de las variedades. Esta determinación se realizó en el laboratorio de suelos de Agrilab (Bogotá, Colombia). Las muestras se obtuvieron realizando un muestreo en “X” en el área de suelo y sustrato, tomando aproximadamente 100 g para obtener una sola muestra homogénea de 1000 g, representativa para el lote.

3.3.3 Contenido nutricional y curva de extracción de nutrientes foliar

Se recolectaron ramas, incluyendo hojas e inflorescencias del tercio medio de las plantas a los 15, 30, 46, 60 y 90 días después de trasplante (ddt) para formar 3 muestras por tratamiento. El tejido se secó a 70°C hasta peso constante y se trituró en un molino (Thomas Wiley® Mini-Mill; Thomas Scientific, Swedesboro, NJ, EE.UU.) con una malla de 1 mm. El contenido de nutrientes se determinó en el Laboratorio de Aguas y Suelos de la Universidad Jorge Tadeo Lozano (Cundinamarca, Colombia).

El contenido de nutrientes se determinó siguiendo la metodología reportada por Hussain *et al.* (2013). El contenido de nitrógeno (N) se determinó según Kjeldahl. Los contenidos de fósforo (P) y boro (B) se determinaron por colorimetría con Molibdato-Vanadato de Amonio y Azometina-H, respectivamente. Los contenidos de potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na), hierro (Fe), manganeso (Mn), cobre (Cu) y zinc (Zn) se determinaron por absorción atómica. El contenido de azufre (S) se determinó por turbidimetría con Cloruro de Bario ($BaCl_2$) al 10% y Glicerina, directamente del filtrado obtenido de la digestión húmeda.

Para la obtención de la curva de extracción de nutrientes foliar, se determinó el peso seco (PS) total del follaje de la planta en cada punto de muestreo. Con los datos de la concentración porcentual del nutriente en el tejido vegetal, se realizó el cálculo de la extracción de cada nutriente basado en el reporte generado por Quesada-Roldán y Bertsch-Hernández (2013) (ecuación 3.1).

$$Kg\ Nutriente\ en\ el\ tejido\ ha^{-1} = \frac{PS\ foliar\ (Kg\ ha^{-1})\ x\ Contenido\ Nutriente\ (\%)}{100} \quad (3.1)$$

3.3.4 Análisis estadístico

Los datos fueron analizados con el paquete estadístico R (versión 4.1.0). Se realizó evaluación de correlación de Pearson empleando la librería “corrplot” (Wei *et al.,* 2017), para realizar así los correlogramas respectivos. Con el fin de evidenciar las variables de mayor contribución se realizó un análisis de componentes principales (PCA) para cada uno de los medios de cultivo (suelo y sustrato). A través de un gráfico Biplot se representó la contribución de cada variable y su asociación con cada tratamiento, para ello se hizo uso de las librerías “FactorExtra” y “FactorMineR”. Se realizó un análisis de varianza multivariado (MANOVA) con el fin de determinar si existen diferencias a través del tiempo para los tratamientos (Friedrich y Pauly, 2018). El análisis se realiza a partir de 10000 iteraciones y se determina la estadística tipo ANOVA modificada (MATS) y el p–valor de remuestreo a partir del enfoque bootstrap paramétrico (paramBS). Para determinar las diferencias significativas se realizó la prueba multivariada post hoc Tukey ($p \leq 0{,}05$). Todo se realizó empleando la librería “MANOVA.RM” del software R.

3.4 Resultados

3.4.1 El sustrato retiene iones nutricionales durante el ciclo de cultivo de las plantas de Cannabis

Se encontró que las condiciones de pH en sustrato fueron estables a través del tiempo (Tabla 3-2). Sin embargo, la CE incrementó en un 153% al finalizar la etapa vegetativa y 215% al finalizar el ciclo de cultivo comparado con las condiciones previas a siembra indicando una elevada concentración de sales y retención de iones en el medio de cultivo. La saturación de humedad mostró que el sustrato retuvo agua entre 5 y 7 veces más de

su volumen seco. Los elementos disponibles en la solución de sustrato muestran que el contenido de Ca^{2+} y Mg^{2+} previo a la siembra era bajo y, aumentó en 929% (Ca^{2+}) y 507% (Mg^{2+}) al inicio de floración y se mantuvo estable al finalizar el ciclo de cultivo. El contenido de K^+ y Na^+ fue alto al inicio del ciclo, y aumentó en 93% (K^+) y 27% (Na^+) al finalizar la etapa vegetativa y al final del ciclo bajó a su contenido inicial. El N-NH4$^+$, HCO_3^-, B, Cu y Mn presentaron un incremento gradual a través del ciclo de cultivo. El P-$H_2PO_4^-$ y el N-NO_3^- se incrementó en 412% y 819% respectivamente al finalizar la etapa vegetativa comparado con la etapa previa a siembra. Luego disminuyó entre el 30 y 50% comparado con el muestreo intermedio. El Fe a pH de sustrato y pH ácidos se mantuvo constante durante el ciclo. El Cl^- fue alto al inicio y disminuyó gradualmente a través del tiempo. El S-SO_4^{2-} aumentó en 533% y 714% al iniciar floración y al finalizar ciclo respectivamente. El Zn tuvo un incremento del 173% al finalizar el ciclo. La relación de adsorción de sodio (RAS) presentó un descenso después de la etapa vegetativa y hasta el final del ciclo de cultivo.

En suelo se realizó una comparación antes de siembra y al finalizar el ciclo de cultivo (Tabla 3-2). El pH aumentó un 5% y la CE se redujo un 75%. La saturación de humedad se mantuvo estable en el tiempo. El Ca^{2+}, K^+, Cl^- y Mn se redujeron en 80%, 73,5%, 91,9% y 90,7% respectivamente. El Mg^{2+} y el Na^+ disminuyeron su contenido en 70% y 48,1% respectivamente. El HCO_3^-, S-SO_4^{2-}, B y el Fe (a pH de solución) pasaron de estar en disponibilidades bajas a disponibilidades altas. El Cu, Zn, P-$H_2PO_4^-$ y la RAS, no tuvieron variaciones a través del tiempo. Respecto a las dos fuentes de N se redujo el contenido a través del ciclo de cultivo, sin embargo, el N-NH_4^+ se encontró en menor proporción que el N-NO_3^- antes de la siembra; por consiguiente, la reducción de la forma NO_3^- fue más alta. El Fe (a pH 2.0) se incrementó un 60% al finalizar la cosecha de las plantas de Cannabis.

Tabla 3-2. Resultados del análisis de elementos disponibles en la solución del suelo y sustrato, en tres periodos clave del ciclo de cultivo de tres variedades de *Cannabis sativa* L. (SC, CW, HC).

	Antes de siembra		***Finalizando etapa vegetativa- Antes de iniciar floración visible***	***Finalizando ciclo total del cultivo***	
	Suelo*	**Sustrato**	**Sustrato**	**Suelo***	**Sustrato**
pH	5,75	5,81	5,5	6,11	5,7
CE (dS/m)	2,48	2,85	7,22	0,62	6,15
Sut. Hum (%)	85,80	703	507	79,2	627
	mg/L	**mg/L**	**mg/L**	**mg/L**	**mg/L**
K^+	330	506	980	87,2	582
Ca^{2+}	167	34,8	354	32,5	317
Mg^{2+}	63,1	33,6	204	18,8	237
Na^+	43,4	252	320	22,5	262
N-NH_4^+	2,46	0,48	3,11	0,79	8,61
HCO_3^-	12,8	46	74,2	19,7	106
Cl^-	171	678	594	13,8	284

P-$H_2PO_4^-$	7,09	41,6	213	7,86	117
S-SO_4^{2-}	31,2	87,4	554	84,9	712
N-NO_3^-	234	21,1	194	3,62	58,7
B	0,06	0,6	1,6	0,29	2,15
Fe	0,033	0,019	0,019	0,826	0,018
Fe (pH 2.0)	0,586	0,022	0,025	0,968	0,021
Cu	0,019	0,017	0,031	0,018	0,154
Mn	0,217	0,017	0,366	0,02	0,811
Zn	0,026	0,313	0,391	0,01	1,07
Relación adsorción sodio	0,726	7,33	3,35	0,777	2,71

*Para suelo se presenta solo el resultado del inicio y final del ciclo de cultivo. No hay valor intermedio.

En el suelo se realizó la determinación de contenido total de nutrientes intercambiables al iniciar floración y finalizando el ciclo del cultivo (Tabla 3-3). Se encontró que el pH aumentó un 10% en la fase de floración. La CE por el contrario disminuyó un 79,6% evidenciando pérdida de sales. La saturación de humedad media presentó un incremento del 7% durante la fase reproductiva. El K y el Ca redujeron sus concentraciones a través del tiempo, pero fue el K el que presentó una reducción del 20,6% en el porcentaje de saturación. El Mg, Mn, P, S, la Saturación de sodio (Sat. Na) y la Saturación de calcio (Sat. Ca) no presentaron variaciones. El contenido de Na, Fe y Zn intercambiable mostraron una disminución finalizando el ciclo de cultivo respecto a la finalización de la etapa vegetativa. El Cu, N-NH_4^+ y el porcentaje de Saturación de magnesio (Sat. Mg) incrementaron en 71%, 30% y 18% respectivamente al finalizar el ciclo de cultivo. El contenido de B aumentó 88%, mientras que el contenido de N-NO_3^- se redujo 84%, ambos al finalizar el ciclo de cultivo. El porcentaje de saturación de Al (Sat. Al) no presentó valores significativos en las dos etapas.

Tabla 3-3. Resultados del análisis convencional de suelo de invernadero, donde se establecieron las tres variedades de *Cannabis sativa* L., Souce Cauca, Calotoweed y Higthcol.

	Finalizando etapa vegetativa- Antes de iniciar floración visible	***Finalizando ciclo total del cultivo***
	Suelo	**Suelo**
pH	5,46	6,11
CE (dS/m)	3,03	0,62
Sat. Hum media (%)	32,30%	39,60%
	mg/Kg	**mg/Kg**
K	1340	900
Ca	2850	2400
Mg	570	570

Na	120	96
Fe	22,2	10
Mn	23	21,4
Cu	0,46	0,79
Zn	18,3	15,1
B	0,434	0,816
P	14,6	14,5
S	108	116
N-NH_4^+	9	11,7
N-NO_3^-	354	54
SAT Mg	20,50%	24,20%
SAT Na	2,28%	2,15%
SAT Al	0,29%	0,00%
SAT K	15,00%	11,90%
SAT Ca	62,00%	61,90%

3.4.2 El contenido de nutrientes foliar presenta diferencias a través del tiempo entre las plantas de suelo y sustrato

En las tres variedades en sustrato el contenido de macronutrientes tuvo un comportamiento diferencial con interacciones dobles de $p \leq 0,001$ (Tabla 3-4). El contenido de N presentó una disminución progresiva a través del tiempo para las tres variedades, alcanzando valores por debajo del 3%. Las variedades HC y CW presentaron un contenido de N más alto que SC durante todo el ciclo de cultivo y esto se observó visualmente en la clorosis foliar generalizada en toda la planta después de iniciada la etapa de floración, después de los 39 ddt (Figura Suplementaria 3). El contenido de P mostró una disminución hasta los 46 ddt en las tres variedades, sin embargo, después de los 60 ddt presentó un aumento, siendo significativo a los 90 ddt, donde también se obtuvo los mayores contenidos de este macronutriente en el follaje. El contenido de K fue variable a través de tiempo, pues presentó una disminución a los 30 ddt; un aumento a los 46 ddt con valores similares a los presentados a los 15 ddt y, una reducción en las variedades CW y SC a los 60 y 90 ddt. En la variedad HC, aunque hubo una disminución progresiva, el contenido fue mucho mayor que en las otras dos variedades. El contenido de Ca en el follaje de CW y SC mantuvo sus niveles constantes hasta los 46 ddt, sin embargo, HC presentó un aumento a los 30 ddt y una disminución a los 46 ddt. A los 60 y 90 ddt todas las variedades disminuyeron el contenido de Ca alcanzando valores cercanos al 2%. El contenido de Mg para las tres variedades disminuyó progresivamente hasta los 60 ddt y presentó un incremento a los 90 ddt. Finalmente, el S mostró una disminución a los 30 ddt, se mantuvo estable a los 46 ddt, disminuyó significativamente a los 60 ddt y a los 90 ddt alcanzó valores cercanos a los presentados a los 15 ddt.

En los micronutrientes (Tabla 3-4), el contenido de Fe, se mantuvo estable en las variedades HC y SC hasta los 60 ddt, mientras que CW presentó una disminución

significativa a los 60 ddt. Las variedades CW y SC aumentaron el contenido de Fe a los 90 ddt. El contenido de Fe se disminuyó a los 30 ddt en HC y SC, y se mantuvo estable en CW. El contenido de Mn a los 46 y 60 ddt fue muy similar al presentado a los 15 ddt, sin embargo, a los 90 ddt presentó un aumento significativo en las tres variedades, obteniendo los mayores valores la variedad SC, seguido de CW y HC. El contenido de Cu y Zn fue muy similar en las tres variedades entre los 15 y 60 ddt, sin embargo, a los 90 ddt se presentó un aumento significativo. Las variedades con mayor acumulación de Cu y Zn a los 90 ddt fueron SC y CW, respectivamente. El contenido de B presentó un aumento significativo a los 30 ddt, mientras que a los 46 y 60 ddt el contenido de B en las tres variedades fue diferencial. Sin embargo, a los 90 ddt el contenido se redujo a niveles similares a los obtenidos en los 15 ddt. El Na para las tres variedades se presentó en niveles óptimos, a excepción de HC a los 46 ddt y CW y SC a los 60 ddt, donde los valores estuvieron por debajo del valor mínimo reportado.

Tabla 3-4. Contenido de macronutrientes y micronutrientes en el follaje para las variedades de *Cannabis sativa* L. Souce Cauca (SC), Calotoweed (CW) y Higthcol (HC) sembradas en condiciones de suelo y sustrato. Se presentan los valores para los 15, 30, 46, 60 y 90 ddt (n=3). El color rojo en el mapa de calor indica niveles superiores al máximo reportado, verde en el rango ideal y naranja por debajo del mínimo reportado.

		Contenido nutricional foliar											
		%							***ppm***				
ddt	**Tratamiento**	**N**	**P**	**K**	**Ca**	**Mg**	**S**	**Na**	**Fe**	**Mn**	**Cu**	**Zn**	**B**
15	CW-Suelo	4,94	0,43	2,77	3,27	0,80	0,28	0,009	236,00	66,60	7,40	63,10	49,50
	CW-Sustrato	5,13	0,56	2,87	3,27	1,33	0,30	0,013	177,00	100,30	7,60	57,57	49,13
	HC-Suelo	4,43	0,44	2,63	3,73	0,84	0,32	0,018	195,00	70,63	7,27	65,70	48,40
	HC-Sustrato	5,14	0,60	3,33	3,30	1,30	0,27	0,021	173,67	102,87	7,57	62,53	44,53
	SC-Suelo	4,35	0,40	3,13	4,07	0,84	0,28	0,011	197,00	55,77	6,20	65,07	43,33
	SC-Sustrato	5,03	0,59	3,17	3,60	1,47	0,26	0,010	205,33	96,17	7,23	66,13	49,00
30	CW-Suelo	4,67	0,45	2,77	4,27	0,91	0,22	0,010	214,33	51,17	6,23	49,67	66,13
	CW-Sustrato	4,32	0,53	2,20	2,83	1,04	0,25	0,011	174,33	129,40	8,97	44,30	79,37
	HC-Suelo	4,34	0,42	3,00	4,23	0,81	0,17	0,013	243,33	102,17	5,33	50,37	53,63
	HC-Sustrato	4,62	0,57	2,47	3,77	1,27	0,20	0,011	137,67	67,77	5,07	51,20	68,77
	SC-Suelo	4,73	0,43	3,07	4,50	0,90	0,19	0,011	180,67	37,83	6,10	48,97	50,90
	SC-Sustrato	4,11	0,55	2,50	2,83	0,94	0,20	0,011	155,33	56,30	4,97	51,67	81,77
46	CW-Suelo	4,41	0,45	3,17	4,80	0,88	0,26	0,012	207,33	58,37	6,33	50,93	65,33
	CW-Sustrato	3,87	0,51	3,00	3,20	0,92	0,24	0,012	222,00	102,50	6,17	48,10	85,37
	HC-Suelo	4,47	0,40	3,27	3,93	0,89	0,21	0,013	163,00	29,63	5,80	47,40	53,43
	HC-Sustrato	3,66	0,51	2,97	2,43	0,84	0,22	0,009	134,67	65,57	5,23	54,80	76,97
	SC-Suelo	4,61	0,41	3,33	3,60	0,71	0,22	0,011	209,67	47,17	5,27	47,77	48,63
	SC-Sustrato	3,69	0,52	3,10	3,17	0,83	0,22	0,014	188,33	96,10	5,50	55,87	64,03
60	CW-Suelo	4,36	0,48	2,47	3,17	0,73	0,18	0,007	167,93	51,80	8,00	64,20	64,87
	CW-Sustrato	3,02	0,54	1,97	2,03	0,69	0,18	0,007	77,87	87,90	8,37	49,00	69,80

	HC-Suelo	4,68	0,50	2,97	3,40	0,75	0,19	0,007	152,33	37,03	7,23	63,63	54,37
	HC-Sustrato	2,94	0,55	2,60	2,23	0,73	0,16	0,027	159,00	85,67	7,50	53,20	77,77
	SC-Suelo	4,25	0,48	2,70	3,23	0,64	0,18	0,008	223,00	65,80	7,37	74,63	56,47
	SC-Sustrato	2,85	0,55	2,07	2,00	0,66	0,15	0,005	217,00	92,90	8,03	49,37	72,47
90	CW-Suelo	3,48	0,80	2,33	2,47	0,73	0,30	0,019	305,33	102,03	13,73	113,33	48,63
	CW-Sustrato	2,71	0,84	2,00	1,97	0,82	0,27	0,020	279,33	180,00	17,33	98,33	50,93
	HC-Suelo	3,75	0,85	1,97	2,23	0,66	0,28	0,015	340,00	91,33	14,13	110,33	36,97
	HC-Sustrato	2,88	0,85	2,20	1,50	0,85	0,25	0,016	152,33	132,27	14,67	75,53	48,83
	SC-Suelo	3,61	0,91	1,87	2,30	0,70	0,30	0,015	344,00	126,33	12,80	109,90	43,40
	SC-Sustrato	2,82	0,85	2,00	2,13	0,86	0,27	0,017	287,33	205,67	18,93	90,93	48,90
	MIN[1]	**3,20**	**0,24**	**1,80**	**1,47**	**0,40**	**0,16**	**0,010**	**99**	**40,00**	**4,90**	**23,00**	**55,00**
	MAX[1]	**4,30**	**0,36**	**2,09**	**2,90**	**0,61**	**0,22**	**0,040**	**125**	**67,00**	**6,10**	**38,00**	**80,00**
	Significancia	***	***	***	***	***	***	NS	*	**	***	***	**

[1]Valores máximos y mínimos tomados de Cockson *et al.* (2019).
NS, *, ** o *** no significativo o significativo a p≤ 0,05, 0,01 o 0,001, respectivamente.

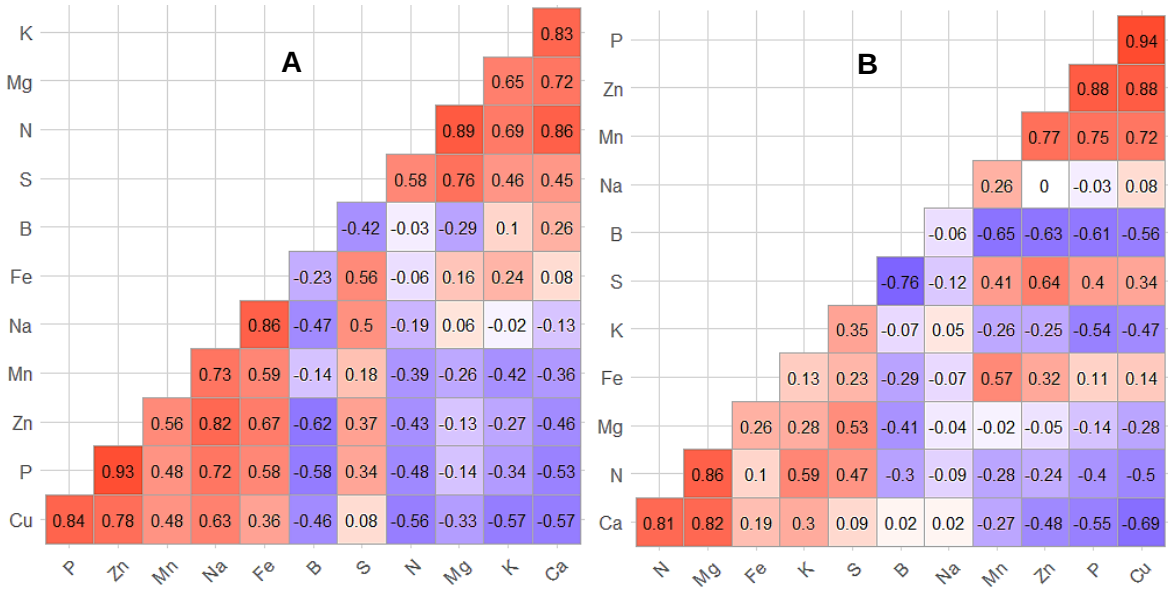
Para las variedades en suelo el contenido de los macronutrientes y micronutrientes fue diferente a lo presentado en sustrato (Tabla 3-4). El contenido de N se mantuvo estable en las tres variedades hasta los 60 ddt. A los 90 ddt se presentó una disminución similar en las tres variedades. El contenido de P fue menor en suelo que en sustrato, sin embargo, igual que en sustrato, aumentó significativamente a los 90 ddt. El porcentaje de K foliar mostró un incremento hasta los 46 ddt, y después de los 60 ddt, disminuyó en las tres variedades. El Ca aumentó en las tres variedades hasta los 30 ddt, y posteriormente, de los 46 a los 90 ddt se observó una disminución gradual alcanzando niveles por debajo del 3%. El Mg, mostró valores más bajos que los presentados en sustrato durante todo el ciclo de cultivo, sin embargo, fue relativamente estable durante el periodo vegetativo y reproductivo, presentando reducciones a los 60 y 90 ddt. El contenido de S se redujo a los 30 ddt respecto al muestreo inicial (15 ddt). Sin embargo, a los 46 ddt presentó un aumento, y a los 90 ddt se tuvo valores similares a lo encontrados a los 15 ddt.

Respecto al contenido de micronutrientes, el Na presentó valores muy similares a lo obtenido en sustrato y; no mostró variaciones significativas a lo largo del ciclo de cultivo. El contenido de Fe mostró una tendencia similar a lo encontrado en sustrato, en términos de concentración y variación de contenido. Se mantuvo estable hasta los 60 ddt, y mostró un incremento significativo a los 90 ddt, con valores muy similares para las tres variedades. El contenido de Mn fue menor comparado con las plantas de sustrato, sin embargo, aumentó al finalizar la etapa de floración de las tres variedades, siendo mayor la concentración a los 90 ddt en la variedad SC. El contenido de Cu también aumentó al finalizar el ciclo de cultivo, acumulándose en mayor proporción a los 90 ddt. El comportamiento fue muy similar al presentado en las plantas de sustrato. El contenido de Zn mostró una reducción hasta los 46 ddt, sin embargo, desde los 60 y hasta los 90 ddt se presentó un aumento significativo del contenido de Zn, alcanzando valores cercanos a 110 ppm en las tres variedades. El B se presentó en concentraciones por debajo de 60 ppm

para las variedades HC y SC durante todo el ciclo de cultivo, mientras que la variedad CW por el contrario presentó valores por encima de 60 ppm a los 30, 46 y 60 ddt. El Na para las tres variedades se presentó en niveles óptimos, a excepción de los 60 ddt donde en las tres variedades, los valores obtenidos se encontraban por debajo del mínimo reportado.

3.4.3 Las correlaciones de nutricionales en las plantas de Cannabis varían entre medios de cultivo.

En sustrato, la variedad CW (Figura 3-1 A), presentó una correlación positiva entre el contenido foliar de K y Ca, Mg y K, N y Mg, Na y Fe, Mn y Na, P y Zn, y Cu y P, todas con valores por encima de 0,65. Se presentaron relaciones inversamente proporcionales entre el S, Na, Zn y P con el B. Igualmente se obtuvo correlaciones negativas entre N y Mn, Zn, P y Cu. El K presentó correlaciones inversas con Cu y Mn. El Ca presentó correlaciones negativas con Cu, Zn, P y Mn. En la variedad HC se presentó una alta correlación positiva entre el P con Cu y Zn, Zn y Cu, N con Mg y Ca, y Ca con Mg (Figura 3-1 B). El Mn mostró correlaciones lineales con Zn, P y Cu. De forma contraria, se presentó una alta correlación negativa entre S y B, al igual que Cu y Ca. Del mismo modo que en CW, el B presentó correlaciones negativas con Mn, Zn, P y Cu. El P con Ca presentó correlaciones inversas de la misma forma que el K con P y Cu. En SC (Figura 3-1 C), se encontraron correlaciones positivas altamente significativas entre N con Mg y Ca, K y Ca, Zn con P, Cu y Mn. Igualmente presentaron correlaciones positivas entre Cu con Mg y Fe, y P y Mn. Las correlaciones negativas con valores más altos se presentaron principalmente en B con S, Zn, P, Cu, Mn, Mg y Fe. El Cu presentó correlaciones lineales negativas con K, Ca y N; el N por su parte mostró correlaciones negativas con Mn y Fe.



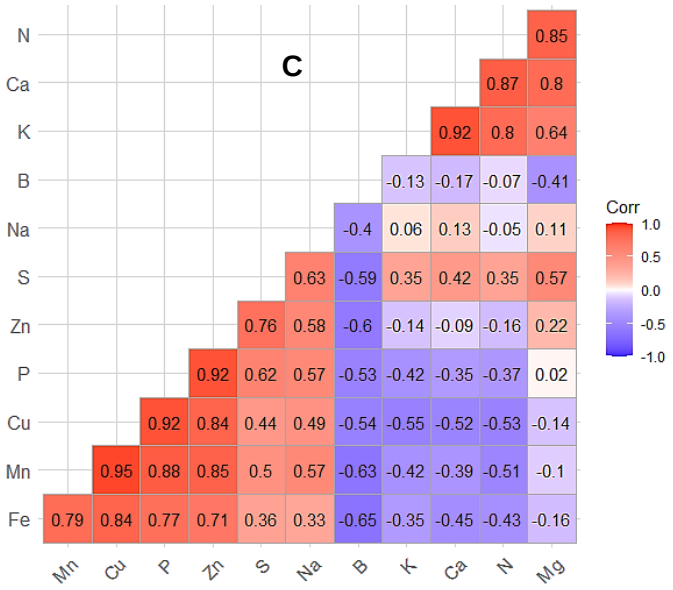


Figura 3-1. Correlogramas del contenido nutricional de tres variedades de *Cannabis sativa* L. sembradas en sustrato, **A.** Calotoweed, **B.** Higthcol y **C.** Souce Cauca, obtenidos a partir del análisis de correlación de Pearson. Colores en la escala de rojo indican correlaciones positivas, colores en la escala de azul correlaciones negativas. Los valores más cercanos a 1 o -1 son altamente significativos.

En suelo, la variedad CW (Figura 3-2 A) mostró correlaciones positivas entre el Ca y Mg, K con Mg y Ca, Cu con P y Zn y P con Zn. El Mn también presentó una correlación positiva con nutrientes como el Fe, Na, Zn, Cu y P. A diferencia de lo anterior, el N presentó correlaciones negativas con Na, Zn, Cu, Mn y una alta correlación inversa con P a pesar de ser los dos macronutrientes esenciales. Se presentaron correlaciones negativas entre Ca con Zn, Cu y P; y de B con Mn, Fe, Na, Zn, Cu, P y S. Para la variedad HC (Figura 3-2 B) se presentó una correlación positiva lineal entre el Cu y Zn al igual que P con Cu y Zn; el Ca y Mg y Ca y K presentó valores altos de correlación (0,86 y 0,73, respectivamente). En este caso se presentaron correlaciones positivas significativas entre el B y cuatro macronutrientes esenciales: K, N, Mg y Ca. El Fe presentó una alta correlación positiva con P, Cu y Zn. Las correlaciones negativas principales en esta variedad se presentaron entre P, Cu y Zn con B, K, N, Mg y Ca. Para la variedad SC (Figura 3-2 C), se presentaron correlaciones altamente positivas entre Cu con P, Zn, Mn, Fe y Na. Se observaron correlaciones positivas entre P con Zn, Mn y Fe. Mn con Fe y Zn. El Ca por su parte obtuvo correlaciones positivas con K, N y Mg y el N con K (0,72). Las correlaciones negativas estuvieron ligadas principalmente al N, K y Ca con Cu, P, Zn, Mn, Fe y S. El B presentó valores negativos de correlación con S y Na.

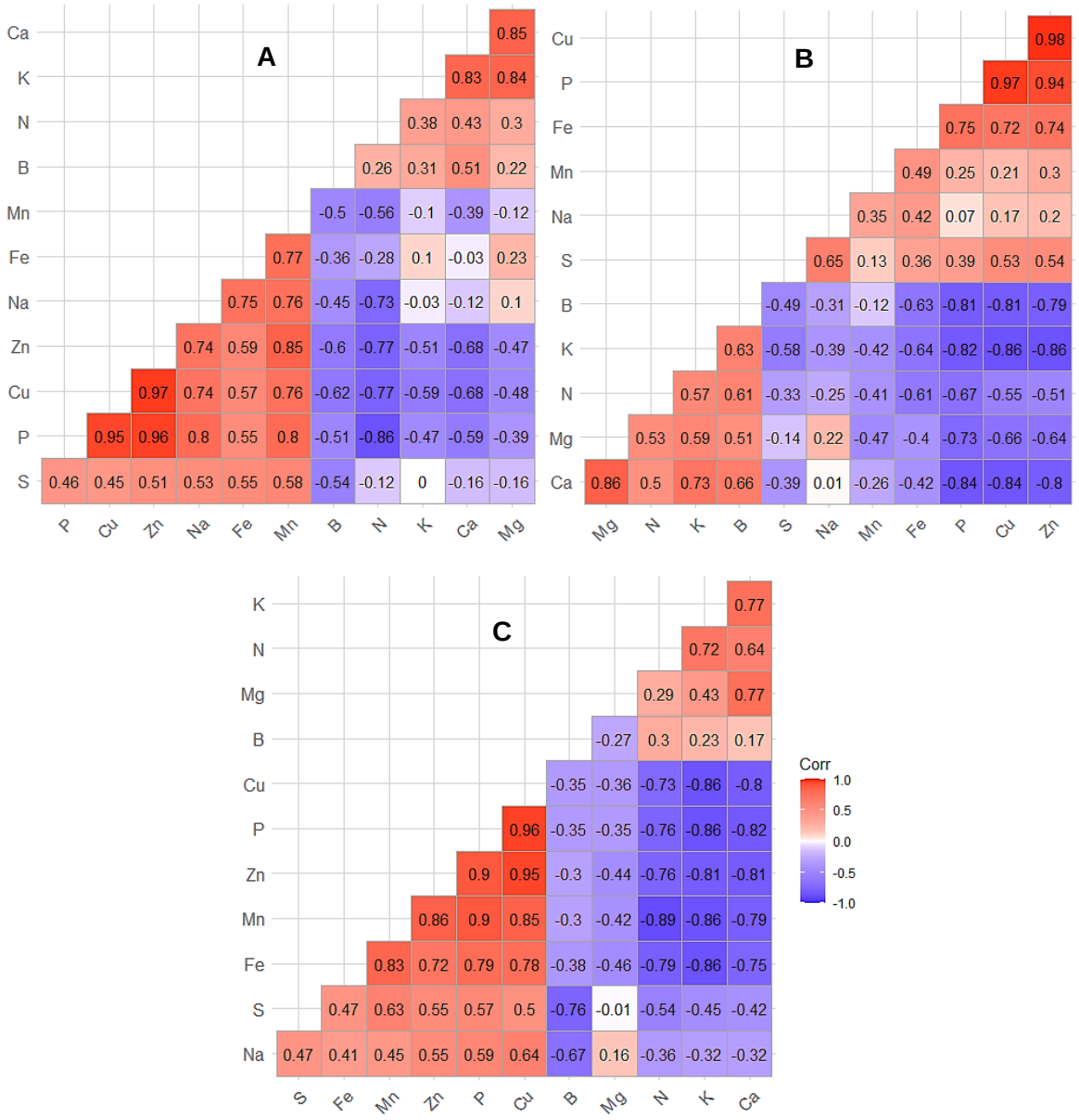
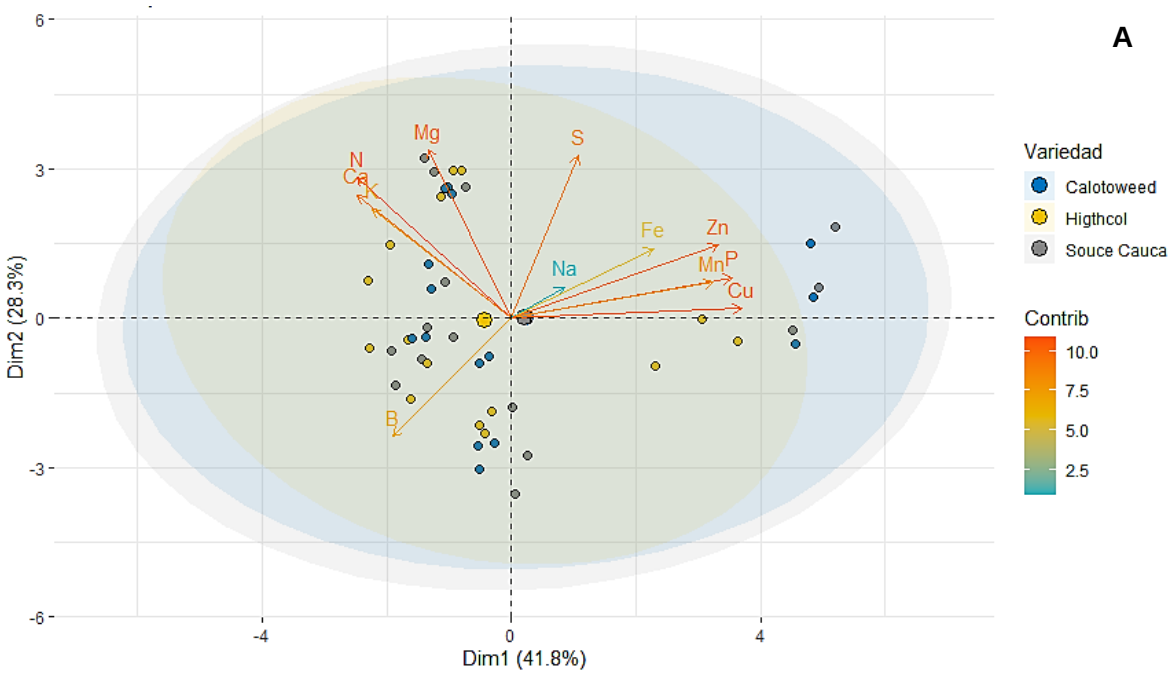


Figura 3-2. Correlogramas del contenido nutricional de tres variedades de *Cannabis sativa* L. sembradas en suelo, **A.** Calotoweed, **B.** Higthcol y **C.** Souce Cauca, obtenidos a partir del análisis de correlación de Pearson. Colores en la escala de rojo indican correlaciones positivas, colores en la escala de azul correlaciones negativas. Los valores más cercanos a 1 o -1 son altamente significativos.

