



EFFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA REDUCCIÓN DEL TIEMPO PARA LA PRODUCCIÓN
DE CRUDO, DESTILADO Y AISLADO DE CBD

JOHAN SEBASTIAN ROJAS LONDOÑO

TESIS DE GRADO MAESTRÍA EN INGENIERÍA

ASESOR

SERGIO AUGUSTO RAMÍREZ ECHEVERRI

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS APLICADAS E INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
MEDELLÍN
2024

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis padres, Patricia Londoño y Cesar Rojas, por su constante respaldo, amor incondicional y sacrificio. Su inquebrantable aliento y fe en mí han sido mi guía a lo largo de este desafiante camino. Este logro no habría sido posible sin su amor y apoyo incondicional; Agradezco a mi familia, por su comprensión, paciencia y ánimo durante este periodo de desafíos. Sus palabras alentadoras y su presencia han sido una fuente de esperanza en los momentos más difíciles, impulsándome a seguir adelante con determinación.

Mi más profundo agradecimiento a mi asesor de grado, Sergio Ramírez por su invaluable orientación, sabiduría y dedicación a lo largo de este proyecto. Sus consejos expertos, críticas constructivas y confianza en mi trabajo fueron esenciales para su éxito. Estoy profundamente agradecido por su tiempo, conocimiento y mentoría, los cuales han contribuido significativamente a mi crecimiento académico y personal.

Agradezco a la empresa donde trabajo, SpringLeaf Inc, por brindarme la oportunidad de crecer profesionalmente mientras cursaba mis estudios. El ambiente de trabajo colaborativo y el apoyo han sido fundamentales para mi desarrollo académico y profesional. Estoy profundamente agradecido por la flexibilidad y el respaldo que me han brindado para alcanzar mis metas educativas.

Quiero expresar mi gratitud a todos aquellos que de alguna manera contribuyeron a la realización de este trabajo. Su apoyo ha sido fundamental en este proyecto académico, agradezco sinceramente su colaboración, amistad y palabras alentadoras.

CONTENIDO

pág.

0. INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO	2
1.1. CRUDO	2
1.2. DESTILADO.....	4
1.3. AISLADO	5
2. MARCO CONCEPTUAL	6
2.1. GC-FID PERFIL CANNABINOIDE.....	6
2.2. EXTRACCIÓN DE CRUDO DE CBD CON ETANOL	6
2.3. DESTILACIÓN DE CBD.....	7
2.4. AISLAMIENTO DE CBD	7
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	8
4. OBJETIVOS	9
4.1. OBJETIVO GENERAL	9
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
5. METODOLOGÍA.....	10
5.1. DEFINICIÓN DE VARIABLES	10
5.2. DEFINICIÓN Y SELECCIÓN DE LA MUESTRA	11
5.2.1. Población	11
5.2.2. Muestra	11
5.3. MÉTODO TAGUCHI	11
5.3.1. Función de pérdida Taguchi.....	12
5.3.2. Índice de señal y ruido Taguchi	13
5.3.3. Matriz ortogonal Taguchi.....	14
6. RESULTADOS	14
6.1. REPORTE DE RESULTADOS CRUDO DE CBD	15
6.2. REPORTE DE RESULTADOS DESTILADO DE CBD	19
6.3. REPORTE DE RESULTADOS AISLADO DE CBD	23
7. CONCLUSIONES	29
REFERENCIAS.....	31
ANEXOS	35

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1 Datos experimentales reportados de obtención Crudo de CBD	15
Tabla 2 Factores de control y niveles seleccionados en obtención de Crudo de CBD	16
Tabla 3 Resumen del modelo SN Crudo de CBD	16
Tabla 4 Análisis de Varianza de Relaciones SN Crudo de CBD	17
Tabla 5 Respuesta para relaciones de Señal y ruido más pequeño mejor Crudo de CBD	17
Tabla 6 Predicción de resultados de Taguchi obtención de Crudo de CBD	18
Tabla 7 Datos experimentales reportados de obtención de Destilado de CBD	19
Tabla 8 Factores de control y niveles seleccionados en obtención de Destilado de CBD	20
Tabla 9 Resumen del modelo SN Destilado de CBD	20
Tabla 10 Análisis de Varianza de Relaciones SN Destilado de CBD	20
Tabla 11 Respuesta para relaciones de Señal y ruido más pequeño mejor Destilado de CBD	21
Tabla 12 Predicción de resultados de Taguchi obtención de Destilado de CBD	22
Tabla 13 Datos experimentales reportados de obtención de Aislado de CBD	23
Tabla 14 Factores de control y niveles seleccionados en obtención de Aislado de CBD	24
Tabla 15 Resumen del modelo SN Aislado de CBD	24
Tabla 16 Análisis de Varianza de Relaciones SN Aislado de CBD	24
Tabla 17 Respuesta para relaciones de Señal y ruido más pequeño mejor Aislado de CBD	25
Tabla 18 Predicción de resultados de Taguchi obtención de Aislado de CBD	26
Tabla 19 Comparación de valor de producción por hora y mes Crudo de CBD con el valor de producción por hora Crudo de CBD optimo	27
Tabla 20 Comparación de valor de producción por hora y mes Destilado de CBD con el valor de producción por hora Destilado de CBD optimo	28
Tabla 21 Comparación de valor de producción por hora y mes Aislado de CBD con el valor de producción por hora Aislado de CBD optimo	28
Tabla 22 Comparación de Tiempos de Producción Antes y Después de la Implementación del Método Taguchi en la obtención de crudo, destilado y aislado de CBD	30

LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1 Proceso de extracción de Crudo CBD con Etanol	6
Figura 2 Proceso de destilado de CBD	7
Figura 3 Proceso de aislado de CBD	8
Figura 4 Tiempo de procesos y tiempo total desde recepción de flor seca hasta obtención de Aislado de CBD	9
Figura 5 Criterio de calidad según G. Taguchi	12
Figura 6 Matriz ortogonal típica del modelo Taguchi	14
Figura 7 Grafica de efectos principales para relaciones SN con respecto al Tiempo De Extracción (min)	17
Figura 8 Grafica de efectos principales para medias con respecto al Tiempo De Extracción (min)	18
Figura 9 Grafica de efectos principales para relaciones SN con respecto al Tiempo De Destilación (min).	21
Figura 10 Grafica de efectos principales para medias con respecto al Tiempo De Destilación (min)	22
Figura 11 Grafica de efectos principales para relaciones SN con respecto al Tiempo De Aislamiento (min)	25
Figura 12 Grafica de efectos principales para medias con respecto al Tiempo De Aislamiento (min)	26
Figura 13 Tiempo de procesos y tiempo total desde recepción de flor seca hasta obtención de Aislado de CBD optimo	27

LISTA DE ECUACIONES

pág.

