e-ISSN: 2954-4440

ARTÍCULO CIENTIFICO

Current Topics in Agronomic Science

https://doi.org/10.5154/r.ctasci.2025.04.006

ES Sección: Ciencia Agrícola

Curvas de crecimiento y extracción de nutrientes de un cultivar de cannabis (*Cannabis sativa* L.)

Luisa Yuliana Alzate-Cataño [1]*; Jhon Wilson Mejía-Montoya [2]; Juan Pablo de los Ríos Muños[3]

[1]Universidad Nacional de Colombia, Ingeniería Agronómica, Medellín, Colombia,

[2]Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agrarias, Carrera 65 No. 59 A -110 Bloque 11 Oficina 214-12, Medellín, Colombia

[3]Green Element S.A.S, Guarne, Antioquia, Colombia.

*Autores para correspondencia: jwmejia@unal.edu.co; lalzatec@unal.edu.co

Historial del artículo:
Received: April 20, 2025
Accepted: April 21, 2026
Publicado en línea:
Agosto 26, 2026
***Autor para correspondencia:**
jwmejia@unal.edu.co;
lalzatec@unal.edu.co

Resumen

La comprensión de la dinámica de absorción de nutrientes de los cultivos resulta esencial para optimizar su manejo agronómico, mejorar la eficiencia del uso de fertilizantes y minimizar el impacto ambiental. La prohibición legal para cultivar *Cannabis sativa*, derivada de su tratamiento como droga estupefaciente por la Organización de Naciones Unidas (ONU) en 1961, ha limitado la investigación agronómica, incluido el conocimiento de su cinética de crecimiento y extracción de nutrientes, lo que limita responder a las expectativas del mercado de flor farmacéutica en términos de eficacia, inocuidad, estandarización y trazabilidad. El objetivo de esta investigación fue conocer la dinámica de extracción de macronutrientes, nutrientes secundarios y micronutrientes de *C. sativa* y su curva de crecimiento, en un ambiente de producción protegido con cubierta plástica con sistema de fertirriego. Se evaluaron variables de crecimiento alométrico y extracción de nutrientes a los 19, 34, 47, 61, 75 y 89 d después del trasplante (ddt), en plantas provenientes de esquejes enraizados, en cada caso, con tres repeticiones independientes conformadas por cinco plantas. Las variables de crecimiento siguieron un patrón polinomial de tercer grado. La mayor tasa de acumulación de materia seca se registró a los 75 ddt, alcanzando 6.04 $g \cdot d^{-1}$. El periodo de mayor absorción de macronutrientes ocurrió entre los 47 y 61 ddt, el de absorción de micronutrientes se presentó entre los 61 y 75 ddt. La floración se registró a los 47 ddt. Los nutrientes extraídos en mayor cantidad, tanto en la fase vegetativa como en la reproductiva, corresponden a nitrógeno, calcio, potasio y hierro. Se proponen lineamientos para el diseño de un plan de nutrición específico para este cultivar no psicoactivo de *C. sativa*.

Palabras clave: Cáñamo, crecimiento y desarrollo, manejo agronómico, nutrición.

Introducción

Cannabis sativa es una planta herbácea de la familia Cannabaceae, originaria de Asia, con etnobotánica que se remonta a más de 10,000 años. Sus primeros usos medicinales quedaron documentados en textos antiguos como la farmacopea del emperador Shen Nung en China y se evidencia en escritos egipcios (Covarrubias-Torres, 2019). Las aplicaciones de la planta incluyen la fabricación de cuerdas, textiles, alimentos y papel (Ángeles et al., 2014), ecomateriales de construcción y biocombustibles (Pérez et al., 2023). Sin embargo, la clasificación de *C. sativa* por la Organización de Naciones Unidas como estupefaciente en 1961, y sustancia psicoactiva en 1971, ha limitado la investigación con la planta. Si bien desde el año 2016, Colombia cuenta con un marco regulatorio dirigido al acceso seguro e informado de los usos médico y científico de *Cannabis* y sus derivados (Congreso de Colombia, 2016; Ministerio de Salud y Protección Social, 2017; Ministerios de Justicia y del Derecho, Agricultura y Desarrollo Rural y Salud y Protección Social, 2022), tienen brechas de conocimiento alrededor del manejo agronómico de la planta, que incluyen los criterios de nutrición ajustados a la cinética de cre-

Please cite this article as follows (APA 7): Alzate-Cataño L. Y., Mejía-Montoya, J. W., & de los Ríos-Muñoz, J. P. (2026). Curvas de crecimiento y extracción de nutrientes de un cultivar de cannabis (*Cannabis sativa* L.). *Current Topicsin Agronomic Science, 6*. e25006. https://doi.org/10.5154/r.ctasci.2025.04.006

cimiento y extracción de nutrientes (Ángeles et al., 2014). El aporte insuficiente de nutrientes compromete el rendimiento potencial del cultivo. Por otra parte, su suministro en exceso, además de altos costos, provoca contaminación del suelo y fuentes de agua (Johnston & Bruulsema, 2014). El objetivo de esta investigación fue conocer las curvas de crecimiento y extracción de nutrientes *C. sativa* cultivar no psicoactivo "Colombia CBD", a fin de contribuir con criterios para definir planes de nutrición del cultivo que optimicen la productividad, con mínimo costo financiero e impacto ambiental, alienados con el propósito de mayor producción de flores de alta calidad, libres de metales pesados, residuos de plaguicidas y carga microbiana, por tanto seguras para la producción de fitofármacos (García & Chamorro, 2021).

Materiales y métodos

El estudio se llevó a cabo en las instalaciones de la empresa Green Element S.A.S., ubicada en la vereda Las Toldas del municipio de Guarne, Antioquia, a 2140 msnm, con temperatura promedio de 16 °C, precipitación anual acumulada de 2958 mm y zona de vida de bosque húmedo montano bajo. La empresa cuenta con licencia de cultivo de plantas de cannabis no psicoactivo, incluida la modalidad e investigación, otorgada por el Ministerio de Justicia y del Derecho, mediante la Resolución 1961 del 29 de noviembre de 2019, con vigencia por 10 años. La evaluación se hizo con el cultivar no psicoactivo de *C. sativa* identificado en el registro nacional de cultivares con el nombre de "Colombia CBD". Después de dos semanas de enraizamiento, los esquejes fueron sembrados individualmente en macetas plásticas con capacidad para 5 kg de sustrato de siembra, resultante de mezclar suelo (40 %), sustrato de coco (25 %), gallinaza (15 %), lombricomposta (10 %) y molienda de rocas (10 %).