La contribución de las variables de contenido nutricional al medio de cultivo mostró un comportamiento diferencial (Figura 3-3). En sustrato, se observó que los dos primeros componentes explican el 70,1% de la varianza. Las variables que contribuyen en mayor proporción al primer componente (41,8%) son el contenido de P, Mn, Cu y Zn, los cuales además presentan una alta correlación entre sí. El segundo componente (28,3%) está determinado principalmente por el contenido de N, Mg y S. Sin embargo, es posible

evidenciar que el N tiene una correlación muy alta con Ca y K. Como elemento que presenta una correlación inversa en doble vía se encuentra el B el cual al aumentar puede generar una disminución en los contenidos de S, Na, Fe, Zn, Mn, P y Cu, sin embargo, su contribución no es alta. Por otro lado, en suelo (Figura 3-3 B), se observó que los dos primeros componentes explican el 71,2% de la variabilidad. Las variables que contribuyen en mayor proporción a explicar el comportamiento de las variedades en suelo son el contenido de N, P, K, Ca, Fe, Mn, Cu y Zn; en menor proporción se encuentra el contenido de Mg y Na. Se observó una alta correlación entre Cu y Zn; por otro lado, se presentó una correlación inversa entre el contenido de N y B con Na, S, Fe y Mn, los cuales presentan alta correlación entre sí. El Mg, Ca y K presentaron una estrecha correlación entre sí y explican significativamente el comportamiento de las variedades en el medio de cultivo suelo.



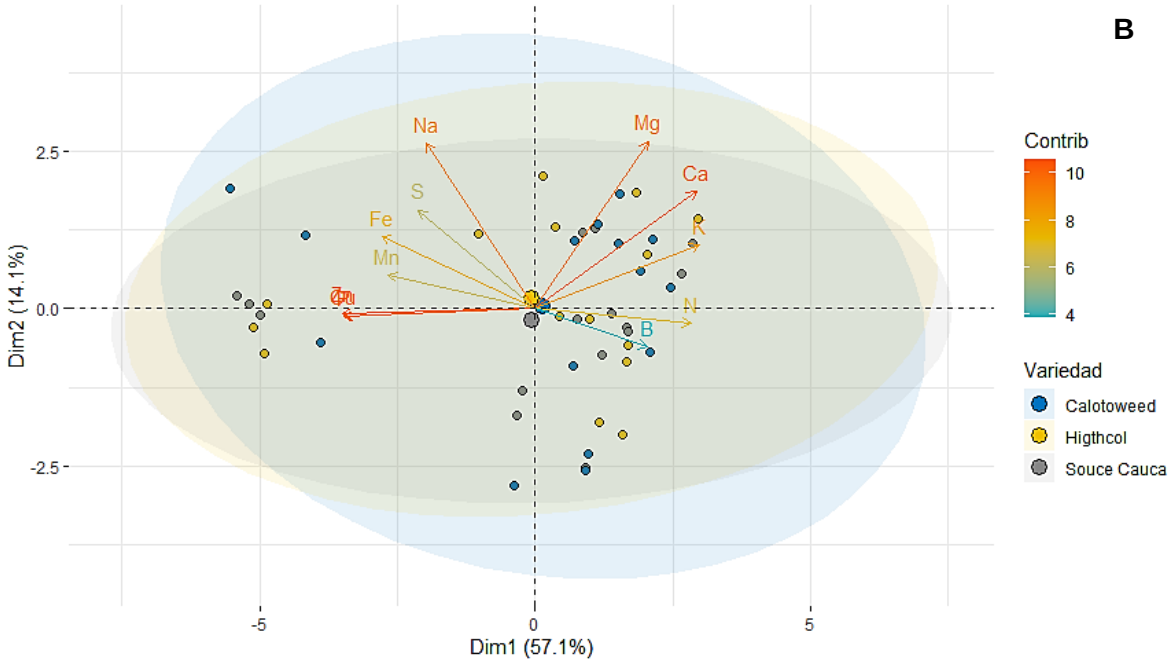


Figura 3-3. PCA Biplot de las variables de contenido nutricional en tres variedades de *Cannabis sativa* L. sembradas en **A.** Sustrato y **B.** Suelo. Las variables con las flechas de mayor longitud y en la escala de colores cálidos representan una mayor contribución. Las variedades están representadas con los colores azul (CW), amarillo (HC) y gris (SC).

Se observó que cada variedad respecto a las variables de contenido nutricional foliar presentó diferencias significativas entre todos los tratamientos (p-valor menor al 0,05% en todos los valores de remuestreo) (Tabla 3-5). En sustrato, para CW, se presentan diferencias significativas entre los 46 y 60 ddt (p-valor =0,011), y 60 y 90 ddt (p-valor =0,026). Para HC, no se presentaron diferencias significativas en el contenido nutricional a través del tiempo. En SC, se presentaron diferencias entre los 15 y 90 ddt (p-valor =0,016) y 30 y 90 ddt (p-valor= 0,001); y al igual que en CW, diferencias entre los 46 y 60 ddt (p-valor= 0,004), y 60 y 90 ddt (p-valor= 0.004). En suelo, para CW, se presentan diferencias significativas entre los 60 y 15 ddt (p-valor= 0,046), 60 y 46 ddt (p-valor= 0,011) y entre los 90 y 60 ddt (p-valor= 0,026). En HC, por el contrario, se presentaron diferencias significativas entre 15 y 90 ddt (p-valor= 0.000), 49 y 90 ddt (p-valor= 0.000), y 60-90 ddt (0.031). Finalmente, en SC, se presentaron diferencias entre los 15 y 90 ddt (p-valor= 0,015), 30 y 90 ddt (p-valor= 0,039), y 46 y 90 ddt (p-valor= 0,005).

Tabla 3-5. MANOVA de los días después de trasplante (ddt) para los seis tratamientos (Variedad x Medio de cultivo) respecto al contenido de macro y micronutrientes. Los valores indican la significancia con un p≤0,05.

Trat. ddt	CW-Sustrato	CW-Suelo	HC-Sustrato	HC-Suelo	SC-Sustrato	SC-Suelo
30-15	1,000	0,979	0,795	0,925	0,175	0,953
46-15	0,704	0,966	0,681	0,074	0,963	0,995
60-15	0,046	0,969	0,955	0,707	0,998	0,989

90-15	0,107	0,885	0,998	0,000	0,016	0,022
46-30	0,998	1,000	1,000	0,412	0,316	0,982
60-30	0,686	0,997	0,981	0,617	0,078	0,913
90-30	0,489	0,736	0,852	0,405	0,001	0,047
60-46	0,011	0,996	0,961	0,999	0,989	0,970
90-46	0,163	0,677	0,809	0,001	0,004	0,004
90-60	0,026	0,750	0,958	0,019	0,002	0,336
MATS	2443,295	1551,958	3833,431	4038,604	1484,81	2083,56
p-valor remuestreo	0,003	0,003	<0,001	<0,001	0,002	<0,001

3.4.4 Determinación de las curvas de extracción de nutrientes foliar para Cannabis medicinal (*Cannabis sativa* L.) en condiciones de suelo y sustrato.

Las curvas de extracción de nutrientes para suelo y sustrato presentaron interacciones dobles entre medios de cultivo, variedades y días de evaluación ($p<0,001$). Se presentan los resultados de las curvas de extracción foliar de macronutrientes para las tres variedades en suelo y sustrato (Figura 3-4). En suelo (Figura 3-4 A, C, E) hay una mayor extracción de N, P, K y S en la variedad SC hasta los 46 ddt y a los 90 ddt. HC y CW mostraron una extracción similar hasta los 46 ddt y a los 90 ddt. Sin embargo, la mayor extracción, coincidente en las tres variedades, es a los 60 ddt, en plena etapa de floración, desarrollo de tricomas y síntesis de metabolitos secundarios. La extracción de Ca fue más alta en SC hasta los 46 ddt. A los 60 y 90 ddt la extracción más alta la presentó HC y CW, respectivamente. Mg fue muy similar en las tres variedades durante todo el ciclo de cultivo. En términos de Kg/ha, los nutrientes de mayor extracción en suelo en las tres variedades fueron N>Ca>K>Mg>P>S. En sustrato (Figura 3-4 B, D, F) la extracción de N, P, K, Ca, Mg y S fue más alta en SC hasta los 30 ddt, mientras que de los 46 a los 90 ddt CW fue la variedad que presentó la mayor extracción con valores muy por encima de los obtenidos en HC y SC. En general, en sustrato HC fue la que presentó menor extracción foliar de nutrientes. Respecto a los Kg/ha, en sustrato, el orden de extracción de nutrientes en el tejido foliar fue: N>Ca>K>Mg>P>S.

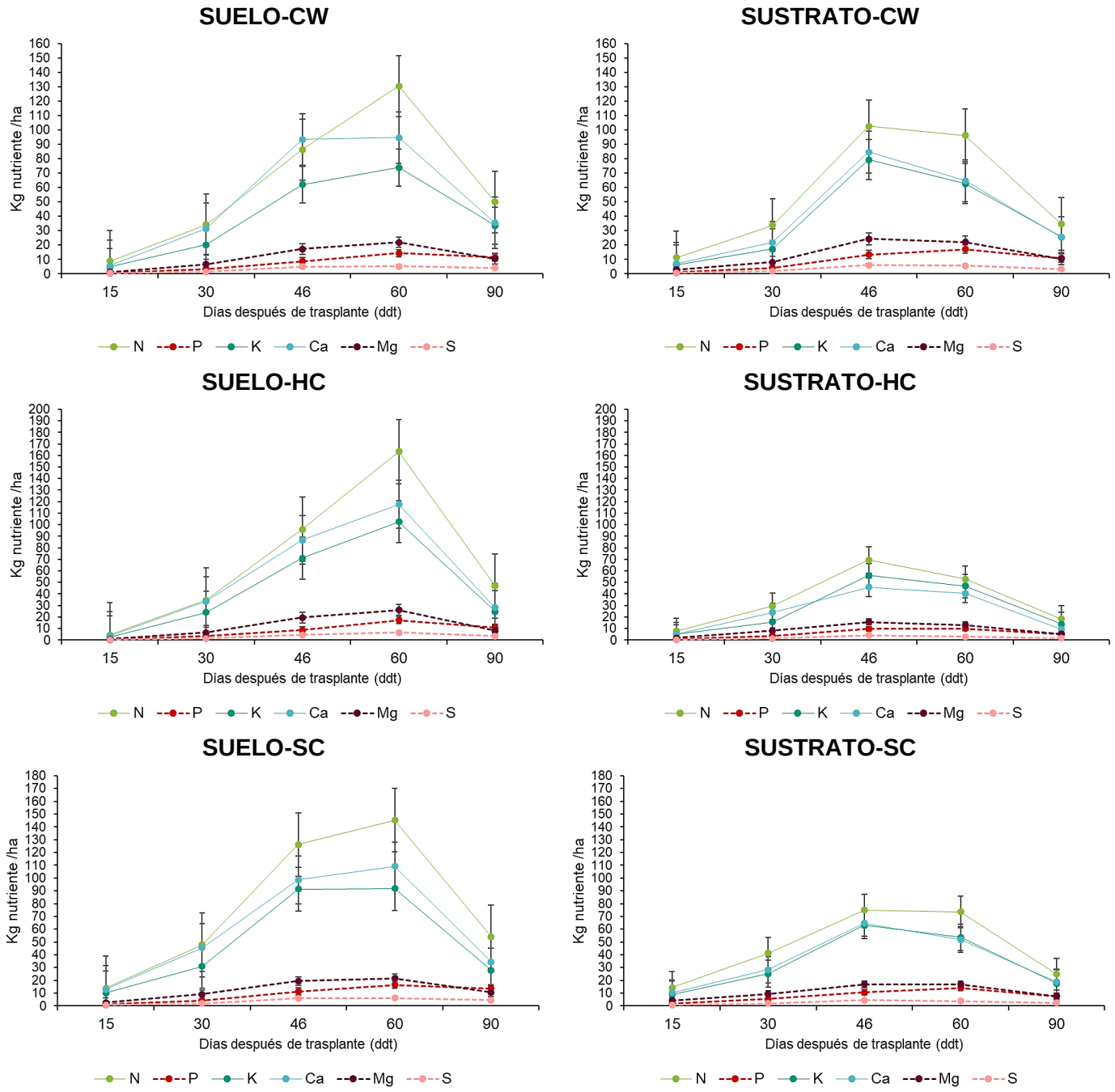
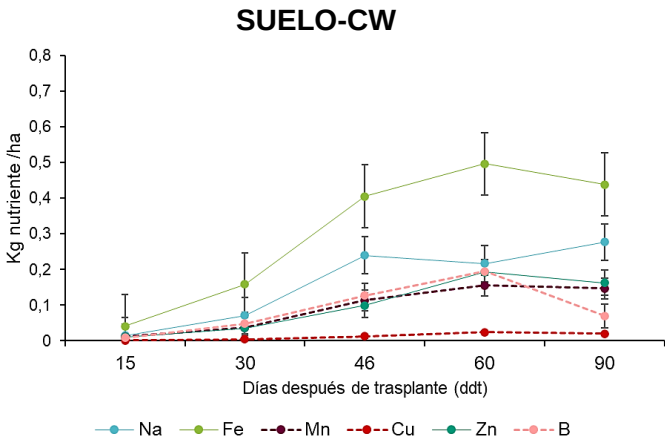
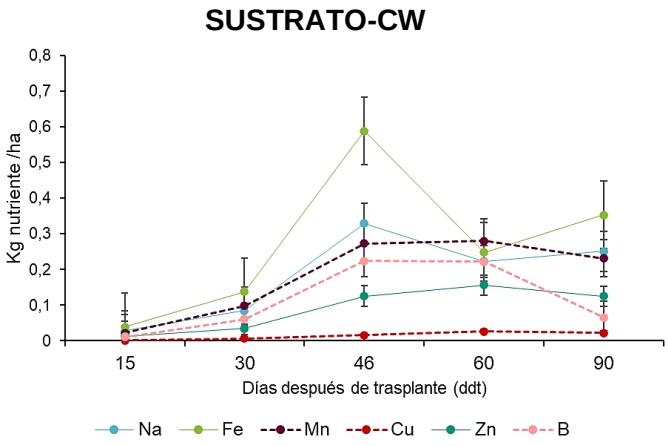


Figura 3-4. Curva de extracción de macronutrientes foliar (N, P, K, Ca, Mg, S) para tres variedades de *Cannabis sativa* L. Souce Cauca (SC), Calotoweed (CW) y Higthcol (HC) sembradas en suelo y sustrato. Se presentan los valores para los 15, 30, 46, 60 y 90 ddt (n=3). Las barras se presentan con la desviación estándar. Las ecuaciones de cada una de las curvas se presentan en la Tabla suplementaria 3.

Las curvas de extracción de micronutrientes foliar en suelo y sustrato (Figura 3-5) para las tres variedades muestran una tendencia característica. En suelo (Figura 3-5 A, C, E) SC

es la variedad que presenta la mayor extracción de Na hasta los 60 ddt, mientras que a los 90 ddt, la variedad CW es la que presenta la mayor extracción. Sin embargo, los valores son muy similares entre variedades. Los metales Fe y Mn fueron extraídos durante todo el ciclo de cultivo mayormente por las hojas de SC, seguido de CW y HC. La extracción de Cu fue mucho más alta en SC y CW comparado con HC, a pesar de ello, la extracción es bastante similar en las tres variedades. El B fue extraído en mayor proporción en SC comparado con las otras dos variedades hasta los 46 ddt. A los 60 y 90 ddt, la extracción más alta la mostró CW. HC fue la variedad que presentó la extracción más baja de todos los micronutrientes durante todo el ciclo de cultivo en suelo. El orden de extracción de los nutrientes para las variedades sembradas en suelo fue para CW y HC: Fe>Na>Zn>B>Mn>Cu. En SC la extracción fue: Fe>Na>Zn>Mn>B>Cu. La mayor extracción de micronutrientes para las tres variedades fue entre los 46 y 60 ddt en plena etapa reproductiva. En sustrato (Figura 3-5 B, D, F) no fue muy clara una tendencia en particular para los micronutrientes y variedades. Respecto al Na, la extracción fue variable para las tres variedades durante el ciclo de cultivo. SC presentó la mayor extracción de Fe hasta los 30 ddt y en los 60 ddt, mientras que a los 46 y 90 ddt los mayores valores de extracción los mostró la variedad CW. El Mn y Cu, fue mayormente extraído por las hojas de CW, seguido de SC y HC. El Zn y B fue extraído en mayor proporción por las hojas de SC hasta los 30 ddt, en los 46, 60 y 90 ddt CW fue la que presentó la mayor extracción. Al igual que en suelo, HC fue la variedad que presentó la menor extracción de micronutrientes y la época de mayor extracción fue entre los 46 y 60 ddt. El orden en Kg/ha de los micronutrientes en sustrato fue: *i)* para CW, Fe>Na>Mn>B>Zn>Cu; *ii)* para HC, Na>Fe>Mn>B>Zn>Cu; y *iii)* para SC, Fe>Na>B>Mn>Zn>Cu hasta los 46 ddt y Na>Fe>Mn>B>Zn>Cu en los 60 y 90 ddt.





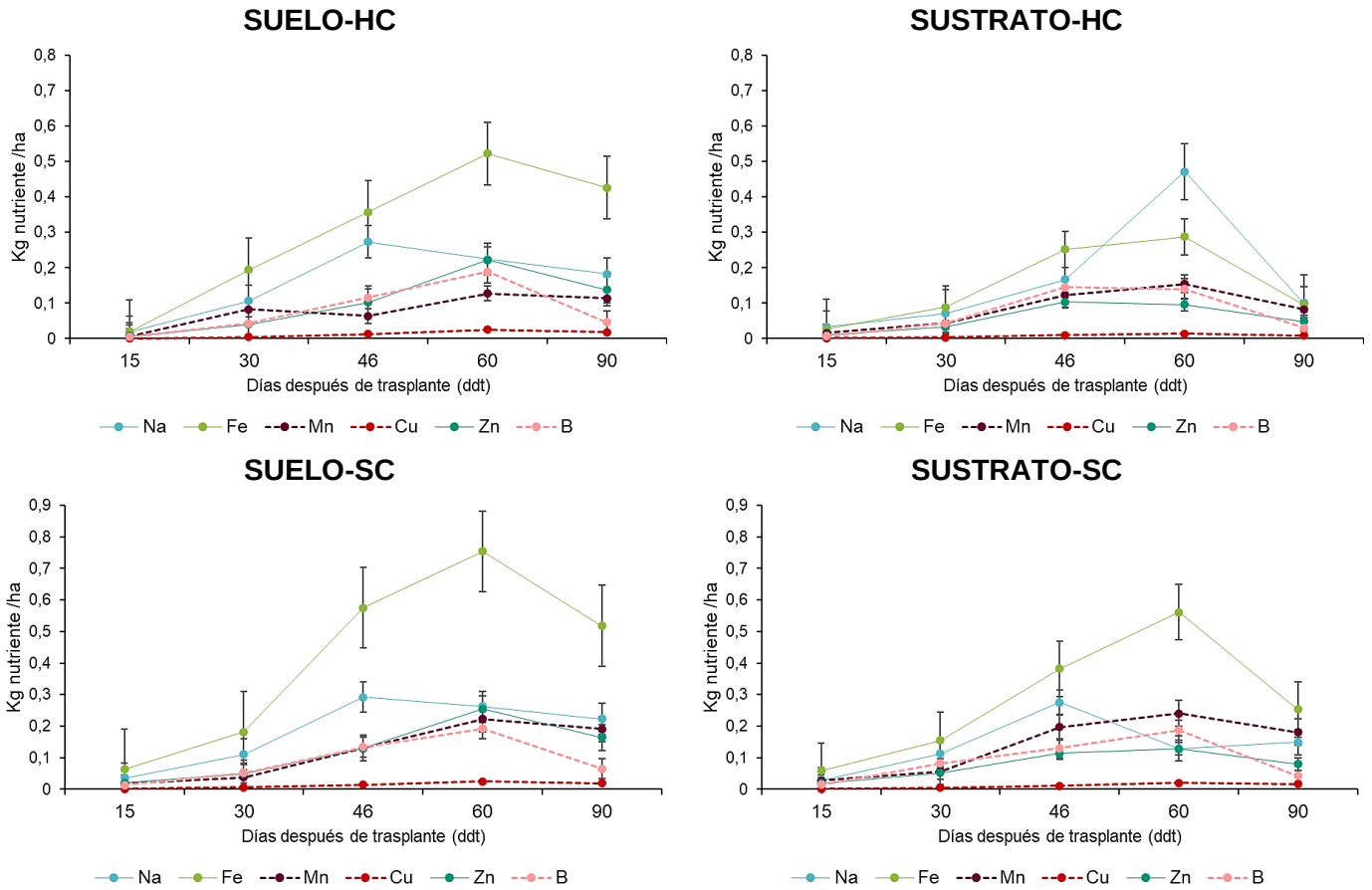


Figura 3-5. Curva de extracción de micronutrientes foliar (Na, Fe, Mn, Cu, Zn, B) para tres variedades de *Cannabis sativa* L. Souce Cauca (SC), Calotoweed (CW) y Higthcol (HC) sembradas en condiciones de suelo y sustrato. Se presentan los valores para los 15, 30, 46, 60 y 90 ddt (n=3). Las barras se presentan con el error estándar. Las ecuaciones de cada una de las curvas se presentan en la Tabla suplementaria 3.

Se presenta el MANOVA para las curvas de extracción foliar establecidas (Tabla 3-6). Se encontró que cada variedad presentó diferencias significativas entre todos los tratamientos (p-valor menor al 0,05% en todos los valores de remuestreo). En sustrato se observa que CW presentó diferencias significativas en todos los ddt a excepción de los 90 y 30 ddt (p-valor= 0,332), y 60 y 46 ddt (p-valor= 0,349). En el caso de HC, solo se presentaron diferencias significativas entre los 30 y 15 ddt (p-valor= 0,002). En SC al igual que en CW, sólo se presentaron diferencias significativas entre los 90 y 30 ddt (p-valor= 0,989) y 60 y 46 ddt (p-valor= 0,935). En el caso de suelo, para CW no se presentaron diferencias significativas entre los 30 y 15 ddt (p-valor = 0,294), 90 y 15 ddt (p-valor= 0,112), 90 y 30 ddt (p-valor= 0,948), 60 y 46 ddt (p-valor= 0,909) y finalmente entre los 90-46 ddt (p-valor= 0,075). En HC, a diferencia que en sustrato, no se presentaron diferencias significativas entre los 90 y 30 ddt (p-valor= 0,342) y 60 y 46 ddt (p-valor= 0,439). En SC, no se presentaron diferencias significativas entre los 90-15, 46-30, 60-30, 90-30 y 60-46 ddt (todos con valores por encima de 0,05).

Tabla 3-6. MANOVA de los días después de trasplante (ddt) para los seis tratamientos (Variedad x Medio de cultivo) respecto a la extracción de macro y micronutrientes. Los valores indican la significancia con un p≤0,05.

Trat. ddt	CW-Sustrato	CW-Suelo	HC-Sustrato	HC-Suelo	SC-Sustrato	SC-Suelo
30-15	0,004	0,294	0,002	0,006	0,001	0,032
46-15	0,000	0,011	0,086	0,000	0,000	0,019
60-15	0,000	0,000	0,086	0,000	0,002	0,004
90-15	0,001	0,112	0,026	0,050	0,000	0,072
46-30	0,001	0,047	0,240	0,001	0,000	0,125
60-30	0,000	0,017	0,159	0,006	0,016	0,111
90-30	0,332	0,948	0,898	0,392	0,989	0,467
60-46	0,349	0,909	0,798	0,439	0,935	0,995
90-46	0,024	0,075	0,334	0,000	0,000	0,044
90-60	0,000	0,024	0,192	0,000	0,017	0,032
MATS	9678,997	15270,17	5643,809	9939,409	15691,86	6401,064
p-valor remuestreo	<0,001	<0,001	0,001	<0,001	<0,001	<0,001

3.5 Discusión

En el presente estudio se demuestra la importancia del medio de establecimiento de cultivo sobre la nutrición de las plantas de Cannabis. Se establecieron las primeras curvas de extracción foliar para las tres variedades de Cannabis medicinal establecidas en suelo y sustrato. Estos resultados proporcionan una información básica y necesaria respecto a la nutrición de Cannabis que será de gran utilidad, tanto a nivel de investigación como en la revisión de los planes de fertilización en cultivos comerciales con el fin de mejorar la productividad.

En el análisis de la solución de suelo y del sustrato, así como en el análisis convencional de suelo, fue posible determinar que los parámetros de CE y concentración de Na^+ y K^+ son un buen indicador de la variabilidad en el contenido de iones en el sustrato de fibra de coco. El alto contenido de Na^+ y K^+ presente en la solución del sustrato, sugiere que el procesamiento del medio de cultivo previo a la siembra no es el adecuado (Abad *et al.*, 2002; Poulter, 2014; Nemati *et al.*, 2021). A pesar de que el proveedor de sustrato asegura que es un sustrato pasteurizado por vaporización y buferizado para neutralizar la inmovilización de Ca/Mg y remover excesos de K/Na, las concentraciones altas de estos elementos se mantuvieron desde el inicio hasta el final del ciclo de cultivo. Estos resultados indican que se debe tener cuidado al usar estos medios de cultivo, particularmente para plantas más sensibles a la sal que el Cannabis (Huaran *et al.*, 2019). Según nuestros resultados no se presentaron efectos negativos en las primeras etapas de desarrollo del cultivo por estas características del sustrato debido a que *C. sativa* es tolerante a condiciones salinas, sin embargo, puede haber una tolerancia diferencial entre variedades (Huaran *et al.,* 2019). En etapas avanzadas de desarrollo del cultivo probablemente se

presentó una acumulación de nutrientes proveniente de la fertilización en este medio de cultivo, lo que generó una mayor salinización del sustrato, interfiriendo con la toma y asimilación de nutrientes por parte de la planta (Guo *et al.*, 2021).

Sin embargo, dentro de la CE hay que considerar el aporte de cationes y aniones, así como la contribución de cada uno de ellos a la CE final del medio. Los datos obtenidos (Tabla suplementaria 3) indican que la proporción de cationes, tanto en suelo como en sustrato, es similar a lo largo del ciclo de cultivo, lo que indicaría que la alta conductividad se debe a la concentración como tal de los cationes y no al porcentaje de contribución de estos a la CE. La concentración de los cationes, así como el porcentaje de contribución del K^+ y Na^+ presentes en el sustrato antes de la siembra, afectaron la disponibilidad de Ca^{2+} y Mg^{2+} en las etapas iniciales del cultivo, generando un desbalance catiónico. También se sabe que pueden formarse algunos complejos entre cationes y aniones (sulfatos, cloruros, fosfatos, entre otros) que podrían incrementar la salinidad del medio de cultivo, principalmente en sustrato donde se obtuvo una CE alta (Hernández *et al.,* 2014).

De otro lado, se ha reportado que *C. sativa* debido a su sistema radical complejo, con una raíz muy profunda y miles de raíces secundarias, es capaz de recuperar minerales y nutrientes en el subsuelo, por lo tanto, es considerada una especie acumuladora dinámica con un papel importante en la remediación de tierras degradas (Mańkowski *et al.*, 2020). Esto explica lo observado en suelo, ya que las plantas de Cannabis pudieron extraer todos los nutrientes y por lo tanto la CE se redujo a niveles inferiores al ideal para esta planta.

Los nutrientes esenciales para las plantas son necesarios en concentraciones específicas de cultivo para obtener un crecimiento o rendimiento óptimos y el análisis de tejido vegetal es el método estándar para medir esos niveles en los cultivos (Cockson *et al.*, 2019). Aquí se encontró que el N diminuyó, después de los 60 ddt, su concentración foliar significativamente más en sustrato que en suelo, llegando a niveles deficitarios de acuerdo con lo reportado por Cockson *et al.* (2019). Los síntomas de deficiencia de nutrientes ocurren cuando las concentraciones tisulares bajan a un nivel en el que el crecimiento o el rendimiento se ven afectados negativamente y pueden servir como una herramienta de diagnóstico visual para productores e investigadores (Bryson *et al*., 2014; Landis *et al.*, 2019). La deficiencia de N en las plantas de sustrato podría estar relacionada con la ausencia de Mo, un nutriente esencial que actúa como cofactor de la nitrato reductasa para permitir que el NO^{3-} sea asimilado por el tejido vegetal (Epstein y Bloom, 2005), sin embargo el contenido de este nutriente no fue analizado. Aquí, en plantas en suelo se encontraron concentraciones foliares de N entre 3,5 y 5,0 % durante el ciclo del cultivo, en comparación con plantas de sustrato donde osciló entre 5,0 y 2,5 % aproximadamente, siendo los valores más bajos después del inicio de la floración. Estos contenidos de N foliar en plantas en suelo indican que esta planta es N-fílica como ha sido reportado anteriormente por Yep *et al.* (2020). Otros estudios también han reportado resultados semejantes a los encontrados aquí, encontrando concentraciones de N foliar en *C. sativa* por encima del 4,0 % (Coffman y Gentner, 1977; Saloner *et al.*, 2019). Los datos obtenidos en esta investigación tanto de contenido de N como de K muestran que estos elementos fueron limitantes en las plantas de sustrato después de iniciada la etapa reproductiva, de

acuerdo con los niveles de macro y micronutrientes reportados para *C. sativa* (Cockson *et al.*, 2019; Landis *et al.*, 2019) y otros cultivos (Bryson *et al.,* 2014). Aquí se encontró una rápida disminución del K foliar después de los 46 ddt para las plantas de suelo y más notoria para plantas de sustrato excepto para la variedad HC, cuyo requerimiento de K podría ser mayor (Wogiatzi *et al.,* 2019). Para *C. sativa* cultivada se ha encontrado que en la etapa vegetativa con 15 mg L^{-1} de K en la solución de fertirrigación se presenta un crecimiento subóptimo, mientras que el crecimiento óptimo se obtuvo con 175 mg L^{-1} de K, una concentración mucho más alta (Saloner *et al.*, 2019). El P se presentó en niveles por encima del máximo reportado (Cockson *et al.,* 2019), sin embargo, después de los 46 ddt, los niveles en sustrato fueron un poco más altos que en suelo. Esto ocurrió simultáneamente con el cambio de fase vegetativa a reproductiva cuando se inició la formación de inflorescencias lo cual genera cambios en los requerimientos nutricionales de la planta (Schachtman *et al*.,1998; Maathuis, 2009). El P es un componente de los ácidos nucleicos y de las membranas, necesario para la división celular y por tanto para el aumento de la biomasa y el desarrollo de las inflorescencias con áreas expansivas ornamentadas morfológicamente como brácteas, pistilos y cálices, que están recubiertas con resinas ricas en fitoquímicos (Yep *et al*., 2020). En cuanto al Ca, pese a que fue más bajo en las plantas de sustrato no se encontró en niveles subóptimos en plantas en ninguno de los dos medios de cultivo (Cockson *et al.,* 2019; Landis *et al.,* 2019).

El Mg presentó inicialmente niveles superiores al máximo reportado, pero su contenido disminuyó en las plantas tanto en suelo como sustrato después del inicio de la etapa reproductiva, alcanzando niveles deficientes a los 60 ddt (Cockson *et al*., 2019). Sin embargo, en las plantas de sustrato los 90 ddt se presentó un contenido excesivo, lo que podría indicar que la planta aumentó la toma de este elemento ya que censó un bajo contenido de clorofilas debido a la deficiencia de N que se presentó en sustrato (Shi *et al*., 2021). El contenido de S y B fue deficitario en plantas tanto en suelo como en sustrato durante todo el ciclo del cultivo (Cockson *et al.,* 2019; Landis *et al.,* 2019). El B tiene un papel estructural en la pared celular, por tanto, es esencial en su síntesis especialmente en zonas con alta división celular como las regiones meristemáticas de la raíz (Hu y Brown, 1994), lo que puede ocasionar menor crecimiento de las plantas. La deficiencia de azufre puede deberse a un requerimiento nutricional mayor de estas plantas y por lo tanto podría aplicarse en mayor proporción en la fórmula de fertilización (Muscolo *et al.,* 2022)

Los contenidos de Fe, Mn, Cu y Zn, presentaron un incremento en la concentración foliar a través del ciclo de cultivo tanto para plantas en suelo como en sustrato y los valores estuvieron por encima del máximo reportado (Cockson *et al.,* 2019; Landis *et al.,* 2019). Esto causó que en las curvas de extracción de nutrientes se obtuvieran valores altos principalmente de Zn, Fe y Mn. Numerosos estudios han encontrado que las plantas de *C. sativa* tienen una alta tolerancia a los metales (Ahmad *et al.,* 2016) y pueden comportarse como plantas fitorremediadoras (Linger *et al.,* 2002). El cáñamo industrial tiene la capacidad de tomar metales y almacenarlos en diferentes órganos de la planta como raíces, hojas, y tallos (Angelova *et al*., 2004), sin mostrar un efecto negativo para la

planta (Citterio *et al.,* 2003; Shi *et al.,* 2012). Esta capacidad de almacenar metales debe considerarse si se van a cosechar las hojas con fines medicinales (Placido y Lee, 2022). Determinar las curvas de extracción de nutrientes es muy importante ya que permite conocer la demanda de nutrientes en cada etapa fenológica generando información que se puede utilizar para hacer ajustes de los planes de fertilización con el fin de incrementar la producción y productividad de las plantas (Bertsch *et al.*, 2003; Calvache, 2015). En las plantas en suelo se obtuvo una mayor extracción foliar de los nutrientes comparado con las de sustrato, debido a la mayor exploración de las raíces, sin embargo, las curvas tienen una tendencia semejante. La época de mayor demanda foliar de macro y micronutrientes se presenta después del inicio de la etapa de floración (46 ddt), siendo los 60 ddt el momento de mayor extracción para la mayoría de los nutrientes determinados. El N es el principal nutriente extraído por las plantas tanto en suelo como en sustrato. El N es el elemento mineral más abundante en las plantas (Ohyama, 2010) debido a sus múltiples funciones en los procesos metabólicos, incluida la síntesis de proteínas, clorofilas y ácidos nucleicos (Hawkesford *et al*., 2012). En Cannabis se ha determinado que un alto suministro de N en la etapa de floración tiene efectos adversos en la producción de compuestos secundarios, aunque promueve el crecimiento y la producción de biomasa (Saloner y Bernstein, 2021). Por tanto, el aporte de N puede usarse para regular los perfiles de cannabinoides y terpenoides, o para aumentar el rendimiento de la planta, en función del programa de producción deseado.

Para el K, se encontró una alta extracción en la etapa de floración. El K tiene un papel importante en la síntesis de cannabinoides, principalmente cannabidiol (CBD) y cannabidivarina (CBDV), lo cual se debe a su efecto en el desempeño fisiológico de la planta (De Prato *et al*., 2022). El Ca por su parte presenta una gran importancia en las plantas debido a que específicamente en Cannabis es componente estructural de las paredes celulares del sistema radical, dada su complejidad e importancia en el anclaje en el medio de cultivo, y por lo tanto, en poder mantener la proporción parte área/raíz lo más balanceada posible (Mańkowski *et al.,* 2020). El Mg no presentó una alta extracción en las plantas tanto en suelo como sustrato, no obstante, es un elemento esencial para la síntesis de azúcares y proteínas (Marschner, 2012).

Los elementos Fe, Mn y Zn presentaron una alta extracción, en comparación con los demás microelementos, probablemente debido a su función en la activación de enzimas, síntesis de hormonas, control de las reacciones redox de la fotosíntesis, síntesis de clorofila y fijación de nitrógeno (Marschner, 2012; Menezes *et al.,* 2022), así como su importancia durante la formación del primordio floral y en etapas avanzadas en la síntesis de cannabinoides (Cockson *et al.,* 2019). Igualmente, la alta extracción de estos micronutrientes puede deberse a la concentración foliar del nutriente lo que genera resultados de extracción elevados en las hojas, ya que como se mencionó antes Cannabis es acumuladora de metales (Angelova *et al.,* 2004).

Finalmente, es posible afirmar que el medio de cultivo, suelo o sustrato, tiene efectos directos en el contenido nutricional de las plantas de Cannabis. La información que se genera en este estudio puede usarse como base para tomar decisiones respecto al tipo de

sustrato a utilizar en cultivos de Cannabis. Se ha encontrado que el tipo de suelo empleado para el cultivo de las plantas de Cannabis está relacionado con el perfil químico del tejido vegetal (Sander *et al*., 2021) y por lo tanto puede tener una implicación directa en la dinámica nutricional en las plantas de Cannabis.