Ecuación 1 Función de pérdida Taguchi	12
Ecuación 2 Función de pérdida promedio por unidad producida “Más pequeño es mejor”	12
Ecuación 3 Índice de señal y ruido caso “Mayor es el mejor”	13

LISTA DE SÍMBOLOS O VARIABLES

$L(Y)$	Función de pérdida Taguchi.
Y	Valor ideal objetivo de característica de calidad.
M	Medida de valor obtenido de la característica analizada en la situación real.
K	Constante de proporcionalidad.
$l(\mu)$	Función de pérdida promedio por unidad producida “Más pequeño es mejor”.
μ	Valor promedio de la característica de calidad.
σ	Variabilidad de la característica de calidad.
S/R	Índice de señal y ruido caso “Mas pequeño es mejor”.
y_i	I-ésimo dato.
n	Tamaño de la muestra.

LISTA DE ANEXOS

pág.

Anexo A Diagrama de flujo de procesos de obtención de Derivados del Cannabis	35
Anexo B Datos experimentales obtenidos Crudo de CBD	36
Anexo C Datos experimentales obtenidos de Destilado de CBD	37
Anexo D Datos experimentales obtenidos de Aislado de CBD	38
Anexo E Equipos de producción de Crudo de CBD	40
Anexo F Equipos de producción de Destilado de CBD	40
Anexo G Equipos de producción de Aislado de CBD	41
Anexo H Equipo de cromatografía GC-FID	41

Resumen

El presente estudio aborda el mejoramiento de los procesos industriales para la producción de crudo, destilado y aislado de CBD, destacando el papel crucial de la temperatura en la reducción del tiempo de producción. La investigación sigue una metodología cuantitativa rigurosa, combinando revisión bibliográfica, análisis de datos históricos y diseño experimental, para identificar los parámetros óptimos de temperatura, concentración de CBD y carga de material, para reducir el tiempo en cada proceso; Utilizando el método Taguchi, se logra reducir significativamente los tiempos de obtención de crudo en un 40,9%, destilación en un 28,7% y aislamiento en un 39,1%, mejorando así la eficiencia y rentabilidad del proceso. Los resultados subrayan la importancia del control preciso de la temperatura en cada etapa para optimizar la producción y garantizar la calidad del producto final. La investigación concluye que ajustar la temperatura no solo acelera los procesos, sino que también mejora la concentración de CBD, destacando la relevancia de la técnica estadística aplicada para el mejoramiento de procesos industriales derivados del CBD.

Palabras clave: Cannabis, Crudo, Destilado, Aislado, Temperatura de proceso, Concentración de CBD, Carga de material, Método Taguchi, Tiempo de proceso.

0. INTRODUCCIÓN

El consumo de cannabis en el mundo ha tenido un crecimiento acelerado, las Naciones Unidas en el 2021 estimó que el 4,3% de la población mundial, 219 millones de personas consumen cannabis; A lo largo de los años, los países consolidan los procesos gubernamentales para fines científicos, médicos y recreacionales [1]. El valor del mercado internacional del cannabis se estima de 103.900 millones de dólares en el 2024, se prevé que el mercado del cannabis medicinal alcance 62.700 millones de dólares, superando al mercado recreativo valorado en 41.200 millones de dólares, a medida que el mercado madure después del 2024, se pronostica que la participación del cannabis recreativo aumente [2].

Colombia cuenta con un marco de normas gubernamentales consolidado donde el Ministerio de Salud Y Protección Social, Ministerio De Justicia Y Del Derecho, regulan la cadena de suministro otorgando licencias, registros y permisos como ejercicio de control a través de las subdirecciones del Invima y el Fondo Nacional De Estupefacientes [3]; Por otra parte, el país cuenta con una proyección de comercialización potencial, por factores significativos como la variedad de condiciones climáticas, intensidad lumínica y mano de obra, junto con años de experiencia en sectores de la agricultura e industria farmacéutica [4], Promoviendo el desarrollo integral en la cadena de suministro para obtener productos primarios como semillas, flores secas y esquejes, para desarrollar productos transformados como crudos, destilados y aislados, como materias primas para la fabricación de medicamentos, cosméticos, alimentos y recreativos [5].

Los productos transformados a escala industrial son obtenidos inicialmente por métodos de fluido supercrítico o solvente; El método de extracción por solvente genera mejores rendimientos de crudo a partir de la biomasa, además, los gastos de operación y solvente son significativamente menores, el costo de infraestructura por el método solvente habitualmente representa la mitad de la inversión a comparación del método supercrítico, por lo cual, la recuperación de la inversión en la infraestructura se logra en un corto tiempo debido al alto valor agregado de los productos obtenidos [6]; Dando continuidad al proceso productivo, la destilación molecular es un fenómeno de transferencia de masa que consta en la vaporización de componentes encontrados en el crudo para obtener destilados de alta concentración de cannabinoide específico [7]; Posteriormente, la cristalización tiene como propósito apartar el cannabinoide específico que se encuentra con alta concentración del resto de cannabinoides obtenidos de destilación, para la obtención de aislados de alta pureza [8].