La densidad de siembra fue de 4 plantas·m^{-2}. Además de los nutrientes del sustrato, las plantas recibieron tres pulsos diarios de nutrición vía fertirriego, en total: 2.0, 0.3 y 1.2 g·planta^{-1} de N, P_2O_5 y K_2O durante el periodo vegetativo; 9.0, 2.0 y 4.4 g·planta^{-1} de N, P, K durante el periodo reproductivo. Todas las plantas recibieron el mismo complemento lumínico, fitosanitario y de podas de formación (4 ramas por planta), durante los primeros 47 d después de trasplante (ddt). El período de crecimiento reproductivo, desde la diferenciación de flores hasta su madurez fue de 43 d.

Se evaluó el crecimiento de la planta y la extracción de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S), cobre (Cu), manganeso (Mn), zinc (Zn), hierro (Fe) y boro (B), a los 19, 34, 47, 61, 75 y 89 ddt. Estos tiempos se establecieron de acuerdo con el conocimiento previo del ciclo de vida del cultivar en las condiciones agroecológicas de la finca, y en la disponibilidad de recursos para cubrir los costos de las determinaciones. En cada evaluación se tuvieron tres repeticiones, conformadas por cinco plantas en competencia completa. Durante el muestreo, se recolectó tejido aéreo (hojas, ramas y flores en partes iguales en peso) y radical, y se evaluaron las siguientes variables:

- Longitud del tallo (cm): se midió la distancia entre el cuello y el ápice, medido con una cinta métrica.
- Diámetro de la base del tallo (mm): la evaluación se realizó a la altura del cuello con un calibrador Vernier.
- Peso fresco (g) de las raíces y tejido aéreo: se evaluó con balanza digital.
- Peso seco (g) de las raíces y tejido aéreo: se lavaron las raíces con agua corriente, posteriormente se enjuagaron con agua destilada, las plantas se secaron en horno a 70 °C hasta alcanzar un peso constante, la evaluación se desarrolló en el laboratorio de Fisiología Vegetal de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia.

Con estos datos se construyeron las curvas de crecimiento y modelos matemáticos de mejor ajuste. A partir de los registros de biomasa seca de la planta, se estimó el índice parra la tasa de crecimiento absoluto (TCA) en g·d^{-1}, con la Ecuación (1), donde W_2 es biomasa de la planta al tiempo de evaluación 2 (T_2) y W_1 es biomasa de la planta al tiempo de evaluación 1 (T_1).

$$AGR = \frac{W_2 - W_1}{T_2 - T_1} \quad (1)$$

Para cada tiempo de evaluación se establecieron las relaciones entre los parámetros de crecimiento, expresadas como longitud del tallo por peso seco de la planta y diámetro de la base del tallo por peso seco de la planta.

Para cuantificar el contenido tisular de los nutrientes, se realizó el análisis de una submuestra de 20 g del peso seco de los tejidos. En el caso de N, se siguió el método establecido por Kjeldahl (AOAC, 2019), con digestión del material vegetal con ácido sulfúrico (H_2S0_4) y la determinación de la concentración por Volumetría Redox. Para las demás determinaciones se siguió la Norma Técnica Colombiana NTC-5752 del 2010 (ICONTEC, 2010), que establece el procedimiento para la digestión y mineralización de muestras en el análisis de tejido vegetal. La extracción se hizo con el método de microondas con mezcla de ácido nítrico (HNO_3) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2), la determinación de la concentración de nutrientes se realizó mediante espectrofotometría de absorción atómica para K, Ca, Mg, Cu, Mn, Fe y Zn. En el caso de P y B, la determinación de la concentración se hizo por colorimetría, y para S por turbidimetría. Las determinaciones fueron realizadas en el Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Para establecer la curva de extracción de nutrientes, se midió el peso seco total del tejido (Ps tejido) en cada

tiempo de muestreo y, con la concentración porcentual de nutrientes en el tejido vegetal se calculó la extracción de cada nutriente con la ecuación (2), siguiendo la metodología modificada de Quesada-Roldán y Bertsch-Hernández (2013).

$$\textit{Extracción de nutrientes } (g \cdot planta^{-1}) = \frac{\textit{Ps tejido } (g \cdot planta^{-1}) \times \textit{contenido de nutriente } (\%)}{100} \quad (2)$$

Análisis estadístico

Los datos fueron procesados utilizando el software R (R Core Team, 2024; RStudio Team, 2023) y Microsoft Excel (Microsoft Corporation, 2025). Se evaluó la normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la homogeneidad de varianzas con la prueba de Levene. Dado que los datos no cumplieron con el supuesto de normalidad, se aplicó el análisis no paramétrico de Kruskal-Wallis. Posteriormente, se realizó una prueba de Dunn para llevar a cabo comparaciones múltiples entre los grupos. En la definición del modelo matemático de mejor ajuste a la curva de crecimiento, se seleccionó el modelo estadísticamente significativo ($P < 0.05$), que tuviera el mayor coeficiente de determinación utilizando el software RStudio. La correlación entre las variables se analizó mediante el coeficiente de correlación de Pearson ($p < 0.001$).

Resultados y discusión

Curvas de crecimiento

Las variables de crecimiento se ajustaron a un modelo polinomial de tercer grado (Figura 1). Se trató de un crecimiento no lineal característico de especies, con transiciones fenológicas marcadas. El modelo ajustado permitió definir el periodo crítico de acumulación de biomasa. La etapa de crecimiento vegetativo tuvo una duración de 46 d; la aparición de primordios florales se dio a los 47 ddt. La mayor tasa de crecimiento en longitud y diámetro del tallo ocurrió a los 61 ddt (al final de la segunda semana después de floración); respecto al peso fresco y seco se obtuvo entre los días 47 y 75 (al final de la cuarta semana después de floración). Los valores máximos en los parámetros evaluados corresponden a 119.9 cm de altura (Figura 1a), 18.5 mm de diámetro basal (Figura 1b), 766.0 g de peso fresco (Figura 1c) y 236.3 g de peso seco (Figura 1d). Ladino (2023) reportó que la altura de tres variedades no psicoactivas de *C. sativa* (Souce Cauca, Highcol y Calotoweed) osciló entre 128 y 146 cm, con pesos frescos de 750 a 900 g·planta^{-1}. Las diferencias en altura y biomasa respecto a los valores obtenidos en el estudio realizado podrían atribuirse a la variación genética de los cultivares evaluados, así como las condiciones ambientales y de manejo agronómico. Esta interacción genotipo por ambiente determinó el patrón de acumulación de biomasa.