3.6 Conclusiones

Una alta concentración de iones, específicamente cationes, al inicio del ciclo de cultivo en el sustrato generó que a medida que avanzaba el ciclo de cultivo, se presentara salinización del medio debido a la fertilización realizada. En el sustrato se produjo la inmovilización de los iones dentro de la rizosfera y la planta no pudo captar la totalidad de nutrientes lo que se observó como una menor extracción foliar en comparación con las plantas en suelo, generándose una deficiencia marcada principalmente de N. En suelo, por el contrario, se observó que las plantas captan los nutrientes que requieren de la solución del suelo y los provenientes del fertirriego. Esto generó que las curvas de extracción foliar de nutrientes para suelo fuera más alta a la obtenida en sustrato, mostrando que las plantas de Cannabis son capaces de absorber y asimilar los nutrientes disponibles. Los contenidos nutricionales indicaron que las plantas de Cannabis requieren concentraciones altas de nitrógeno para su crecimiento y desarrollo y que pueden ser consideradas N-fílicas. También se encontró que las plantas de Cannabis extraen del suelo altas concentraciones de metales, lo que puede convertirse en una limitante al tratarse de una especie con propósito medicinal. Las correlaciones de nutrientes presentaron algunas variaciones entre los medios de cultivo lo que debe ser considerado al generar planes de fertilización específicos para esta especie vegetal. Los resultados obtenidos en este estudio permiten comprender parte de la dinámica de la nutrición mineral en las plantas de Cannabis y sirven como base para futuras investigaciones, así como para el manejo de la fertilización en esta planta.

3.7 Referencias

Abad, M., Noguera, P., Puchades, R., Maquieira, A., y Noguera, V. (2002). Physicochemical and chemical properties of some coconut coir dust for use as a peat substitute for containerised ornamental plants. Bioresour. Technol. 82(3), 241-245. *doi: 10.1016/s0960-8524(01)00189-4.*

Ahmad, R., Tehsin, Z., Malik, S.T., Asad, S.A., Shahzad, M., Bilal, M., Shah, M.M., y Khan, S.A. (2016). Phytoremediation potential of hemp (*Cannabis sativa* L.): Identification and characterization of heavy metals responsive genes: Biotechnology. CLEAN Soil Air Water. 44, 195–201. doi: 10.1002/clen.201500117.

Angelova, V., Ivanova, R., Delibaltova, V., y Ivanov, K. (2004). Bio-accumulation and distribution of heavy metals in fibre crops (flax, cotton and hemp). Ind. Crops Prod. 19, 197–205. *doi:10.1016/j.indcrop.2003.10.001.*

Baker, D., Pryce, G., Giovannoni, G., y Thompson, A.J. (2003). The therapeutic potential of Cannabis. Lancet Neurol. 2(5), 291–298. *doi: 10.1016/S1474-4422(03)00381-8.*

Beerling, E.A.M., Blok, C., van der Maas, A.A., y van Os, E.A. (2014). Closing the water and nutrient cycles in soilless cultivation systems. Acta Hortic.1034, 49–55. *doi: 10.17660/ActaHortic.2014.1034.4.*

Bernstein, N., Gorelick, J., Zerahia, R., y Koch, S. (2019). Impact of N, P, K, and humic acid supplementation on the chemical profile of medical Cannabis (*Cannabis sativa* L). Front. Plant Sci. 10, 1–13. *doi: 10.3389/fpls.2019.00736.*

Bertsch, F., Hernández, J.C., Arguedas, F. y Acosta, M. (2003). Curvas de absorción de nutrimentos en dos variedades, Bribri y Sacapobres, de frijol común de grano rojo. Agronomía Costarricense. 27(2), 75-81.

Bertsch-Hernández, F. (2003). Absorción de nutrimentos por los cultivos. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. San José, Costa Rica.

Bridgeman, M.B., y Abazia, D.T. (2017). Medicinal Cannabis: history, pharmacology, and implications for the acute care setting. Pharm. Ther. 42(3), 180-188.

Bryson, G.M., Mills, H.A., Sasseville, D.N., Jones, J.B., Jr., y Barker, A.V. (2014). Plant Analysis Handbook III: A Guide to Sampling, Preparation, Analysis and Interpretation for Agronomic and Horticultural Crops; Micro-Macro Publishing, Inc.: Athens, GA, USA.

Calvache, A. (2015). Curvas de absorción en plátano. En: Avellán, L., Calvache, M., y Cabeña, N. (ed.). Curvas de absorción de nutrientes por el cultivo de plátano barraganete (*Musa paradisiaca* L.). Tsafiqui. pp. 17-19.

Caplan, D., Dixon, M., and Zheng, Y. (2017a). Optimal rate of organic fertilizer during the flowering stage for Cannabis grown in two coir-based substrates. HortScience 52, 1796-1803. *doi: 10.21273/hortsci12401-17.*

Caplan, D., Dixon, M., and Zheng, Y. (2017b). Optimal rate of organic fertilizer during the vegetative-stage for Cannabis grown in two coir-based substrates. HortScience 52, 1307-1312. *doi: 10.21273/hortsci12401-17.*

Caplan, D., Dixon, M., y Zhenga, Y. 2019. Coir-based growing substrates for indoor Cannabis production. Acta Hortic. 1266, 55-62. *doi: 10.17660/ActaHortic.2019.1266.9.*

Citterio, S., Santagostino, A., Fumagalli, P., Prato, N., Ranalli, P., Sgorbati, S. (2003). Heavy metal tolerance and accumulation of Cd, Cr and Ni by *Cannabis sativa* L. Plant Soil. 256, 243–252. *doi: 10.1023/A:1026113905129.*

Cockson, P., Landis, H., Smith, T., Hicks, K., y Whipker, B.E. (2019). Characterization of Nutrient Disorders of *Cannabis sativa*. Appl. Sci. 9, 4432. *doi: 10.3390/app9204432.*

Coffman, C.B., y Gentner, W.A. (1977). Responses of greenhouse-grown *Cannabis sativa* L. To nitrogen, phosphorus, and potassium. Agron. J. 69, 832–836. *doi: 10. 2134/agronj1977.00021962006900050026x.*

Deng, G., Du, G., Yang, Y., Bao, Y., y Liu, F. (2019). Planting Density and Fertilization Evidently Influence the Fiber Yield of Hemp (*Cannabis sativa* L.). Agronomy. 9, 368. *doi:10.3390/agronomy9070368.*

De Prato, L., Ansari, O., Hardy, G.E., Howieson, J., O'Hara, G., y Ruthrof, K.X. (2022). The cannabinoid profile and growth of hemp (*Cannabis sativa* L.) is influenced by tropical daylengths and temperatures, genotype and nitrogen nutrition. Industrial Crops & Products. 178, 114605. *doi: 10.1016/j.indcrop.2022.114605.*

Ebersbach, P., Stehle, F., Kayser, O., y Freier, E. (2018). Chemical fingerprinting of single glandular trichomes of *Cannabis sativa* by coherent anti-stokes raman scattering (CARS) Microscopy. BMC Plant Biol. 18, 1-12. *doi: 10.1186/s12870-018-1481-4.*

Epstein, E., y Bloom, A.J. (2005). Mineral metabolism. In: Epstein, E., Bloom, A.J. (Eds.), Mineral Nutrition of Plants: Principles and Perspectives. Sinauer Associates, Inc., Sunderland, Massachusetts, pp. 201–207.

Friedrich, S., y Pauly, M. (2018). MATS: Inference for potentially singular and heteroscedastic MANOVA. Journal of Multivariate Analysis, 165, 166-179. *doi: 10.1016/j.jmva.2017.12.008.*

González, F., Cabezas, M., Ramírez-Gómez, M., y Ramírez, J. (2018). Macronutrient absorption curves in three varieties of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) for panela in the hoya del río Suárez. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 21(2), 395-404. *doi: 10.31910/rudca.v21.n2.2018.995.*

Graber, A., y Junge, R. (2009). Aquaponic systems: nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. Desalination 246, 147–156. *doi: 10.1016/j.desal.2008.03.048.*

Guo, F., Luo, H., Shi, Z., Wu, Y., y Liu, H. (2021). Substrate salinity: A critical factor regulating the performance of microbial fuel cells, a review. Science of the Total Environment. 763, 143021. *doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143021*.

Hauck, R.D., Goyal, S.S., y Huffaker, R.C. (1984). Nitrogen toxicity in plants. Nitrogen in Crop Production, pp. 97–118. *doi: 10.2134/1990.nitrogenincropproduction.c6.*

Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Skrumsager Møller, I., et al. (2012). "Functions of macronutrients," en Marschner"s Mineral Nutrition of Higher Plants, ed. H. Marschner (Cambridge, MA: Academic Press), 135–190.

Hazekamp, A., Tejkalov´a, K., Papadimitriou, S. (2016). Cannabis: From Cultivar to Chemovar II - A Metabolomics Approach to Cannabis Classification. Cannabis Cannabinoid Res. 1(1), 202–215. *doi: 10.1089/can.2016.0017.*

Hernández, M., Chailloux, M., Moreno, V., Igarza, A., y Ojeda, A. (2014). Nutrient levels of reference in the soil solution to the nutrition diagnostic in the tomato protected crop. IDESIA. 32(2), 79-88. *doi: 10.4067/S0718-34292014000200011.*

Hu, H., y Brown, P.H. (1994). Localization of boron in cell walls of squash and tobacco and its association with pectin (evidence for a structural role of boron in the cell wall). Plant Physiol. 105, 681–689. *doi: 10.1104/pp.105.2.681.*

Huaran, H., Haoa, L., Guanghuia, D., Feib, Y., Ganga, D., Yanga, Y., y Feihu, L. (2019). Fiber and seed type of hemp (*Cannabis sativa* L.) responded differently to salt-alkali stress in seedling growth and physiological indices. Industrial Crops & Products. 129, 624–630. *doi: 10.1016/j.indcrop.2018.12.028.*

Hussain, J., Rehman, N., Al-Harrasi, A., Ali, L., Latif, A., Albroumi, M.A. (2013). Essential oil composition and nutrient analysis of selected medicinal plants in Sultanate of Oman. Asian Pac J Trop Dis. 3(6), 421-428. *doi: 10.1016/S2222-1808(13)60095-X.*

Landis, H., Hicks, K., Cockson, P., Henry, J.B., Smith, J.T., y Whipker, B.E. (2019). Expanding leaf tissue nutrient survey ranges for greenhouse cannabidiol-hemp. Crop Forage Turfgrass Manag. 5, 1–3. *doi: 10.2134/cftm2018.09.0081.*

Lea, P., y Morot-Gaudry, J.-F. (eds) (2001). Plant Nitrogen. Berlin: Springer-Verlag.

Linger, P., Müssig, J., Fischer, H., y Kobert, J. (2002). Industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) growing on heavy metal contaminated soil: Fibre quality and phytoremediation potential. Ind. Crop. Prod. 16, 33–42. *doi: 10.1016/S0926-6690(02)00005-5.*

López-Astilleros, O., Vinay, J.C., Villegas-Aparicio, Y., López, I., y Lozano-Trejo, S. (2020). Dinámica de crecimiento y curvas de extracción de nutrientes de Pennisetum sp. (Maralfalfa). Rev Mex Cienc Pecu 2020. 11(1), 255-265. *doi: 10.22319/rmcp.v11i1.4674.*

Marschner, H. (2012). Mineral Nutrition of Higher Plants, ed. H. Marschner (Cambridge, MA: Academic Press), pp. 166-455.

Mańkowski, J., Kołodziej, J., Pudełko, K., y Kozłowski, R. M. (2020). Bast fibres. Handbook of Natural Fibres, 393–417. *doi:10.1016/b978-0-12-818782-1.00011-0.*

Maathuis, F.J. (2009). Physiological functions of mineral macronutrients. Curr. Opin. Plant Biol. 12, 250–258. *doi: 10.1016/j.pbi.2009.04.003.*

Menezes, I., Nascimento, P., Yamamoto, C., y Oliveira, A. (2022). Evaluation of trace elements in Cannabis products. Journal of Food Composition and Analysis. 113, 104721. *doi: 10.1016/j.jfca.2022.104721.*

Monsees, H., Kloas, W., y Wuertz, S. (2017). Decoupled systems on trial: eliminating bottlenecks to improve aquaponic processes. PLoS One 12, 1–18*. doi: 10.1371/journal.pone.0183056.*

Muscolo, A., Marra, F., Canino, F., Maffia, A., Mallamaci, C., y Russo, Mt. (2022). Growth, nutritional quality and antioxidant capacity of lettuce grown on two different soils with sulphur-based fertilizer, organic and chemical fertilizers. Scientia Horticulturae. 305, 111421. *doi: 10.1016/j.scienta.2022.111421.*

Nemati, R., Fortin, J.-P., Craig, J., y Donald, S. (2021). Growing Mediums for Medical Cannabis Production in North America. Agronomy.11, 1366. *doi: 10.3390/agronomy11071366.*

Ohyama, T. (2010). Nitrogen as a major essential element of plants. In: Ohyama, T., Sueyoshi, K. (Eds.), Nitrogen Assimilation in Plants. Research Signpost, Kerala, pp. 1–17.

Placido, D.F., y Lee, C.C. (2022). Potential of Industrial Hemp for Phytoremediation of Heavy Metals. Plants. 11, 595. *doi: 10.3390/plants11050595*

Poulter, R. (2014). Quantifying differences between treated and untreated coir substrate. Acta Hortic. 1018, 557-564. *doi: 10.17660/ActaHortic.2014.1018.61.*

Quesada-Roldán, G., y Bertsch-Hernández, F. (2013). Obtaining of theAbsorption Curve for the FB-17Tomato Hybrid. Terra Latinoamericana. 31(1), 1-7. *ISSN 2395-8030.*

Rioba, N. B., Itulya, F. M., Saidi, M., Dudai, N., y Bernstein, N. (2015). Effects of nitrogen, phosphorus and irrigation frequency on essential oil content and composition of sage (*Salvia officinalis* L.). J. Appl. Res. Med. Aromat. Plants 2, 21–29. *doi: 10.1016/j.jarmap.2015.01.003.*

Salas, R.E., y Vega, E.V. (2012). Curvas de absorción de nutrientes bajo dos métodos de fertilización en sandia, en Guanacaste, Costa Rica. InterSedes: Revista de las Sedes Regionales. XIII(26),19-44. *ISSN: 2215-2458.*

Saloner, A., Sacks, M.M., y Bernstein, N. (2019). Response of medical Cannabis (*Cannabis sativa* L.) genotypes to K supply under long photoperiod. Front. Plant Sci. 10, 1–16. *doi: 10.3389/fpls.2019.01369*

Saloner, A., y N. Bernstein. (2020). Response of Medical Cannabis (*Cannabis sativa* L.) to Nitrogen Supply Under Long Photoperiod. Front. Plant Sci. 11:572293. *doi: 10.3389/fpls.2020.572293.*

Saloner, A., y Bernstein, N. (2021). Nitrogen supply affects cannabinoid and terpenoid profile in medical Cannabis (*Cannabis sativa* L.). Industrial Crops & Products. 167, 113516. *doi: 10.1016/j.indcrop.2021.113516.*

Sander, M., Fogliatto, R., Scorsatto, R., Tiecher, T., y Anastácio de Oliveira, F. (2021). The use of vegetal tissue multi-element content as an indicator of soil or substrate type employed to cultivate *Cannabis sativa* L. (marijuana). Forensic Chemistry, 23, 100319. *doi:10.1016/j.forc.2021.100319*.

Sandoval, M., Sánchez, P., y Alcántar, G. (2007). Principios de la hidroponía y del fertirriego. pp. 373-438. In: G. Alcántar y Trejo, L. (eds.). Nutrición de cultivos. Mundi Prensa y Colegio de Postgraduados. México, D. F.

Schachtman, D.P., Reid, R.J., y Ayling, S.M. (1998). Phosphorus uptake by plants: from soil to cell. Plant Physiol. 116, 447–453. *doi: 10.1104/pp.116.2.447.*

Shi, G., Liu, C., Cui, M., Ma, Y.,y Cai, Q. (2012). Cadmium tolerance and bioaccumulation of 18 hemp accessions. Appl. Biochem. Biotechnol. 168, 163–173. *doi: 10.1007/s12010-011-9382-0.*

Shi, J., Wang, Y., Li, Z., Huang, X., Shen, T., y Zou, T. (2021). Simultaneous and nondestructive diagnostics of nitrogen/magnesium/potassium-deficient cucumber leaf based on chlorophyll density distribution features. Byosistems engineering. 212, 458-467. *doi: 10.1016/j.biosystemseng.2021.11.001*

United Nations Office on Drugs and Crime (2013). Recommended methods for the identification and analysis of Cannabis and Cannabis products, Recommended Methods for the Identification and Analysis of Cannabis and Cannabis Products. Vienna, Austria. 50 pp. *doi: 10.18356/1e8e4f16-en.*

Wei, T., Simko, V., Levy, M., Xie, Y., Jin, Y., y Zemla, J. (2017). R package “corrplot”: Visualization of a Correlation Matrix. 56, 316-324.

Wogiatzi, E, Gougoulias, N., Giannoulis, K., y Kamvoukou, C.-A. 2019. Effect of irrigation and fertilization levels on mineral composition of Cannabis sativa L. leaves. Not Bor Hortu Agrobo. 47(4), 1073-1080. *doi: 10.15835/nbha47411527*.

Yep, B., Gale, N.V., y Zheng Y. (2020). Comparing hydroponic and aquaponic rootzones on the growth of two drugtype *Cannabis sativa* L. cultivars during the flowering stage. Industrial Crops & Products. 157, 112881. *doi: 10.1016/j.indcrop.2020.112881.*

Zheng, Y. (2016). Root zone environment management in container crop production. Proc. for the Veg., potato, greenhouse, small fruit & Gen. session, Mid-Atlantic Fruit & Veg. Convention, Hershey, PA.

Zheng, Y. (2018). Current nutrient management practices and technologies used in North American greenhouse and nursery industries. Acta Hortic. 1227, 435–442. *doi: 10.17660/ActaHortic.2018.1227.54.*

4. Establecimiento del desempeño fisiológico de tres variedades de Cannabis medicinal sembradas en condiciones de suelo y sustrato

4.1 Resumen

Cannabis sativa L. es una planta importante en la industria alimentaria, medicinal y textil. La legalización del Cannabis con fines medicinales y científicos genera varios desafíos agronómicos, siendo el medio de establecimiento del cultivo, uno de los factores más importantes ya que puede modificar la fisiología de las plantas. El objetivo de este estudio fue determinar el efecto del medio de establecimiento suelo o sustrato sobre los parámetros fisiológicos relacionados con el rendimiento fotosintético de tres variedades de Cannabis. Las variedades no psicoactivas de Cannabis Souce Cauca (SC), Calotoweed (CW) y Higthcol (HC) se sembraron en suelo y sustrato (fibra de coco+perlita) bajo condiciones de invernadero. Se midieron variables relacionadas con el contenido nutricional a los 15, 46 y 90 días después de trasplante (ddt) y variables relacionadas con el rendimiento fotosintético a los 20, 35, 50, 65, 80 y 95 ddt. El contenido de N, K y Ca disminuyó a través del tiempo en las plantas cultivadas en sustrato, mientras que el contenido de P, Mn y B se redujo en las plantas sembradas en suelo. El rendimiento cuántico máximo potencial del fotosistema II (Fv/Fm), el rendimiento cuántico fotoquímico del fotosistema II (Y(II)) y la tasa de transporte de electrones (ETR) disminuyeron significativamente en las plantas de sustrato comparado con las de suelo. El contenido relativo de clorofilas (CRC) fue significativamente menor en plantas de sustrato debido a que se presentó una deficiencia de nitrógeno en este medio de cultivo. Del mismo modo, el área foliar y la producción de materia seca también fue menor en las plantas en sustrato que en suelo. Se acumuló mayor materia seca en los órganos foliares e inflorescencias en suelo. Se concluye que el medio de cultivo modifica la disponibilidad y por lo tanto el contenido de nutrientes en las plantas, lo que a su vez genera cambios en los parámetros fisiológicos de las plantas de Cannabis.

Palabras clave: *Cannabis sativa*, eficiencia fotoquímica, clorofila, nutrición, distribución de masa seca, medio de crecimiento de cultivo.

4.2 Introducción

Cannabis sativa L., una especie de la familia Cannabácea, presenta una larga historia como cultivo recreacional y/o medicinal, y su conocimiento como planta multipropósito se remonta a miles de años atrás (Ren *et al.,* 2021). El requerimiento para la producción de Cannabis ha aumentado con la expansión global de la legalización de la utilización médica y recreativa durante la última década (Caulkins *et al.,* 2012; Pacula y Smart, 2017). Debido a una mejor comprensión sobre la fisiología y manejo agronómico de esta planta, se estima

que el mercado mundial de Cannabis alcanzará los 90.400 millones de USD para el año 2026 (Lyu *et al.,* 2022). De esta manera, la demanda creciente de Cannabis está aumentando la necesidad investigación sobre los sistemas de producción y manejo para lograr un alto rendimiento y calidad.

Uno de los parámetros determinantes del comportamiento agronómico es el rendimiento fotosintético, ya que la fotosíntesis es el principal proceso que afecta la productividad, y cualquier factor que la altere modifica el rendimiento agronómico de los cultivos (Wungrampha *et al.,* 2018). El efecto de diferentes medios de cultivo sobre la fisiología en Cannabis medicinal, que sepamos, no se ha estudiado en el mundo, sin embargo, en plantas de cáñamo se ha encontrado que los cambios de suelo a sustrato pueden modificar el desarrollo produciendo alteraciones en la morfología, anatomía y fisiología de la planta (Akram *et al.,* 2021). En uno de los primeros estudios en Cannabis medicinal, determinaron la respuesta fotosintética a las densidades de flujo de fotones, la temperatura y las condiciones de CO_2 (Chandra *et al.* 2008 y 2011). Yep *et al.* (2020) evaluaron los efectos de la zona de raíces en la fisiología de la planta cultivando dos variedades tipo psicoactiva en tres sistemas de producción distintos (hidroponía, turba+residuos de acuicultura y acuaponía). En este estudio se encontró que hubo un efecto significativo en la zona de raíces en la mayoría de los rasgos fisiológicos y de crecimiento medidos; las plantas se desempeñaron mejor en la zona radical hidropónica produciendo entre un 42 y un 116 % más de biomasa de inflorescencias que los otros sistemas radicales, lo que estuvo directamente relacionado con la disponibilidad de macronutrientes del sustrato y el contenido de nutrientes foliar. En un estudio anterior, se observó un mayor contenido de clorofila en las variedades con mayor fotosíntesis máxima, y se encontró que el contenido relativo de THC tiene un efecto en el contenido de carotenoides (Chandra *et al.,* 2011).

La mayoría de los estudios fisiológicos se han publicado para el cáñamo con un enfoque en la respuesta fotosintética y el rendimiento de biomasa con condiciones variables como temperatura, disponibilidad de agua, nitrógeno y nutrición mineral (Amaducci *et al*., 2002; Finnan y Burke, 2013; Aubin *et al.*, 2015; Tang *et al*., 2017, 2018; Papastylianou *et al*., 2018). Dado que la respuesta fisiológica de las plantas de Cannabis medicinal puede diferir de las plantas de cáñamo debido a las diferencias genéticas y químicas, es importante entonces, tener una comprensión clara de los factores que determinan el desempeño fotosintético óptimo para el Cannabis medicinal (Hussain *et al.,* 2021).

Además de la estructura genética (Sawler *et al.*, 2015; Welling *et al*., 2016) y la quimiotaxonomía (Hazekamp *et al.*, 2004), cualquier modificación en el manejo agronómico de plantas de Cannabis, va a afectar su fisiología, generando respuestas en la fotosíntesis, conductividad estomática, respiración, temperatura foliar y señalización bioquímica (Giraldo *et al.,* 2010). Esto muchas veces se evidencia en el funcionamiento del PSII, en el contenido de clorofila y en el cierre estomático que causa la disminución de la fijación de CO_2, y reducción en la eficiencia fotosintética y la transpiración (Sánchez-De-Miguel *et al.,* 2009; Tambussi, 2011; Tarqui-Delgado *et al.,* 2017). Por lo tanto, es importante gestionar la eficiencia fotoquímica para mantener un equilibrio entre el

rendimiento y posible daño a la planta que pueda suceder como consecuencia de un estrés (Pinnola y Bassi, 2018; Murchie y Ruban, 2020). Asimismo, la fotosíntesis, juega un papel clave en la determinación de la tasa de crecimiento de la planta de Cannabis, ya que es la principal fuente de carbono y energía (Chandra *et al*., 2008). Por lo tanto, una mayor actividad fotosintética puede contribuir a un mayor rendimiento de la planta (Mia *et al.,* 2010). Así entonces, la fotosíntesis se convierte en una herramienta fisiológica valiosa para la selección de plantas en una condición ambiental particular (Joshi y Palni, 2005; Monclus *et al.,* 2006) o para la selección de condiciones ambientales adecuadas para una especie de planta en específico (Chandra *et al.,* 2008).

El objetivo de este estudio fue determinar los parámetros fisiológicos relacionados con el rendimiento fotosintético en tres variedades de Cannabis sembradas en condiciones de suelo y sustrato para momentos clave del cultivo que permitan predecir el comportamiento del rendimiento de las plantas.

4.3 Materiales y Métodos

4.3.1 Material vegetal y establecimiento del experimento

La investigación se realizó en la finca El Candil, Lote Guacachica, La Conejera, Bogotá, Colombia (4°47'02,6" N, 74°06'10,9" O). Se emplearon 3 variedades no psicoactivas de Cannabis medicinal: Souce Cauca (SC), Calotoweed (CW) y Higthcol (HC) (Tabla suplementaria 1) proporcionadas por la compañía Medcolcanna S.A.S. Las plántulas se obtuvieron a partir de esquejes enraizados de 4 semanas de edad y se crecieron bajo invernadero con temperatura promedio de 16,39 °C, humedad relativa de 76,21 %, intensidad de luz diaria promedio de 16,7 mol m^{-2} s^{-1}, radiación fotosintéticamente activa (PAR) promedio de 282,61 µmol $m^{-2}s^{-1}$ (Figura suplementaria 1) y fotoperiodo natural (12/12 h luz/oscuridad). Las tres variedades se sembraron en junio de 2020 en condiciones de suelo y sustrato (Sustracoco Germiplus®, Fibra de coco 70%, perlita 30%), para un total de seis tratamientos que corresponden a la interacción entre las variedades y el medio de producción.

Las plantas se trasplantaron en materas plásticas de 12 L con sustrato o en camas elevadas de 0,80 m de ancho con suelo, bajo una densidad de siembra de 4 plantas m^{-2}. Se estableció un fotoperiodo durante la fase vegetativa de 18/6 luz/oscuridad el cual se suplementó con iluminación artificial haciendo uso de luminarias LED Sylvania ® de 30W durante 38 noches. Posteriormente las plantas crecieron bajo condiciones naturales de fotoperiodo (12/12). Las plantas se regaron y fertirregaron con un sistema de riego por goteo en el suelo y sistema de riego localizado tipo araña con 2 estacas inyectoras cada planta en el sustrato. Se fertilizó 5 días a la semana durante el ciclo de cultivo hasta dos semanas antes de la cosecha. Se estableció una fórmula de fertilización diferencial para las fases vegetativa y floración de acuerdo con lo reportado por Cockson *et al.* (2019) con algunas modificaciones (Tabla 4-1), la cual fue aplicada tanto en suelo como en sustrato. Durante todo el ciclo de cultivo se realizó la medición del potencial de hidrogeniones (pH)

y conductividad eléctrica (CE) de drenaje y gotero con un medidor portátil de temperatura y pH/EC/TDS HI 9813-6 (distribuido por Hanna Instruments, Bogotá, Colombia). Se realizó poda bajera de los tres nudos basales a los 54 ddt y 80 ddt.

Tabla 4-1. Fórmula de fertilización en partes por millón (ppm) para la etapa vegetativa y floración utilizada en los medios de cultivo suelo y sustrato para plantas de Cannabis medicinal.

Nutriente	Vegetativo	Floración 1*	Floración 2
N	161	37	53
P	64	35	51
K	224	176	251
Ca	144	46	65
Mg	77	45	64
Mn	6	5	6
Fe	6	5	6
Cu	6	7	11
Zn	1,7	7	11
B	0,7	0,5	0,7
S	107	111	157

*Fórmula utilizada durante 5 días después de iniciada la fase de floración. Posteriormente se utilizó la fórmula floración 2.

Cada tratamiento se estableció en un área de 72,53 m^2 en 5 camas de manera aleatoria, utilizando un diseño en bloques (medio de cultivo) completos al azar con parcelas divididas (variedades). Se realizaron 5 repeticiones por tratamiento y la unidad experimental consistió en 37 plantas. Las variables fisiológicas relacionadas con parámetros fotosintéticos se midieron a los 20, 35, 50, 65, 80 y 95 ddt en 3 plantas por repetición por tratamiento (n=15).

4.3.2 Medición de variables nutricionales y fisiológicas

4.3.2.1 Contenido foliar de nutrientes

Adicionalmente se determinó el contenido foliar de nutrientes a los 15, 46 y 90 ddt. El N se determinó según Kjeldahl; P y B por colorimetría; K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Cu y Zn por absorción atómica; y S por turbidimetría, siguiendo la metodología propuesta por Hussain *et al.* (2013) en el Laboratorio de Aguas y Suelos de la Universidad Jorge Tadeo Lozano (Cundinamarca, Colombia).

4.3.2.2 Eficiencia Fotoquímica

La eficiencia fotoquímica se midió con un analizador de fluorescencia de amplitud de pulso modulado (JUNIOR-PAM, Walz, Germany) en una hoja completamente expandida del tercio superior entre las 08:30 y las 12:00 h. Se evaluaron las variables de tasa de transporte de electrones del fotosistema II (PSII) (ETR), el rendimiento cuántico máximo potencial del PSII (Fv/Fm), Rendimiento cuántico fotoquímico del PSII (YII) y el Quenching

no fotoquímico (NPQ). Fo' y Fm' se determinó a la densidad de flujo de fotones fotosintéticos incidente (PPFD). Fm y Fo fueron determinados en las mismas hojas después de un periodo de adaptación de 1 h en oscuridad. Para medir la fluorescencia saturada, se utilizó un pulso de luz con un PPFD de 2000 µmol (fotón) $m^{-2}s^{-1}$. Todos los parámetros de fluorescencia de la clorofila se calcularon de acuerdo con los métodos propuestos por Stirbet *et al.* (2018).

4.3.2.3 Conductancia estomática y temperatura foliar

La conductancia estomática (gs) se determinó con un porómetro de hoja Decagon SC-1 (Decagon Devices, Inc., Pullman, Washington) en la misma hoja donde se determinó la eficiencia fotoquímica, entre las 10:00 y las 13:00 h. Además, se determinó la temperatura de la hoja en una hoja superior completamente expandida con un termómetro infrarrojo Extech (Extech instruments, US). Se tomaron 5 mediciones por hoja y el valor final se definió como el promedio de las mediciones.

4.3.2.4 Contenido relativo de Clorofilas

El contenido relativo de clorofilas (CRC) se determinó con un clorofilómetro SPAD-502 plus (Konica Minolta, Osaka, Japan) en una hoja totalmente expandida del tercio superior de la planta, tomando 5 mediciones en el foliolo central, en la parte media sin tocar la nervadura principal. El dato final se tomó como el promedio de las mediciones realizadas.

4.3.2.5 Área foliar

El área foliar (AF) se midió haciendo uso del software ImageJ®. Para ello se separaron los foliolos principales y secundarios de cada planta. Se dispusieron sobre hojas de papel blanco y se realizó el registro fotográfico. Se analizaron 3 plantas por repetición.

4.3.2.6 Distribución de biomasa

Para determinar la acumulación de biomasa en cada uno de los órganos de la planta, se cosecharon las plantas y se separaron sus órganos en tallo, hojas, ramas e inflorescencias, de acuerdo con su estado de desarrollo. Se registraron los pesos frescos y luego cada órgano se llevó a una estufa de secado a 65 °C hasta que alcanzaron peso constante (aproximadamente 48 horas) con el fin de obtener el peso seco. Se hizo uso de una balanza digital de mesa MIX A3000 (Trumax, Bogotá, Colombia).

4.3.3 Análisis estadístico

Los datos fueron analizados con el paquete estadístico R (versión 4.1.0). Se realizó un análisis de componentes principales (PCA) para cada uno de los medios de cultivo (suelo y sustrato) evaluados. A través de un gráfico Biplot se observa la contribución de cada variable y su asociación con cada uno de los tratamientos planteados, para ello se hizo uso de las librerías “FactorExtra” y “FactorMineR”. Para cada variable fisiológica medida los resultados se evaluaron con ANOVA en una vía, con verificación de supuestos de normalidad y efecto de los tratamientos mediante la prueba de comparación múltiple de Tukey ($p \leq 0,05$). Finalmente se realizó un análisis de varianza multivariado (MANOVA) con

el fin de evidenciar si existen diferencias a través del tiempo para los tratamientos planteados (Friedrich y Pauly, 2018) haciendo uso de la librería “MANOVA.RM”. El análisis se realiza a partir de 10000 iteraciones y se determina la estadística tipo ANOVA modificada (MATS) y el p–valor de remuestreo a partir del enfoque bootstrap paramétrico (paramBS). Para determinar las diferencias significativas se realizó la prueba multivariada post hoc Tukey (p≤0,05).

4.4 Resultados

4.4.1 El contenido nutricional foliar varía a través del tiempo en plantas de Cannabis sembradas en sustrato vs. suelo

El contenido nutricional foliar de las plantas evaluado a los 15, 46 y 90 ddt muestra diferencias significativas entre medio de cultivo*día (p<0,001) y para los tratamientos (p<0,05) en cada uno de los nutrientes determinados (Tabla 4-2). El contenido de N disminuyó progresivamente desde los 15 ddt hasta los 90 ddt siendo mucho más significativa la reducción en las tres variedades de sustrato. El P por el contrario presentó un aumento a los 90 ddt comparado con los 15 ddt. Sin embargo, se presentó en niveles excesivos durante todo el ciclo de evaluación de acuerdo con los niveles reportados para esta planta. El K y el Ca presentó un incremento a los 46 ddt y posterior disminución en los tres puntos de evaluación a excepción de HC en sustrato para Ca, sin embargo, a los 90 ddt estos dos nutrientes disminuyeron, siendo el K más bajo en plantas de sustrato para CW y SC y en suelo para HC. El Ca por el contrario se redujo en las tres variedades sembradas en sustrato. Sin embargo, ni el K, ni el Ca se presentaron en niveles deficitarios de acuerdo con lo reportado para estas plantas. El Mg presentó una disminución entre los 15 y los 90 ddt, sin embargo, en sustrato, estuvo por encima de los niveles. En suelo se presentó una reducción significativa a los 90 ddt. El S y B en general se presentaron en niveles limitantes tanto en las plantas de suelo como de sustrato. El Mn y Cu aumentaron significativamente su concentración foliar en el ciclo de cultivo tanto en suelo como en sustrato, siendo más alta en los tres puntos de muestreo en las variedades de sustrato. El Fe y Zn se presentaron en concentraciones superiores al máximo reportado durante los tres puntos evaluados, sin embargo, en sustrato, la concentración foliar siempre fue menor comparado con suelo.

Tabla 4-2. Contenido de macronutrientes y micronutrientes en el follaje para las variedades Souce Cauca (SC), Calotoweed (CW) y Higthcol (HC) sembradas en condiciones de suelo y sustrato. Se presentan los valores para los 15, 46 y 90 ddt (n=3). El color rojo en el mapa de calor indica niveles superiores al máximo reportado, verde en el rango ideal y naranja por debajo del mínimo reportado por Cockson *et al.* 2019.