El procesamiento a escala industrial para obtener productos transformados a partir de la biomasa del cannabis, consta de diferentes procesos donde la temperatura juega un valor importante en la operación;

Se tiene como objetivo determinar el efecto de la temperatura en los diferentes procesos de obtención de crudo, destilado y aislado de CBD para reducir el tiempo. Es esencial entender como la temperatura afecta cada proceso para poder realizar ajustes precisos en el tiempo, con la finalidad de planificar mayores capacidades de producción, toma de decisiones técnicas en operación, tiempos de higienización y programación de mantenimiento preventivo y correctivo; Para establecer y reducir los costos y gastos asociados a la producción, con la finalidad de garantizar la calidad y uniformidad en los productos transformados.

La metodología combina revisión bibliográfica, análisis de datos históricos y diseño experimental para mejorar la producción de crudo, destilado y aislado de CBD a gran escala. Se recopilan 50 datos experimentales de control en cada etapa, evaluando temperatura del proceso, concentración de CBD y carga de materia prima en el tiempo de proceso. Los datos se analizan estadísticamente para identificar puntos óptimos de temperatura y tiempo, donde se validan mediante experimentos controlados. Aplicando el método Taguchi, se identifica factores de control y ruido, se planifica y realiza un diseño de experimentos eficiente, donde se examinan por ultimo los resultados. El objetivo es encontrar la combinación óptima de variables que minimice la media y reduzca la variabilidad del tiempo de proceso, elaborando conclusiones y recomendaciones prácticas basadas en los hallazgos.

1. MARCO TEÓRICO

Dentro de la industria del cannabis, la extracción está experimentando un crecimiento acelerado y diversificación constante, la innovación en métodos y tecnologías en los procesos de obtención de producto deben seguir siendo reflejados en materias de eficiencia, precisión y rentabilidad. La extracción de cannabis implica la separación de componentes activos como cannabinoides, terpenos y otros componentes de la biomasa de cannabis, para generar productos transformados como crudos, destilados y aislados de calidad, como materia prima para la elaboración de productos médicos, cosméticos y recreativos [9].

1.1. CRUDO

Heiner Toloza *et al.* en [10] realizan una evaluación de extracción de cannabis con el solvente etanol a temperaturas criogénicas, utilizando un dispositivo giratorio asimilado a procesos de extracción industrial; Se efectúan experimentos sumergiendo biomasa seca en etanol con agitación a diferentes temperaturas que rondan entre -80°C a -20°C y diferentes proporciones de solvente-sólido, donde se

analizan factores como la cantidad de cannabinoides y terpenos extraídos; Los resultados proporcionan información útil a la operación en sistemas industriales para evaluaciones económicas a mayor escala.

Philip Wiredu *et al.* en [11] estudian los efectos de la extracción en frío con etanol para obtener compuestos de la planta de cannabis, donde examinan diferentes factores como la proporción de muestra-disolvente a temperaturas de -20°C y -40°C para identificar como afecta el rendimiento en la concentración de cannabinoides y terpenos; Emplean el modelo estadístico de superficie de respuesta para determinar los factores óptimos de extracción y comparar como influyen los diferentes factores en los resultados obtenidos a partir de medidas cuantitativas.

Meharab Valizadehderakhshan *et al.* en [12] hacen una revisión de los diferentes métodos de extracción en biomasa de cannabis, donde se examinan técnicas de pretratamiento y opciones tecnológicas disponibles para extracciones a gran escala; El artículo se centra en el método de extracción por solvente, donde analizan los factores en la toma de decisiones en cada etapa; Por otra parte, se identifican los factores que afectan la transformación de los cannabinoides y como esto cambia la funcionalidad médica de los productos finales.

Cesar Pegoraro *et al.* en [13] muestran la diversidad en los perfiles químicos de 3 genéticas distintas de cannabis sativa, donde son utilizados para la producción de aceites en usos médicos; Emplean dos técnicas diferentes de extracción y evaporación, realizando una comparación de los métodos y analizando la proporción de terpenoides totales con respecto a los principales cannabinoides THC y CBD; Utilizando cromatografía de gases con espectroscopia de masas (GC-MS) observando la extracción mediante el método Soxhlet donde produjo el mayor rendimiento de crudo; Por último, se encontró que la aplicación de temperatura y exposición de oxígeno en la evaporación de solventes, provocan modificaciones significativas en los perfiles químicos finales, por lo cual se destaca la importancia de estandarizar las variaciones en los perfiles químicos en la elaboración de aceites medicinales.

Milan Kostiç *et al.* en [14] presentan una investigación centrada en optimizar el proceso de extracción de aceite de cáñamo cannabis, examinando las variables como la temperatura de extracción, proporción de solvente respecto al cáñamo y el tiempo de extracción, afectan el rendimiento del aceite. Empleando la metodología de superficie de respuesta y un modelo de red neuronal artificial, buscando comparar su eficacia en la predicción del rendimiento del aceite; Concluyendo que ambos modelos son adecuados, demostrando que el modelo de red neuronal artificial fue más preciso; dando como resultado las óptimas condiciones de temperatura, proporción solvente-cáñamo y tiempo de extracción, para maximizar el rendimiento.

1.2. DESTILADO

Sai Kumar *et al.* en [15] desarrollan un proceso de optimización de parámetros operativos para mejorar el sistema de destilación molecular en la extracción de cannabinoides del aceite de cannabis, donde analizan el efecto del flujo de alimentación y la temperatura de condensación interna, mediante la utilización de metodología de superficie de respuesta, analizan cuales son las condiciones óptimas para obtener la mayor cantidad y concentración de cannabinoides específicos en el destilado con la menor cantidad de residuos.

Sara Palmieri *et al.* en [16] evalúan como los tiempos de destilación afectan la composición química en los aceites de Cannabis Sativa; El estudio analiza 5 variedades de cannabis, donde realizan destilaciones de 2 y 4 horas; Con base a los destilados obtenidos analizan la composición química, contenido de polifenoles, capacidad antioxidante y actividad antimicrobiana, donde concluyen que el tiempo de destilación es un factor que afecta la composición química y la actividad biológica del cannabis sativa.