La identificación de los intervalos con mayor tasa de crecimiento ofrece información valiosa para ajustar los

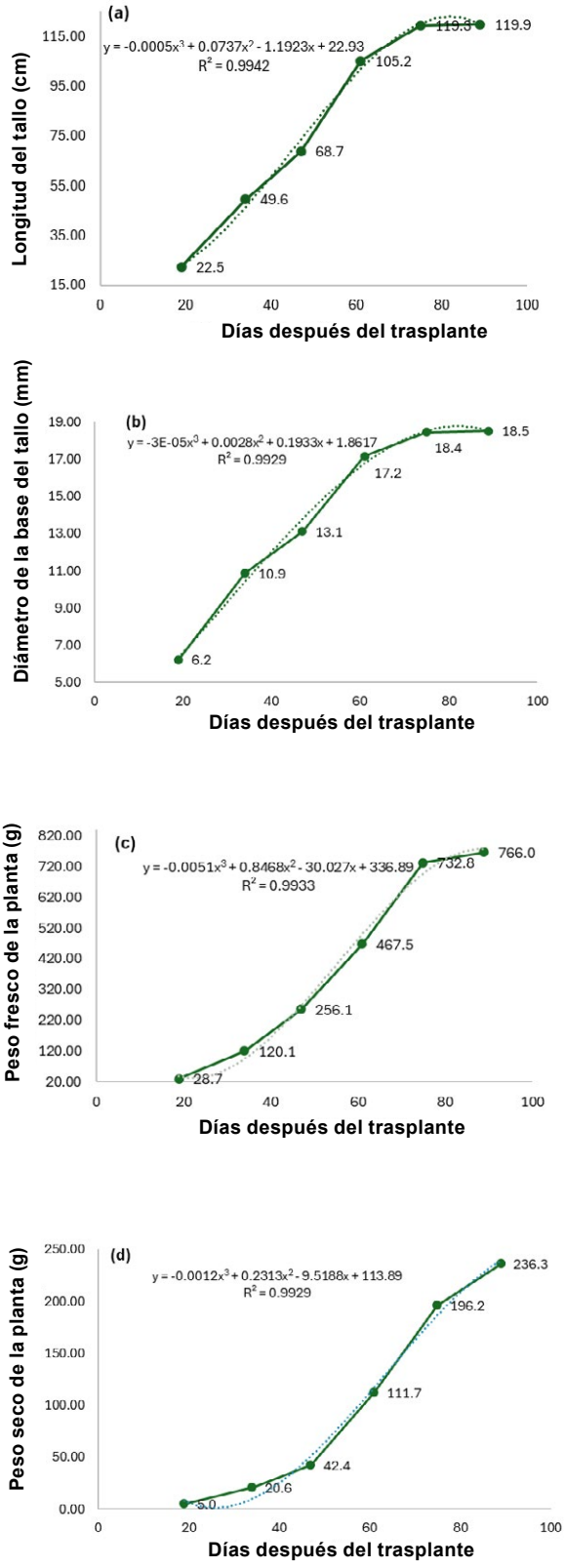


Figura 1. Curvas de crecimiento de C. sativa cultivar "Colombia CBD" con ecuaciones de modelos polinómicos de tercer grado y su correspondiente R2 con significancia al nivel de 0.05.
*** La línea continua representa los valores observados promedio. La línea punteada indica el ajuste del modelo polinómico. Número de observaciones: n = 3.**

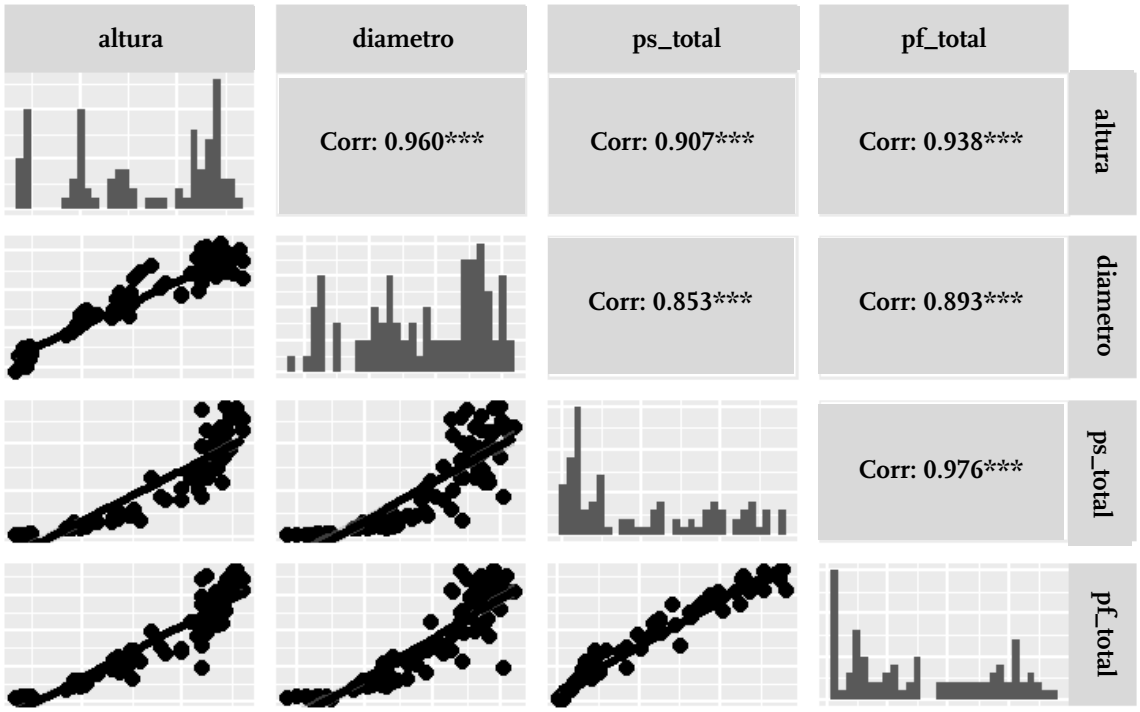


Figure 2. Pearson correlation matrix among the variables height, diameter, dry weight of the plant (dw_total) and fresh weight of the plant (fw_total) for the non-psychoactive cultivar of *C. sativa*. "Colombia CBD".
*** The diagonal shows the histograms of the distribution of each variable, below it are the scatter plots, and above it are the Pearson correlation coefficients. *** significance of $p < 0.001$.**

programas de nutrición, riego, protección del área fotosintética, dirigidas a optimizar la productividad y la calidad de flor seca o extracto de cannabinoides y terpenoides como producto final.