		Contenido nutricional foliar										
		%						ppm				
ddt	**Tratamiento**	**N**	**P**	**K**	**Ca**	**Mg**	**S**	**Fe**	**Mn**	**Cu**	**Zn**	**B**
15	CW-Suelo	4,94	0,43	2,77	3,27	0,80	0,28	236,00	66,60	7,40	63,10	49,50
	CW-Sustrato	5,13	0,56	2,87	3,27	1,33	0,30	177,00	100,30	7,60	57,57	49,13

	HC-Suelo	4,43	0,44	2,63	3,73	0,84	0,32	195,00	70,63	7,27	65,70	48,40
	HC-Sustrato	5,14	0,60	3,33	3,30	1,30	0,27	173,67	102,87	7,57	62,53	44,53
	SC-Suelo	4,35	0,40	3,13	4,07	0,84	0,28	197,00	55,77	6,20	65,07	43,33
	SC-Sustrato	5,03	0,59	3,17	3,60	1,47	0,26	205,33	96,17	7,23	66,13	49,00
46	CW-Suelo	4,41	0,45	3,17	4,80	0,88	0,26	207,33	58,37	6,33	50,93	65,33
	CW-Sustrato	3,87	0,51	3,00	3,20	0,92	0,24	222,00	102,50	6,17	48,10	85,37
	HC-Suelo	4,47	0,40	3,27	3,93	0,89	0,21	163,00	29,63	5,80	47,40	53,43
	HC-Sustrato	3,66	0,51	2,97	2,43	0,84	0,22	134,67	65,57	5,23	54,80	76,97
	SC-Suelo	4,61	0,41	3,33	3,60	0,71	0,22	209,67	47,17	5,27	47,77	48,63
	SC-Sustrato	3,69	0,52	3,10	3,17	0,83	0,22	188,33	96,10	5,50	55,87	64,03
90	CW-Suelo	3,48	0,80	2,33	2,47	0,73	0,30	305,33	102,03	13,73	113,33	48,63
	CW-Sustrato	2,71	0,84	2,00	1,97	0,82	0,27	279,33	180,00	17,33	98,33	50,93
	HC-Suelo	3,75	0,85	1,97	2,23	0,66	0,28	340,00	91,33	14,13	110,33	36,97
	HC-Sustrato	2,88	0,85	2,20	1,50	0,85	0,25	152,33	132,27	14,67	75,53	48,83
	SC-Suelo	3,61	0,91	1,87	2,30	0,70	0,30	344,00	126,33	12,80	109,90	43,40
	SC-Sustrato	2,82	0,85	2,00	2,13	0,86	0,27	287,33	205,67	18,93	90,93	48,90
	MIN*	**3,20**	**0,24**	**1,80**	**1,47**	**0,40**	**0,16**	**99**	**40,00**	**4,90**	**23,00**	**55,00**
	MAX*	**4,30**	**0,36**	**2,09**	**2,90**	**0,61**	**0,22**	**125**	**67,00**	**6,10**	**38,00**	**80,00**
	Significancia	***	***	***	***	***	***	*	**	***	***	**

*Valores máximos y mínimos tomados de Cockson *et al.* (2019). NS, *, ** o *** no significativo o significativo a p < 0,05, 0,01, 0,001, respectivamente.

4.4.2 Las tres variedades de *Cannabis sativa* L. sembradas en suelo y sustrato presentan correlaciones diferenciales respecto a las variables relacionadas con el rendimiento fotosintético

Las tres variedades presentan diferencias en las variables fisiológicas tanto en suelo como en sustrato, sin embargo, entre ellas no hay diferencias (Figura 4-1). En el PCA se observa que los dos primeros componentes explican el 68% de la variación (Figura 4-1A). Las variables que contribuyen en mayor proporción al primer componente (45,3%) son el peso seco de las ramas (PSR), el área foliar (AF), que muestran una alta correlación entre sí; el peso fresco de las ramas (PFR) y el peso fresco del tallo (PFT). En menor proporción contribuyen el peso fresco y seco de la inflorescencia (PFIn y PSIn, respectivamente) y el peso seco de las hojas (PSH). El PSIn y PFIn tienen una alta correlación. El segundo componente (22,7%) se explica principalmente por el Rendimiento cuántico fotoquímico del PSII (YII), el quenching no fotoquímico (NPQ), el rendimiento cuántico potencial del PSII (Fv/Fm) y el contenido relativo de clorofilas (SPAD). Ninguna de estas variables está altamente correlacionada entre sí. Las variables que no tienen una alta influencia en la variación observada son la tasa de transporte de electrones (ETR), la conductancia estomática (g_s) y la temperatura foliar (tf). Sin embargo, la tf presenta una relación inversa con los pesos secos y frescos de tallos, ramas y hojas y el CRC. La g_s, ETR y Fv/Fm tienen correlación entre sí y presentan una relación inversa con el peso seco y fresco de la inflorescencia, área foliar y NPQ. Las variables fisiológicas presentan diferencias entre las

plantas crecidas en suelo y sustrato (Figura 4-1B). En suelo la variación está explicada principalmente por los pesos secos y frescos de ramas, hojas, tallo, el CRC y la tf, mientras que en el sustrato la variación está dada por las variables de eficiencia fotoquímica y pesos secos y frescos de las inflorescencias. Así entonces, estas variables podrían usarse como variables predictivas la respuesta fisiológica y de rendimiento de las plantas.

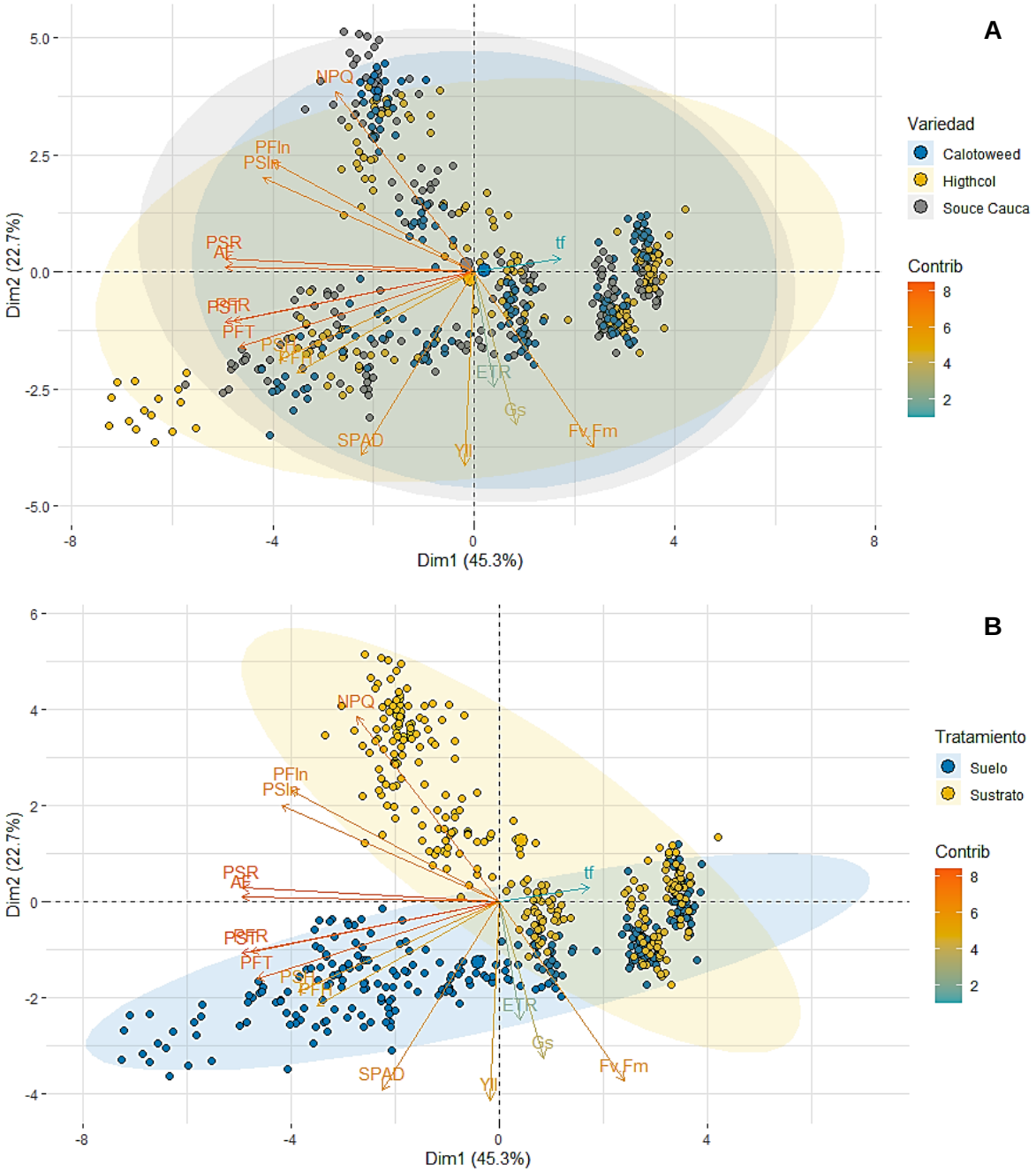


Figura 4-1. PCA Biplot de las variables fisiológicas relacionadas con el rendimiento fotosintético en tres variedades de *Cannabis sativa* L., Souce Cauca, Calotoweed y

Higthcol en suelo y sustrato. **A.** PCA-Biplot para las tres variedades y **B.** PCA-Biplot para los dos medios de cultivo. Las variables con las flechas de mayor longitud y en la escala de colores cálidos representan una mayor contribución.

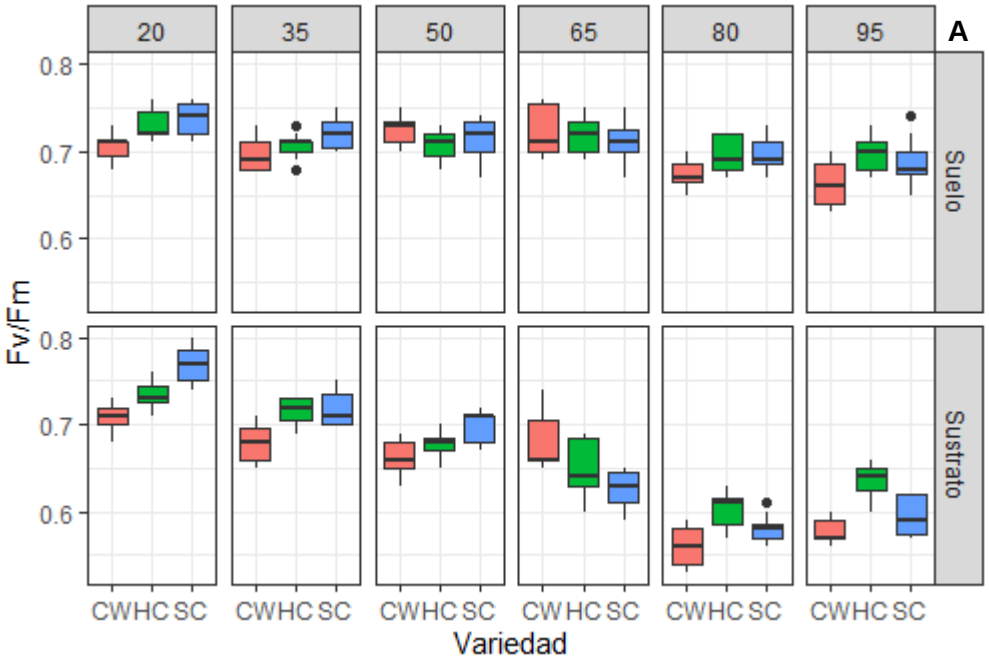
4.4.3 La eficiencia fotoquímica de las plantas en sustrato es más baja que las plantas en suelo después de iniciada la etapa de floración

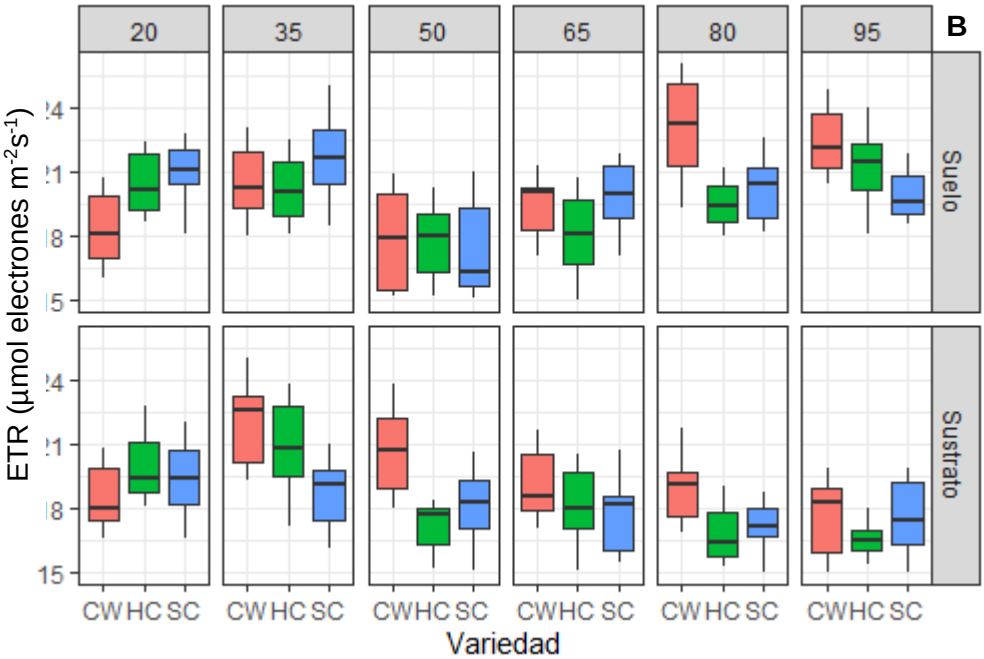
Para las variables relacionadas con la eficiencia fotoquímica se presentaron diferencias entre los tratamientos de suelo y sustrato y los días evaluados ($p \leq 0,001$) y entre los días y las variedades ($p \leq 0,05$). Hasta los 35 ddt no se observaron diferencias en la eficiencia cuántica potencial del PSII (Fv/Fm), entre las plantas cultivadas en sustrato y suelo, presentándose diferencias sólo entre las variedades (Figura 4-2 A). Sin embargo, después de los 50 ddt se observan diferencias significativas entre las plantas en suelo y sustrato, presentando los mayores valores las plantas de suelo (entre 0,66 y 0,72) comparado con las plantas de sustrato (entre 0,56 y 0,69). Después de los 65 ddt se observó que las variedades en sustrato presentan una disminución en Fv/Fm (entre 0,55 y 0,65), lo que sugiere la presencia de daños en el PSII.

La tasa de transporte de electrones (ETR) después de los 65 ddt presentó diferencias entre las plantas en suelo y sustrato, siendo mayor en las plantas en suelo comparadas con las plantas de sustrato (Figura 4-2 B). Las plantas de CW, tanto en suelo como en sustrato, presentaron una mayor ETR, seguida de SC y HC. En plantas en suelo, después de los 65 ddt, la ETR presentó valores de entre 18 y 23, mientras que en sustrato estuvieron entre 17 y 19.

La energía absorbida por la clorofila utilizada en la actividad fotoquímica (YII), en plantas en suelo aumenta a lo largo del ciclo de cultivo, lo que contrasta con el sustrato, donde se observa disminución progresiva para las tres variedades hasta los 95 ddt (tratamiento $p \leq 0,001$) (Figura 4-2 C). Esto indica que las tres variedades presentaron una condición de estrés, lo que afectó el proceso fotosintético después de los 50 ddt. Entre variedades se observaron diferencias significativas en YII, siendo HC en suelo la que presentó mayores valores, mientras que en sustrato SC presentó los mayores (excepto a los 20 ddt), lo que indica un comportamiento diferencial de las variedades en los medios de cultivo.

La disipación de la energía en forma de calor (NPQ), aumentó a través del tiempo para las plantas en suelo y sustrato (Figura 4-2 D). Sin embargo, en suelo los valores nunca estuvieron por encima de 0,2, por el contrario, en las tres variedades en sustrato el NPQ, después de los 50 ddt, fue casi el doble del máximo presentado en suelo, con diferencias significativas, lo que indica una alta disipación de energía por calor. Entre variedades no se presentaron diferencias estadísticas significativas.


A
20
35
50
65
80
95
Suelo
Sustrato
Fv/Fm
0.8
0.7
0.6
CW HC SC
Variedad


B
20
35
50
65
80
95
Suelo
Sustrato
ETR (µmol electrones m-2s-1)
CW HC SC
Variedad

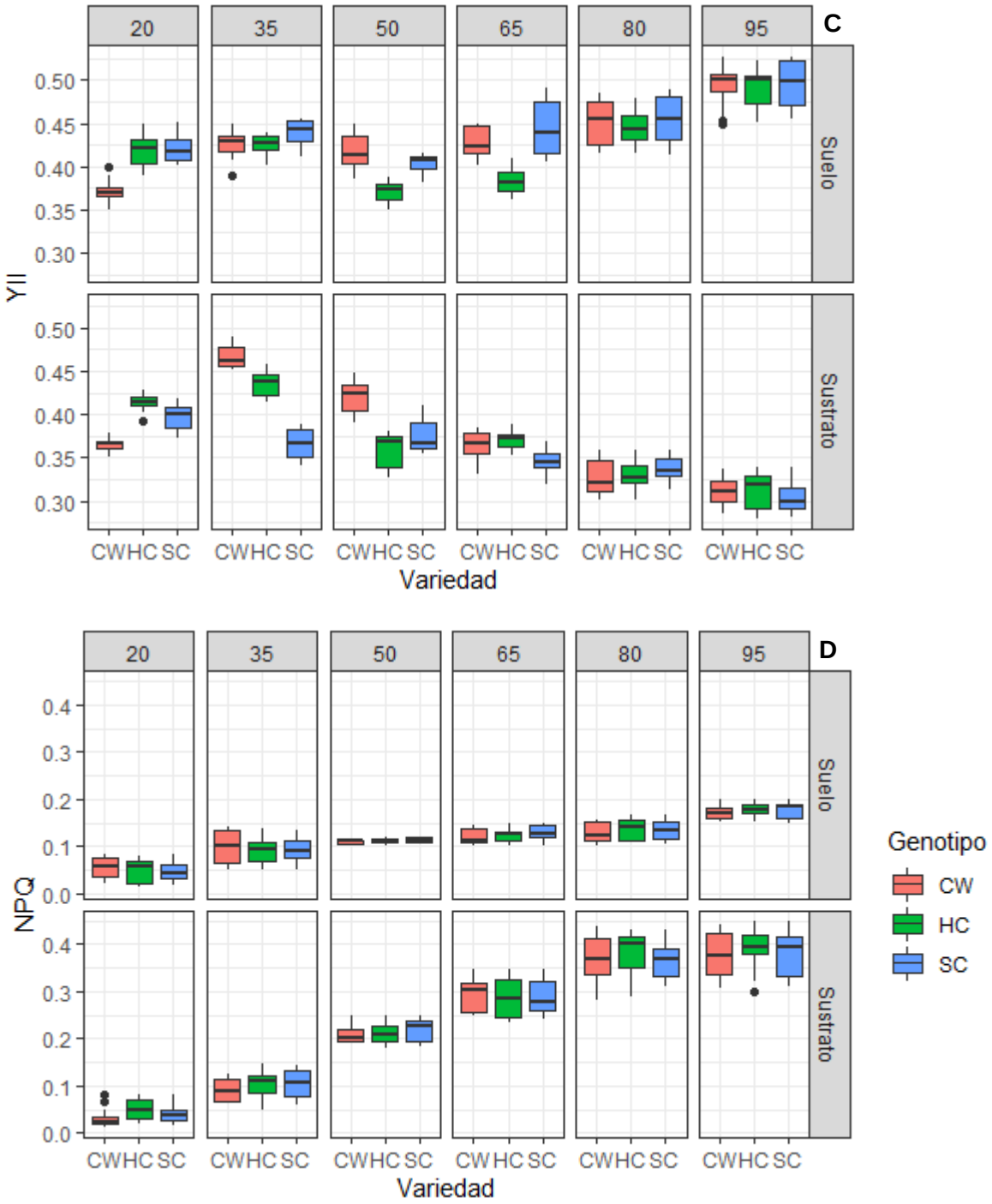
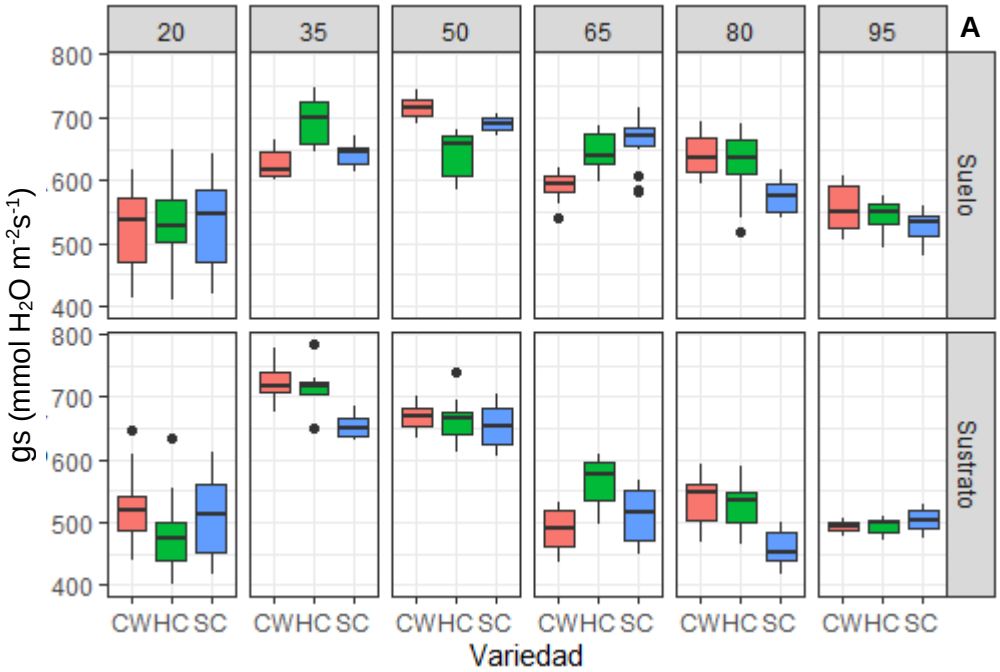


Figura 4-2. Efecto del cultivo de Cannabis en suelo y sustrato sobre **A.** Eficiencia cuántica potencial del PSII (Fv/Fm), **B.** Tasa de transporte de electrones (ETR), **C.** Rendimiento cuántico fotoquímico del PSII (YII) y **D.** Quenching no fotoquímico (NPQ) en tres variedades de *Cannabis sativa* L. (SC: Souce Cauca, HC: Higthcol, CW: Calotoweed). Los datos se presentan como la media de las repeticiones. Las cajas rojas representan la variedad CW, las cajas azules la variedad SC y las cajas verdes la variedad HC.

4.4.4 Las variables relacionadas con el intercambio gaseoso se modifican en las plantas de sustrato en plena floración.

La conductancia estomática (g_s) aumentó a través del tiempo hasta los 50 ddt para todos los tratamientos (Figura 4-3 A). Después de los 65 ddt, g_s en las plantas de suelo fue significativamente mayor que las plantas en sustrato, pero no se observaron diferencias entre variedades. Después de los 65 ddt g_s disminuyó en las tres variedades para suelo y sustrato. Los valores de g_s estuvieron entre 456,07 y 723,4 mmol de H_2O $m^{-2}s^{-1}$ para todos los tratamientos durante el ciclo del cultivo.

Las plantas en suelo hasta los 50 ddt presentaron la mayor temperatura foliar, sin embargo, a los 65, 80 y 95 ddt las plantas en sustrato presentaron los mayores valores de temperatura foliar, sin diferencias significativas entre las variedades (Figura 4-3 B). Entre variedades no se presentó una tendencia particular. En las plantas de suelo los valores de temperatura foliar oscilaron entre 20,9 y 30,5 °C y en las plantas de sustrato entre 20,79 y 28,7 °C.



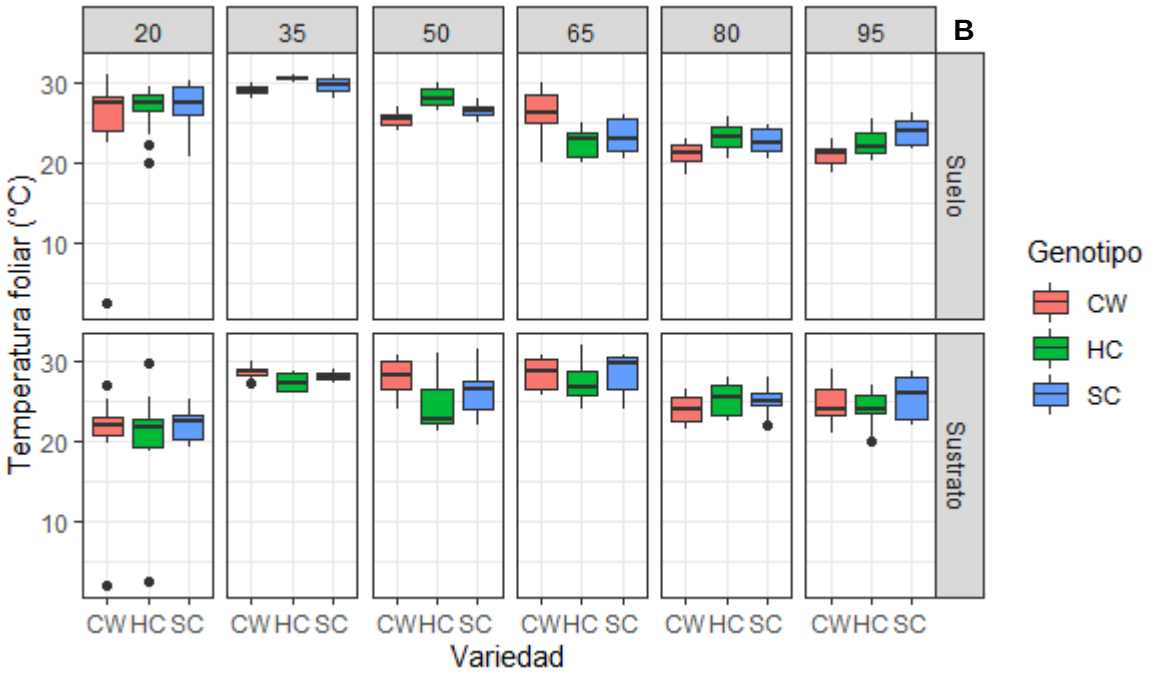


Figura 4-3. Efecto del cultivo de Cannabis en suelo y sustrato sobre **A.** Conductancia estomática (g_s) y **B.** Temperatura foliar (°C) en tres variedades de *Cannabis sativa* L. (SC: Souce Cauca, HC: Higthcol, CW: Calotoweed). Los datos se presentan como la media de las repeticiones. Las cajas rojas representan la variedad CW, las cajas azules la variedad SC y las cajas verdes la variedad HC.

4.4.5 Las plantas de sustrato presentan una disminución en el contenido relativo de clorofilas después de la diferenciación floral.

En el CRC, se presentan diferencias significativas entre las variedades cultivadas en suelo y sustrato, entre los días y entre variedades ($p \leq 0{,}001$) (Figura 4-4). La variedad HC en suelo presentó el mayor CRC durante el ciclo de cultivo (52,58 SPAD) seguido de SC (49,43 SPAD) y CW (49,02 SPAD), estas dos últimas sin diferencias significativas. En las plantas en sustrato las variedades presentaron las mismas diferencias que en suelo. Sin embargo, en las variedades SC y CW en sustrato se observó después de los 65 ddt una disminución gradual del CRC, con diferencias significativas respecto HC en sustrato y las plantas en suelo. Los valores promedio de CRC en unidades SPAD de las variedades cultivadas en sustrato durante los seis puntos de muestreo fueron 46,38 (HC), 42,06 (CW) y 38,10 (SC).

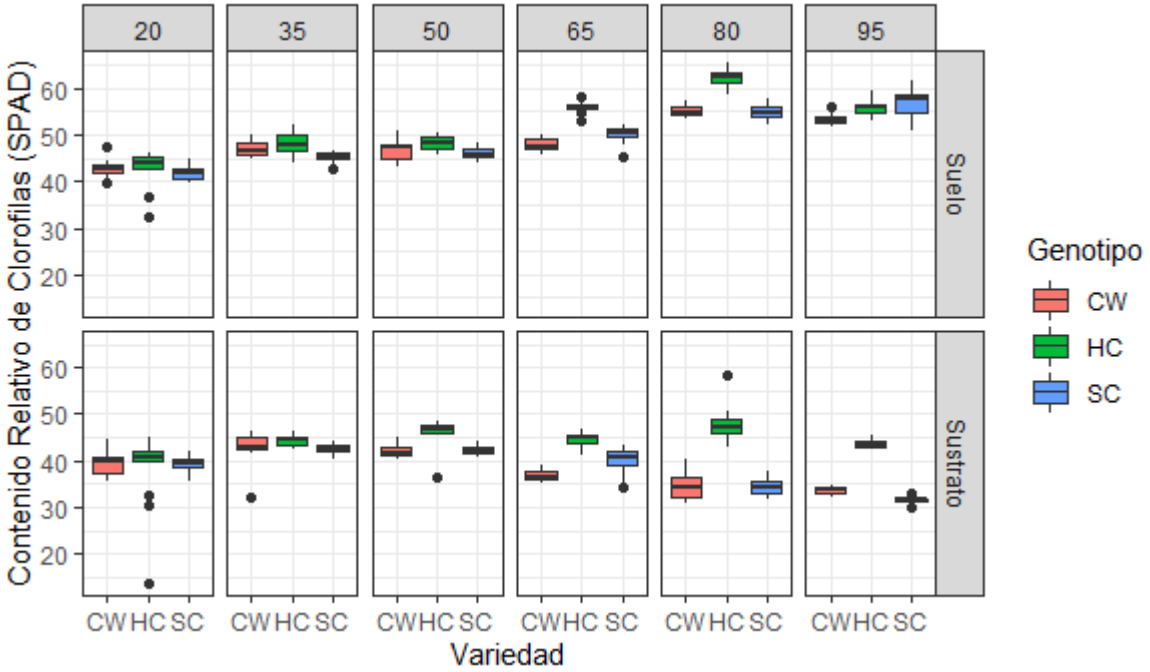


Figura 4-4. Efecto del cultivo de Cannabis en suelo y sustrato sobre el contenido relativo de clorofilas en unidades SPAD en tres variedades de *Cannabis sativa* L. (SC: Souce Cauca, HC: Higthcol, CW: Calotoweed). Los datos se presentan como la media de las repeticiones. Las cajas rojas representan la variedad CW, las cajas azules la variedad SC y las cajas verdes la variedad HC.

4.4.6 Las plantas en suelo presentan una mayor área foliar y distribución de masa seca aérea después de iniciada la etapa reproductiva

El AF presentó diferencias significativas entre los tratamientos de suelo y sustrato y los días evaluados ($p \leq 0,05$). Para los dos tratamientos el área foliar aumentó (Figura 4-5A), sin embargo, el incremento es mucho menor en las plantas sembradas en sustrato, y hay una reducción a los 95 ddt para las tres variedades evaluadas en sustrato. En suelo se alcanzaron valores de AF por encima de 10.000 cm^2, mientras que en sustrato los valores máximos promedios fueron de alrededor de 9000 cm^2. La variedad con mayor área foliar tanto en suelo como en sustrato fue la variedad SC. En las primeras etapas de cultivo (hasta los 50 ddt) CW tenía una mayor área foliar comparado con la variedad HC. Después de los 65 ddt HC presentó una mayor área foliar en los dos medios de cultivo. Se observó una variación asociada a la variedad en el desarrollo morfológico foliar.

Durante el ciclo de cultivo las tres variedades en suelo presentaron mayor acumulación de masa seca en los órganos aéreos después de los 80 ddt (Figura 4-5 B). En CW en suelo se presentó un incremento de MS foliar progresivo hasta los 80 ddt mientras que a los 95 ddt en esta variedad se presentó una reducción debida a la poda que se realizó semanas previas a la cosecha. Esta reducción causó una disminución en la MS total de las plantas. En sustrato, la tendencia fue similar mostrando un incremento en la acumulación de MS hasta los 80 ddt. Sin embargo, se observó que la reducción de la MS en hojas se presentó

desde los 80 ddt y fue significativamente más baja a los 95 ddt. A los 80 y 95 ddt se observa la mayor acumulación de MS en la inflorescencia. Para HC tanto en suelo como sustrato se presentó un incremento gradual en la MS de todos los órganos, sin embargo, a los 95 ddt se observa una reducción de la MS foliar y un aumento significativo de la MS de la inflorescencia, siendo mayor en suelo que en sustrato. Para SC la acumulación de MS foliar fue semejante, no obstante, a los 95 ddt en sustrato el incremento en MS de la inflorescencia es mayor que en suelo, pero sin diferencias significativas con el sustrato, encontrando una acumulación total de MS muy similar entre los dos medios de cultivo.

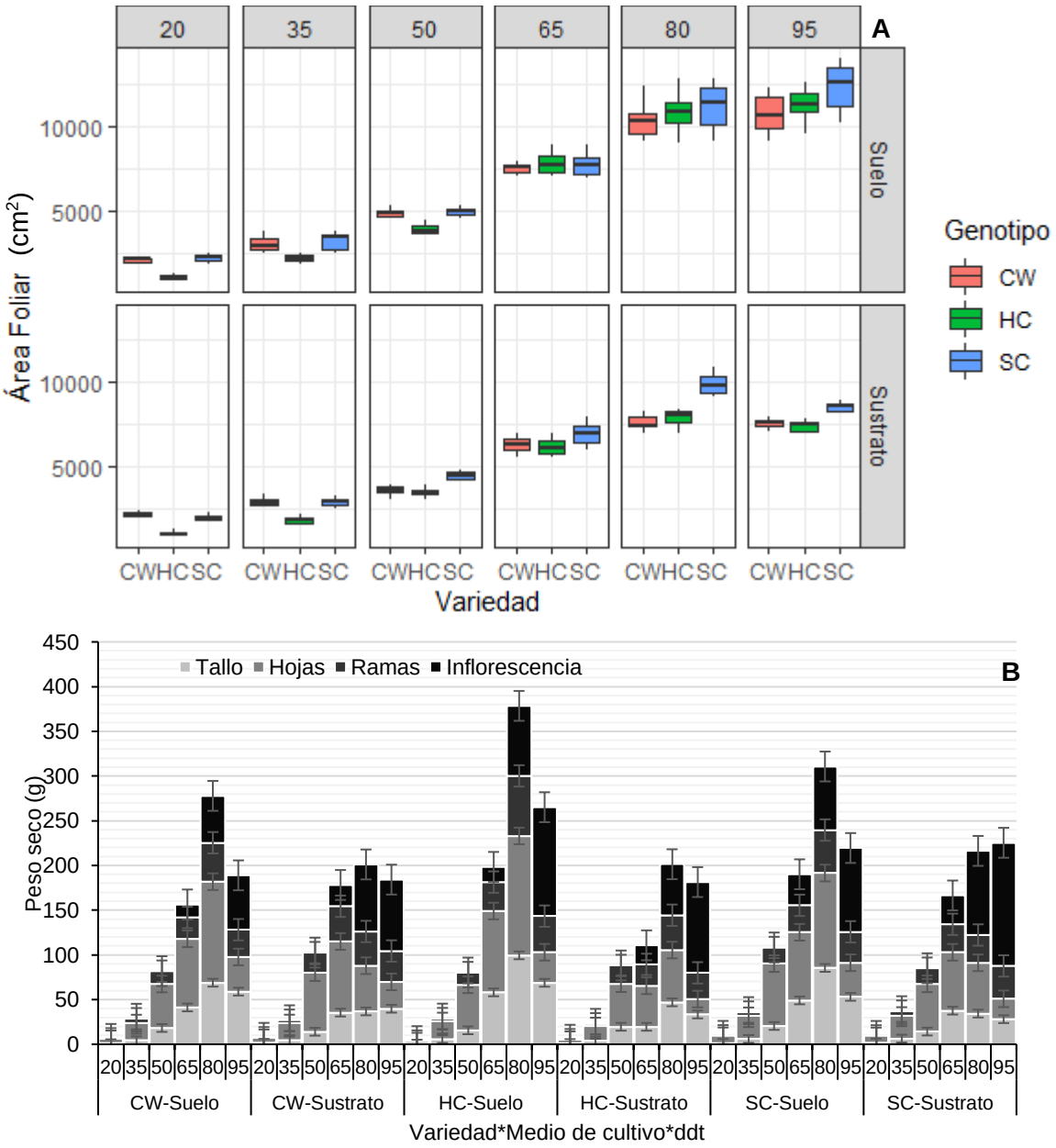


Figura 4-5. Efecto del cultivo de Cannabis en suelo y sustrato sobre **A.** Área foliar y **B.** Distribución de biomasa seca aérea en tres variedades de *Cannabis sativa* L. (SC: Souce Cauca, HC: Higthcol, CW: Calotoweed). Los datos se presentan como la media de las

repeticiones (± Error estándar). Las cajas rojas representan la variedad CW, las cajas azules la variedad SC y las cajas verdes la variedad HC en la primera figura.