Valtcho Jeliazkov *et al.* en [17] investigan como el proceso de destilación con vapor puede mejorar el aprovechamiento a partir de la biomasa de cáñamo de CBD orgánico y certificado; El estudio analiza los efectos de destilación en diferentes cepas de cáñamo donde identifican factores críticos para el desarrollo del estudio como la concentración de cannabinoides activos en la biomasa y cantidad de tricomas del componente vegetal.

Ayobami Salami *et al.* en [18] efectúan una caracterización detallada de los destilados derivados de diferentes genéticas del cannabis, mediante un proceso de pirolisis lenta a temperaturas moderadas que inician desde temperatura ambiente hasta 350°C; Con la finalidad de investigar la composición química de los destilados y detectar posibles compuestos de interés utilizando diversas técnicas de análisis químico. Además, se busca presentar información innovadora sobre compuestos encontrados en las muestras de cáñamo, específicamente aquellos compuestos obtenidos en etapas de torrefacción y pirolisis.

Giuseppe Micalizzi *et al.* en [19] desarrollan un método de destilación utilizando microondas para extraer y aislar el aceite de cannabis de las inflorescencias frescas y secas de cáñamo, el método optimizado permite obtener productos destilados con una alta concentración de cannabinoides y terpenos; Se realizó un análisis detallado de destilado obtenido de diferentes variedades de cáñamo, utilizando el método de cromatografía de gases equipado con detectores de espectrometría de masas y ionización de llama, determinando la cantidad absoluta de compuestos destilados.

1.3. AISLADO

Salvatore Genovese *et al.* en [20] introducen un método innovador para la eliminación de restos de hidrocarburos en el CBN y CBD cristalizados, provenientes del proceso de purificación y fraccionamiento de extractos de cannabis; Consta de una destilación azeotrópica de n-pentano, n-hexano y n-heptano con agua, seguido de un tratamiento térmico suave en un evaporador rotatorio, donde los resultados plasman una reducción considerable en los residuos de hidrocarburos, sugiriendo una alternativa para procesar cannabinoides de alta pureza, para el cumplimiento de estándares legales de contenido residual de hidrocarburos.

William Lanier *et al.* en [21] presentan un método para la cristalización de cannabinoides; El proceso inicia con la disolución de aislado de cannabinoides en un disolvente de cristalización, continuando con un proceso de evaporación controlado del disolvente, logrando que la solución alcance la saturación; Por último, se añade un cultivo de cristales de cannabinoides para la formación de cristales en la solución super saturada con aplicación de temperatura y vacío hasta alcanzar el tamaño deseado.

Christopher Adair *et al.* en [22] suministran una técnica de preparación continua de partículas cristalinas de CBD en un reactor CSTR de flujo continuo, donde describe los procedimientos y condiciones involucradas en el proceso, permitiendo controlar la distribución del tamaño de los cristales, las formas poliformicas y la morfología; Lo cual es deseable para aplicaciones medicinales y recreativas.

Mettler Toledo *et al.* en [23] ofrecen una visión detallada sobre el proceso de cristalización de CBD a partir de extractos destilados; El proceso de cristalización actualmente tiene deficiencias que conducen a inconsistencias en la calidad del producto final; El artículo destaca la necesidad de comprender mejor el proceso de cristalización para optimizar el aislamiento del CBD. Se mencionan términos como solubilidad, super saturación, nucleación y límite de la zona metaestable, fundamentales para entender cómo se forman los cristales de CBD. Además, subraya la importancia de utilizar tecnologías analíticas de procesos para mejorar la eficiencia y la calidad del proceso de recristalización.

Alan Ferraro *et al.* en [24] proporcionan información describiendo los procesos y equipos utilizados para obtener aislado de CBD de alta calidad; El proceso consta de la mezcla de CBD aislado con un solvente en un recipiente agitado a temperaturas criogénicas, la mezcla se transfiere a un secador Nutsche, donde se aplica presión para eliminar el exceso de solvente y capturar el aislado de CBD en un filtro; Por último, destaca la importancia de cristalización de CBD en la industria química y farmacéutica.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1. GC-FID PERFIL CANNABINOIDE

La detección y cuantificación de cannabinoides a través de cromatografía de gases con detección por ionización de llama GC-FID es una técnica común en el análisis de cannabis y productos relacionados. La técnica se utiliza para separar, identificar y cuantificar los diferentes compuestos cannabinoides presentes en muestras de cannabis como biomasa, crudo, destilado y aislado; detectando compuestos como el THC-Tetrahidrocannabinol, el CBD-Cannabidiol, el CBN-Cannabinol, entre otros. La cromatografía de gases se basa en la separación de compuestos según sus características químicas y físicas, mientras que la detección por ionización de llama permite identificar los compuestos separados midiendo la corriente eléctrica generada por su combustión en una llama de hidrógeno/aire. Esta técnica, debido a su alta sensibilidad y precisión, es fundamental en la industria del cannabis para garantizar el control de calidad, procesos e investigaciones, para el cumplimiento de los requisitos regulatorios del mercado de cannabis y sus derivados [25].

2.2. EXTRACCIÓN DE CRUDO DE CBD CON ETANOL

El proceso de extracción de crudo de CBD de la biomasa de cannabis, consta de la utilización de etanol orgánico, llevándolo a condiciones criogénicas a la centrífuga, la biomasa seca se coloca en una bolsa de filtración y se sumerge en etanol enfriado para extraer los cannabinoides. Después de la extracción, el licor se drena y se almacena en un tanque; Posteriormente, el líquido se filtra a través de diferentes filtros para eliminar impurezas y se almacena en otro tanque. Finalmente, el Etanol se separa del crudo utilizando un destilador de película descendente, donde se aplica vacío para evaporar el etanol, dejando el Crudo de CBD concentrado. Este proceso garantiza la extracción eficiente y segura de crudo CBD de la biomasa [26].