Correlaciones de las variables de crecimiento

La Figura 2 muestra una correlación positiva y significativa entre las variables de crecimiento evaluadas. Entre las variables no destructivas cuantificadas, la altura fue la que tuvo mejor correlación (r = 0.907***) que el diámetro del tallo (r = 0.853***). Esto sugiere que, en este cultivar y bajo las condiciones del estudio, la altura es un predictor más robusto de la biomasa acumulada. Otros autores reportaron que la altura de la planta y el diámetro del tallo son indicadores tempranos del rendimiento en *C. sativa* (Naim-Feil et al., 2021).

Tasa de crecimiento absoluto (TCA)

Las curvas de crecimiento de especies no perennes a partir de biomasa seca en función del tiempo (días después de siembra), suelen seguir un patrón sigmoidal característico (Lipovetsky, 2010). El uso de regresiones logísticas permite modelar el comportamiento de variables relacionadas con el crecimiento de los cultivos (Feller et al., 2015; Genard & Huguet, 1996). La acumulación instantánea de materia seca de *C. sativa* cultivar "Colombia CBD", presentó un comportamiento no lineal, ajustándose a un modelo polinomial de tercer grado (Figura 3). La tasa de crecimiento absoluto (TCA) registró sus valores mínimos durante la etapa de crecimiento vegetativo, cuando la planta prioriza la formación de estructuras de soporte. Entre los 47 y 61 ddt, coincidiendo con el inicio y consolidación de la etapa de floración, se observó el incremento más pronunciado de la TCA. Alcanzando un valor máximo a los 75 ddt (6.04 $g \cdot d^{-1}$) y reflejó el periodo de mayor eficiencia fisiológica en términos de acumulación de biomasa. La reducción posterior a 2.87 $g \cdot d^{-1}$

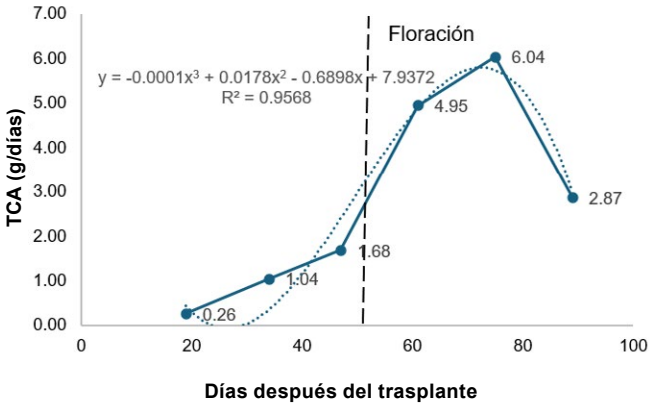


Figura 3. Tasa de crecimiento absoluto para el cultivar no psicoactivo de *C. sativa* "Colombia CBD", modelo polinómico y su correspondiente R^2 con significancia de 0.05.
*** La línea punteada vertical indica el inicio de la floración a los 47 ddt.**

Cuadro 1. Resultados de análisis fisicoquímico del sustrato de siembra.

Textura				pH	MO	Ca	Mg	K	CICE	P	S	$N\text{-}NO_3$	$N\text{-}NH_4$	Fe	Mn	Cu	Zn	B
A%	L%	Ar%	Clase		%	cmol c · kg^{-1}				mg·kg^{-1}								
72	22	6	FA	6.8	14.8	38.8	2.7	1.4	42.8	224	599	329	17	120	9	8	38	3

podría asociarse a la culminación de la etapa de floración y la disminución de la actividad fotosintética, fenómeno ya descrito en estudios de la especie durante la madurez floral, cuando la planta senescente redirige energía hacia procesos de acumulación final de metabolitos (Alden & Faust, 2025).

Curvas de extracción de nutrientes

En el Cuadro 1 se presenta el análisis fisicoquímico del sustrato de siembra utilizado en el cultivo, caracterizado por una textura franco-arenosa, con pH cercano a la neutralidad, altos contenido de materia orgánica, Ca, Mg y K.

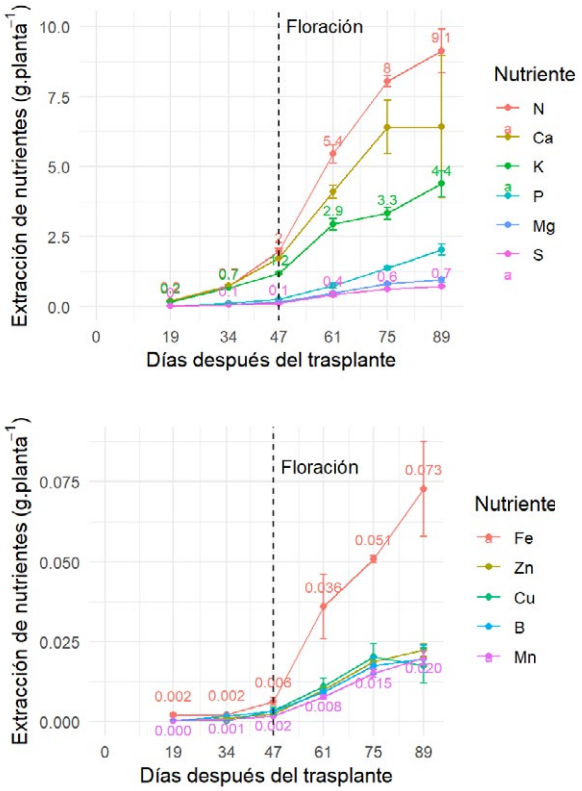


Figura 4. Curvas de extracción de macronutrientes (g·planta^{-1}) en cultivar no psicoactivo *C. sativa* "Colombia CBD". *Las barras denotan la desviación estándar.