El análisis de varianza multivariado para todas las variedades, medios de cultivo y días de evaluación se presenta en la Tabla suplementaria 4. Se observan diferencias significativas entre las variedades para cada uno de los tratamientos y los días después de trasplante al obtener un p-valor de remuestreo menor al 0,001. En la variedad HC no hubo diferencias significativas entre suelo y sustrato a los 20 ddt (p=1,000), 35 ddt (p=0,997), 50 ddt (p=0,953), 65 ddt (p=0,191), 80 y 65 ddt (p=1,000), 95 y 65 ddt (p=0,997). Además, no se presentaron diferencias entre suelo a los 80 y 65 ddt (p=0,079) y 95-65 (p=0,067) y para sustrato entre los 95 y 65 ddt (p=0,337) y 95 y 80 ddt (p=0,997). En SC no se presentaron diferencias significativas entre suelo y sustrato a los 20 ddt (p=1,000), entre los 35 y 20 ddt (p=0,073, p=0,060), 35 ddt (p=1,000), 50 y 35 ddt (p=0,090), 50 ddt (p=0,763), 65 y 50 ddt (0,161), 95 y 65 ddt (p=1,000), 80 ddt (p=0,962), 95 y 80 (p=0,339, p=0,732) y 95 (p=0,105). En suelo no se presentaron diferencias entre los 35 y 20 ddt (p=0,220), 80 y 65 ddt (p=0,245), 95 y 65 (p=0,081), 95 y 80 (p=1,000); y en sustrato únicamente entre los 95 con los 65 (p=0,164) y 80 ddt (p=0,690). Finalmente, el HC no se presentaron diferencias significativas entre suelo y sustrato a los 20 ddt (p=0,001), 20 y 35 ddt (p=0,306), 35 ddt (p=1,000), 50 y 35 ddt (p=0,527), 65 y 50 ddt (p=0,191), 65 ddt (p=0,340), 80 y 65 ddt (p=1,000), 80 y 95 ddt (p=0,193), 95 ddt (p=0,117). En suelo no se presentaron diferencias entre los 20 y 35 (p=0,170), 95 y 65 ddt (p=0,103), 95 y 80 ddt (p=1,000); y en sustrato entre los 50 y 35 ddt (p=0,090), 80 y 65 ddt (p=0,307), 95 y 65 ddt (p=0,241) y entre los 90 y 80 ddt (p=1,000).

4.5 Discusión

La investigación en el cultivo de *C. sativa* en la actualidad se ha enfocado en el mejoramiento de la eficiencia y productividad en el sector industrial y medicinal. Un aspecto importante que afecta el rendimiento bajo condiciones de invernadero son los medios de cultivo ya que modifican la fisiología de la planta y por tanto su rendimiento. Los productores de *C. sativa* en la actualidad usan diferentes medios de cultivo como turba y fibra de coco, sin embargo, que sepamos, no se ha caracterizado el efecto que éstos tienen en la fisiología de la planta. En este estudio se encontró que el medio de cultivo, sustrato o suelo modifica el comportamiento de algunos parámetros fisiológicos.

El contenido nutricional de las plantas de Cannabis fue variable en el tiempo (Tabla 4-2), siendo marcada la deficiencia de N en las plantas en condiciones de sustrato cerca a la cosecha (90 ddt), la cual aumentó a través del tiempo, observándose síntomas de deficiencia en las plantas. Inicialmente, las plantas desarrollaron una clorosis generalizada en el follaje del tercio inferior. A medida que avanza la deficiencia, la clorosis se acentúa (Figura suplementaria 3) y algunas hojas se necrosan y se presentan absición. Posteriormente esta sintomatología se extiende al tercio medio de la planta. Esta sintomatología de deficiencia de N en plantas de Cannabis ha sido reportada por Coffman

y Gentner (1977), Aubin *et al.* (2015), Papastylianou *et al.* (2018), Cockson *et al.* (2019) y Saloner y Bernstein (2021). Dado que el N es el nutriente requerido por las plantas en mayor cantidad y está involucrado en la mayoría de los procesos metabólicos, la disponibilidad de este elemento es un factor limitante para el crecimiento y desarrollo de las plantas (Ohyama, 2010). En Cannabis el N debe estar en una concentración foliar cercana al 4,0% (Cockson *et al*., 2019), valores por debajo indican una deficiencia de este macronutriente. Además, a partir del análisis de las concentraciones de nutrientes, se ha determinado que un porcentaje foliar más bajo de N induce una disminución significativa en la absorción y acumulación de Ca, Zn y Fe, como se ha encontrado para otras especies de plantas (Kutman *et al*., 2011), lo que se relaciona a lo obtenido en la investigación ya que la concentración foliar de Ca, Zn y Fe, fue más baja en plantas de sustrato a los 90 ddt.

De otro lado, las correlaciones de las variables relacionadas con el rendimiento fotosintético muestran que algunas variables explican mayormente los resultados en suelo y otras en sustrato (Figura 4-1). En sustrato se observó una disminución de Fv/Fm, ETR y Y(II), y un aumento de NPQ, después de los 50 ddt para las tres variedades (Figura 4-2). La energía luminosa absorbida por las clorofilas asociadas con el PSII se puede utilizar para impulsar la fotoquímica en la que se transfiere un electrón (e-) desde el centro de reacción de la clorofila, P680, al aceptor primario de quinona del PSII, QA. Alternativamente, la energía luminosa absorbida puede perderse del PSII como fluorescencia de clorofila o como calor. Los procesos de fotoquímica y disipación por fluorescencia de la clorofila a y por pérdida de calor compiten directamente por la energía de excitación. Si la velocidad de un proceso aumenta, la velocidad de los otros dos disminuye (Baker, 2008). La relación Fv/Fm es proporcional a la máxima eficiencia fotoquímica primaria de las hojas y es una de las variables de fluorescencia más estudiada por numerosos autores, que han encontrado buenas correlaciones entre este parámetro y diferentes tipos de estrés (Tang *et al.,* 2017). Los valores encontrados para la variable Fv/Fm en plantas de sustrato a lo largo del cultivo (0,77 a 0,5) difieren de los valores obtenidos por Tang *et al.* (2015) en plantas de Cannabis de treinta días sin ningún tipo de estrés (0,8). Los valores observados aquí en la eficiencia fotoquímica del PSII sugieren que las plantas estuvieron sometidas a estrés nutricional (Goh, 2012; Khajuria *et al*., 2020) lo que causó una mayor disipación de la energía por una vía diferente a la fotoquímica. La presencia de estrés a nivel del aparato fotosintético en las plantas de sustrato no solo causó una reducción en la relación Fv/Fm sino también en la ETR (Figura 4-2 B). Esto es semejante a lo encontrado por Pérez-Asseff *et al.* (2007) en plantas de anamú, donde el patrón de las curvas ETR, muestra que las plantas con menor disponibilidad de N son más susceptibles a presentar bloqueos en su tasa de transporte de electrones. Estos resultados se relacionan con los valores de Fv/Fm observados aquí, ya que, al aumentar la disipación de energía por fluorescencia, se disminuye el transporte de electrones, generando una menor ETR, lo que puede traducirse en una respuesta de fotoinhibición. De la misma manera, el aumento en NPQ y la disminución de Y(II) están relacionados con la reducción en la ETR. Resultados semejantes se encontraron en plantas de girasol sometidas a estrés hídrico las cuales presentaron un aumento en la disipación de energía en forma de calor y

una disminución en la eficiencia máxima real del PSII (Jiménez-Suancha *et al.,* 2015). NPQ indica la disipación del exceso de energía en forma de calor en el complejo antena PSII, es decir, es un mecanismo de fotoprotección inducido por la luz que está estrechamente relacionado con la conversión de violaxantina a zeaxantina en el ciclo de las xantofilas (Goh, 2012).

Además de la deficiencia de N, después de los 46 ddt se presentó una rápida disminución en el K foliar para las plantas de sustrato, lo que generó al mismo tiempo una disminución en la g_s y un aumento en la temperatura foliar en comparación con las plantas de suelo durante todo el experimento (Figura 4-3). El K es el elemento más importante en el mantenimiento del equilibrio osmótico en la planta y cuando es deficiente, hay una disminución en g_s (Pettigrew, 2008; Yep *et al.,* 2020). La disminución en la g_s en los dos tratamientos puede deberse también a condición ambiental específica en la zona de estudio (Candelario-Guerrero *et al.,* 2023) que generó la disminución progresiva a través del tiempo. Sin embargo, se evidencia que no está relacionado con la temperatura y humedad relativa (Figura suplementaria 1). En plantas como tomate la deficiencia de K genera limitaciones o deficiencias en las plantas establecidas en hidroponía (Graber y Junge, 2009; Monsees *et al.,* 2017). Saloner *et al.* (2019) encontraron que esta condición puede ser prevalente y aún más limitante en *C. sativa*. En la temperatura foliar se encontraron resultados diferenciales a lo obtenido por Pino *et al.* (2019) en plantas de olivo, pues ellos afirman que a mayor g_s, mayor temperatura foliar, pero esto puede ser debido a diferencias entre la especie vegetal. Sin embargo, es importante pensar que los estomas responden directamente al estrés nutricional y tienden a cerrarse, lo que reduce la disipación de la radiación en forma de calor latente (evaporación), pero aumenta el flujo de calor sensible (temperatura).

En sustrato se encontró que cuando las variables asociadas al rendimiento fotosintético disminuyen, debido al estrés nutricional por N, también se reduce el CRC ya que este elemento es un componente estructural de las clorofilas (Figura 4-4). Para el cultivo de Cannabis, se ha reportado un CRC entre 40 y 60 SPAD como indicador de contenidos óptimos de N (Tang *et al*., 2017). De esta manera los valores reportados aquí para plantas de Cannabis de sustrato estuvieron por debajo del rango reportado indicando un daño al proceso fotosintético (Rodríguez-Yzquierdo *et al.*, 2021). Por el contrario, los niveles de CRC en plantas en suelo se encuentran dentro del rango óptimo reportado por diferentes autores (Tang *et al.*, 2017; Yep *et al.*, 2020).

La disminución de la acumulación de masa seca foliar en los últimos puntos de muestreo, tanto en suelo como sustrato, puede deberse a la poda realizada semanas previas a cosecha. Las diferencias entre plantas de suelo y de sustrato en la producción total de masa seca aérea puede deberse a la arquitectura propia de la planta que se generó en los dos medios de cultivo, pues a mayor área foliar hay mayor penetración y distribución de la radiación incidente en la planta para la producción de asimilados (Ji *et al.*, 2019). Además, la menor acumulación de masa seca en las estructuras aéreas en sustrato se podría deber a una distribución de carbono diferencial entre las partes de la planta a causa de una menor

producción de raíces en el contenedor o matera (Morales *et al.*, 2016). En cuanto a la masa seca de flor específicamente, aquí se observó que las plantas con mayor biomasa en tallos y hojas, obtuvieron la mayor acumulación de biomasa de inflorescencia. El rendimiento final de la flor de cannabis está determinado por las interacciones entre los rasgos fisiológicos y la morfología de la planta. Se ha encontrado que un aumento en la biomasa de inflorescencia se debe a un aumento en el número de flores durante el desarrollo de las yemas axilares de la planta de Cannabis, asociado a una mayor acumulación de biomasa de hojas y tallo (Lyu *et al*., 2022).

4.6 Conclusiones

Se determinaron las mediciones fisiológicas de las plantas de *Cannabis sativa* L. sembradas en condiciones de suelo y sustrato determinando el rendimiento fotosintético y generando las diferencias entre los medios de cultivo. Se encontró variación entre plantas establecidas en sustrato y suelo en el contenido nutricional de la planta, tanto en macro como micronutrientes entre los tres periodos de medición, siendo significativa la deficiencia de N y un exceso de Mg a los 90 ddt en las plantas de sustrato. La deficiencia de N, generó alteraciones en la eficiencia fotosintética de la planta disminuyendo Fv/Fm, ETR y Y(II) después de los 50 ddt. Adicionalmente, esto se relacionó con una disminución progresiva en el CRC. El estrés de tipo nutricional generó cierre estomático en las plantas disminuyendo el intercambio gaseoso representado en la g_s y aumentando la temperatura foliar después de los 50 ddt. Esto afectó el crecimiento de las plantas y por lo tanto generó una disminución en el área foliar. Al disminuir el área foliar se afecta la síntesis y producción de fotoasimilados, generando una menor acumulación de masa seca floral a los 90 ddt. También se observaron diferencias a nivel morfológico y fisiológico que indican que cada variedad buscó la manera de adaptarse al medio de cultivo establecido.

4.7 Referencias

Ač, A., Malenovský, Z., Olejníčková, J., Gallé, A., Rascher, U., y Mohammed, G. (2015). Meta-analysis assessing potential of steady-state chlorophyll fluorescence for remote sensing detection of plant water, temperature and nitrogen stress. Remote Sensing of Environment, 168, 420–436. *doi:10.1016/j.rse.2015.07.022.*

Akram, N.A., Shafiq, F., Ashraf, M., Iqbal, M., y Ahmad, P. (2021). Advances in Salt Tolerance of Some Major Fiber Crops Through Classical and Advanced Biotechnological Tools: A Review. J. Plant Growth Regul. 40, 891–905. *doi: 10.1007/s00344-020-10158-5*

Amaducci, S., Errani, M., y Venturi, G. (2002). Response of hemp to plant population and nitrogen fertilization. Ital. J. Agron. 6, 103–111.

Aubin, M., Seguin, P., Vanasse, A., Tremblay, G.F., Mustafa, A.F., y Charron, J. (2015). Industrial Hemp Response to Nitrogen, Phosphorus, and Potassium Fertilization. Crop. Forage Turfgrass Manag. 1, 1–10. *doi: 10.2134/cftm2015.0159.*

Baker, N.R. (2008). Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo. Annu Rev Plant Biol. 59, 89-113. *doi: 10.1146/annurev.arplant.59.032607.092759.*

Backer, R., Schwinghamer, T., Rosenbaum, P., McCarty, V., Eichhorn Bilodeau, S., Lyu, D., Ahmed, M.B., Robinson, G., Lefsrud, M., Wilkins, O., y Smith, D.L. (2019). Closing the yield gap for Cannabis: a meta-analysis of factors determining Cannabis yield. Front. Plant Sci. 10, 1-15. *doi: 10.3389/fpls.2019.00495.*

Candelario-Guerrero, D.A., Calabria-Parodi., L.E., Pardey-Rodríguez, C., y Vargas-Sánchez, J.J. (2023). Phenology of ten cultivars of Cannabis satival. under the environmental conditions of Palomino, La Guajira. Intropica, 18(1). *doi: 10.21676/23897864.4672.*

Caulkins, J.P., Coulson, C.C., Farber, C., y Vesely, J.V. (2012). Marijuana legalization: Certainty, impossibility, both, or neither? J. Drug Policy Anal. 5, 1–27. *doi: 10.1515/1941-2851.1035.*

Chandra, S., Lata, H., Khan, I., y Elsohly, M. (2008). Photosynthetic response of *Cannabis sativa* L. to variations in photosynthetic photon flux densities, temperature and CO2 conditions. Physiology and molecular biology of plants. 14, 299-306. *doi: 10.1007/s12298-008-0027-x*.

Chandra, S., Lata, H., Khan, I., y Elsohly, M. (2011). Temperature response of photosynthesis in different drug and fiber varieties of *Cannabis sativa* L. Physiology and molecular biology of plants. 17, 297-303. *doi: 10.1007/s12298-011-0068-4.*

Cockson, P., Landis, H., Smith, T., Hicks, K., y Whipker, B.E. (2019). Characterization of Nutrient Disorders of *Cannabis sativa*. Appl. Sci. 9, 4432. *doi: 10.3390/app9204432.*

Coffman, C.B., y Gentner, W.A. (1977). Responses of greenhouse-grown *Cannabis sativa* L. to nitrogen, phosphorus, and potassium. Agron. J. 69, 832–836. *doi: 10.2134/agronj1977.00021962006900050026x.*

Danziger, N., y Bernstein, N. (2021) Plant architecture manipulation increases cannabinoid standardization in 'drug-type' medical Cannabis. Industrial Crops & Products. 167, 113528. *doi: 10.1016/j.indcrop.2021.113528.*

Friedrich, S., y Pauly, M. (2018). MATS: Inference for potentially singular and heteroscedastic MANOVA. Journal of Multivariate Analysis, 165, 166-179. *doi: 10.1016/j.jmva.2017.12.008.*

Finnan, J., y Burke, B. (2013). Nitrogen fertilization to optimize the greenhouse gas balance of hemp crops grown for biomass. GCB Bioenergy. 5, 701–712. *doi: 10.1111/gcbb.12045.*

Goh, C.H., Ko, S.M., Koh, S., Kim, Y.J., y Bae, H.J. (2012). Photosynthesis and environments: photoinhibition and repair mechanisms in plants. J. Plant Biol. 55(2), 93–101. *doi: 10.1007/s12374-011-9195-2.*

Graber, A., Junge, R. (2009). Aquaponic systems: nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. Desalination 246, 147–156. *doi: 10.1016/j.desal.2008.03.048*.

Hazekamp, A., Choi, Y, y Verpoorte, R. (2004). Quantitative Analysis of Cannabinoids from *Cannabis sativa* Using 1H-NMR. Chemical & pharmaceutical bulletin. 52, 718-21. *doi: 10.1248/cpb.52.718.*

Hussain, J., Rehman, N., Al-Harrasi, A., Ali, L., Latif, A., Albroumi, M.A. (2013). Essential oil composition and nutrient analysis of selected medicinal plants in Sultanate of Oman. Asian Pac J Trop Dis. 3(6), 421-428. *doi: 10.1016/S2222-1808(13)60095-X.*

Hussain T, Jeena G, Pitakbut T, Vasilev N, y Kayser O. (2021). *Cannabis sativa* research trends, challenges, and new-age perspectives. iScience. 24(12), 103391. *doi: 10.1016/j.isci.2021.103391*.

Jiménez-Suancha, S.C., Álvarado S., O.H., y Balaguera-López, H.E. (2015). Fluorescencia como indicador de estrés en *Helianthus annuus* L. Una revisión. Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas, 9(1), 149–160. *doi: 10.17584/rcch.2015v9i1.3753.*

Joshi, S. C., y Palni, L. M. S. (2005). Greater sensitivity of *Hordeum himalayens* Schult. to increasing temperature causes reduction in its cultivated area. Current Science, 89(5), 879–882. *http://www.jstor.org/stable/24111036.*

Khajuria, M., Prakash, V., y Vyasa, D. (2020). Photochemical efficiency is negatively correlated with the Δ9 - tetrahydrocannabinol content in *Cannabis sativa* L. Plant Physiology and Biochemistry. 151, 589-600. *doi: 10.1016/j.plaphy.2020.04.003.*

Kutman, U.B., Yildiz, B., Cakmak, I. (2011). Effect of nitrogen on uptake, remobilization and partitioning of zinc and iron throughout the development of durum wheat. Plant Soil. 342, 149–164. *doi: 10.1007/s11104-010-0679-5.*

Ji, F.-S., Tang, L., Li, Y.-Y., Wang, W.-C., Yang, Z., Li, X.-G., et al. (2019). Differential proteomic analysis reveals the mechanism of musa paradisiaca responding to salt stress. Mol. Biol. Rep. 46, 1057–1068. *doi: 10.1007/s11033-018-4564-2.*

Joshi, S.C., y Palni, L.M.S. (2005). Greater sensitivity of *Hordeum himalayens* Schult. to increasing temperature causes reduction in its cultivated area. Current Science, 89(5), 879–882. *https://www.jstor.org/stable/24111036.*

Lyu, D., Backer, R., y Smith, D.L. (2022). Three plant growth-promoting rhizobacteria alter morphological development, physiology, and flower yield of *Cannabis sativa* L. Industrial Crops & Products. 178, 114583. doi: *10.1016/j.indcrop.2022.114583.*

Mia, M., Shamsuddin, Z., Wahab, Z., y Marziah, M. (2010). Effect of plant growth promoting rhizobacterial (PGPR) inoculation on growth and nitrogen incorporation of tissue-culture Musa plantlets under nitrogen free hydroponics condition. Australian Journal of Crop Science. 4.

Moher, M., Llewellyn, D., Jones, M., y Zheng, Y. (2022). Light intensity can be used to modify the growth and morphological characteristics of Cannabis during the vegetative stage of indoor production. Industrial Crops & Products. 183, 114909. *doi: 10.1016/j.indcrop.2022.114909.*

Monclus, R., Dreyer, E., Villar, M., Delmotte, F. M., Delay, D., Petit, J.-M., Barbaroux, C., Le Thiec, B., Bréchet, C., y Brignolas, F. (2006). Impact of drought on productivity and water use efficiency in 29 genotypes of Populus deltoides x Populus nigra. New Phytologist, 169(4), 765–777. *doi:10.1111/j.1469-8137.2005.01630.x.*

Monsees, H., Kloas, W., Wuertz, S. (2017). Decoupled systems on trial: eliminating bottlenecks to improve aquaponic processes. PLoS One 12, 1–18. *doi: 10.1371/journal.pone.0183056.*

Morales, J., Gómez, M., Velázquez, C., y Ambriz, E. (2016). Variación de la distribución de carbono entre la raíz y la parte aérea en tres especies de pino. Revista mexicana de ciencias forestales, 7(38), 59-66.

Murchie, E.K., y Ruban A.V. (2020). Dynamic non-photochemical quenching in plants: from molecular mechanism to productivity. The Plant Journal. 101, 885–896. *doi: 10.1111/tpj.14601.*

Pacula, R.L., y Smart, R.J. (2017). Medical marijuana and marijuana legalization. Annu Rev Clin Psychol. 13, 397–419. *doi: 10.1146/annurev-clinpsy-032816-045128.*

Papastylianou, P., Kakabouki, I., y Travlos, I. (2018). Effect of Nitrogen Fertilization on Growth and Yield of Industrial Hemp (*Cannabis sativa* L.). Not. Bot. Horti Agrobot. Cluj-Napoca. 46, 197–201. *doi: /10.15835/nbha46110862.*

Pérez-Asseff, J. M., Peña E.J., y Torres, C. (2007) Efecto del nitrógeno y la irradianza en la eficiencia fotosintética del anamú *Petiveria alliacea* (Phytolaccaceae). Rev. Acad. Colomb. Cienc. 31(118), 49-55. *ISSN 0370-3908.*

Pettigrew, W.T. (2008). Potassium influences on yield and quality production for maize, wheat, soybean and cotton. Physiol. Plant. 133, 670–681. *doi: 10.1111/j.1399-3054.2008.01073.x.*

Pino, E., Montalván, I., Vera, A., y Ramos, L. (2019). La conductancia estomática y su relación con la temperatura foliar y humedad del suelo en el cultivo del olivo (*Olea europaea* L.), en periodo de maduración de frutos, en zonas áridas. La Yarada, Tacna, Perú. Idesia (Arica). 37(4), 55-64. *doi: 10.4067/S0718-34292019000400055.*

Pinnola A, y Bassi R. (2018). Molecular mechanisms involved in plant photoprotection. Biochem Soc Trans. 46(2), 467-482. *doi: 10.1042/BST20170307.*

Ren, G., Zhang, X., Li, Y., Ridout, K., Serrano-Serrano, M.L., Yang, Y., Liu, A., Ravikanth, G., Nawaz, M.A., y Mumtaz, A.S. (2021). Large-scale whole-genome resequencing unravels the domestication history of *Cannabis sativa*. Sci. Adv. 7, eabg2286. *doi: 10.1126/sciadv.abg2286.*

Rodríguez-Yzquierdo, G., Patiño, M., y Betancourt, M. (2021). Physiological characterization in medicinal Cannabis plants during different phenological stages under biotic stress. Agron. Mesoam. 32(3), 823-840. *doi:10.15517/am.v32i3.44443.*

Giraldo, C.J., Cano, M.A.O., y Ribas, R.F. (2010). Respuesta fotosintética de diferentes ecotipos de fríjol a la radiación y la salinidad. Ciencia y Tecnología Agropecuaria. 10(2), 129-140. *doi: 10.21930/rcta.vol10_num2_art:135.*

Ohyama, T. (2010). Nitrogen as a major essential element of plants. In: Ohyama, T., Sueyoshi, K. (Eds.), Nitrogen Assimilation in Plants. Research Signpost, Kerala, pp. 1–17.

Saloner, A., Sacks, M.M., Bernstein, N. (2019). Response of medical Cannabis (*Cannabis sativa* L.) genotypes to K supply under long photoperiod. Front. Plant Sci. 10, 1–16. *doi: 10.3389/fpls.2019.01369.*

Saloner, A., y Bernstein, N. (2021). Nitrogen supply affects cannabinoid and terpenoid profile in medical Cannabis (*Cannabis sativa* L.). Industrial Crops & Products. 167, 113516. *doi: 10.1016/j.indcrop.2021.113516*

Sánchez-de-Miguel, P., Junquera, P., Jimenez, L., y Lissarrague, J.R. (2009). Efectos de la temperatura foliar y de la humedad relativa en la respuesta fotosintética a la luz de las hojas de vid

de los cvs. Cabernet Sauvignon y Tempranillo, en el período de maduración. Revista Enología. 6. 1-8.

Sawler, J., Stout, J.M., Gardner, K.M., Hudson, D., Vidmar, J., Butler, L., Page, J.E. (2015). The Genetic Structure of Marijuana and Hemp. PLoS ONE. 10(8), e0133292. *doi: 10.1371/journal.pone.0133292.*

Stirbet, A., Lázar, D., Kromdijk, J., y Govindjee (2018). Chlorophyll a fluorescence induction: Can just a one-second measurement be used to quantify abiotic stress responses? Photosynthetica. 56(1), 86-104. *doi: 10.1007/s11099-018-0770-3*

Tambussi, E.A. (2011). Fotosíntesis, fotoprotección, productividad y estreses abióticos: casos de estudio (Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona). Depósito Digital de la Universidad de Barcelona. *http://diposit.ub.edu/dspace/handle/2445/36093.*

Tang, Y., Bao, Q., Tian, G., Fu, K., y Cheng, H. (2015). Heavy metal cadmium tolerance on the growth characteristics of industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) in China. In S. Chen, & S. Zhou (Eds.), Proceedings of the International Conference on Advances in Energy, Environment and Chemical Engineering (pp. 289–295). Atlantis Press. *doi: 10.2991/aeece-15.2015.58.*

Tang, K., Struik, P.C., Amaducci, S., Stomph, T.-J., y Yin, X. (2017). Hemp (*Cannabis sativa* L.) leaf photosynthesis in relation to nitrogen content and temperature: implications for hemp as a bioeconomically sustainable crop. GCB Bioenergy. 9, 1573–1587. *doi: 10.1111/gcbb.12451.*

Tarqui-Delgado, M., Mena-Herrera, F.C., Quino-Luna, J.J., Gutiérrez-Villalobos, S., y Coela-Poma, R.R. (2017). Leaflet temperature of lettuce (*Lactuca sativa*) and air influenced by the vapor pressure deficit. Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales, 4(1), 60–66.

Welling, M.T., Liu, L., Shapter, T., Raymond, C., y King G.J. (2016). Characterisation of cannabinoid composition in a diverse *Cannabis sativa* L. germplasm collection. Euphytica. 208, 463–475. *doi: 10.1007/s10681-015-1585-y.*

Wungrampha, S., Joshi, R., Singla-Pareek, S.L., y Pareek, A. (2018). Photosynthesis and salinity: Are these mutually exclusive? Photosynthetica. *56*, 366–381. *doi: 10.1007/s11099-017-0763-7.*

Yep, B., Gale, N.V., y Zheng Y. (2020). Comparing hydroponic and aquaponic rootzones on the growth of two drugtype *Cannabis sativa* L. cultivars during the flowering stage. Industrial Crops & Products. 157, 112881. *doi: 10.1016/j.indcrop.2020.112881.*

5. Determinación de los componentes de rendimiento, rendimiento y potencia de tres variedades de *Cannabis sativa* L. sembradas en suelo y sustrato

5.1 Resumen

La producción del cultivo de *Cannabis sativa* L. actualmente emplea diferentes medios de cultivo según los propósitos, sin embargo, se sabe poco sobre los efectos que esto puede tener sobre los componentes de rendimiento, rendimiento y la potencia de los cannabinoides. El objetivo fue determinar el efecto de la siembra en suelo y sustrato sobre estas variables. Se establecieron tres variedades de *C. sativa,* Souce Cauca (SC), Calotoweed (CW) y Higthcol (HC), en dos medios de cultivo, suelo y sustrato. Los resultados revelaron efectos significativos del medio de cultivo en la mayoría de los rasgos evaluados. Se encontró que en sustrato se disminuyó el contenido foliar de N, K, Ca y Fe; aumentaron los contenidos de P, Mg y Mn y no se presentó una alta variación en los contenidos de S y B. Los componentes de rendimiento, en su gran mayoría, fueron significativamente menores en las plantas en sustrato que en suelo. Al determinar el rendimiento en flor seca y potencia se obtuvo que las variedades SC y HC en sustrato mostraron un rendimiento más bajo, pero una mayor potencia. En CW, tanto el rendimiento como la potencia fueron más altas en sustrato comparado con suelo. Se encontró una relación directamente proporcional entre el rendimiento de flor seca y los gramos totales de CBD por planta, es decir, a mayor rendimiento de flor, mayor contenido total de CBD por planta. Se sugiere establecer las variedades SC y HC en suelo y CW en sustrato. Este trabajo destaca la importancia del medio de establecimiento de cultivo para el rendimiento de las plantas de *Cannabis sativa*, específicamente en sistemas bajo invernaderos enfocados a la producción o investigación.

Palabras clave: Cannabinoides, rendimiento, inflorescencia, componentes de rendimiento, morfología, suelo y sustrato.

5.2 Introducción

Cannabis sativa L. (*C. sativa*) es una planta multifuncional con un alto potencial en industrias como la alimentaria, productos farmacéuticos, cosméticos y productos para animales (Andre *et al.,* 2016; Burgel *et al.,* 2020). Esta especie herbácea anual, a menudo es cultivada por su alta y única concentración de metabolitos secundarios llamados cannabinoides (Caplan *et al.,* 2019a,b), los cuales exhiben diversas propiedades psicoactivas y medicinales (Baron, 2018). Los cannabinoides se producen en resinas, las cuales se acumulan en tricomas glandulares que cubren, en forma densa, las superficies

de las inflorescencias femeninas pistiladas no fecundadas (Potter, 2014) y, en menor grado, en el follaje de plantas masculinas y femeninas (Booth y Bohlmann, 2019). Según su perfil y concentración de cannabinoides, el Cannabis se clasifica como el quimiotipo I las plantas que tienen una alta proporción de delta-9-tetrahidrocannabinol/cannabidiol (THC/CBD) (>1), el quimiotipo II como las plantas con una proporción intermedia (≈1), el quimiotipo III como las plantas de tipo fibra con una relación THC/CBD baja (<1) (De Meijer, 2014), quimiotipo IV las plantas que contienen ácido cannabigerólico (CBGA) como cannabinoide principal (Fournier *et al.,* 1987), y el quimiotipo V las plantas que casi no contienen cannabinoides (Pacífico *et al.,* 2008; De Meijer, 2014).

El cultivo de *C. sativa* L. fue prohibido durante mucho tiempo en muchos países debido a su componente psicoactivo THC (Rodríguez-Yzquierdo *et al.*, 2021). Los esfuerzos actuales en el mejoramiento en quimiotipos amplificados con CBD, llamados genotipos de Cannabis ricos en fitocannabinoides, tienen como objetivo contenidos mayores al 10 % de CBD y menos del 0,2 % de THC (Burgel *et al.,* 2020). Debido a su carácter históricamente ilegal, existe poca información sobre los sistemas de producción del cultivo de Cannabis en la literatura científica (Caplan *et al.*, 2019a; Rodríguez-Yzquierdo *et al.*, 2021). El Cannabis se cultiva principalmente en interior, en un entorno controlado, normalmente en dos etapas de crecimiento: vegetativa y de floración, controladas por fotoperíodo (Potter, 2014; Farag y Kayser, 2015). Para optimizar el rendimiento de las flores con la calidad deseada, la elección de los genotipos y el sistema de cultivo es muy importante, ya que el contenido de los cannabinoides individuales puede verse influenciado por el método de cultivo y las interacciones ambientales (Campbell *et al.*, 2019). Para la obtención de la sustancia pura o la preparación del extracto, el cultivo al aire libre ha sido el más utilizado en Norteamérica y Europa (Laginha, 2018). El cultivo en interiores, bajo condiciones controladas tiene ventajas en términos de calidad, así como de estándares de higiene para evitar posibles contaminaciones y para producir lotes con características homogéneas (Magagnini *et al.,* 2018). Los medios de crecimiento sin suelo se han utilizado comúnmente en la producción de plantas de invernadero y se pueden formular mezclando componentes orgánicos como turba y componentes inorgánicos como vermiculita, perlita y arena (Bunt, 1988; Nelson, 2003; Burgel *et al.,* 2020). Elegir los componentes adecuados del sustrato o el tipo de suelo es fundamental para proporcionar las propiedades físicas y químicas necesarias para el crecimiento y desarrollo óptimo de una especie en particular (Bunt, 1988; Evans *et al.*, 2004).

Los sistemas de producción de plantas sin suelo presentan desafíos para el crecimiento óptimo de las raíces, ya que, a diferencia de un perfil de suelo normal, el entorno de una matera proporciona una capa poco profunda de sustrato, que alcanza el punto de saturación rápidamente durante el riego. De otro lado, un tamaño de matera pequeño proporciona una capacidad de volumen limitada para el almacenamiento de agua entre ciclos de riego (Bunt, 1988). Un medio de cultivo adecuado necesita una estructura física con un equilibrio favorable entre el almacenamiento de agua y el aire (Fonteno, 1993). En Cannabis se requiere una mezcla equilibrada de agua y oxígeno en el medio durante todo el ciclo de vida a nivel de las raíces para permitir que las plantas crezcan (Burgel *et al.,*

2020). Este equilibrio en pequeños volúmenes es un factor clave en el desarrollo de composiciones de sustrato para sistemas de producción de plantas sin suelo. Estos medios de cultivo han sido una innovación fundamental, ya que permiten el control del suministro de agua, aire y nutrientes (Raviv *et al.*, 2002). Sin embargo, en *C. sativa* no hay mucha información sobre las propiedades físicas del sustrato y/o suelo y sus efectos sobre el rendimiento de las plantas (Burgel *et al.,* 2020).

Los productores de *C. sativa* en la actualidad utilizan una amplia variedad de sistemas de cultivo sin suelo, incluida la técnica de película de nutrientes, sistemas de macetas orgánicas de riego manual y fibra de coco o lana de roca convencional con riego por goteo (Jin *et al.*, 2019). Estos sistemas tienen diversas zonas de raíces: la disponibilidad de oxígeno, el flujo de agua y la disponibilidad de nutrientes minerales pueden variar mucho, según las propiedades fisicoquímicas de los sustratos utilizados y las prácticas de manejo hortícola (van Os *et al.,* 2019; Zheng, 2019). En un metaanálisis reciente donde se describen los factores de cultivo que afectan a *C. sativa*, se sugiere que algunos factores de la zona radical, como el tamaño de la matera y la fertilización, pueden influir significativamente en el rendimiento y la potencia de *C. sativa* (Backer *et al.,* 2019). Además, estudios recientes han encontrado que los macronutrientes de la zona de la raíz pueden influir por sí solos en el rendimiento de la inflorescencia de *C. sativa* y en el contenido de fitocannabinoides (Bernstein *et al.,* 2019; Caplan *et al.,* 2017). Bouchard (2008) encontró que el medio de producción y el ambiente influyen sobre el rendimiento en gramos de botones florales y el número de cosechas por año, mostrando que los métodos hidropónicos en sustrato son más efectivos (Plecas y Diplock, 2007).

En este estudio se plantea la hipótesis de que las plantas en suelo obtendrán tanto mayor contenido de fitocannabinoides como mayor rendimiento de material seca en el órgano floral. El objetivo de este estudio fue evaluar los componentes de rendimiento y el rendimiento de tres variedades de *Cannabis sativa* L. sembradas en condiciones de suelo y sustrato bajo invernadero.