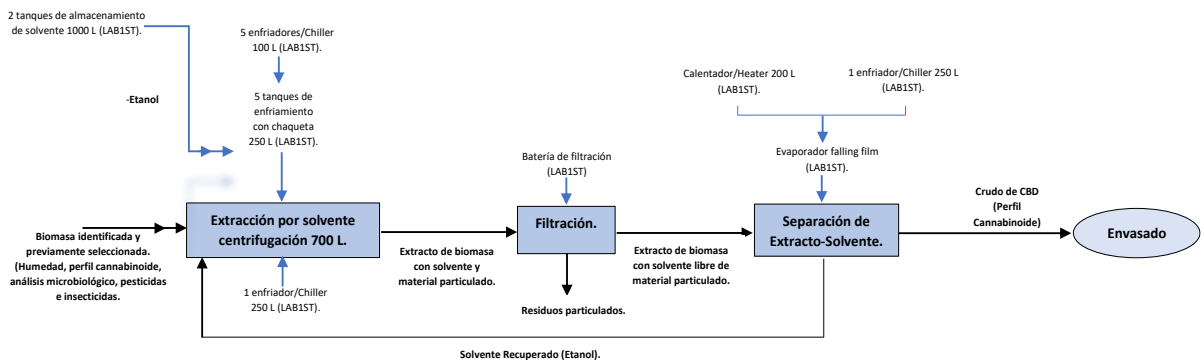


Fig 1. Proceso de extracción de Crudo CBD con Etanol.

Fuente: Elaboración propia.

2.3. DESTILACIÓN DE CBD

El proceso de destilación de CBD tiene como finalidad separar el CBD de cannabinoides, grasas, terpenos y clorofila; el proceso consta en la utilización un equipo de destilación de corto recorrido de un volumen específico, donde requiere una serie de equipos acoplados, como una bomba de vacío y un baño circulante refrigerado. El proceso comienza llenando el crudo de CBD en el matraz, agregando un agitador magnético. Posteriormente se ensamblan los equipos acoplados para el proceso de destilación. Se inicia el baño circulante refrigerado a baja temperatura, se enciende el agitador magnético a una velocidad específica y se pone en marcha la bomba de vacío. Por último, se procede a calentar el matraz con temperaturas específicas, se recolectan las diferentes fracciones de destilado de CBD en los recipientes receptores [27].

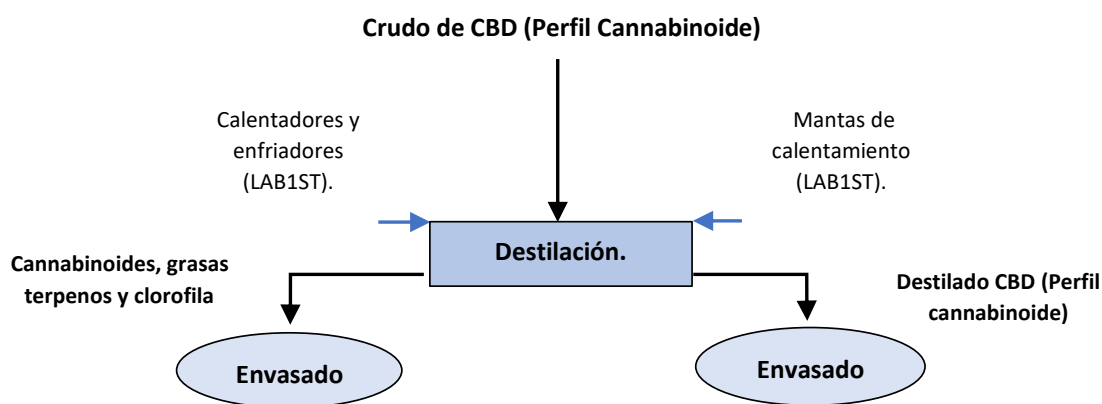


Fig 2. Proceso de destilado de CBD.

Fuente: Elaboración propia.

2.4. AISLAMIENTO DE CBD

El proceso para la cristalización del aislado de CBD implica una serie de pasos para garantizar la pureza y la calidad del producto final, donde inicialmente se llena el reactor con destilado CDB, calentándolo con agitación constante. A continuación, se añade lentamente pentano a temperatura ambiente al aceite, hasta que el aceite se encuentre completamente soluble en el pentano. Una vez lograda la solución homogénea, se enfría la mezcla para permitir la formación de cristales. Los cristales se filtran de la solución homogénea, para eliminar impurezas, posteriormente los cristales se lavan con pentano a bajas temperaturas. Por último, se colocan los cristales en un horno de vacío a 35°C para eliminar cualquier residuo de pentano, asegurando así la pureza del producto final [28].

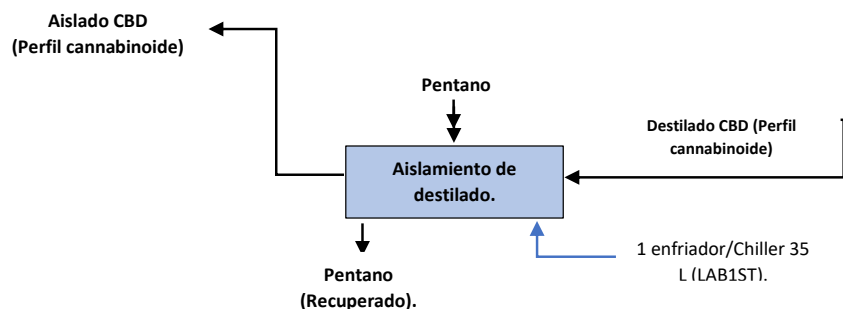


Fig 3. Proceso de aislado de CBD.

Fuente: Elaboración propia.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La industria del cannabis experimenta un crecimiento significativo en los últimos años, con una alta dinamicidad pese a las limitantes normativas y exigencias específicas en el mercado de productos derivados [29]; La producción de Crudo, destilado y aislado de CBD, representa un proceso crucial donde se disponen de avances y desafíos; Aunque se han logrado progresos en las técnicas de producción, aún persisten retos significativos en los procesos de fabricación. Uno de los principales obstáculos es el tiempo en los procesos, lo que impacta negativamente en la eficiencia operativa y la rentabilidad. Además, garantizar la calidad y consistencia del producto final es crucial debido a las regulaciones del mercado y las demandas de los consumidores. Mantener estándares estrictos de control de calidad es esencial en todas las etapas de producción. También es importante mejorar rendimientos para maximizar la eficiencia y la cantidad de los productos obtenidos por unidad de materia prima utilizada [30].