Las curvas de extracción de macronutrientes (Figura 4) muestran diferencias marcadas entre las etapas de crecimiento vegetativo y floración. Durante la etapa de crecimiento vegetativo, el Ca presentó la mayor extracción, lo cual es consistente con su papel estructural en la formación y estabilidad de paredes celulares, procesos que dominan esta etapa del crecimiento, también se observaron estos valores en N, K, P, Mg y S. Este patrón coincidió con estudios previos en *C. sativa*, donde se han estimado concentraciones óptimas de macronutrientes durante la fase vegetativa, con una alta demanda de calcio estructural y también de nitrógeno (Kpai et al., 2024). En la investigación realizada por Ladino (2023), también encontró que el Ca es el mineral con mayor extracción hasta el día 46 ddt en el cultivar no psicoactivo "Souce Cauca".

En la etapa de floración, el N pasó a ser el nutriente de mayor extracción, lo que refleja su importancia en la síntesis de proteínas, enzimas y compuestos asociados al desarrollo floral y al aumento de biomasa reproductiva (Niazi & Monib, 2023). El Ca continuó siendo el segundo macronutriente más demandado, mientras que el orden relativo del resto de los elementos se mantuvo similar al de la etapa de crecimiento vegetativo. El N suele ser el macronutriente con mayor absorción en los cultivos, debido a su abundancia en biomoléculas esenciales, como proteínas y ácidos nucleicos (Azcón-Bieto & Talón, 2013; Epstein & Bloom, 2004; Li et al., 2019).

Durante la etapa de crecimiento vegetativo la demanda de micronutrientes fue relativamente baja (Figura 4), y al entrar en la etapa de floración la extracción se aceleró, especialmente para Fe, que presentó el mayor incremento. Otros elementos que tuvieron esta tendencia fueron el Cu, Zn, B y Mn, lo que indica que son especialmente requeridos durante la biosíntesis de estructuras reproductivas y la formación de tejidos florales. Este patrón sugiere que los programas de nutrición para cultivo de *Cannabis* deberían contemplar un incremento en la disponibilidad de micro-

Cuadro 2. Ecuaciones y valor R^2 con significancia de 0.05 para las curvas de extracción de macro y micronutrientes foliares del cultivar no psicoactivo de *C. sativa*.

Nutriente	Euación	R^2
N	$y = -7E\text{-}05x^3 + 0.0123x^2 - 0.4921x + 5.6747$	0.996
P	$y = -3E\text{-}06x^3 + 0.0008x2 - 0.037x + 0.4556$	0.998
K	$y = -2E\text{-}05x^3 + 0.0029x^2 - 0.0888x + 0.9182$	0.979
Ca	$y = -6E\text{-}05x^3 + 0.0103x^2 - 0.4059x + 4.7193$	0.992
Mg	$y = -6E\text{-}06x^3 + 0.0012x^2 - 0.0493x + 0.5995$	0.991
S	$y = -5E\text{-}06x^3 + 0.0009x^2 - 0.0388x + 0.4596$	0.988
Fe	$y = -4E\text{-}07x^3 + 7E\text{-}05x^2 - 0.0032x + 0.0401$	0.987
Zn	$y = -2E\text{-}07x^3 + 3E\text{-}05x^2 - 0.0013x + 0.0154$	0.989
B	$y = -1E\text{-}07x^3 + 2E\text{-}05x^2 - 0.001x + 0.0122$	0.985
Cu	$y = -3E\text{-}07x^3 + 5E\text{-}05x^2 - 0.002x + 0.0241$	0.981
Mn	$y = -9E\text{-}08x^3 + 2E\text{-}05x^2 - 0.0009x + 0.0106$	0.992

Cuadro 3. Estadísticos de Kruskal-Wallis para la extracción de nutrientes evaluados.

Nutriente	Chi-cuadrado	Grados de libertad	Valor de *P*
N	16.579	5	0.00537
P	16.613	5	0.00529
K	16.392	5	0.00581
Ca	[1]5.807	5	0.0074[2]
Mg	16.613	5	0.00529
S	16.648	5	0.00522
Fe	16.158	5	0.00641
B	16.158	5	0.00641
Zn	16.579	5	0.00537
Mn	16.579	5	0.00537
Cu	15.69	5	0.00779

Cuadro 4. Resultados de la prueba de Dunn de comparación de extracción de nutrientes para cada mineral en los seis tiempos de evaluación...

Nutriente	ddt	Media de absorción (valor)	Grupo estadístico	Valor *P* ajustado
N	19	0.207	a	19 - 75 (0.0295), 19 - 89 (0.0087)
	34	0.716	ab	-
	47	1.91	abc	-
	61	5.45	abc	-
	75	8.05	bc	19 - 75 (0.0295)
	89	9.14	c	19 - 89 (0.0087)
P	19	0.03	a	19 - 75 (0.0293), 19 - 89 (0.0086)
	34	0.12	ab	34 - 89 (0.0293)
	47	0.27	abc	-
	61	0.74	abc	-
	75	1.38	bc	19 - 75 (0.0293)
	89	2.03	c	19 - 89 (0.0086), 34 - 89 (0.0293)
K	19	0.17	a	19 - 75 (0.0372), 19 - 89 (0.0087)
	34	0.67	ab	34 - 89 (0.0372)
	47	1.19	abc	-
	61	2.94	abc	-
	75	3.34	bc	19 - 75 (0.0372)
	89	4.39	c	19 - 89 (0.0087), 34 - 89 (0.0372)
Ca	19	0.21	a	19 - 75 (0.0167), 19 - 89 (0.0167)
	34	0.75	ab	-
	47	1.74	ab	-
	61	4.10	ab	-
	75	6.42	b	19 - 75 (0.0167)
	89	6.43	b	19 - 89 (0.0167)
Mg	19	0.03	a	19 - 75 (0.0293), 19 - 89 (0.0086)
	34	0.08	ab	34 - 89 (0.0293)
	47	0.16	abc	-
	61	0.48	abc	-
	75	0.82	bc	19 - 75 (0.0293)
	89	0.96	c	19 - 89 (0.0086), 34 - 89 (0.0293)

...Cuadro 4. Resultados de la prueba de Dunn de comparación de extracción de nutrientes para cada mineral en los seis tiempos de evaluación.