5.3 Materiales y Métodos

5.3.1 Material vegetal y establecimiento del experimento

La investigación se realizó en la finca El Candil, Lote Guacachica, La Conejera, Bogotá, Colombia (4°47'02,6" N, 74°06'10,9" O). Se emplearon 3 variedades no psicoactivas de Cannabis medicinal: Souce Cauca (SC), Calotoweed (CW) y Higthcol (HC) (Tabla suplementaria 1) proporcionadas por la compañía Medcolcanna S.A.S. Las plántulas se obtuvieron a partir de esquejes enraizados de 4 semanas de edad y se crecieron bajo invernadero con temperatura promedio de 16,39 °C, humedad relativa de 76,21 %, intensidad de luz diaria promedio de 16,7 mol m^{-2} s^{-1}, radiación fotosintéticamente activa (PAR) promedio de 282,61 µmol $m^{-2}s^{-1}$ (Figura suplementaria 1) y fotoperiodo natural (12/12 h luz/oscuridad). Las tres variedades se sembraron en junio de 2020 en condiciones

de suelo y sustrato (Sustracoco Germiplus®, Fibra de coco 70%, perlita 30%), para un total de seis tratamientos que corresponden a la interacción entre las variedades y el medio de producción.

Las plantas se trasplantaron en materas plásticas de 12 L con sustrato o en camas elevadas de 0,80 m de ancho con suelo, bajo una densidad de siembra de 4 plantas m^{-2}. Se estableció un fotoperiodo durante la fase vegetativa de 18/6 luz/oscuridad el cual se suplementó con iluminación artificial haciendo uso de luminarias LED Sylvania ® de 30W durante 38 noches. Posteriormente las plantas crecieron bajo condiciones naturales de fotoperiodo (12/12). Las plantas se regaron y fertirregaron con un sistema de riego por goteo en el suelo y sistema de riego localizado tipo araña con 2 estacas inyectoras cada planta en el sustrato. Se fertilizó 5 días a la semana durante el ciclo de cultivo hasta dos semanas antes de la cosecha. Se estableció una fórmula de fertilización diferencial para las fases vegetativa y floración de acuerdo con lo reportado por Cockson *et al.* (2019) con algunas modificaciones (Tabla 5-1), la cual fue aplicada tanto en suelo como en sustrato. Durante todo el ciclo de cultivo se realizó la medición del potencial de hidrogeniones (pH) y conductividad eléctrica (CE) de drenaje y gotero con un medidor portátil de temperatura y pH/EC/TDS HI 9813-6 (distribuido por Hanna Instruments, Bogotá, Colombia). Se realizó poda bajera de los tres nudos basales a los 54 ddt y 80 ddt.

Tabla 5-1. Fórmula de fertilización en partes por millón (ppm) para la etapa vegetativa y floración utilizada en los medios de cultivo suelo y sustrato para plantas de Cannabis medicinal.

Nutriente	Vegetativo	Floración 1*	Floración 2
N	161	37	53
P	64	35	51
K	224	176	251
Ca	144	46	65
Mg	77	45	64
Mn	6	5	6
Fe	6	5	6
Cu	6	7	11
Zn	1,7	7	11
B	0,7	0,5	0,7
S	107	111	157

*Fórmula utilizada durante 5 días después de iniciada la fase de floración. Posteriormente se utilizó la fórmula floración 2.

Cada tratamiento se estableció en un área de 72,53 m^2 en 5 camas de manera aleatoria, utilizando un diseño en bloques completos al azar con parcelas divididas. Se realizaron 5 repeticiones por tratamiento y la unidad experimental consistió en 37 plantas.

5.3.2 Contenido foliar de nutrientes

Se determinó el contenido foliar de nutrientes a los 15, 46 y 90 ddt. El N se determinó según Kjeldahl; P y B por colorimetría; K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Cu y Zn por absorción atómica; y S por turbidimetría, siguiendo la metodología propuesta por Hussain *et al.* (2013) en el Laboratorio de Aguas y Suelos de la Universidad Jorge Tadeo Lozano (Cundinamarca, Colombia).

5.3.3 Parámetros de descripción morfológica en la etapa de floración

Una semana antes de cosecha se realizó la medición de los caracteres morfológicos como variables predictivas cuantitativas y cualitativas del rendimiento de las tres variedades en cada uno de los tratamientos descritos. Para ello se tomaron 10 plantas por repetición por tratamiento y se determinó el número de foliolos en la hoja verdadera apical más desarrollada de la planta. También se determinó la longitud del peciolo midiendo el raquis de la hoja apical más desarrollada hasta la vaina donde el peciolo se une con el tallo principal. La longitud de los entrenudos en el tallo principal se midió en el entrenudo inmediatamente anterior de la hoja apical más desarrollada. La longitud del foliolo central de la hoja se midió desde el raquis de la hoja apical más desarrollada hasta la punta del foliolo central. El ancho del foliolo central de la hoja se midió en la parte más ancha del foliolo central de la hoja apical más desarrollada y el grosor del tallo principal se midió en el tallo principal en el tercio basal de la planta.

Como características visuales se determinó el color del tallo principal, observando la tonalidad predominante en categorías de color: amarillo, verde, verde oscuro o púrpura. La pigmentación antociánica del peciolo se determinó en la hoja apical más desarrollada observando la tonalidad púrpura en diferentes categorías: ausente, débil, media, fuerte o muy fuerte. En la hoja apical más desarrollada se determinó la intensidad del color verde en 3 categorías: ligero, medio u oscuro. En la profundidad de los surcos del tallo principal se observó si había o no presencia de surcos en el tercio medio del tallo principal de la planta, se evaluaron tres categorías: pocos profundos, medios y profundos. En las inflorescencias se determinó la pigmentación antociánica de las flores en la inflorescencia más apical de la planta. Las categorías determinadas fueron: ausente, débil, media o fuerte.

5.3.4 Componentes de rendimiento

Se realizó la medición de las variables asociadas con el rendimiento en 15 plantas por repetición en cada uno de los tratamientos (n=75). Se determinó la altura y número de nudos cada 8 días desde los 8 ddt hasta los 78 ddt y antes de la cosecha para establecer un único valor final. Además, se determinó el número de ramas productivas, el peso fresco de la planta y el peso fresco de las ramas productivas con una balanza digital de mano y una balanza digital de mesa MIX A3000 (Trumax, Bogotá, Colombia).

5.3.5 Rendimiento

El rendimiento (R) se determinó en 15 plantas por repetición por tratamiento (n=75). El momento de cosecha se estableció cuando los pistilos de la inflorescencia apical del 50%+1 de la población presentaron color café y el 30% de los tricomas eran de color ámbar (Bernstein *et al.,* 2019). Para cada planta se cortaron las ramas productivas y se llevaron a un cuarto de secado, donde se colgaron con circulación de aire para lograr un secado uniforme y rápido. Cuando las flores de las ramas presentaron un porcentaje de humedad del 9-13% se realizó el *trimming* y triturado para determinar el rendimiento de flor seca por planta. La flor seca de cada tratamiento se empacó al vacío para su conservación.

5.3.6 Contenido de Cannabinoides

Se tomaron muestras de flor semanalmente desde los 88 ddt hasta el momento de la cosecha y 8 días después de cosecha (ddc). Las flores se secaron en un horno a 50°C hasta alcanzar una humedad entre el 9 y 13%, luego se molieron y se determinó el contenido de delta-9-Tetrahidrocannabinol (THC) y cannabidiol (CBD) con un analizador de potencias GemmaCert Lite (GemmaCert, Alemania).

5.3.7 Análisis estadístico

Para las variables relacionadas con los parámetros de floración, componentes de rendimiento y rendimiento se realizó un análisis de varianza (ANOVA) ($p \leq 0,05$). Cuando se encontraron diferencias significativas, se utilizó la prueba comparativa post hoc de Tukey a $p \leq 0,05$. Los datos se analizaron utilizando el paquete estadístico R (versión 4.1.0). Se realizó un análisis de componentes principales (PCA) para cada uno de los medios de cultivo (suelo y sustrato) evaluados para las variables de componentes de rendimiento y rendimiento. A través de un gráfico Biplot se observa la contribución de cada variable y su asociación con cada uno de los tratamientos planteados, para ello se hizo uso de las librerías “FactorExtra” y “FactorMineR”.

5.4 Resultados

5.4.1 Las variedades en sustrato presentan un menor contenido de N, Ca, Zn y Fe, pero mayor contenido de Mg y Mn comparado con las plantas en suelo.

Se observó una variación en el contenido nutricional foliar a través del tiempo (Tabla 5-2). Se presentó diferencias significativas entre la interacción Tratamiento*día y Medio de cultivo*variedad ($p<0,001$). El contenido de N se presentó por encima de los niveles máximos reportados para todas las variedades a los 30 ddt, a excepción de SC en sustrato, la cual se encontró dentro de los niveles óptimos. A los 90 ddt se presentó una disminución significativa en todas las variedades en los dos medios de cultivo, sin embargo, las plantas

de sustrato mostraron valores por debajo del mínimo reportado. El P por el contrario aumento los niveles foliares de los 30 a los 90 ddt. El contenido de K disminuyó en este mismo periodo de tiempo, pero la disminución a los 90 ddt mantuvo el contenido dentro del rango óptimo reportado para la mayoría de los tratamientos, a excepción de CW en suelo y HC en sustrato (contenidos por encima del rango óptimo). El Ca presentó una tendencia similar al K. El Mg disminuyó en contenido de los 30 a los 90 ddt, pero en sustrato el nivel se mantuvo por encima del rango óptimo reportado y en suelo por debajo. El S y B fueron estables a través del tiempo. El Mn y Cu aumentaron el contenido foliar a lo largo del ciclo de cultivo, sin embargo, los niveles de Mn en las hojas fueron más altos en sustrato que en suelo, a pesar de que, en los dos medios de cultivo, los contenidos se encuentran por encima del rango reportado. El Fe aumentó los contenidos foliares de los 30 a los 90 ddt indicando una alta concentración del elemento durante el ciclo de cultivo.

Tabla 5-2. Contenido de macronutrientes y micronutrientes en el follaje para las variedades Souce Cauca (SC), Calotoweed (CW) y Higthcol (HC) sembradas en condiciones de suelo y sustrato. Se presentan los valores para los 30 y 90 ddt (n=3). El color rojo en el mapa de calor indica niveles superiores al máximo reportado, verde en el rango ideal y naranja por debajo del mínimo reportado. Letras distintas indican diferencias significativas de acuerdo con el test de Tukey (p≤0,05).

		Contenido nutricional foliar										
		%						ppm				
ddt	Tratamiento	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn	Cu	Zn	B
30	CW-Suelo	4,67 e	0,45 a	2,77 e	4,27 fg	0,91 c	0,22 a	214,33 d	51,17 b	6,23 b	49,67 ab	66,13 f
	CW-Sustrato	4,32 d	0,53 b	2,20 c	2,83 d	1,04 d	0,25 ab	174,33 bc	129,40 e	8,97 c	44,30 a	79,37 g
	HC-Suelo	4,34 d	0,42 a	3,00 f	4,23 f	0,81 a	0,17 a	243,33 e	102,17 d	5,33 ab	50,37 b	53,63 e
	HC-Sustrato	4,62 e	0,57 b	2,47 d	3,77 e	1,27 d	0,20 a	137,67 a	67,77 c	5,07 a	51,20 b	68,77 f
	SC-Suelo	4,73 e	0,43 a	3,07 f	4,50 g	0,90 c	0,19 a	180,67 c	37,83 a	6,10 b	48,97 a	50,90 cd
	SC-Sustrato	4,11 cd	0,55 b	2,50 d	2,83 d	0,94 cd	0,20 a	155,33 ab	56,30 bc	4,97 a	51,67 b	81,77 g
90	CW-Suelo	3,48 b	0,80 c	2,33 c	2,47 c	0,73 a	0,30 b	305,33 g	102,03 d	13,73 de	113,33 f	48,63 bc
	CW-Sustrato	2,71 a	0,84 c	2,00 b	1,97 b	0,82 ab	0,27 b	279,33 f	180,00 f	17,33 f	98,33 de	50,93 cd
	HC-Suelo	3,75 bc	0,85 c	1,97 ab	2,23 bc	0,66 a	0,28 b	340,00 h	91,33 d	14,13 e	110,33 f	36,97 a
	HC-Sustrato	2,88 a	0,85 cd	2,20 c	1,50 a	0,85 b	0,25 ab	152,33 ab	132,27 e	14,67 e	75,53 c	48,83 bc
	SC-Suelo	3,61 b	0,91 d	1,87 a	2,30 c	0,70 a	0,30 b	344,00 h	126,33 e	12,80 d	109,90 f	43,40 ab

SC-Sustrato	2,82 a	0,85 cd	2,00 b	2,13 b	0,86 bc	0,27 b	287,33 fg	205,67 g	18,93 f	90,93 d	48,90 bc
MIN*	**3,20**	**0,24**	**1,80**	**1,47**	**0,40**	**0,16**	**99**	**40,00**	**4,90**	**23,00**	**55,00**
MAX*	**4,30**	**0,36**	**2,09**	**2,90**	**0,61**	**0,22**	**125**	**67,00**	**6,10**	**38,00**	**80,00**

*Valores máximos y mínimos tomados de Cockson *et al.* (2019).

5.4.2 Las variedades sembradas en sustrato presentan una morfología descriptiva diferencial previo a cosecha

Los componentes de rendimiento son parámetros cuantitativos y cualitativos que permiten predecir el rendimiento final de las plantas de Cannabis, algunas de estas variables se evaluaron en esta investigación (Tabla 5-3). El número de foliolos de las hojas no presentó diferencias significativas entre variedades ni entre medios de cultivo. La longitud del peciolo (lpeciolo), por el contrario, fue menor en las plantas de suelo, presentando diferencias significativas con las plantas de sustrato. La variedad CW es la que presenta mayor longitud; HC y SC no presentan diferencias significativas. La longitud de los entrenudos fue mayor en la variedad CW, seguido de HC y SC, en las cuales se presentó la menor longitud de entrenudos en sustrato. La longitud del foliolo central (lfolioloc) fue similar para todas las variedades, sin embargo, en sustrato, en HC y SC se presentó una menor longitud del foliolo central comparado con el suelo. El ancho del foliolo central (afolioloc) fue menor en las tres variedades en sustrato presentando diferencias significativas con las plantas de suelo. El grosor del tallo (gtallo) fue significativamente mayor en las plantas de suelo comparado con las plantas en sustrato. SC en suelo mostró el valor más alto seguido de HC y CW. Para la altura de la planta (ALPL) y el número de nudos (NNUD) se presenta sólo el resultado de la última evaluación, sin embargo, se presentó un aumento lineal de las dos variables a través del tiempo (tratamiento*día: $p \leq 0{,}001$). La ALPL fue significativamente menor en las tres variedades de sustrato comparado con suelo, sin embargo, las plantas de CW fueron las que presentaron la mayor altura, seguido de HC y SC. Respecto al NNUD, las plantas de SC y HC en sustrato presentaron significativamente menos nudos que en suelo, por el contrario, en CW no se presentaron diferencias significativas entre el suelo y sustrato. La variedad que presentó el mayor número de nudos fue HC seguido de SC y CW.

Tabla 5-3. Componentes de rendimiento cuantitativos relacionados con la morfología de tres variedades de *Cannabis sativa* L. sembradas en suelo y sustrato. Los datos se presentan como la media de las repeticiones (n=50). NS, *, ** o *** no significativo o significativo a $p \leq 0{,}05$, 0,01 o 0,001, respectivamente.

Tratamiento	No. de foliolos	Longitud peciolo	Longitud entrenudos	Longitud foliolo central	Ancho foliolo central	Grosor del tallo	Altura de la planta	No. de nudos
SC-Suelo	7,00	3,90 a	6,50 ab	17,57 b	2,02 c	4,56 d	170,27 c	34 b
SC-Sustrato	6,60	4,94 b	5,69 a	12,04 a	1,41 a	2,37 ab	128,37 a	31 a
HC-Suelo	7,00	3,93 a	7,27 c	15,16 ab	1,72 b	3,45 c	176,09 c	37 c
HC-Sustrato	6,84	4,98 b	7,07 bc	12,46 a	1,38 a	2,28 a	128,36 a	32 a

CW-Suelo	7,00	4,98 b	7,48 cd	12,96 a	1,72 b	2,75 b	199,97 d	33 ab
CW-Sustrato	6,76	5,59 c	7,56 c	12,72 a	1,38 a	2,20 a	146,57 b	34 b
Significancia	NS	**	***	*	***	**	***	*

*Letras distintas indican diferencias significativas de acuerdo con el test de Tukey ($p \leq 0,05$). Letras iguales indican que las medias no son estadísticamente significativas ($\leq 0,05$).

Para las variables cualitativas descriptivas (Tabla 5-4) se observó que el color del tallo presentó una variación en la variedad CW en sustrato la cual mostró una coloración verde claro. La pigmentación del peciolo presentó variaciones en HC y CW en los dos medios de cultivo. La variedad HC en sustrato y CW en suelo presentaron pigmentos antociánicos fuertes en los peciolos, mientras que SC no presentó ninguna variación en los dos medios de cultivo. El color de las hojas fue menos intenso en SC y CW en sustrato, sin embargo en HC, la intensidad de la coloración de las hojas en sustrato fue más fuerte comparado con suelo. La profundidad de los surcos y la pigmentación de la inflorescencia no se modificó en las variedades en los diferentes medios de cultivo.

Tabla 5-4. Variables descriptivas relacionadas con la morfología de tres variedades de *Cannabis sativa* L. sembradas en suelo y sustrato (n=50).

Tratamiento	Color del tallo	Pigmentación peciolo	Intensidad color hoja	Profundidad surcos	Pigmentación inflorescencia
SC-Suelo	Verde	Débil	Oscuro	Poco profundos	Ausente
SC-Sustrato	Verde	Débil	Medio	Poco profundos	Ausente
HC-Suelo	Verde	Ausente	Oscuro	Medios	Débil
HC-Sustrato	Verde	Fuerte	Fuerte	Medios	Débil
CW-Suelo	Verde	Fuerte	Medio	Poco profundos	Débil
CW-Sustrato	Verde Claro	Media	Ligero	Poco profundos	Débil

5.4.3 Los componentes de rendimiento en plantas de Cannabis son diferentes entre suelo y sustrato.

La contribución de las variables relacionadas con los componentes de rendimiento es diferencial en suelo y sustrato (Figura 5-1). En sustrato se observa que los dos primeros componentes explican el 42,6% de la variación. Las variables que contribuyen en mayor proporción al primer componente (26,1%) son la ALPL, gtallo y NNUD. El segundo componente (16,5%) está influenciado principalmente por el afolioloc. Se observa que el NNUD y el peso de la flor seca (PFSE) presentan una correlación inversa, sin embargo, su contribución a la explicación a los resultados no es alta (Figura 5-1A). A medida que el afolioloc aumenta o disminuye, la lfolioloc presenta una relación inversa. La lpeciolo tiene una relación inversa con el gtallo. La ALPL presentó una relación inversa con la lpeciolo y el PFSE. Adicionalmente, las variedades HC y SC presentan similitudes entre sí, mientras que CW es diferente. En suelo, los dos primeros componentes explican el 61,3% de la variación. Las variables que explican la variación de las variedades en suelo son la lfolioloc y el gtallo las cuales presentan una alta correlación entre sí; la altura de la planta y la longitud del peciolo tuvieron una contribución moderada. El PFSE y la lpeciolo, y el afolioloc y la ALPL tienen una relación inversa, es decir, si uno aumenta el otro disminuye.

En suelo es mucho más clara la diferencia entre las variedades respecto a los componentes de rendimiento, es decir, hay una mayor contribución del genotipo en estas diferencias.

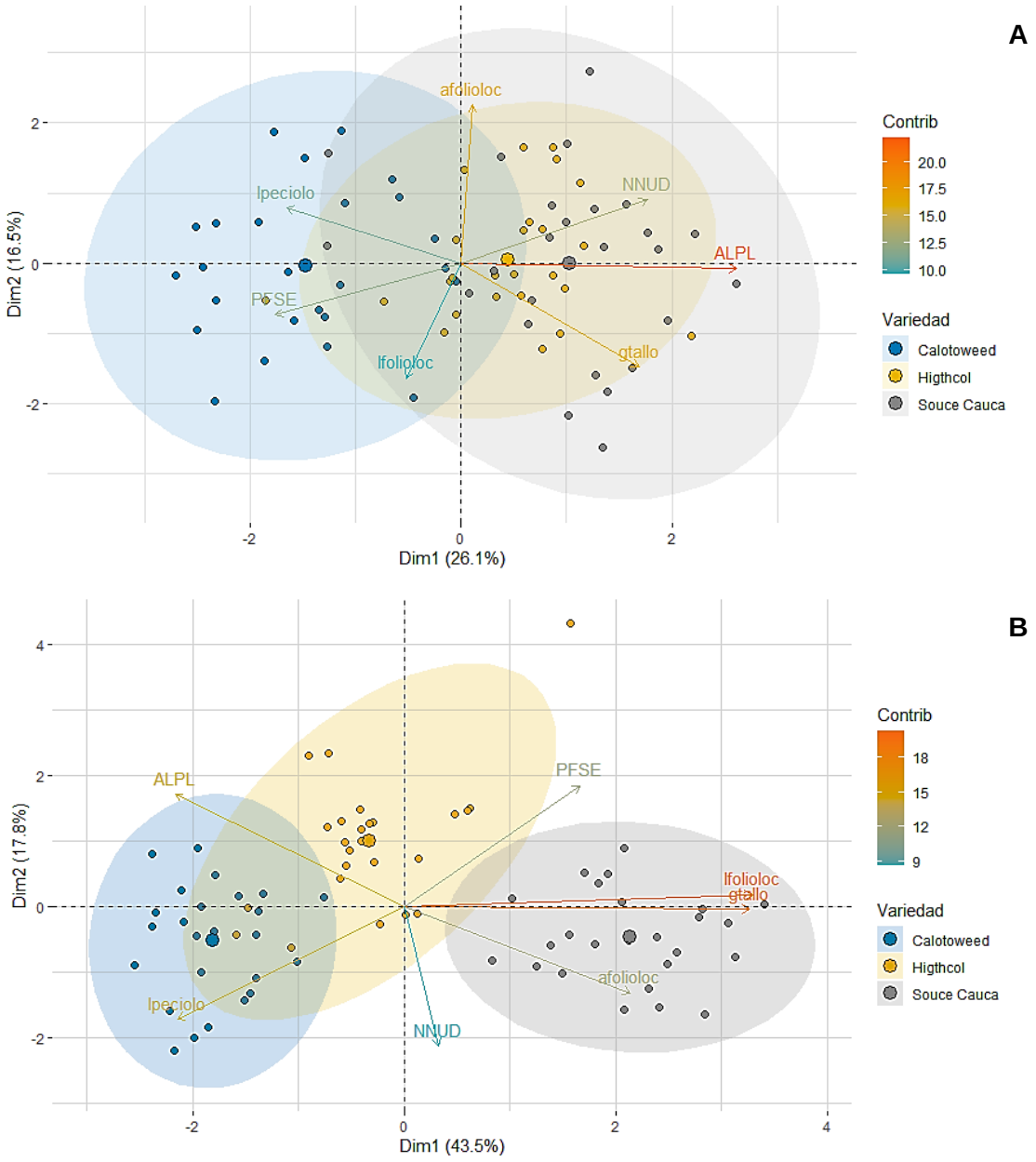


Figura 5-1. PCA Biplot para los componentes de rendimiento en tres variedades de *Cannabis sativa* L. sembradas en **A.** Sustrato y **B.** Suelo. Las variables con las flechas de mayor longitud y en la escala de colores cálidos representan una mayor contribución a la explicación de los resultados.

Durante la cosecha, algunas variables pueden predecir los resultados finales de rendimiento (Tabla 5-3) y por lo tanto pueden considerarse componentes de rendimiento clave. El número de ramas productivas (Rproductivas) presentó diferencias significativas en las plantas de SC y HC sembradas en sustrato comparado con suelo y su valor fue más

bajo, mientras que en CW no se presentaron diferencias significativas. El peso fresco de la planta (PFP) y el peso fresco de las ramas productivas (PFRP) en las tres variedades fue menor en sustrato mostrando diferencias significativas con el medio de cultivo suelo. Las variedades HC y SC tuvieron valores similares en todas las variables.

Tabla 5-5. No. de Ramas productivas, peso fresco de planta y peso fresco de ramas productivas de tres variedades de *Cannabis sativa* L. sembradas en suelo y sustrato. Los datos se presentan como la media de las repeticiones (n=75). NS, *, ** o *** no significativo o significativo a p≤ 0,05, 0,01 o 0,001, respectivamente.

Tratamiento	No. Ramas productivas	Peso fresco planta (Kg)	Peso fresco ramas productivas (g)
SC-Suelo	15,67 b	1,40 c	1060,79 f
SC-Sustrato	14,23 a	0,90 b	652,12 b
HC-Suelo	17,00 c	1,32 c	1004,07 e
HC-Sustrato	14,80 a	0,75 a	580,91 a
CW-Suelo	15,43 b	1,08 b	808,95 d
CW-Sustrato	15,47 b	0,75 a	693,84 c
Significancia	***	**	***

*Letras distintas indican diferencias significativas de acuerdo con el test de Tukey (p ≤ 0,05). Letras iguales indican que las medias no son estadísticamente significativas (≤ 0,05).

La contribución de las variables de rendimiento a las siembras en suelo y sustrato mostró un resultado diferencial (Figura 5-2). En sustrato, se observó que los dos primeros componentes explican el 59,8% de la variabilidad (Figura 5-2 A). Las variables que contribuyen sobre el primer componente (32,2%) son el PFRP, el PFSE y el contenido de CBD el cual presenta una relación inversa con el PFSE. El segundo componente está influenciado principalmente por el contenido de THC y el Rproductivas. Esta última variable presenta una relación inversa con el contenido de CBD. La contribución del PFP no es alta. En suelo se observó que los dos primeros compontes explican el 78,5% de la varianza (Figura 5-2 B). Las variables que contribuyen a explicar los resultados de las variedades en suelo respecto al primer componente (57,2%) son el contenido de CBD, el PFSE, el PFP y el PFRP. Las dos primeras y las dos últimas variables presentan una alta correlación entre sí. El segundo componente (27,6%) está explicado por el Rproductivas. El contenido de THC presenta una alta correlación con el contenido de CBD y PFSE, pero presenta una baja contribución a la explicación de los resultados.

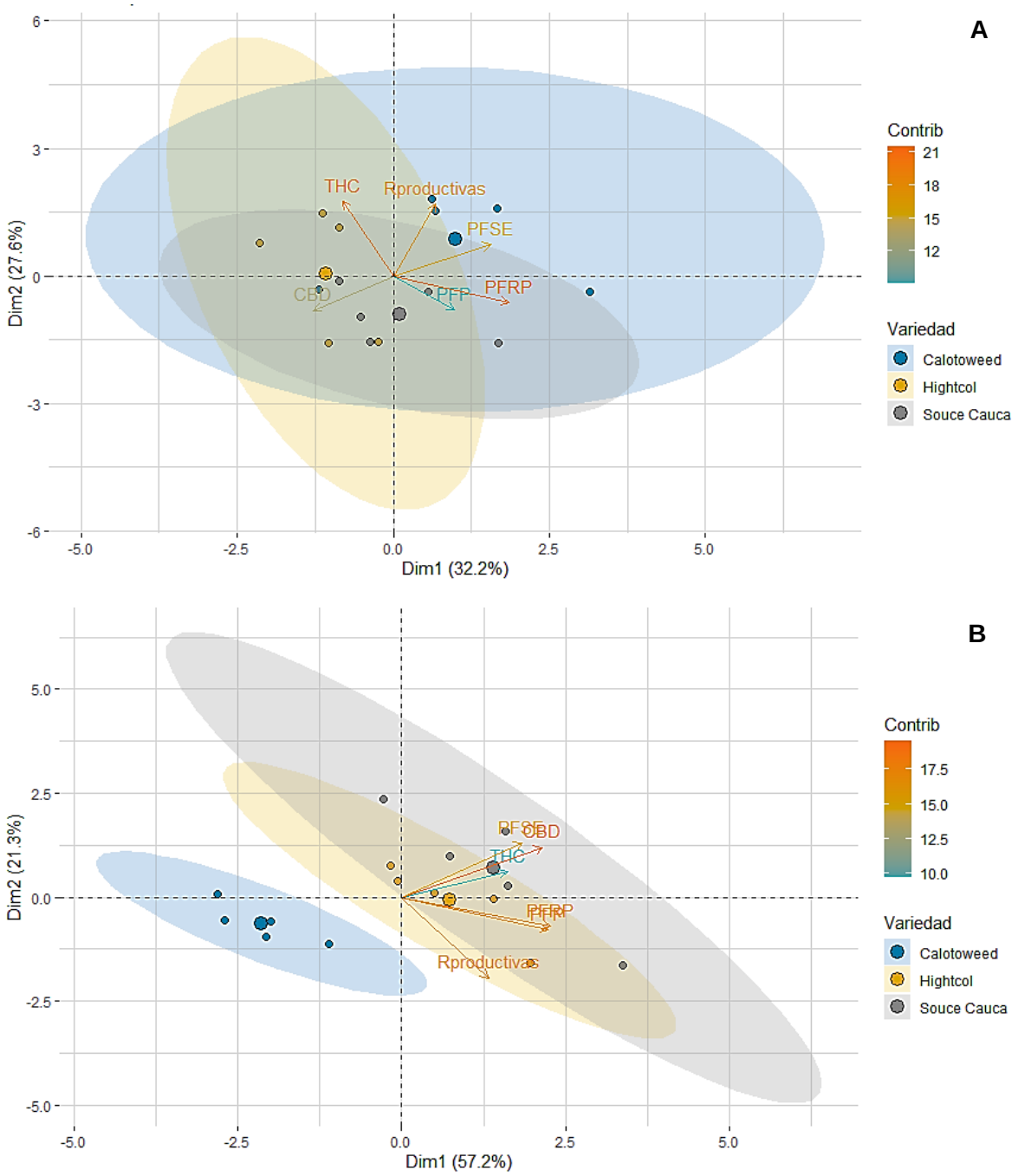


Figura 5-2. PCA Biplot para contenido de cannabinoides y pesos frescos en cosecha de tres variedades de *Cannabis sativa* L. sembradas en **A.** Sustrato y **B.** Suelo. Las variables con las flechas de mayor longitud y en la escala de colores cálidos representan una mayor contribución a la explicación de los resultados.

5.4.4 El porcentaje de cannabidiol es más alto en plantas sembradas en sustrato, pero el rendimiento final de CBD por planta depende del rendimiento de flor seca

Las plantas de sustrato presentaron menos gramos de flor seca por planta, a excepción de la variedad CW la cual obtuvo un valor más alto, pero no significativamente diferente al obtenido en suelo. La variedad con mayor rendimiento fue SC en suelo seguida de HC en suelo. En el porcentaje de CBD, las plantas de sustrato presentaron un mayor contenido comparado con las de suelo, sin embargo, en la variedad SC esta diferencia no fue significativa. En términos de gramos de CBD por planta, las variedades que tuvieron mayor rendimiento de flor seca al final obtuvieron los mayores valores en esta variable y fue significativamente diferente entre suelo y sustrato ($p \leq 0{,}001$). Así entonces, las variedades SC y HC presentan un mayor rendimiento de CBD y flor seca en suelo y CW en sustrato. En términos de gramos de CBD por planta al año se observó una tendencia similar a la variable anterior. La variedad SC en suelo es la que presenta el mayor rendimiento anual, seguido de HC en suelo y CW en sustrato. El más bajo rendimiento es para CW en suelo, con diferencias significativas respecto a las plantas en sustrato (Tabla 5-6).

Tabla 5-6. Rendimiento de flor seca, porcentaje de Δ^9-tetrahidrocannabinol (THC), porcentaje de Cannabidiol (CBD) y rendimiento en términos de gramos de CBD por planta de tres variedades de *Cannabis sativa* L. sembradas en suelo y sustrato. NS, *, ** o *** no significativo o significativo a p≤ 0,05, 0,01 o 0,001, respectivamente.

Tratamiento	Rendimiento (g flor seca/planta)	% THC (Cosecha)	% CDB (Cosecha)	CBD (g/planta)	CBD[1] (g/planta/año)
SC-Suelo	247,83 d	0,3	11,11 c	27,53 d	86,71 e
HC-Suelo	173,65 c	0,4	10,76 bc	18,68 c	61,46 d
CW-Suelo	140,33 b	0,2	8,91 a	12,50 a	37,13 a
SC-Sustrato	122,30 a	0,3	11,52 c	14,09 b	50,16 b
HC-Sustrato	114,44 a	0,3	12,61 d	14,43 b	51,65 b
CW-Sustrato	168,69 bc	0,4	10,08 b	17,00 c	55,93 c
Significancia	***	NS	***	***	**

*Letras distintas indican diferencias significativas de acuerdo con el test de Tukey (p≤0,05). Letras iguales indican que las medias no son estadísticamente significativas (≤0,05).
[1]Datos obtenidos de acuerdo con los resultados del capítulo 2.

5.5 Discusión

Se ha encontrado que en Cannabis el rendimiento puede modificarse tanto por alteraciones en los métodos de producción como por efecto de la variedad (Faux *et al.,* 2013). Es muy importante evaluar los métodos de producción convencional comparativamente y en diferentes variedades con el fin de ajustar los sistemas de producción de esta planta y

obtener el mejor rendimiento. En este estudio se encontró que el rendimiento de las plantas de Cannabis depende de la variedad y del medio de cultivo que se utilice.

Las plantas tienen una gran capacidad para modificar su morfología y fisiología en respuesta a las condiciones ambientales y de establecimiento (Moher *et al.,* 2022). Durante las primeras semanas, el crecimiento tanto en suelo como sustrato aumentó rápidamente, lo que es propio de la etapa de desarrollo vegetativo. Luego, durante el desarrollo de órganos reproductivos, se presentaron cambios en la nutrición y la estequiometría foliar mostrando una rápida disminución en la relación N:P y K:P después de iniciada la fase de floración (Tabla 5-1). Este cambio nutricional, hacia una mayor absorción de P, coincide con el evento organogénico normal de primordios de inflorescencias emergentes y desarrollo de órganos en plantas vasculares (Maathuis, 2009). Esto generó un cambio en algunos de los componentes de rendimiento cuantitativos de Cannabis después de iniciada la etapa de floración y coincide con lo reportado por Caplan *et al.* (2019a) y Yep *et al.* (2020). Respecto al número de foliolos no se presentaron diferencias significativas entre suelo y sustrato, y esto se debe a que la morfología de las hojas de Cannabis no se altera en la etapa reproductiva si en la etapa vegetativa presenta un crecimiento óptimo, produciendo así hojas de primer orden hasta más de cuatro ordenes con un número de foliolos impar (Spitzer-Rimon *et al.,* 2019). La longitud del peciolo fue el único componente de rendimiento que fue mayor en el sustrato comparado con el suelo y puede deberse a una medida mitigatoria del estrés por deficiencia de N, ya que se ha reportado que bajo condiciones de estrés se activa una respuesta hormonal mediada por ácido abscísico (ABA) y giberelinas (GA) que regula la elongación del peciolo (Jin *et al.,* 2017).

Los demás componentes de rendimiento medidos fueron mayores en suelo que en sustrato (Tabla 5-2). Esto podría ser causado por el efecto propio del medio de crecimiento de cultivo que genera modificaciones anatómicas y morfológicas en la altura de la planta, número de nudos y grosor del tallo (Caplan *et al.,* 2019). Una disminución en el desempeño fotosintético en sustrato (ver capítulo 4), que resulta en una reducción del crecimiento y desarrollo, genera hojas de menor tamaño, menor altura de la planta, menor número de nudos y menor rendimiento (Rodríguez-Yzquierdo *et al.,* 2021). El número de nudos está directamente relacionado con una menor altura y menor elongación de los entrenudos (Yep *et al.,* 2020). El menor número de nudos lleva a que las plantas tengan menor número de ramas productivas de segundo y tercer orden (Spitzer-Rimon *et al.* 2019) (Tabla 5-5) y, por tanto, el peso de la planta total y de las ramas productivas va a disminuir y todas éstas variables tienen un efecto directo sobre el rendimiento en términos de flor seca (Burgel *et al.,* 2020).

Las variables cualitativas medidas en la fase de floración muestran modificaciones en la coloración de las hojas y peciolos entre plantas en suelo y sustrato (Tabla 5-4). Este cambio puede ser un efecto directo de la deficiencia de N, ya que ésta causa síntomas visuales en las plantas como clorosis y bajo desarrollo (Uchida, 2000; McCauley *et al.*, 2009; Saloner y Bernstein, 2021). La pigmentación del peciolo con compuestos antociánicos con frecuencia indica que la planta se encuentra ante una condición de estrés, aunque puede ser una característica propia de la variedad (Liang y He, 2018).