Seleccionar las técnicas apropiadas de extracción es esencial para garantizar que se alineen con las características específicas que se buscan en el producto final. Esto implica considerar una serie de factores claves que pueden influir significativamente en la eficiencia del proceso. Uno de los aspectos fundamentales a tener en cuenta es el pretratamiento requerido de la biomasa a procesar, dependiendo del método de extracción y de las características de la materia prima, puede ser necesario realizar operaciones como la trituración, el secado o la molienda para facilitar la liberación de los compuestos deseados. Las condiciones de presión y temperatura durante el proceso de extracción también juegan un papel fundamental. Los parámetros pueden variar dependiendo del método de extracción empleado y de las características específicas de la biomasa. El control adecuado de la presión y la temperatura puede influir en la eficiencia de la extracción y en la concentración del producto final [31]. Entre estos factores, la temperatura destaca como un aspecto especialmente relevante para la optimización en los procesos. Las condiciones de temperatura adecuadas pueden acelerar la velocidad de producción, lo que puede

resultar en una reducción significativa de los tiempos de procesamiento y una mejora de la eficiencia operativa en general [32].

Tanto la temperatura como el tiempo de proceso son factores críticos que deben ajustarse para mejorar la eficiencia en los procesos, La temperatura óptima permite una separación eficiente de crudo, destilado y aislado de CBD, asegurando que se capturen los compuestos deseados sin degradar su calidad. Por otro lado, el tiempo de extracción determina la cantidad de producto y la posible contaminación con compuestos no deseados. Es esencial encontrar un equilibrio entre la temperatura y el tiempo de extracción para maximizar los rendimientos y garantizar la concentración de producto final [33] (citado por [34]).

Proceso	Tiempo proceso (min)	Horas																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Recepción flor seca	60	■																		■					
Extracción por solvente centrifugación	65		■																		■				
Destilación (Crudo – Solvente)	246			■	■	■	■															■	■	■	■
Descarboxilación	100							■	■																
Destilación CBD	238									■	■	■	■												
Aislamiento CBD	375												■	■	■	■	■	■	■						
Tiempo Total	1084	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■					
Tiempo Total (h)	18																								

Fig 4. Tiempo de procesos y tiempo total desde recepción de flor seca hasta obtención de Aislado de CBD.

Fuente: Elaboración propia.

Por consiguiente, se requiere investigar los efectos de la temperatura en la reducción del tiempo necesario para producir crudo, destilado y aislado de CBD. Este estudio busca establecer los parámetros óptimos de temperatura que permitan acelerar el proceso de extracción sin comprometer la concentración del producto final.

4. OBJETIVOS

4.1.OBJETIVO GENERAL

Determinar si la temperatura en las etapas de proceso en la obtención de crudo, destilado y aislado de CBD reducen el tiempo de producción.

4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

Identificar los tiempos de cada etapa del proceso en la obtención de crudo, destilado y aislado de CBD con las variaciones de temperatura.

Analizar el impacto de las variaciones de temperatura en la concentración de crudo, destilado y aislado de CBD para los tiempos reportados.

Evaluar la cantidad de carga biomasa, crudo y destilado de CBD en los procesos, en función de la temperatura en cada etapa del proceso, para los tiempos alcanzados.

Establecer la temperatura, tiempo, concentración de CBD y cantidad óptima de carga en cada proceso de obtención de crudo, destilado y aislado.

5. METODOLOGÍA

La investigación se centra en determinar como el efecto de la temperatura en los procesos de obtención de crudo, destilado, y aislado de CBD, reducen el tiempo de producción; el estudio opta por un enfoque metodológico de investigación cuantitativo que implique definir variables claves, diseñar un experimento controlado, recopilar datos precisos, realizar análisis estadístico, interpretar resultados y proporcionar conclusiones basados en evidencia[35].

Surgió la necesidad de mejorar los procesos de obtención de crudo, destilado y aislado de CBD a gran escala, con el propósito de optimizar la operación. Los procesos prolongados en cada etapa de proceso representan un desafío importante que impacta negativamente en la rentabilidad; Por consiguiente, es crucial comprender como las variaciones de temperatura pueden afectar la efectividad y velocidad en las técnicas utilizadas para obtener los derivados, con el fin de identificar las condiciones óptimas de operación para reducir el tiempo de producción, determinar concentraciones y cantidades de carga en cada proceso adecuadas para los productos obtenidos.

5.1. DEFINICIÓN DE VARIABLES

- Variables de control:
 - Temperatura etapa del proceso (°C)
 - Concentración de producto: (Crudo: $CBD \geq 60.0000\%$) (Destilado: Concentración de $CBD \geq 90.0000\%$) (Aislado: Concentración $CBD \geq 99.5000\%$).
 - Carga de material al proceso (kg)

- Variable de ruido:
 - Tiempo de proceso (min)

5.2. DEFINICIÓN Y SELECCIÓN DE LA MUESTRA

5.2.1. Población.

Los diferentes procesos involucrados en la obtención de crudo, destilado y aislado de CBD; Constituyen una población separada, donde involucra los datos históricos de temperatura, concentración de producto CBD, carga de materia al proceso y tiempo de proceso, reportados en experiencias de obtención de derivados del cannabis.

5.2.2. Muestra.

Corresponde a un conjunto específico de datos no probabilísticos históricos de temperatura, concentración de producto CBD, carga de materia al proceso y tiempo de proceso, reportados durante las experiencias de obtención de derivados del cannabis en cada etapa. Posibilitando un análisis exhaustivo del efecto de la temperatura en el tiempo de obtención de derivados de cannabis.