Nutriente	ddt	Media de absorción (valor)	Grupo estadístico	Valor *P* ajustado
S	19	0.02	a	19 - 75 (0.0290), 19 - 89 (0.0085)
	34	0.07	ab	34 - 89 (0.0290)
	47	0.12	abc	-
	61	0.43	abc	-
	75	0.61	bc	19 - 75 (0.0290)
	89	0.72	c	19 - 89 (0.0085), 34 - 89 (0.0290)
Fe	19	0.0020	a	19 - 89 (0.0198)
	34	0.0022	a	34 - 89 (0.0214)
	47	0.0064	ab	-
	61	0.0360	ab	-
	75	0.0509	ab	-
	89	0.0727	b	19 - 89 (0.0198), 34 - 89 (0.0214)
B	19	0.0004	a	19 - 75 (0.0214), 19 - 89 (0.0198)
	34	0.0017	ab	-
	47	0.0033	ab	-
	61	0.0094	ab	-
	75	0.0175	b	19 - 75 (0.0214)
	89	0.0196	b	19 - 89 (0.0198)
Zn	19	0.0003	a	19 - 75 (0.0295), 19 - 89 (0.0087)
	34	0.0010	ab	-
	47	0.0024	abc	-
	61	0.0099	abc	-
	75	0.0187	bc	19 - 75 (0.0295)
	89	0.0223	c	19 - 89 (0.0087)
Mn	19	0.0003	a	19 - 75 (0.0295), 19 - 89 (0.0087)
	34	0.0008	ab	34 - 89 (0.0295)
	47	0.0017	abc	-
	61	0.0077	abc	-
	75	0.0151	bc	19 - 75 (0.0295)
	89	0.0199	c	19 - 89 (0.0087), 34 - 89 (0.0295)
Cu	19	0.00028	ab	19 - 75 (0.0372)
	34	0.0002	a	34 - 75 (0.0257), 34 - 89 (0.0372)
	47	0.0034	abc	-
	61	0.0111	abc	-
	75	0.0203	c	19 - 75 (0.0372), 34 - 75 (0.0257)
	89	0.0176	bc	34 - 89 (0.0372)

ddt: días después del trasplante

nutrientes desde el inicio de la floración, especialmente de Fe y Cu, para asegurar un adecuado desarrollo floral y potencialmente maximizar los metabolitos secundarios.

El ajuste de las curvas de extracción a un modelo polinomial de tercer grado (Cuadro 2), evidencia una variación no lineal en la dinámica de absorción de los nutrientes a lo largo del ciclo de crecimiento de la planta.

El análisis de Kruskal–Wallis reveló diferencias significativas en la absorción de nutrientes entre los distintos tiempos de evaluación (ddt) (Cuadro 3). Se observó un comportamiento no lineal del fenómeno de absorción y dependencia acorde a la etapa fenológica. Simonutti et al. (2025) reportaron variaciones significativas en la absorción de macronutrientes (N, P, K) según el estado fenológico bajo diferentes tratamientos de fertilización, lo

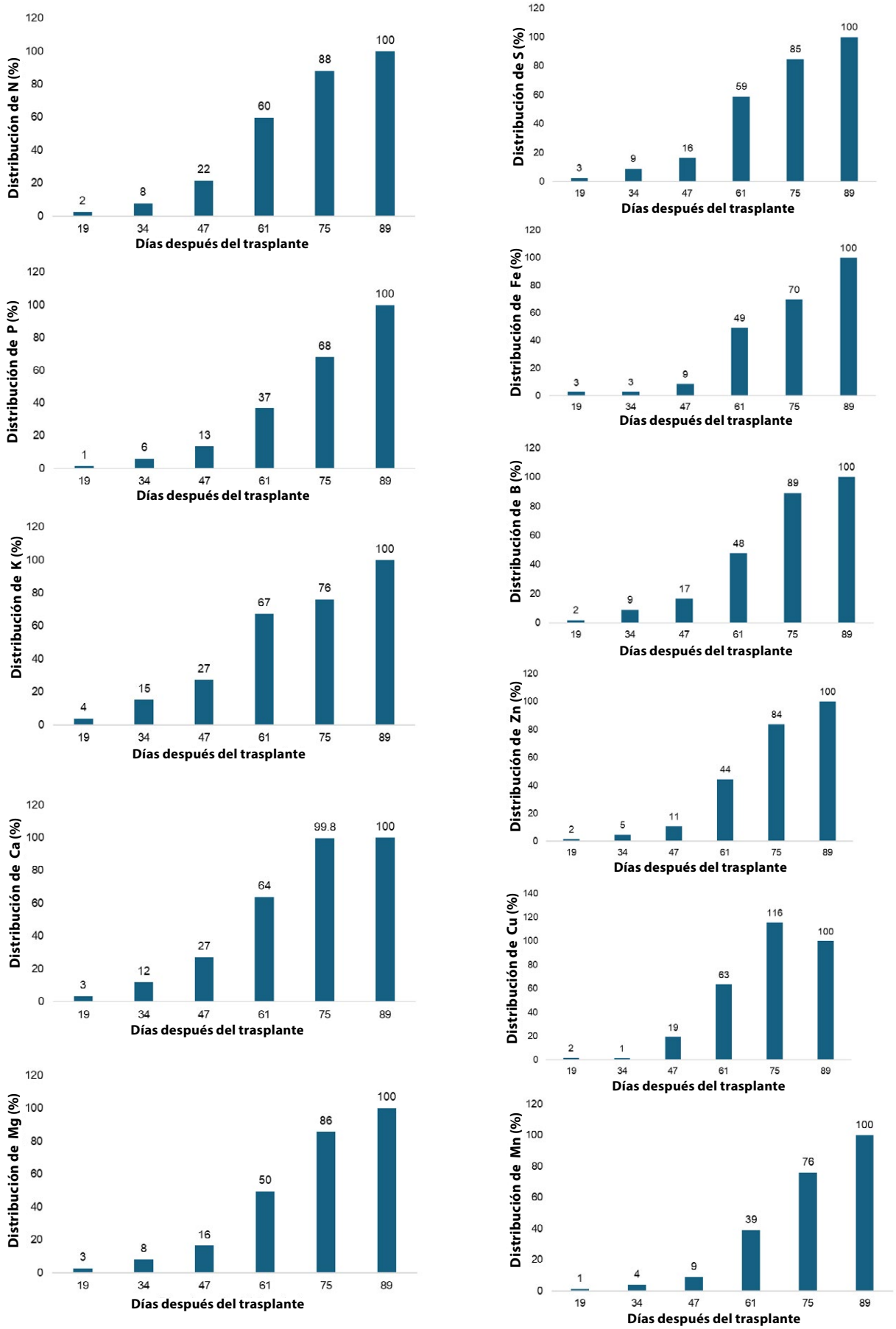


Figura 5. Distribución porcentual en la extracción de nutrientes del cultivar no psicoactivo de *C. sativa* "Colombia CBD" durante su ciclo de crecimiento.