El medio de cultivo puede influir en la potencia de la inflorescencia, es decir concentraciones de cannabinoides y terpenos. El aumento en las concentraciones de CBD en la biomasa de las inflorescencias de SC y HC en sustrato podría deberse a factores ambientales. Se ha encontrado que el estrés ambiental, como el estrés por nutrición, estrés hídrico o estrés salino aumenta la concentración de cannabinoides en *C. sativa* (Caplan *et al.*, 2019b). Después de los 30 ddt, las plantas de sustrato mostraron clorosis foliar, clorosis marginal y hojas quemadas (Figura suplementaria 4) debido a la expresión de una deficiencia de N. Asimismo, la zona radical en sustrato generó estrés a través del tamaño limitado de la matera, generando un aumento en la producción de metabolitos secundarios como mecanismo de defensa similar a lo reportado por Yep *et al.* (2020), debido a que el CBD es un compuesto a base de resorcinol que tiene propiedades antioxidantes (Hampson *et al.,* 1998) y se ha demostrado su efecto de protección del aparato fotosintético ante especies reactivas de oxígeno (Hacke *et al.,* 2019) bajo la condición de estrés por N (Saloner y Bernstein, 2021) y tamaño de la matera (Yep *et al.,* 2020).

Por otro lado, las diferencias entre suelo y sustrato relacionado con la concentración de cannabinoides y rendimiento de flor seca (Tabla 5-6) se debe a las diferencias en la concentración de nutrientes, el equilibrio de los nutrientes de las plantas y el momento de la aplicación (Caplan *et al.,* 2017; Backer *et al.,* 2019). Aunque en la experimentación se aplicaron las mismas concentraciones de nutrientes y fuentes de fertilizantes, el momento de aplicación varió entre suelo y sustrato, pues en sustrato, se presenta un mayor porcentaje de drenaje por la estructura propia del medio. Las concentraciones más altas de cannabinoides en las plantas de sustrato son el resultado también de un efecto de dilución de la biomasa de la inflorescencia debido a la deficiencia de N, es decir, se produjo una inflorescencia más pequeña con una mayor proporción de brácteas perigonales, donde residen principalmente los tricomas glandulares, respecto a la otra biomasa de la inflorescencia, es decir, tallo y hojas de azúcar, lo que produce una mayor concentración de cannabinoides (Caplan *et al.,* 2017; Yep *et al.,* 2020).

5.6 Conclusiones

En esta investigación se evaluaron los componentes de rendimiento y el rendimiento en términos de flor seca y potencia de dos de los cannabinoides más importantes de Cannabis medicinal sembradas en suelo y sustrato. Se encontró una variación nutricional cercano a cosecha (90 ddt), determinada principalmente por una deficiencia de N y un exceso de Mg en plantas de sustrato. Los componentes de rendimiento cuantitativos y cualitativos mostraron que se asocian al rendimiento final de las plantas de Cannabis. Variables como la altura de la planta, ancho del foliolo central, grosor del tallo y la longitud del peciolo, pueden usarse como como variables predictivas de rendimiento, las cuales mostraron resultados diferenciales entre suelo y sustrato para las tres variedades evaluadas. Las variables descriptivas durante la etapa de floración son herramientas visuales que se asocian directamente con los resultados finales de rendimiento. Las variedades SC y HC en suelo presentaron mayor rendimiento de flor seca, pero menor porcentaje de CBD. CW

en sustrato presentó el mayor rendimiento de flor seca y porcentaje de CBD. Las plantas con mayor rendimiento de flor seca fueron las que obtuvieron el mayor rendimiento de CBD en gramos por planta, lo que indicaría que el rendimiento de CBD, es directamente proporcional al rendimiento de flor seca de las plantas. SC y HC deben establecerse en condiciones de suelo, mientras que CW debe establecerse en fibra de coco y perlita en materas de 12 L de capacidad.

5.7 Referencias

Andre, C.M., Hausman, J.F., y Guerriero, G. (2016). *Cannabis sativa*: The plant of the thousand and one molecules. Front. Plant Sci. 7:19. *doi: 10.3389/fpls.2016.00019.*

Backer, R., Schwinghamer, T., Rosenbaum, P., McCarty, V., Eichhorn Bilodeau, S., Lyu, D., Ahmed, M.B., Robinson, G., Lefsrud, M., Wilkins, O., y Smith, D.L. (2019). Closing the yield gap for Cannabis: a meta-analysis of factors determining Cannabis yield. Front. Plant Sci. 10, 1-15. *doi: 10.3389/fpls.2019.00495*

Baron, E.P. (2018). Medicinal properties of cannabinoids, terpenes, and flavonoids in Cannabis, and benefits in migraine, headache, and pain: An update on current evidence and Cannabis science. Headache, 58(7), 1139–1186. *doi: 10.1111/head.13345.*

Bernstein, N., Gorelick, J., Zerahia, R., y Koch, S. (2019). Impact of N, P, K, and humic acid supplementation on the chemical profile of medical Cannabis (*Cannabis sativa* L). Front. Plant Sci. 10, 1‑13. *doi: 10.3389/fpls.2019.00736.*

Booth, J.K., y Bohlmann, J. (2019). Terpenes in *Cannabis sativa* – From plant genome to humans. Plant Science. 284, 67–72. *doi: 10.1016/j.plantsci.2019.03.022.*

Bouchard, M. (2008). Towards a realistic method to estimate Cannabis production in industrialized countries. Contemporary Drug Problems. 35, 291-320. *doi:10.1177/009145090803500206.*

Bunt, A.C. (1988). Media and Mixes for Container-Growth Plants; Unwin Hyman: London, UK.

Burgel, L., Hartung, J., y Graeff-Hönninger, S. (2020). Impact of Different Growing Substrates on Growth, Yield and Cannabinoid Content of Two *Cannabis sativa* L. Genotypes in a Pot Culture. Horticulturae. 6(4), 62. *doi:10.3390/horticulturae6040062.*

Campbell, B.J., Berrada, A.F., Hudalla, C., Amaducci, S., y McKay, J.K. (2019). Genotype x Environment Interactions of Industrial Hemp Cultivars Highlight Diverse Responses to Environmental Factors. Agrosyst. Geosci. Environ. 2, 1–11. *doi: 10.2134/age2018.11.0057*.

Caplan, D., Dixon, M., y Zheng, Y. (2017). Optimal rate of organic fertilizer during the flowering stage for Cannabis grown in two coir-based substrates. HortScience 52, 1796‑1803. *doi: 10.21273/HORTSCI12401-17.*

Caplan, D., Dixon, M., y Zhenga, Y. (2019a). Coir-based growing substrates for indoor Cannabis production. Acta Hortic. 1266, 55-62. *doi: 10.17660/ActaHortic.2019.1266.9.*

Caplan, D., Dixon, y M., Zheng, Y. (2019b). Increasing inflorescence dry weight and cannabinoid content in medical Cannabis using controlled drought stress. HortScience. 54, 964-969. *doi: 10.21273/HORTSCI13510-18.*

De Meijer, E. (2014). The chemical phenotypes (chemotypes) of Cannabis. In Handbook of Cannabis; Oxford University Press: Oxford, UK. pp. 89-110.

Evans, M.R., y Gachukia, M. (2004). Fresh Parboiled Rice Hulls Serve as an Alternative to Perlite in Greenhouse Crop Substrates. HortScience. 39, 232–235. *doi: 10.21273/HORTSCI.39.2.232.*

Farag, S., y Kayser, O. (2015). Cultivation and breeding of *Cannabis sativa* L. For preparation of standardized extracts for medicinal purposes. In: Mathe, A. (Ed.), Medicinal and Aromatic Plants of the World. Springer, Budapest, Hungary, pp. 165–186. *doi: 10.1007/978-94-017-9810-5_9.*

Faux, A.M., Draye, X., Lambert, R., d'Andrimont, R., Raulier, P., y Bertin, P. (2013). The relationship of stem and seed yields to flowering phenology and sex expression in monoecious hemp (*Cannabis sativa* L.). European Journal of Agronomy. 47. 11–22. *doi: 10.1016/j.eja.2013.01.006.*

Fonteno, W.C. (1993). Problems & considerations in determining physical properties of horticultural substrates. In International Symposium on Horticultural Substrates Other than Soil In Situ; Acta Horticulturae: Leuven, Belgium. Volumen 342, 197–204.

Fournier, G., Richez-Dumanois, C., Duvezin, J., Mathieu, J.-P., y Paris, M. (1987). Identification of a new chemotype in *Cannabis sativa*: Cannabigerol-Dominant plants, biogenetic and agronomic prospects. Planta Med. 53, 277-280. *doi: 10.1055/s-2006-962705.*

Hacke, A.C.M., Lima, D., de Costa, F., Deshmukh, K., Li, N., Chow, A.M., Marques, J.A.,Pereira, R.P., y Kerman, K. (2019). Probing the antioxidant activity of Δ 9-tetrahydrocannabinol and cannabidiol in *Cannabis sativa* extracts. Analyst. 144(16), 4952-4961. *doi: 10.1039/c9an00890j.*

Hampson, A.J., Grimaldi, M., Axelrod, J., y Wink, D. (1998). Cannabidiol and (−) Δ9 tetrahydrocannabinol are neuroprotective antioxidants. Proc. Natl. Acad. Sci. Unit. States Am. 95 (14), 8268-8273. *doi: 10.1073/pnas.95.14.8268.*

Hussain, J., Rehman, N., Al-Harrasi, A., Ali, L., Latif, A., Albroumi, M.A. (2013). Essential oil composition and nutrient analysis of selected medicinal plants in Sultanate of Oman. Asian Pac J Trop Dis. 3(6), 421-428. *doi: 10.1016/S2222-1808(13)60095-X.*

Jin, Q., Wang, Y., Li, X., Wu, S., Wang, Y., Luo, J., Mattson, N., y Xu, Y. (2017). Interactions between ethylene, gibberellin and abscisic acid in regulating submergence induced petiole elongation in Nelumbo nucifera. Aquatic Botany, 137, 9–15. *doi:10.1016/j.aquabot.2016.11.002.*

Jin, D., Jin, S., y Chen, J. (2019). Cannabis indoor growing conditions, management practices, and post-harvest treatment: a review. Am. J. Plant Sci. 10, 925‑946. *doi: 10.4236/ajps.2019.106067.*

Laginha, A.M. (2018). High-Tech-Anbau von Cannabis. Dtsch. Apoth. Ztg. 158, 36-43. *doi:10.13140/RG.2.1.1790.2486.*

Liang, J., y He, J. (2018). Protective role of anthocyanins in plants under low nitrogen stress. Biochemical and Biophysical Research Communications. 498(4), 946–953. *doi:10.1016/j.bbrc.2018.03.087.*

Magagnini, G., Grassi, G., y Kotiranta, S. (2018). The Effect of Light Spectrum on the Morphology and Cannabinoid Content of *Cannabis sativa* L. Med. Cannabis Cannabinoids. 1, 19–27. *doi: 10.1159/000489030.*

Maathuis, F.J. (2009). Physiological functions of mineral macronutrients. Curr. Opin. Plant Biol. 12, 250–258. *doi: 10.1016/j.pbi.2009.04.003.*

McCauley, A., Jones, C., y Jacobsen, J. (2009). Plant nutrient functions and deficiency and toxicity symptoms. Nutr. Manage. Modul. 1–16.

Moher, M., Llewellyn, D., Jones, M., y Zheng, Y. (2022). Light intensity can be used to modify the growth and morphological characteristics of Cannabis during the vegetative stage of indoor production. Industrial Crops & Products. 183, 114909. *doi: 10.1016/j.indcrop.2022.114909.*

Nelson, P.V. (2003). Greenhouse Operation & Mangement; Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, USA.

Pacifico, D., Miselli, F., Carboni, A., Moschella, A., y Mandolino, G. (2008). Time course of cannabinoid accumulation and chemotype development during the growth of *Cannabis sativa* L. Euphytica. 160, 231-240. *doi: 10.1007/s10681-007-9543-y.*

Plecas, D., y Diplock, J. (2007). Marihuana growing operations in Alberta 1997–2003. Centre for Criminal Justice Research (University College of the Fraser Valley).

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 Test. Anal. 6(1-2), 31–38 *doi: 10.1002/dta.1531.*

Raviv, M., Wallach, R., Silber, A., y Bar-Tal, A. (2002). Substrates and their Analysis. En Hydroponic Prod. Veg. Ornam. Sawas, D., Passam, H., Eds.; Embryo Publications: Atenas, Grecia, pp. 25-105.

Rodríguez-Yzquierdo, G., Patiño, M., y Betancourt, M. (2021). Physiological characterization in medicinal *Cannabis* plants during different phenological stages under biotic stress. Agron. Mesoam. 32(3), 823-840. *doi:10.15517/am.v32i3.44443.*

Saloner, A., y Bernstein, N. (2021). Nitrogen supply affects cannabinoid and terpenoid profile in medical Cannabis (*Cannabis sativa* L.). Industrial Crops & Products. 167, 113516. *doi: 10.1016/j.indcrop.2021.113516*

Spitzer-Rimon, B., Duchin, S., Bernstein, N., y Kamenetsky, R. (2019) Architecture and Florogenesis in Female *Cannabis sativa* Plants. Front. Plant Sci. 10:350. *doi: 10.3389/fpls.2019.00350.*

Uchida, R., 2000. Essential nutrients for plant growth: nutrient functions and deficiency symptoms. Plant Nutr. Manage. Hawaii's soils. 31–55.

Van Os, E., Gieling, T.H., y Lieth, J.H. (2019). Technical equipment in soilless production systems. In: Raviv, M., Lieth, J.H., Bar-Tal, A. (Eds.), Soilless Culture: Theory and Practice. Elsevier B.V., pp. 587‑635. *doi: 10.1016/B978-044452975-6.*

Zheng, Y. (2019). Developments in growing substrates for soilless cultivation. En: Marcelis, L., Heuvelink, E. (Eds.), Achieving Sustainable Greenhouse Cultivation. Burleigh Dodds Science Publishing, Cambridge, UK, pp. 1‑16. *doi: 10.19103/AS.2019.0052.11.*

6. Discusión general

Debido a las condiciones actuales de legalización del cultivo de Cannabis medicinal en países del trópico, incluido Colombia, se ha generado un aumento en la producción con fines medicinales y científicos, generando desafíos agronómicos relacionados con el manejo del uso del suelo, la nutrición mineral, la labor cultural y el manejo integrado del cultivo, todos ellos, factores que afectan la productividad, calidad y costos de producción. Aunque uno de los factores más importantes es el medio de establecimiento de cultivo, aún no se ha caracterizado el efecto de la siembra de Cannabis en suelo y sustrato sobre el desempeño fisiológico, las curvas de extracción de nutrientes y el rendimiento. Los resultados obtenidos en esta investigación mostraron que en las variedades Souce Cauca, Calotoweed y Higthcol sembradas en fibra de coco y perlita se modificó el rendimiento fotosintético debido a una deficiencia de marcada de N, lo que generó un cambio en la fenología de la planta, una disminución de los componentes de rendimiento y un aumento en la producción de metabolitos secundarios.

Para las tres variedades evaluadas se establecieron cinco etapas fenológicas principales (Tabla 2-2) y dentro de cada una se determinaron los estadios fenológicos secundarios obteniendo la escala fenológica extendida y ajustada (Tabla 2-3) a lo que usualmente se ha trabajado para cáñamo (Mediavilla *et al.,* 1998; Mischenko *et al.,* 2017). Se pudo determinar debido a que las tres variedades mostraron la arquitectura típica de las plantas de Cannabis (Spitzer-Rimon *et al.,* 2019), que consiste en segmentos modulares constituidos por un entrenudo y un nudo regulados por la dominancia apical y que en consecuencia generan que las plantas formen un tallo principal con ramificaciones laterales (Danziger y Bernstein, 2021), las cuales sostienen las inflorescencias femeninas pistiladas constituidas por brácteas, tricomas glandulares y hojas apiladas (Park *et al.,* 2014).

Para los cuatro estadios fenológicos visualizados se determinó el tiempo calendario (Figura 2-2, Tabla 2-4) y los GDC (Tabla 2-5). Las variedades SC, HC y CW en sustrato mostraron un ciclo menor en días comparado con las plantas de suelo y eso se debe a la condición de siembra en los diferentes medios de cultivo, ya que se ve modificada la temperatura, humedad y composición de medio (Jaramillo-Robledo, 2005) o se altera la zona de crecimiento de raíces generando una condición de estrés, acelerando así, los procesos de crecimiento y desarrollo (Yep *et al.,* 2020). Entre variedades se obtuvieron resultados diferentes y esto se debe a que la morfología de cada genotipo se modifica ante condiciones ambientales cambiantes, generando un desarrollo desigual (Faux *et al.,* 2013). Como los GDC pueden llegar a ser más específicos que hablar de tiempo calendario (Salazar-Gutiérrez *et al.,* 2013), pero dependen de los cambios en la temperatura ambiental, los resultados de grados días fueron muy similares a lo obtenido en días, ya que las condiciones de temperatura máxima y mínima fueron iguales para los dos medios de cultivo (Figura suplementaria 1). Sin embargo, los GDC deben considerarse en programas de predicción de cosechas y determinaciones de rendimiento ante condiciones cambiantes de temperatura ambiental (Khan *et al.,* 2013).

También se realizó la evaluación de la solución de suelo y sustrato y el análisis convencional de suelo en etapas clave de cultivo para relacionarlas con el comportamiento nutricional foliar en las plantas de Cannabis (Tabla 3-2 y Tabla 3-3). Se encontró altos contenidos de Na^+ y K^+ en la solución del sustrato debido probablemente a un procesamiento insuficiente del medio previo a siembra para remover el exceso de estos cationes y asegurar la movilización de cationes divalentes como el Ca^{2+} y Mg^{2+} (Poulter, 2014; Nemati *et al.,* 2021). Aunque no hubo afectaciones durante la etapa vegetativa en las tres variedades, en la etapa reproductiva se generó una acumulación de nutrientes proveniente de la fertilización, salinizando el sustrato y generando una toma de nutrientes reducida (Guo *et al.,* 2021). En suelo, por el contrario, la planta al tener un sistema radical complejo, extrajo todos los nutrientes disponibles y por lo tanto, la CE se redujo significativamente (Mańkowski *et al.,* 2020). En el contenido nutricional foliar (Tabla 3-4) se encontró una reducción significativa del N en las plantas de sustrato, comparado con las de suelo, a niveles por debajo del mínimo reportado por (Cockson *et al.,* 2019), indicando que las plantas de Cannabis son N-fílicas (Yep *et al.,* 2020) pues se requieren concentraciones en el follaje de más del 4,0% de N para un óptimo crecimiento y desarrollo (Saloner *et al.,* 2019). El K foliar disminuyó significativamente en las plantas de sustrato más que en suelo, pues se ha encontrado que el Cannabis requiere concentraciones altas del elemento en la fórmula de fertilización para garantizar concentraciones tisulares óptimas (Saloner *et al.,* 2019). El P aumentó su contenido después de iniciada la etapa de floración debido a que se requiere en la formación de las inflorescencias y desarrollo de tricomas glandulares donde se concentran la mayor cantidad de cannabinoides (Yep *et al*., 2020). El contenido de Mg aumentó significativamente en sustrato después de los 90 ddt debido a que censó un bajo contenido de clorofilas debido a la deficiencia de N (Shi *et al.,* 2021). Tanto el B como el S estuvieron en condiciones deficitarias en suelo y sustrato y puede ser debida a un mayor requerimiento por parte de las plantas de Cannabis (Muscolo *et al.,* 2022). Los contenidos de metales como el Fe, Mn, Cu y Zn se incrementaron a lo largo del ciclo del cultivo y se debe a que las plantas de Cannabis tienen una alta tolerancia y capacidad de almacenar metales, y suelen comportarse como plantas fitorremediadoras (Linger *et al.,*2022). Con los contenidos nutricionales foliares se determinaron las curvas de extracción de macro y microelementos (Figura 3-4 y Figura 3-5) encontrando que la época de mayor extracción nutricional es a los 60 ddt, lo que coincide con la formación de estructuras reproductivas de las plantas (Spitzer-Rimon *et al.,* 2019; Yep *et al.,* 2020).

Los cambios en el contenido nutricional foliar generaron modificaciones en las variables relacionadas con el rendimiento fotosintético. En sustrato, para las tres variedades se disminuyó la Fv/Fm, la ETR y el Y(II), y se aumentó el NPQ después de los 50 días (Figura 4-2). Esto se debe a que las plantas se encontraban sometidas a un estrés nutricional marcado principalmente por la deficiencia de N, ya que las plantas con menor disponibilidad de este nutriente son más susceptibles a presentar inhibición en la tasa de transporte de electrones (Pérez-Asseff *et al.,* 2007) y generan mecanismos para disipar la energía absorbida por una vía diferente a la fotoquímica (Goh, 2012). Asimismo, se redujo

el CRC a niveles por debajo de lo reportado para Cannabis (Tang *et al.,* 2017) (Figura 4-4). Al mismo tiempo se generó una disminución de g_s en las plantas de sustrato (Figura 4-3) debido a la rápida disminución del K foliar después de los 46 ddt, debido a que el K regula la apertura estomática y cuando es deficiente, reduce la g_s (Pettigrew, 2008; Yep *et al.,* 2020). Sin embargo, la reducción en ambos tratamientos puede ser generada a una condición ambiental específica tal como lo reporta Candelario-Guerrero *et al.* (2023). Estas alteraciones afectaron el proceso fotosintético en las plantas de sustrato lo que generó una disminución en el área foliar y en la distribución de masa seca aérea (Figura 4-5). Esto se debe a que la arquitectura morfológica generada en los dos medios de cultivo fue diferente, de manera que las plantas en suelo, tienen una mejor distribución de la radiación incidente lo que aumenta la producción de asimilados (Ji *et al.,* 2019) o una distribución mayor de carbono debida a la generación de mayor área radical (Morales *et al.,* 2016).

Una menor acumulación de biomasa en las plantas en hojas, tallos y ramas productivas en las plantas de sustrato generó una disminución de los componentes de rendimiento (Tabla 5-3 y Tabla 5-5) (Lyu *et al.,* 2022) generando modificaciones en la altura de las plantas, menor número de nudos y menor rendimiento de flor seca lo que coincide con los estudios de Burgel *et al.* (2020) y Rodríguez-Izquierdo *et al.* (2021). En concentración de cannabinoides se encontró que las plantas de sustrato produjeron mayor contenido de CBD comparado con las plantas de suelo, pero menor rendimiento de flor seca (Tabla 5-6) y esto se debe a que cuando las plantas presentan un estrés por N aumentan los contenidos de fitocannabinoides, especialmente CBD, ya que es un eliminador de especies reactivas de oxígeno (ROS) (Hampson *et al.,* 1998). Al mismo tiempo, la deficiencia de N genera inflorescencias más pequeñas, debido a las limitantes en crecimiento, con una proporción mayor de tricomas glandulares por área, generando un efecto de dilución de la biomasa (Yep *et al.,* 2020). Con base en los resultados específicos se elaboró un modelo de las respuestas de las plantas de Cannabis medicinal en condiciones de suelo y sustrato (Figura 7-1).

Referencias

Burgel, L., Hartung, J., Schibano, D., y Graeff-Hönninger, S. (2020). Impact of Different Phytohormones on Morphology, Yield and Cannabinoid Content of *Cannabis sativa* L. Plants. 9, 725. *doi: 10.3390/plants9060725.*

Candelario-Guerrero, D.A., Calabria-Parodi., L.E., Pardey-Rodríguez, C., y Vargas-Sánchez, J.J. (2023). Phenology of ten cultivars of *Cannabis sativa* L. under the environmental conditions of Palomino, La Guajira. Intropica, 18(1). *doi: 10.21676/23897864.4672.*

Cockson, P., Landis, H., Smith, T., Hicks, K., y Whipker, B.E. (2019). Characterization of Nutrient Disorders of *Cannabis sativa*. Appl. Sci. 9, 4432. *doi: 10.3390/app9204432.*

Danziger, N., y Bernstein, N. (2021) Plant architecture manipulation increases cannabinoid standardization in ‘drug-type’ medical Cannabis. Industrial Crops & Products. 167, 113528. *doi: 10.1016/j.indcrop.2021.113528.*

Faux, A.M., Draye, X., Lambert, R., d'Andrimont, R., Raulier, P., y Bertin, P. (2013). The relationship of stem and seed yields to flowering phenology and sex expression in monoecious hemp (*Cannabis sativa* L.). European Journal of Agronomy. 47. 11–22. *doi: 10.1016/j.eja.2013.01.006.*

Goh, C.H., Ko, S.M., Koh, S., Kim, Y.J., y Bae, H.J. (2012). Photosynthesis and environments: photoinhibition and repair mechanisms in plants. J. Plant Biol. 55(2), 93–101. *doi: 10.1007/s12374-011-9195-2.*

Guo, F., Luo, H., Shi, Z., Wu, Y., y Liu, H. (2021). Substrate salinity: A critical factor regulating the performance of microbial fuel cells, a review. Science of the Total Environment. 763, 143021. *doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143021*.

Hampson, A.J., Grimaldi, M., Axelrod, J., y Wink, D. (1998). Cannabidiol and (−) Δ9 tetrahydrocannabinol are neuroprotective antioxidants. Proc. Natl. Acad. Sci. Unit. States Am. 95 (14), 8268-8273. *doi: 10.1073/pnas.95.14.8268.*

Jaramillo-Robledo, A. (2005). Clima andino y café en Colombia. Cenicafe.

Ji, F.-S., Tang, L., Li, Y.-Y., Wang, W.-C., Yang, Z., Li, X.-G., et al. (2019). Differential proteomic analysis reveals the mechanism of musa paradisiaca responding to salt stress. Mol. Biol. Rep. 46, 1057–1068. *doi: 10.1007/s11033-018-4564-2.*

Khan, M., Van-Eck, H.,y Striuk, P. (2013). Model-Based Evaluation of Maturity Type of Potato Using a Diverse Set of Standard Cultivars and a Segregating Diploid Population. Potato Research, 56(1), 127-146. *doi: 10.1007/s11540-013-9235-z.*

Linger, P., Müssig, J., Fischer, H., y Kobert, J. (2002). Industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) growing on heavy metal contaminated soil: Fibre quality and phytoremediation potential. Ind. Crop. Prod. 16, 33–42. *doi: 10.1016/S0926-6690(02)00005-5.*

Lyu, D., Backer, R., y Smith, D.L. (2022). Three plant growth-promoting rhizobacteria alter morphological development, physiology, and flower yield of *Cannabis sativa* L. Industrial Crops & Products. 178, 114583. doi: *10.1016/j.indcrop.2022.114583.*

Mańkowski, J., Kołodziej, J., Pudełko, K., y Kozłowski, R. M. (2020). Bast fibres. Handbook of Natural Fibres, 393–417. *doi:10.1016/b978-0-12-818782-1.00011-0.*

Mediavilla, V., Jonquera, M., Schmid-Slembrouck, I., y Soldati, A. (1998). Decimal code for growth stages of hemp (*Cannabis sativa* L.). Journal of the international hemp association. 2(65), 68-74.

Mishchenko, S., Mokher, S., Laiko, I., Burbulis, N., Kyrychenko, H., y 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. *doi: 10.6001/zemesukiomokslai.v24i2.3496.*

Morales, J., Gómez, M., Velázquez, C., y Ambriz, E. (2016). Variación de la distribución de carbono entre la raíz y la parte aérea en tres especies de pino. Revista mexicana de ciencias forestales, 7(38), 59-66.

Muscolo, A., Marra, F., Canino, F., Maffia, A., Mallamaci, C., y Russo, Mt. (2022). Growth, nutritional quality and antioxidant capacity of lettuce grown on two different soils with sulphur-based fertilizer, organic and chemical fertilizers. Scientia Horticulturae. 305, 111421. *doi: 10.1016/j.scienta.2022.111421.*

Nemati, R., Fortin, J.-P., Craig, J., y Donald, S. (2021). Growing Mediums for Medical Cannabis Production in North America. Agronomy.11, 1366. *doi: 10.3390/agronomy11071366.*

Park S. J., Eshed Y., y Lippman Z.B. (2014). Meristem maturation and inflorescence architecture–lessons from the Solanaceae. Curr. Opin. Plant Biol. 17, 70–77. *doi: 10.1016/j.pbi.2013.11.006.*

Pérez-Asseff, J. M., Peña E.J., y Torres, C. (2007) Efecto del nitrógeno y la irradianza en la eficiencia fotosintética del anamú *Petiveria alliacea* (Phytolaccaceae). Rev. Acad. Colomb. Cienc. 31(118), 49-55. *ISSN 0370-3908.*

Pettigrew, W.T. (2008). Potassium influences on yield and quality production for maize, wheat, soybean and cotton. Physiol. Plant. 133, 670–681. *doi: 10.1111/j.1399-3054.2008.01073.x.*

Poulter, R. (2014). Quantifying differences between treated and untreated coir substrate. Acta Hortic. 1018, 557-564. *doi: 10.17660/ActaHortic.2014.1018.61.*

Rodríguez-Yzquierdo, G., Patiño, M., y Betancourt, M. (2021). Physiological characterization in medicinal Cannabis plants during different phenological stages under biotic stress. Agron. Mesoam. 32(3), 823-840. *doi:10.15517/am.v32i3.44443.*

Salazar-Gutierrez, M.R., Johnson, J., Chaves-Cordoba, B., y Hoogenboom, G. (2013) Relationship of base temperature to development of winter wheat. Int J Plant Prod. 7(4), 741-762. *doi: 10.22069/IJPP.2013.1267.*

Saloner, A., Sacks, M.M., y Bernstein, N. (2019). Response of medical Cannabis (*Cannabis sativa* L.) genotypes to K supply under long photoperiod. Front. Plant Sci. 10, 1–16. *doi: 10.3389/fpls.2019.01369*.

Spitzer-Rimon, B., Duchin, S., Bernstein, N., y Kamenetsky, R. (2019). Architecture and Florogenesis in Female *Cannabis sativa* Plants. Front. Plant Sci. 10:350. *doi: 10.3389/fpls.2019.00350.*

Tang, K., Struik, P.C., Amaducci, S., Stomph, T.-J., y Yin, X. (2017). Hemp (*Cannabis sativa* L.) leaf photosynthesis in relation to nitrogen content and temperature: implications for hemp as a bioeconomically sustainable crop. GCB Bioenergy. 9, 1573–1587. *doi: 10.1111/gcbb.12451.*

Yep, B., Gale, N.V., y Zheng Y. (2020). Comparing hydroponic and aquaponic rootzones on the growth of two drugtype *Cannabis sativa* L. cultivars during the flowering stage. Industrial Crops & Products. 157, 112881. *doi: 10.1016/j.indcrop.2020.112881.*

7. Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

Se obtiene la escala fenológica para Cannabis medicinal dioico femenino lo que facilitará la medición de esta variable en sistemas productivos y de investigación. Con la metodología de grados día se pueden establecer los momentos de cosecha y es mucho más específica que hablar de días calendario, y puede ser usado bajo condiciones ambientales cambiantes.

El sustrato utilizado, una mezcla de fibra de coco+perlita mostró desde el inicio de siembra un contenido alto de sodio, pues este sustrato tiende a contener altos niveles de sodio y potasio en comparación con otros sustratos. Esto generó que iones divalentes como el calcio y el magnesio se quedaran adheridos al sustrato generando así niveles excesivos de potasio y sodio e insuficientes de otros nutrientes. Es muy importante neutralizar la fibra de coco para evitar que, en los primeros estadios de la planta, los cationes que contiene de forma natural este material desequilibren la solución nutritiva. El sustrato mostró una acumulación de iones durante el ciclo de cultivo generando aumentos en la CE, ocasionado que las plantas no absorbieran los nutrientes disponibles en la solución de sustrato, por ello es importante no solo lavar el sustrato inicialmente, sino evaluar el contenido nutricional de drenaje con un fotómetro multiparámetro para realizar los ajustes pertinentes al programa de fertilización. Sin embargo, las plantas en sustrato durante la etapa vegetativa no mostraron alguna sintomatología, sino hasta después de iniciada la etapa de floración donde el contenido de N, Ca, S, Fe y Zn disminuyó, siendo de mayor relevancia la condición de déficit de N. Esto generó limitaciones en el rendimiento fotosintético y crecimiento de la planta, no obstante, aceleró el ciclo productivo y produjo mayor contenido de CBD. A pesar de ello el rendimiento en términos de gramos de CBD por planta fue mucho menor. En suelo la condición fue contraria, pues la CE se redujo a niveles por debajo del ideal (1,6) mostrando que gran parte de los nutrientes aplicados en el programa de fertilización y retenidos por la solución del suelo, fueron absorbidos por la planta para procesos de crecimiento, desarrollo, producción de fotoasimilados y síntesis de metabolitos secundarios. Esto generó un contenido nutricional óptimo en plantas en suelo y, por lo tanto, se mantuvo una eficiencia fotosintética que permitió obtener un rendimiento de flor seca mayor. Aunque se produjo porcentajes más bajos de CBD, el rendimiento en gramos de CBD por planta fue mayor que en sustrato. Las variedades pueden tener desempeños diferentes, tal como sucedió con la variedad CW, la cual obtuvo mejores resultados de rendimiento y potencia, en sustrato. Con los resultados de rendimiento finales es posible afirmar que la fórmula de fertilización utilizada es óptima pues funcionó adecuadamente en suelo, lo que llevaría a replantear la posibilidad de evaluar los momentos óptimos de aplicación de fuentes de fertilizantes en sustrato de acuerdo con la demanda de la planta. Las curvas de extracción de nutrientes mostraron la absorción de nutrientes por parte de las plantas. En esta investigación se generaron las curvas de extracción de nutrientes foliar, destacando como nutrientes de mayor importancia para las plantas de Cannabis al N, Ca, K, Fe, Na, Mn y Zn. Estas curvas deben usarse con la información de los lixiviados para así establecer planes de fertilización óptimos.