5.3. METODO TAGUCHI

El método estadístico Taguchi es una herramienta efectiva para elegir la mejor combinación de niveles de los factores de control de un sistema, con el objetivo de lograr un comportamiento robusto frente a la variación de factores de ruido. Se entiende por robustez la capacidad de mantener una respuesta estable ante cambios en los factores de entrada. Distinguiendo entre dos tipos de variables: factores de control, que pueden ser fijados a ciertos niveles y factores de ruido, que no pueden controlarse por diversas razones prácticas o económicas. El enfoque de Taguchi busca mitigar los efectos no deseados causados por fuentes de ruido en la respuesta del sistema. Para ello, se evalúa si hay una diferencia significativa en la magnitud de los errores entre diferentes niveles de un factor de control y se selecciona el nivel con el menor error para asegurar la condición más robusta [36].

Con el fin de mejorar la calidad percibida por los consumidores. El método Taguchi se centra en diseñar productos y procesos robustos, es decir, insensibles a las condiciones; Sus fortalezas incluyen un enfoque en la calidad desde el inicio del proceso, el reconocimiento de la importancia de los factores que afectan el desempeño, la reducción de la variabilidad mediante funciones de pérdida y la razón señal-ruido adaptadas a objetivos específicos, así como la creación de parámetros de diseño para disminuir la variabilidad en el desempeño. La metodología es adecuada para mejorar procesos y productos ya existentes [37].

5.3.1. Función de pérdida Taguchi

La Función de Pérdida proporciona un método para calcular la discrepancia entre las condiciones ideales de un proceso y las condiciones reales. Es decir, para una característica específica en nuestro producto o proceso, esta función indica cuánto nos estamos alejando de las condiciones óptimas de operación establecidas.

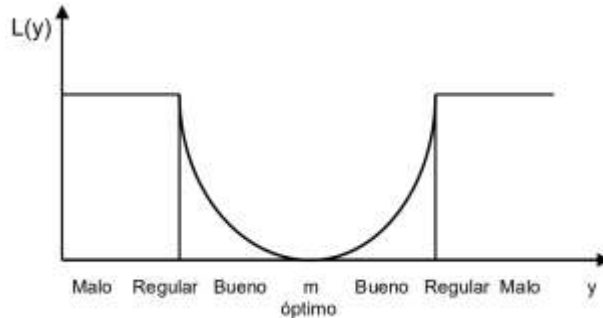


Fig 5. Criterio de calidad según G. Taguchi.

Fuente: A. B. Hernández, M. De, L. P. Guillon, y L. A. García, “La metodología de Taguchi en el control estadístico de la calidad”, Bahía Blanca, Argentina, may 2015.

Función de pérdida Taguchi (1).

$$L(Y) = K(Y - M)^2 \quad (1)$$

Taguchi enfatiza que la eficacia de un proceso puede medirse en términos de la pérdida promedio experimentada por cada unidad procesada. Esta pérdida promedio puede variar según la condición del proceso que se esté considerando. En el caso de una característica de proceso denominada “Más pequeño es mejor”, el objetivo es minimizar esta característica. Por lo tanto, la pérdida se calcula como la diferencia entre el valor objetivo y el valor real de la condición del proceso. En este contexto, se busca minimizar esta pérdida, ya que cuanto menor sea, más se acercará el valor real al valor objetivo, lo que indica una mayor eficiencia del proceso.

Función de pérdida promedio por unidad producida “Más pequeño es mejor” (2).

$$l(\mu) = (K)(\sigma^2 + \mu^2) \quad (2)$$

La pérdida promedio por unidad producida se establece como el pilar central del marco conceptual de Taguchi para la mejora de las condiciones del proceso. Este enfoque implica la modulación de la media y la reducción de la variabilidad como fundamento clave para lograr una mejora efectiva. En su estrategia,

utiliza el Diseño de Experimentos para ajustar la media hacia el valor óptimo y emplea el índice de Señal-Ruido como una herramienta esencial para minimizar la variabilidad del proceso [38].

5.3.2. Índice de señal y ruido Taguchi

La variabilidad en las condiciones del proceso puede deberse al diseño del proceso, factores no controlables o a fluctuaciones en los niveles de los factores durante la producción. Taguchi propone reducir esta variabilidad utilizando el índice de Señal-Ruido, calculado a partir de resultados experimentales. Este índice ayuda a determinar los factores que afectan la variabilidad y a encontrar el nivel óptimo para minimizarla, mediante un análisis de varianza (ANOVA). En el enfoque de Taguchi, donde "más pequeño es mejor", se busca optimizar el proceso buscando el menor valor posible del índice de Señal-Ruido, lo que indica una menor variabilidad, por lo tanto, una mayor estabilidad y consistencia en las condiciones del proceso.

Índice de señal y ruido caso "Más pequeño es mejor" (3).

$$S/R = -10 \text{Log} \left(\frac{y_1^2 + \dots + y_n^2}{n} \right) \quad (3)$$

Taguchi adapta su enfoque según la fuente de la variabilidad en los procesos de fabricación. Cuando esta proviene del diseño del proceso, recurre a Repeticiones Simples, que implica realizar múltiples repeticiones de los ensayos para evaluar la variabilidad inherente. Para enfrentar la variabilidad causada por factores no controlables, utiliza los Arreglos Interno/Externo, combinando dos Arreglos Ortogonales que abordan factores de control y ruido por separado. En caso de fluctuaciones en los niveles de los factores durante la producción, aplica el Arreglo Alternativo Interno/Externo, similar al anterior pero enfocado en factores de control con niveles variables. Posteriormente, analiza los resultados mediante el índice S/R y ANOVA para identificar factores de control significativos. Este método difiere del enfoque clásico al utilizar el índice S/R para detectar influencias en la variabilidad del proceso [39].

La estrategia de Taguchi busca implementar un modelo donde "más pequeño es mejor", no solo optimizando la media de los procesos, sino también reduciendo la variabilidad en la producción. En este contexto, se busca minimizar tanto la distancia entre el valor real y el objetivo, como la variabilidad inherente del proceso, lo que conlleva a una mayor estabilidad y consistencia en la producción.