Cuadro 5. Relación en la extracción de Ca:Mg:K en el ciclo de vida del cultivar no psicoactivo de *C. sativa* "Colombia CBD".

Días después del trasplante (ddt)	Ca	Mg	K
19	4.3	0.12	0.8
34	3.7	0.10	0.9
47	4.1	0.09	0.7
61	3.7	0.12	0.7
75	3.3	0.13	0.5
89	2.7	0.15	0.7
Promedio	**3.6**	**0.12**	**0.72**



Figura 6. Registro fotográfico del cultivar no psicoactivo de *C. sativa* "Colombia CBD" a los 19, 47 y 75 ddt, sin síntomas visibles de fitotoxicidad ni deficiencias nutricionales.

que refuerza la hipótesis que el proceso de absorción de nutrientes lejos de ser constante es dinámico.

En el Cuadro 4 se presentan los resultados de la prueba de Dunn, con las comparaciones múltiples (seis evaluaciones) correspondientes a la extracción de cada nutriente.

Distribución porcentual de los minerales durante el ciclo

La distribución porcentual de la extracción de minerales (Figura 5) mostró un patrón de acumulación progresiva a lo largo del ciclo del cultivo, con un incremento notable a partir de los 61 d después del trasplante (ddt) para todos los nutrientes evaluados. A los 47 ddt la transición de crecimiento vegetativo a reproductivo, la extracción representó entre el 9 y 27 % del total acumulado. Se debe garantizar la adecuada disponibilidad de nutrientes en el sustrato de siembra en ambas etapas de crecimiento, especialmente en la etapa reproductiva, a fin de lograr el óptimo crecimiento y desarrollo del cultivo.

El Cuadro 5 presenta la relación de las bases Ca:Mg:K en los diferentes tiempos de evaluación durante el ciclo de vida del cultivar "Colombia CBD". La relación promedio Ca:Mg:K a lo largo del ciclo de crecimiento fue de 3.6:0.12:0.7.

Durante el período de crecimiento evaluado, las plantas de *C. sativa* no presentaron síntomas visibles de deficiencia (Figura 6).

Zafeiraki et al. (2021) reportaron altas concentraciones foliares de Cu, Ca, Mg, Mn, Zn, Fe y K en *C. sativa*. De manera similar, Milan et al. (2024) encontraron elevadas concentraciones de Fe, Mn, Zn y Cu en esta especie. De acuerdo con Bing et al. (2011), *C. sativa* posee la capacidad de absorber metales y metaloides del suelo. Sin embargo, sus niveles de acumulación están influenciados por las fuentes tanto naturales como antropogénicas. Por otro lado, Placido y Lee (2022) señalaron que el cáñamo, debido a su sistema radicular profundo, es tolerante a la acumulación de distintos metales. La planta tiene la capacidad para regular la acumulación de elementos en sus diferentes órganos (Angelova et al., 2004) lo que le permite crecer sin presentar síntomas evidentes de fitotoxicidad (Shi et al., 2012). Se debe considerar la capacidad de acumulación de metales en las hojas de *C. sativa* al utilizarlas para uso medicinal, ya que podría influir en su seguridad y calidad (Placido & Lee, 2022).

La gestión eficiente, sostenible y respetuosa con el medio ambiente es fundamental para maximizar el rendimiento de los cultivos (Fageria & Baligar, 2005). El uso de fertilizantes juega un papel crucial en este proceso, ya que per-

mite que las plantas completen su ciclo de vida (Verzeaux et al., 2017). Al respecto, se estima que entre 40 y 60 % de la producción agrícola mundial depende de la adición de nutrientes al suelo (Johnston & Bruulsema, 2014).

Conclusiones

La investigación permitió conocer la dinámica de crecimiento y extracción de nutrientes del cultivar no psicoactivo de *C. sativa* "Colombia CBD", bajo un sistema de producción protegida con cubierta plástica y fertirriego, en las condiciones agroecológicas del estudio. De acuerdo con la cinética de crecimiento, la mayor tasa de crecimiento absoluto se observó entre los días 47-61 ddt, inmediatamente después de la floración. En el mismo período, se presentó la mayor pendiente en la curva de extracción de nutrientes. En este intervalo del ciclo del cultivo, se deben tener los mayores cuidados de fertirriego y fitoprotección. A fin de validar la cinética de crecimiento y extracción de nutrientes encontrada en esta investigación, se deben realizar nuevas evaluaciones con otros sustratos, dosis y fraccionamiento de fertilizantes. Se requiere de evaluaciones adicionales que permitan determinar los niveles críticos de nutrientes, a partir de datos de rendimiento de flor seca de *C. sativa* o cantidad de extracto de cannabinoides de concentración definida por unidad de superficie cultivada, y concentración de nutrientes.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, por su apoyo institucional. A la empresa Green Element S.A.S. por permitir realizar este trabajo en sus instalaciones y su financiamiento.

Referencias

Alden, M. J., & Faust, J. E. (2025). Optimal harvest timing: quantifying temporal changes in dry mass and tissue cannabinoids for high-CBD Cannabis sativa grown in controlled environments. *HortScience*, *60*(4), 624–630. https://doi.org/10.21273/HORTSCI18415-24

Ángeles, L. G. E., Brindis, F., Niizawa, C. S., & Ventura, Martínez, R. (2014). *Cannabis sativa* L., una planta singular. *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, *45*(4), 1–6. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-01952014000400004

Angelova, V., Ivanova, R., Delibaltova, V., & Ivanov, K. (2004). Bio-accumulation and distribution of heavy metals in fibre crops (flax, cotton and hemp). *Industrial Crops and Products*, *19*(3), 197–205. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2003.10.001

AOAC. (2019). *Official methods of analysis (21st ed.)*. AOAC International.

Azcón-Bieto, J., & Talón, M. (2013). *Fundamentos de fisiología vegetal* (Segunda ed). McGraw Hill Interamericana.

Bing, H., Wu, Y., Sun, Z., & Yao, S. (2011). Historical trends of heavy metal contamination and their sources in lacustrine sediment from Xijiu Lake, Taihu Lake Catchment, China. Journal of Environmental Sciences, 23(10), 1671–1678. https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60593-1

Congreso de Colombia. (2016). *Ley 1787 de 2016, por medio de la cual se regula el acceso seguro e informado al uso médico y científico del cannabis en Colombia*. Diario Oficial No. 49.938 del 6 de julio de 2016.