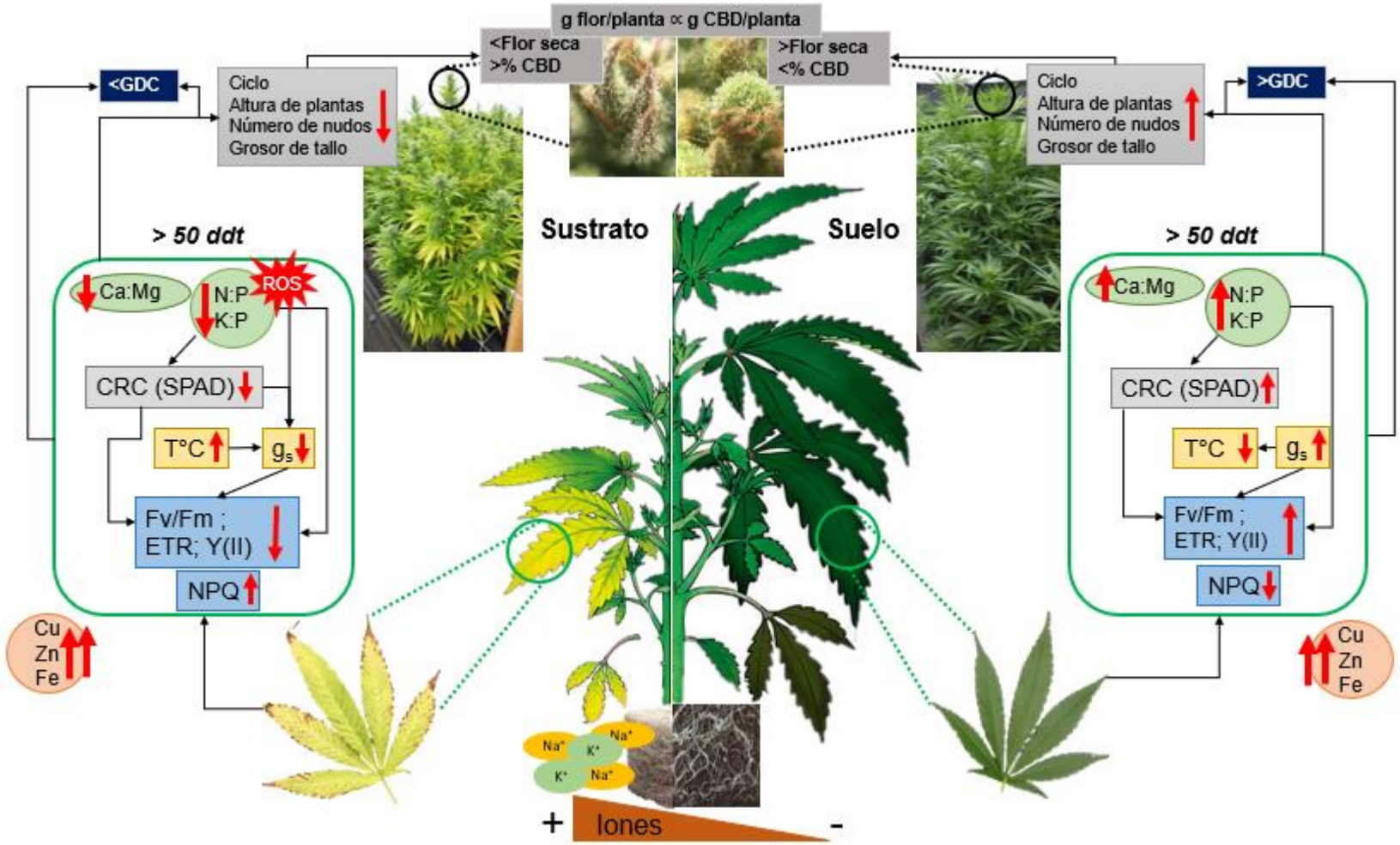

g flor/planta ∝ g CBD/planta
<Flor seca
>% CBD
>Flor seca
<% CBD
<GDC
>GDC
Ciclo
Altura de plantas
Número de nudos
Grosor de tallo
Ciclo
Altura de plantas
Número de nudos
Grosor de tallo
Sustrato
Suelo
> 50 ddt
> 50 ddt
Ca:Mg
N:P
K:P
ROS
CRC (SPAD)
T°C
gs
Fv/Fm ;
ETR; Y(II)
NPQ
Ca:Mg
N:P
K:P
CRC (SPAD)
T°C
gs
Fv/Fm ;
ETR; Y(II)
NPQ
Cu
Zn
Fe
Cu
Zn
Fe
Na+
K+
Na+
K+
Na+
+
Iones
-

Figura 7-1. ***Modelo del desempeño fisiológico, contenido nutricional y rendimiento de Cannabis medicinal en suelo y sustrato.***

Las plantas sembradas en sustrato (Lado izquierdo) después de los 50 días de trasplante presentan una clorosis foliar generalizada, más severa en las hojas viejas, esto como consecuencia de una relación Ca:Mg, N:P y K:P baja. El estrés nutricional, generado principalmente por el nitrógeno, causa una disminución en el contenido o la actividad en la enzima RuBisCO (ribulosa-1,5-bisfosfato carboxilasa/oxigenasa), lo que ralentiza el ciclo de Calvin, ya que la fase síntesis se ve limitada. En la fase foto se forman especies reactivas de oxígeno (ROS) como el superóxido y los radicales hidroxilos debido a la presencia de electrones libres y oxígeno, las cuales dañan el aparato fotosintético. Como consecuencia se genera cierre estomático, lo que disminuye el intercambio gaseoso entre la planta y la atmósfera, generando un aumento en la temperatura foliar. El estrés nutricional y oxidativo genera un menor rendimiento del aparato fotosintético de las plantas, reflejado en la disminución de Fv/Fm, ETR y Y(II). Esto va a activar las otras vías de disipación de energía con las que cuenta las plantas, produciendo un aumento en el NPQ. La condición de estrés de las plantas puede generar un ciclo de vida más corto y por lo tanto menor GDC. Asimismo, se producen plantas de menor altura, número de nudos y grosor del tallo, lo que se refleja en un menor rendimiento en términos de flor seca por planta, pero un mayor contenido de CBD debido probablemente a un efecto de dilución de la biomasa de la inflorescencia. Las plantas sembradas en suelo (Lado derecho) después de los 50 días de trasplante presentan una condición contraria. No se evidencia síntomas de estrés nutricional y oxidativo, por lo tanto, se generan plantas de mayor altura, número de nudos y grosor de tallo. Sin embargo, la formación más densa de las plantas aumenta el ciclo de cultivo y consecuentemente los grados día necesarios para completar el desarrollo. Esta condición genera un mayor rendimiento de flor seca, pero menor porcentaje de CBD. No obstante, hay una relación directamente proporcional entre el rendimiento de flor seca y los gramos de CDB por planta, lo que indica que las plantas de suelo tienen un mayor rendimiento que las plantas de sustrato.

7.2 Recomendaciones

- Un sustrato como el utilizado en esta experimentación (Sustracoco Germiplus®) debe ser lavado con algún fertilizante de síntesis química que permita desplazar el Na^+ y K^+. Se recomienda el uso de Nitrato de Calcio, el cual permite ionización del Sodio y desplazamiento de este garantizando niveles bajos en el sustrato previo a siembra.
- Para futuras evaluaciones experimentales en campo, la determinación del efecto de la zona de raíces sobre la explicación de los resultados podría permitir un mayor entendimiento de lo que sucede con las plantas de Cannabis cuando son sembradas en suelo y sustrato.
- La determinación de la curva de extracción de nutrientes en cada órgano de la planta permitiría visualizar la distribución de cada elemento y así determinar los requerimientos nutricionales exactos de las plantas en cada uno de los medios de cultivo.

8. Tablas suplementarias

Tabla suplementaria 1. Características generales de las variedades Souce Cauca (SC), Calotoweed (CW) y Higthcol (HC) determinadas en las pruebas de evaluación agronómica para la obtención del Registro Nacional de Cultivares comerciales del ICA de las tres variedades, para la subregión natural de área fría (altitud superior a 2200 msnm).

Variedades Características	Calotoweed	Higthcol	Souce Cauca
Pigmentación antociánica de la corona	Débil	Débil	Ausente
Intensidad del color verde de la hoja	Medio	Medio	Medio
Longitud del peciolo (cm)	1,36	1,81	2,33
Pigmentación antociánica del peciolo	Débil	Ausente	Ausente
Número de foliolos	6,33	5,73	5,93
Longitud del foliolo central de la hoja (cm)	7,68	7,17	8,48
Anchura del foliolo central de la hoja (cm)	0,85	1,01	1,17
Época de floración masculina	No aplica	No aplica	No aplica
Proporción de plantas hermafroditas (%)	0	0	0
Proporción de plantas femeninas (%)	100	100	100
Proporción de plantas masculinas (%)	0	0	0
Color del tallo principal	Verde	Verde	Verde
Longitud del entrenudo del tallo principal (cm)	1,16	1,09	1,34
Grosor del tallo principal (cm)	0,27	0,33	0,34
Profundidad de los surcos del tallo principal	Poco profundos	Medios	Poco profundos
Médula en la sección transversal	Ausente	Ausente	Ausente
Pigmentación antociánica de las flores femeninas	Débil	Ausente	Ausente
Pigmentación antociánica de las flores masculinas	No aplica	No aplica	No aplica
Altura del tallo cosechado (cm)	151,36	163,83	161,10
Número de tallos por planta	3,70	8,23	6,10

Rendimiento de flores (13% de humedad) (g/planta)	156,38	155,86	133,31
Rendimiento de biomasa (materia fresca) (g/planta)	298,78	541,67	657,585
THC (%)	0,85	0,67	0,44
CBD (%)	10,67	15,38	11,06

Tabla suplementaria 2. Ecuaciones y valor R^2 para las curvas de extracción de nutrientes foliar de macro y micronutrientes en tres variedades de *Cannabis sativa* L. (Souce Cauca (SC), Calotoweed (CW) y Higthcol (HC)) en condiciones de suelo y sustrato.

Nutriente	SC-Suelo	CW-Suelo	HC-Suelo
N	$y = -12{,}913x^3 + 94{,}131x^2 - 154{,}44x + 86{,}406$ $R^2 = 0{,}9967$	$y = -12{,}609x^3 + 97{,}763x^2 - 185{,}4x + 110{,}14$ $R^2 = 0{,}9893$	$y = -17{,}892x^3 + 140{,}5x^2 - 277{,}7x + 161{,}89$ $R^2 = 0{,}9753$
P	$y = -0{,}9734x^3 + 7{,}8046x^2 - 13{,}546x + 8{,}0041$ $R^2 = 1$	$y = -0{,}9612x^3 + 7{,}883x^2 - 14{,}83x + 8{,}7603$ $R^2 = 0{,}9958$	$y = -1{,}4795x^3 + 12{,}189x^2 - 24{,}71x + 14{,}72$ $R^2 = 0{,}9678$
K	$y = -8{,}6377x^3 + 61{,}355x^2 - 95{,}87x + 51{,}838$ $R^2 = 0{,}9783$	$y = -6{,}5554x^3 + 48{,}895x^2 - 82{,}972x + 44{,}965$ $R^2 = 0{,}9951$	$y = -11{,}255x^3 + 86{,}024x^2 - 161{,}73x + 90{,}35$ $R^2 = 0{,}994$
Ca	$y = -8{,}8278x^3 + 61{,}123x^2 - 87{,}698x + 48{,}14$ $R^2 = 0{,}9992$	$y = -8{,}0889x^3 + 56{,}295x^2 - 79{,}596x + 35{,}656$ $R^2 = 0{,}979$	$y = -11{,}978x^3 + 89{,}141x^2 - 157{,}44x + 84{,}804$ $R^2 = 0{,}9953$
Mg	$y = -1{,}4492x^3 + 9{,}9568x^2 - 12{,}866x + 6{,}9492$ $R^2 = 0{,}9976$	$y = -1{,}7966x^3 + 13{,}364x^2 - 22{,}208x + 12{,}02$ $R^2 = 1$	$y = -2{,}6619x^3 + 20{,}14x^2 - 36{,}474x + 19{,}898$ $R^2 = 0{,}9994$
S	$y = -0{,}4194x^3 + 3{,}1074x^2 - 4{,}7441x + 2{,}8164$ $R^2 = 0{,}9556$	$y = -0{,}3137x^3 + 2{,}2804x^2 - 3{,}0168x + 1{,}4474$ $R^2 = 0{,}9583$	$y = -0{,}5975x^3 + 4{,}7119x^2 - 8{,}9414x + 5{,}1436$ $R^2 = 1$
Na	$y = -0{,}0096x^3 + 0{,}0547x^2 + 0{,}0156x - 0{,}0328$ $R^2 = 0{,}9177$	$y = -0{,}0025x^3 + 0{,}0095x^2 + 0{,}0862x - 0{,}086$ $R^2 = 0{,}9068$	$y = -0{,}0058x^3 + 0{,}0184x^2 + 0{,}1113x - 0{,}1136$ $R^2 = 0{,}905$
Fe	$y = -0{,}0575x^3 + 0{,}4514x^2 - 0{,}8126x + 0{,}4777$ $R^2 = 0{,}9963$	$y = -0{,}0231x^3 + 0{,}1722x^2 - 0{,}2162x + 0{,}104$ $R^2 = 0{,}9923$	$y = -0{,}0208x^3 + 0{,}1489x^2 - 0{,}1463x + 0{,}0417$ $R^2 = 0{,}993$
Mn	$y = -0{,}0163x^3 + 0{,}1391x^2 - 0{,}287x + 0{,}1828$ $R^2 = 0{,}9987$	$y = -0{,}0084x^3 + 0{,}068x^2 - 0{,}1147x + 0{,}0656$ $R^2 = 0{,}9958$	$y = 0{,}0015x^3 - 0{,}0203x^2 + 0{,}1022x - 0{,}0715$ $R^2 = 0{,}8211$
Cu	$y = -0{,}0017x^3 + 0{,}0143x^2 - 0{,}0278x + 0{,}0175$ $R^2 = 0{,}9879$	$y = -0{,}0017x^3 + 0{,}0145x^2 - 0{,}0297x + 0{,}0184$ $R^2 = 0{,}9865$	$y = -0{,}0021x^3 + 0{,}0177x^2 - 0{,}0366x + 0{,}0221$ $R^2 = 0{,}9771$
Zn	$y = -0{,}0223x^3 + 0{,}1864x^2 - 0{,}3924x + 0{,}2527$ $R^2 = 0{,}975$	$y = -0{,}0134x^3 + 0{,}1149x^2 - 0{,}2362x + 0{,}1478$ $R^2 = 0{,}9878$	$y = -0{,}0194x^3 + 0{,}1615x^2 - 0{,}3359x + 0{,}2045$ $R^2 = 0{,}9587$
B	$y = -0{,}0191x^3 + 0{,}147x^2 - 0{,}2761x + 0{,}1635$ $R^2 = 0{,}994$	$y = -0{,}0193x^3 + 0{,}1496x^2 - 0{,}2829x + 0{,}1633$ $R^2 = 0{,}9891$	$y = -0{,}0209x^3 + 0{,}1619x^2 - 0{,}3146x + 0{,}1809$ $R^2 = 0{,}9782$
Nutriente	**SC- Sustrato**	**CW- Sustrato**	**HC-Sustrato**
N	$y = -4{,}5221x^3 + 27{,}384x^2 - 21{,}511x + 12{,}654$ $R^2 = 0{,}9959$	$y = -8{,}4668x^3 + 58{,}813x^2 - 84{,}556x + 43{,}423$ $R^2 = 0{,}9579$	$y = -3{,}0596x^3 + 15{,}477x^2 + 4{,}6026x - 10{,}775$ $R^2 = 0{,}9273$
P	$y = -0{,}9735x^3 + 7{,}1612x^2 - 11{,}34x + 6{,}9546$ $R^2 = 0{,}9941$	$y = -1{,}3693x^3 + 10{,}615x^2 - 18{,}817x + 10{,}695$ $R^2 = 0{,}9953$	$y = -0{,}6945x^3 + 4{,}7922x^2 - 6{,}1079x + 2{,}7788$ $R^2 = 0{,}9753$

K	$y = -4{,}019x^3 + 25{,}354x^2 - 25{,}399x + 11{,}838$ $R^2 = 0{,}9475$	$y = -5{,}9333x^3 + 40{,}902x^2 - 56{,}627x + 25{,}251$ $R^2 = 0{,}8703$	$y = -4{,}4738x^3 + 30{,}536x^2 - 42{,}327x + 19{,}879$ $R^2 = 0{,}9209$
Ca	$y = -3{,}2031x^3 + 18{,}018x^2 - 6{,}7026x + 0{,}8283$ $R^2 = 0{,}9369$	$y = -5{,}6279x^3 + 37{,}012x^2 - 43{,}062x + 16{,}077$ $R^2 = 0{,}8728$	$y = -2{,}3526x^3 + 12{,}09x^2 + 1{,}4821x - 6{,}6059$ $R^2 = 0{,}9889$
Mg	$y = -0{,}9845x^3 + 6{,}2296x^2 - 6{,}0246x + 4{,}8705$ $R^2 = 0{,}994$	$y = -1{,}6773x^3 + 11{,}369x^2 - 14{,}322x + 7{,}0026$ $R^2 = 0{,}939$	$y = -0{,}5509x^3 + 2{,}2532x^2 + 4{,}4102x - 4{,}3522$ $R^2 = 0{,}9678$
S	$y = -0{,}1791x^3 + 0{,}9902x^2 + 0{,}0143x - 0{,}1571$ $R^2 = 0{,}9287$	$y = -0{,}3966x^3 + 2{,}7218x^2 - 3{,}3447x + 1{,}5356$ $R^2 = 0{,}9318$	$y = -0{,}1636x^3 + 0{,}8688x^2 + 0{,}1441x - 0{,}5802$ $R^2 = 0{,}815$
Na	$y = 0{,}0359x^4 - 0{,}4231x^3 + 1{,}6815x^2 - 2{,}5366x + 1{,}2712$ $R^2 = 1$	$y = -0{,}0046x^3 + 0{,}0123x^2 + 0{,}1245x - 0{,}1185$ $R^2 = 0{,}7538$	$y = -0{,}061x^3 + 0{,}5058x^2 - 1{,}1256x + 0{,}728$ $R^2 = 0{,}8774$
Fe	$y = -0{,}0515x^3 + 0{,}402x^2 - 0{,}7682x + 0{,}4803$ $R^2 = 0{,}9934$	$y = 0{,}0991x^4 - 1{,}1817x^3 + 4{,}7876x^2 - 7{,}4789x + 3{,}8127$ $R^2 = 1$	$y = -0{,}0274x^3 + 0{,}2013x^2 - 0{,}3407x + 0{,}1917$ $R^2 = 0{,}9951$
Mn	$y = -0{,}0179x^3 + 0{,}1418x^2 - 0{,}2568x + 0{,}1575$ $R^2 = 0{,}9832$	$y = -0{,}0128x^3 + 0{,}0854x^2 - 0{,}063x + 0{,}0069$ $R^2 = 0{,}9612$	$y = -0{,}013x^3 + 0{,}0989x^2 - 0{,}1752x + 0{,}1043$ $R^2 = 0{,}9978$
Cu	$y = -0{,}0014x^3 + 0{,}012x^2 - 0{,}0243x + 0{,}0161$ $R^2 = 0{,}9829$	$y = -0{,}0016x^3 + 0{,}0132x^2 - 0{,}0243x + 0{,}0145$ $R^2 = 0{,}996$	$y = -0{,}001x^3 + 0{,}0083x^2 - 0{,}0152x + 0{,}0091$ $R^2 = 0{,}9989$
Zn	$y = -0{,}0075x^3 + 0{,}0526x^2 - 0{,}0674x + 0{,}0405$ $R^2 = 0{,}9924$	$y = -0{,}0109x^3 + 0{,}0863x^2 - 0{,}1514x + 0{,}0867$ $R^2 = 0{,}9849$	$y = -0{,}0074x^3 + 0{,}0507x^2 - 0{,}0656x + 0{,}0295$ $R^2 = 0{,}9412$
B	$y = -0{,}015x^3 + 0{,}1055x^2 - 0{,}1601x + 0{,}0871$ $R^2 = 0{,}9561$	$y = -0{,}0222x^3 + 0{,}1586x^2 - 0{,}249x + 0{,}1192$ $R^2 = 0{,}9697$	$y = -0{,}0141x^3 + 0{,}0987x^2 - 0{,}1484x + 0{,}0681$ $R^2 = 0{,}9742$

Tabla suplementaria 3. Porcentaje de participación de los cationes en la conductividad eléctrica de la solución del suelo y del sustrato.

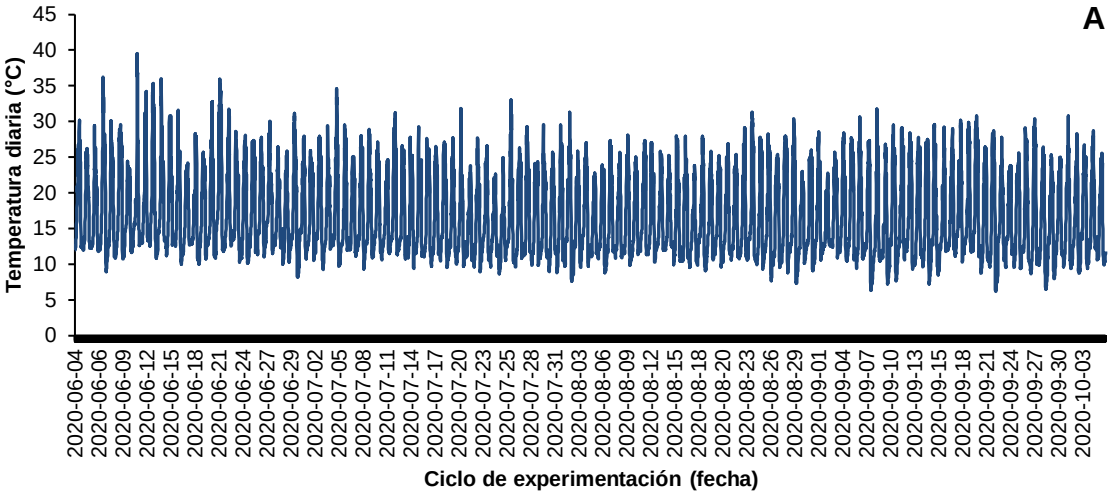
			Antes de siembra		***Finalizando etapa vegetativa***		***Finalizando ciclo total del cultivo***	
Tratamiento	**Cationes**	**meq**	**ppm/peso equivalente**	**%**	**ppm/peso equivalente**	**%**	**ppm/peso equivalente**	**%**
Suelo	**K^+**	39,1	8,440	35%	Sin dato		2,230	35%
	Ca^{2+}	20	8,350	35%			1,625	25%
	Mg^{2+}	12,16	5,189	22%			1,546	24%
	Na^+	23	1,887	8%			0,978	15%
	$N\text{-}NH_4^+$	17	0,145	1%			0,046	1%
	Sumatoria		24,011				6,426	
	CE calculada		2,401				0,643	
Sustrato	**K^+**	39,1	12,941	46%	25,064	34%	14,885	24%
	Ca^{2+}	20	1,740	6%	17,700	24%	15,850	26%
	Mg^{2+}	12,16	2,763	10%	16,776	23%	19,490	31%
	Na^+	23	10,957	39%	13,913	19%	11,391	18%
	$N\text{-}NH_4^+$	17	0,028	0%	0,183	0%	0,506	1%
	Sumatoria		28,429		73,636		62,123	

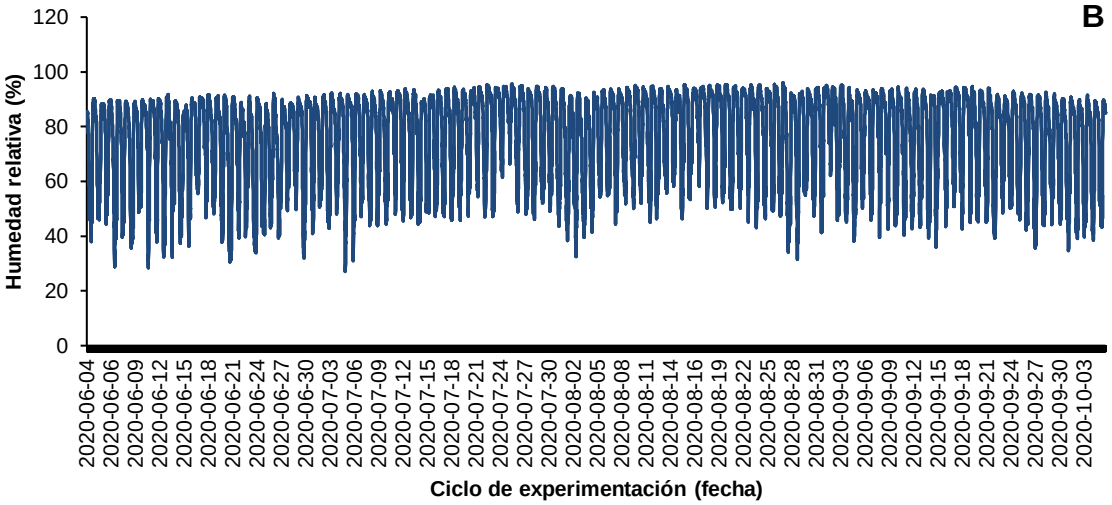
Tabla suplementaria 4. MANOVA de la combinación de los tratamiento y los días después de trasplante para las tres variedades (Souce Cauca, Higthcol y Calotoweed) respecto a las variables fisiológicas. Los valores indican la significancia con un p≤0,05.

Tratamiento*ddt	Higthcol	Souce Cauca	Calotoweed
Suelo 35 - Suelo 20	0,000	0,220	0,170
Suelo 50 - Suelo 20	0,000	0,000	0,000
Suelo 65 - Suelo 20	0,000	0,000	0,000
Suelo 80 - Suelo 20	0,000	0,000	0,000
Suelo 95 - Suelo 20	0,000	0,000	0,000
Sustrato 20 - Suelo 20	1,000	1,000	1,000
Sustrato 35 - Suelo 20	0,000	0,073	0,004
Sustrato 50 - Suelo 20	0,000	0,000	0,000
Sustrato 65 - Suelo 20	0,000	0,000	0,000
Sustrato 80 - Suelo 20	0,000	0,000	0,000
Sustrato 95 - Suelo 20	0,000	0,000	0,000
Suelo 50 - Suelo 35	0,000	0,001	0,000
Suelo 65 - Suelo 35	0,000	0,000	0,000
Suelo 80 - Suelo 35	0,000	0,000	0,000
Suelo 95 - Suelo 35	0,000	0,000	0,000
Sustrato 20 - Suelo 35	0,000	0,060	0,306
Sustrato 35 - Suelo 35	0,997	1,000	1,000
Sustrato 50 - Suelo 35	0,000	0,090	0,527
Sustrato 65 - Suelo 35	0,000	0,000	0,000
Sustrato 80 - Suelo 35	0,000	0,000	0,000
Sustrato 95 - Suelo 35	0,000	0,000	0,000
Suelo 65 - Suelo 50	0,000	0,001	0,000
Suelo 80 - Suelo 50	0,000	0,000	0,000
Suelo 95 - Suelo 50	0,000	0,000	0,000
Sustrato 20 - Suelo 50	0,000	0,000	0,000
Sustrato 35 - Suelo 50	0,000	0,000	0,000
Sustrato 50 - Suelo 50	0,953	0,763	0,013
Sustrato 65 - Suelo 50	0,008	0,161	0,191
Sustrato 80 - Suelo 50	0,000	0,000	0,000
Sustrato 95 - Suelo 50	0,000	0,000	0,000
Suelo 80 - Suelo 65	0,079	0,245	0,019
Suelo 95 - Suelo 65	0,067	0,081	0,103
Sustrato 20 - Suelo 65	0,000	0,000	0,000
Sustrato 35 - Suelo 65	0,000	0,000	0,000
Sustrato 50 - Suelo 65	0,000	0,000	0,000
Sustrato 65 - Suelo 65	0,191	0,914	0,340
Sustrato 80 - Suelo 65	1,000	0,590	1,000
Sustrato 95 - Suelo 65	0,997	1,000	1,000

	Suelo 95 - Suelo 80	1,000	1,000	1,000
	Sustrato 20 - Suelo 80	0,000	0,000	0,000
	Sustrato 35 - Suelo 80	0,000	0,000	0,000
	Sustrato 50 - Suelo 80	0,000	0,000	0,000
	Sustrato 65 - Suelo 80	0,000	0,031	0,000
	Sustrato 80 - Suelo 80	0,027	0,962	0,042
	Sustrato 95 - Suelo 80	0,004	0,339	0,019
	Sustrato 20 - Suelo 95	0,000	0,000	0,000
	Sustrato 35 - Suelo 95	0,000	0,000	0,000
	Sustrato 50 - Suelo 95	0,000	0,000	0,000
	Sustrato 65 - Suelo 95	0,000	0,004	0,003
	Sustrato 80 - Suelo 95	0,020	0,732	0,193
	Sustrato 95 - Suelo 95	0,000	0,105	0,117
	Sustrato 35 - Sustrato 20	0,000	0,001	0,013
	Sustrato 50 - Sustrato 20	0,000	0,000	0,000
	Sustrato 65 - Sustrato 20	0,000	0,000	0,000
	Sustrato 80 - Sustrato 20	0,000	0,000	0,000
	Sustrato 95 - Sustrato 20	0,000	0,000	0,000
	Sustrato 50 - Sustrato 35	0,000	0,000	0,090
	Sustrato 65 - Sustrato 35	0,000	0,000	0,000
	Sustrato 80 - Sustrato 35	0,000	0,000	0,000
	Sustrato 95 - Sustrato 35	0,000	0,000	0,000
	Sustrato 65 - Sustrato 50	0,000	0,009	0,000
	Sustrato 80 - Sustrato 50	0,000	0,000	0,000
	Sustrato 95 - Sustrato 50	0,000	0,000	0,000
	Sustrato 80 - Sustrato 65	0,079	0,019	0,307
	Sustrato 95 - Sustrato 65	0,337	0,164	0,241
	Sustrato 95 - Sustrato 80	0,997	0,690	1,000
Tratamiento	MATS	<0,001	<0,001	<0,001
	p-valor remuestreo	2833,075	3302,424	2401,728
ddt	MATS	<0,001	<0,001	<0,001
	p-valor remuestreo	43876,962	40240,867	44606,744

9. Figuras suplementarias





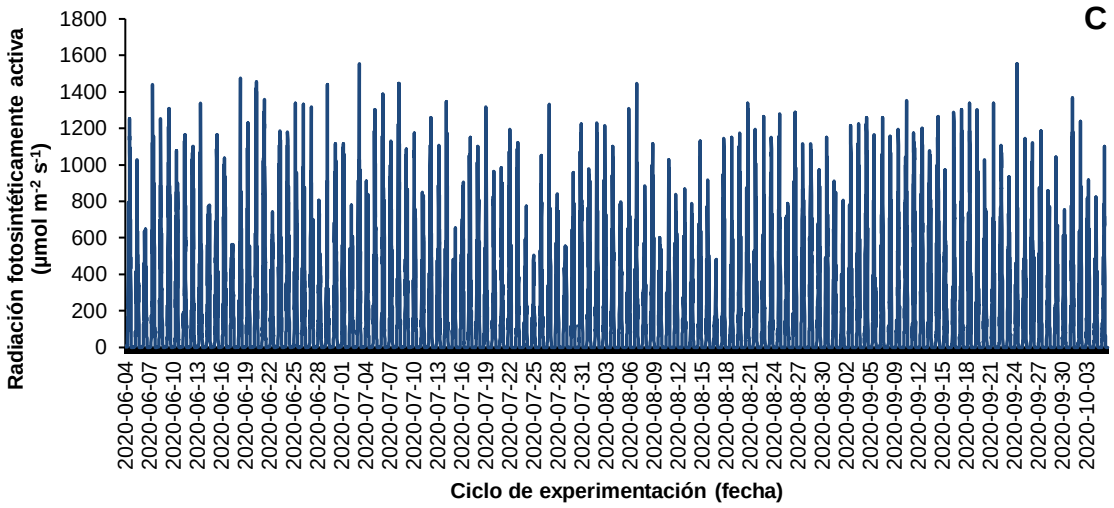


Figura suplementaria 1. Condiciones climáticas durante la fase experimental tomadas cada 15 minutos durante las 24 horas del día. **A.** Temperatura (°C), **B.** Humedad relativa (%), **C.** Radiación fotosintéticamente activa (µmol m^{-2} s^{-1}).

Figura suplementaria 2. Descripción gráfica de los cambios en crecimiento y desarrollo vegetativo (parte superior) y reproductivo (parte inferior) de tres variedades de *Cannabis sativa* L. sembradas en condiciones de suelo y sustrato **A.** Souce Cauca-Suelo, **B.** Souce Cauca-Sustrato, **C.** Calotoweed-Suelo, **D.** Calotoweed-Sustrato, **E.** Higthcol-Suelo, **F.** Higthcol-Sustrato.

Continuación Figura suplementaria 2. Descripción gráfica de los cambios en crecimiento y desarrollo vegetativo (parte superior) y reproductivo (parte inferior) de tres variedades de *Cannabis sativa* L. sembradas en condiciones de suelo y sustrato **A.** Souce Cauca-Suelo, **B.** Souce Cauca-Sustrato, **C.** Calotoweed-Suelo, **D.** Calotoweed-Sustrato, **E.** Higthcol-Suelo, **F.** Higthcol-Sustrato.

Continuación Figura suplementaria 2. Descripción gráfica de los cambios en crecimiento y desarrollo vegetativo (parte superior) y reproductivo (parte inferior) de tres variedades de *Cannabis sativa* L. sembradas en condiciones de suelo y sustrato **A.** Souce Cauca-Suelo, **B.** Souce Cauca-Sustrato, **C.** Calotoweed-Suelo, **D.** Calotoweed-Sustrato, **E.** Higthcol-Suelo, **F.** Higthcol-Sustrato.

Continuación Figura suplementaria 2. Descripción gráfica de los cambios en crecimiento y desarrollo vegetativo (parte superior) y reproductivo (parte inferior) de tres variedades de *Cannabis sativa* L. sembradas en condiciones de suelo y sustrato **A.** Souce Cauca-Suelo, **B.** Souce Cauca-Sustrato, **C.** Calotoweed-Suelo, **D.** Calotoweed-Sustrato, **E.** Higthcol-Suelo, **F.** Higthcol-Sustrato.

Continuación Figura suplementaria 2. Descripción gráfica de los cambios en crecimiento y desarrollo vegetativo (parte superior) y reproductivo (parte inferior) de tres variedades de *Cannabis sativa* L. sembradas en condiciones de suelo y sustrato **A.** Souce Cauca-Suelo, **B.** Souce Cauca-Sustrato, **C.** Calotoweed-Suelo, **D.** Calotoweed-Sustrato, **E.** Higthcol-Suelo, **F.** Higthcol-Sustrato.

Continuación Figura suplementaria 2. Descripción gráfica de los cambios en crecimiento y desarrollo vegetativo (parte superior) y reproductivo (parte inferior) de tres variedades de *Cannabis sativa* L. sembradas en condiciones de suelo y sustrato **A.** Souce Cauca-Suelo, **B.** Souce Cauca-Sustrato, **C.** Calotoweed-Suelo, **D.** Calotoweed-Sustrato, **E.** Higthcol-Suelo, **F.** Higthcol-Sustrato.

Figura suplementaria 3. Después de iniciada la fase de floración las variedades sembradas en sustrato mostraron una clorosis foliar generalizada, siendo mucho más notoria en las hojas viejas de las plantas. En la parte izquierda de la fotografía se observa la variedad Souce Cauca sembrada en sustrato, en la parte derecha la variedad Souce Cauca sembrada en suelo. Fotografía sin ningún tipo de edición.

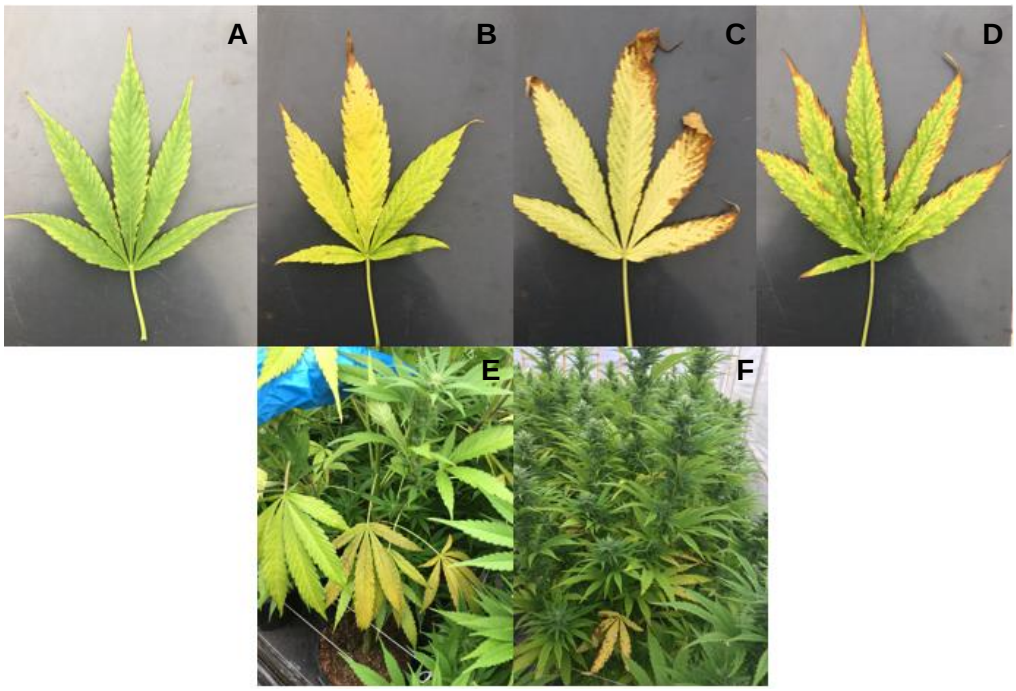


Figura suplementaria 4. Después de iniciada la fase de floración, las variedades sembradas en sustrato mostraron sintomatologías foliares asociadas a deficiencias nutricionales. **A.** Clorosis marginal, **B.** Clorosis generalizada, **C.** Necrosis marginal, **D.** Clorosis intervenal y necrosis marginal, **E.** Clorosis en hojas bajeras y **F.** Clorosis y necrosis en hojas bajeras.