Covarrubias-Torres, N. (2019). Uso medicinal de la Marihuana. *Anestesia En México*, *31*(2), 49–58.https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2448-87712019000200049&script=sci_abstract

Epstein, E., & Bloom, A. J. (2004). *Mineral nutrition of plants* (Second edi). Sinauer Associates, Oxford University Press.

Fageria, N. K., & Baligar, V. C. (2005). *Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants* (pp. 97–185). https://doi.org/10.1016/S0065-2113(05)88004-6

Feller, C., Favre, P., Janka, A., Zeeman, S. C., Gabriel, J.-P., & Reinhardt, D. (2015). Mathematical modeling of the dynamics of shoot-root interactions and resource partitioning in plant growth. *PLOS ONE*, *10*(7), e0127905. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0127905

García, P. V., & Chamorro, M. L. (2021). *Protocolo para el control de calidad de productos derivados del cannabis*. Universidad CES, Facultad de Ciencias y Biotecnología, Química Farmacéutica, Medellín, Colombia.

Genard, M., & Huguet, J. G. (1996). Modeling the response of peach fruit growth to water stress. *Tree Physiology*, *16*(4), 407–415. https://doi.org/10.1093/treephys/16.4.407

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC]. (2010). *NTC 5752: Análisis de tejido vegetal. Digestión y mineralización de muestras*.

Johnston, A. M., & Bruulsema, T. W. (2014). 4R nutrient stewardship for improved nutrient use Eeficiency. *Procedia Engineering*, *83*, 365–370. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.029

Kpai, P. Y., Adaramola, O., Addo, P. W., MacPherson, S., & Lefsrud, M. (2024). Mineral nutrition for *Cannabis sativa* in the vegetative stage using response surface analysis. *Frontiers in Plant Science*, *15*. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1501484

Ladino, F. W. A. (2023). *Parámetros fisiológicos, curva de extracción de nutrientes y rendimiento de tres variedades de Cannabis sativa L. cultivadas en suelo y sustrato*. [Tesis de Maestría], Universidad Nacional de Colombia.

Li, W., Yang, M., Wang, J., Wang, Z., Fan, Z., Kang, F., Wang, Y., Luo, Y., Kuang, D., Chen, Z., Guo, C., Li, Y., He, X., Chen, X., Shi, X., & Zhang, Y. (2019). Agronomic responses of major fruit crops to fertilization in China: A meta-analysis. *Agronomy*, *10*(1), 15. https://doi.org/10.3390/agronomy10010015

Lipovetsky, S. (2010). Double logistic curve in regression modeling. *Journal of Applied Statistics*, *37*(11), 1785–1793. https://doi.org/10.1080/02664760903093633

Microsoft Corporation. (2025). *Microsoft Excel for Microsoft 365 MSO (Version 2508, Build 16.0.19127.20192, 64-bit)*. Microsoft Corporation.

Milan, J., Michalska, A., & Jurowski, K. (2024). The comprehensive review about elements accumulation in industrial hemp (*Cannabis sativa* L.). *Food and Chemical Toxicology*, *184*, 114344. https://doi.org/10.1016/j.fct.2023.114344

Ministerio de Salud y Protección Social. (2017). Decreto 613 de 2017, por el cual se reglamenta la Ley 1787 de 2016 y se dictan disposiciones sobre el uso del cannabis medicinal en Colombia. Gobierno de Colombia.

Ministerios de Justicia y del Derecho, Agricultura y Desarrollo Rural, y Salud y Protección Social. (2022). *Resolución 227 de 2022, por la*

cual se reglamenta el uso de semillas de Cannabis para la siembra y cultivo de plantas de Cannabis psicoactivo y no psicoactivo. Diario Oficial No. 51.959 del 15 de febrero de 2022. Gobierno de Colombia.

Naim-Feil, E., Pembleton, L. W., Spooner, L. E., Malthouse, A. L., Miner, A., Quinn, M., Polotnianka, R. M., Baillie, R. C., Spangenberg, G. C., & Cogan, N. O. I. (2021). The characterization of key physiological traits of medicinal cannabis (*Cannabis sativa* L.) as a tool for precision breeding. *BMC Plant Biology*, *21*(1), 294. https://doi.org/10.1186/s12870-021-03079-2

Niazi, P., & Monib, A. W. (2023). Function of macronutrients in plant growth and human. *International Journal of Scientific Development and Research (IJSDR)*, *8*(4), 1265–1274. https://openrgate.org/viewfulldetails.php?id=12421

Pérez, A. J. A., Franco, J. M., & Benítez, B. R. (2023). Biomasa residual de industria del Cannabis, una alternativa para la obtención de productos de alto valor agregado. *Revista Colombiana de Biotecnología*, *25*(1), 92–103. https://www.redalyc.org/journal/776/77677353010/77677353010.pdf

Placido, D. F., & Lee, C. C. (2022). Potential of industrial hemp for phytoremediation of heavy metals. *Plants*, *11*(5), 595. https://doi.org/10.3390/plants11050595

Quesada-Roldán, G., & Bertsch-Hernández, F. (2013). Obtención de la curva de extracción nutrimental del híbrido de tomate FB-17. *Terra Latinoamericana*, *31*(1), 1–7. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792013000100001

R Core Team. (2024). *R software. https://www.r-project.org/*

RStudio Team. (2023). *RStudio. https://posit.co/*

Shi, G., Liu, C., Cui, M., Ma, Y., & Cai, Q. (2012). Cadmium tolerance and bioaccumulation of 18 hemp accessions. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, *168*(1), 163–173. https://doi.org/10.1007/s12010-011-9382-0

Simonutti, M., Berhongaray, G., Derita, M., & Zabala, J. M. (2025). Response of *Cannabis sativa* L. to inorganic fertilization (N, P, K): Biomass, nutrient uptake and cannabinoids profile. *International Journal of Plant Biology*, *16*(3), 92. https://doi.org/10.3390/ijpb16030092

Verzeaux, J., Hirel, B., Dubois, F., Lea, P. J., & Tétu, T. (2017). Agricultural practices to improve nitrogen use efficiency through the use of arbuscular mycorrhizae: Basic and agronomic aspects. *Plant Science*, *264*, 48–56. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2017.08.004

Zafeiraki, E., Kasiotis, K. M., Nisianakis, P., & Machera, K. (2021). Macro and trace elements in hemp (*Cannabis sativa* L.) cultivated in Greece: Risk assessment of toxic. *Frontiers in Chemistry*, *9*. https://doi.org/10.3389/fchem.2021.654308