5.3.3. Matriz ortogonal Taguchi

Taguchi propone un diseño ortogonal para los factores controlables (arreglo interno) cruzado con otro diseño para los factores ruido (arreglo externo). La matriz ortogonal es una herramienta clave en el diseño de experimentos para mejorar la calidad y la eficiencia de los procesos. Esta matriz consiste en una selección cuidadosa de combinaciones de variables de diseño que permiten obtener información completa y precisa sobre cómo cada variable afecta al resultado final. Su diseño garantiza que las pruebas sean estadísticamente independientes entre sí y cubran todas las posibles combinaciones de niveles de las variables. Esto reduce la cantidad de experimentos necesarios, lo que ahorra tiempo y recursos en la identificación y optimización de los factores más influyentes en un proceso [40].

	Z_1	Z_2	Z_3									
Z_1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1				
Z_2	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1				
Z_3	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1				
X_1	X_2	X_3	X_4	X_5								
-1	-1	-1	-1	1	8.0	-0.5	-1.0	13.0	12.0	1.5	14.0	14.0
1	-1	-1	-1	-1	0.0	0.0	4.0	1.0	8.0	-4.0	-2.0	-0.5
-1	1	-1	-1	-1	-0.5	5.0	3.5	1.0	8.0	12.5	-1.0	3.0
1	1	-1	-1	1	4.5	-3.0	-2.0	-6.5	0.5	19.0	0.5	4.0
-1	-1	1	-1	-1	5.5	2.0	6.0	10.5	16.5	2.0	6.0	4.5
1	-1	1	-1	1	1.0	0.0	3.0	8.5	4.5	9.5	-1.0	4.5
-1	1	1	-1	1	3.0	13.5	6.0	-2.0	4.5	5.5	18.5	-1.5
1	1	1	-1	-1	4.5	-1.5	1.5	13.0	0.0	6.0	-2.0	19.5
-1	-1	-1	1	-1	5.0	-1.5	3.5	2.0	1.0	6.5	6.5	9.5
1	-1	-1	1	1	8.0	0.0	2.0	-1.0	2.0	4.0	8.5	-1.0
-1	1	-1	1	1	3.5	1.5	10.5	4.0	13.0	0.5	6.5	-0.5
1	1	-1	1	-1	1.0	-3.0	8.0	8.0	7.5	-1.0	7.5	-0.5
-1	-1	1	1	1	12.0	6.5	8.0	9.5	7.5	7.0	12.0	12.5
1	-1	1	1	-1	8.0	-3.0	13.5	-5.0	6.5	4.0	21.0	11.0
-1	1	1	1	-1	17.0	11.5	3.5	-4.0	7.0	5.0	15.5	6.0
1	1	1	1	1	14.0	9.5	-3.0	6.0	-1.5	10.5	8.0	1.5

Fig 6. Matriz ortogonal típica del modelo Taguchi.

Fuente: E. Arturo, C. Trejos, P. Daniel Medina Varela, C. Andrés, y S. Diaz, “Una revisión crítica de la razón señal ruido usada por Taguchi”, Sci. Tech, n.o 50, abr. 2012.

Para aplicar el método Taguchi, se sigue un proceso sistemático que implica la identificación de los factores de control con sus respectivos niveles y factor de ruido en la planificación de un diseño de experimentos eficiente, la realización de los experimentos según el plan establecido y el análisis estadístico de los resultados obtenidos. El objetivo final es encontrar la combinación adecuada de temperatura, concentración de producto CBD y carga de materia al proceso, que minimice la media y reduzca la variabilidad del tiempo de proceso de obtención de crudo, destilado y aislado de CBD.

6. RESULTADOS

El estudio se realizó con la genética cosechada y estandarizada llamada FRANKLIN donde se tritura y se lleva a análisis fisicoquímicos de (humedad<15%) y perfil cannabinoide (CBD>9%), condiciones óptimas para ser aprobada en producción.

6.1. REPORTE DE RESULTADOS CRUDO DE CBD

La biomasa aprobada en producción se llevó a un proceso de contacto criogénico a temperaturas controladas con solvente Etanol (C₂H₆O) a la Centrifuga LAB1ST (700 L) cargada con aproximadamente 30 Kg de biomasa y 400 L de solvente a 900 RPM y 20 ciclos; Al culminar la centrifugación el licor con material particulado paso por una Batería de Filtración LAB1ST para eliminar residuos; Por último el licor fue llevado a un evaporador de película descendente LAB1ST para la separación del etanol y crudo a condiciones de Temperatura de calentamiento 85°C, Temperatura de condensación 8°C y Presión de vacío de 80 Pa. El tiempo de extracción constituyo la suma de tiempo de centrifugación y tiempo de destilación, al finalizar la extracción se determinó el perfil cannabinoide de Crudo CBD con cromatografía GC-FID y tiempo de extracción, donde se identificó la concentración de CBD en cada experimento (Ver Anexo B y Anexo E).

Tabla 1. Datos experimentales reportados de obtención de Crudo de CBD

N°	Temperatura de extracción (°C)	Concentración de CBD en Crudo GC-FID (%)	Carga Biomasa (kg)	Tiempo extracción (min)
1	-0,1	42,9769	30,20	311,11
2	-0,3	43,1343	30,10	307,27
3	-1,4	43,1958	30,90	304,45
4	-1,6	43,5824	29,40	298,28
5	-2,1	43,883	30,20	283,93
6	-2,8	44,2002	29,20	283,29
7	-3,3	44,4087	30,30	283,05
8	-3,7	44,4389	29,90	280,95
9	-4,6	45,1289	29,80	280,6
10	-4,9	45,5691	30,20	278,64
11	-5,2	46,8529	30,10	275,52
12	-6,2	47,1934	30,40	273,48
13	-6,6	48,0174	30,20	271,5
14	-7,1	48,0215	29,30	269,38
15	-7,9	48,5618	30,60	268,56
16	-8,4	48,6045	31,00	259,69
17	-8,7	48,6936	29,70	256,81
18	-9,6	49,7273	29,80	249,77
19	-10,4	51,2933	29,90	246,48
20	-11,4	51,4458	30,10	241,82
21	-11,8	52,6608	29,70	237,21
22	-12,3	52,8565	29,80	233,46
23	-12,5	52,8595	29,90	232,29
24	-13,2	53,3226	30,40	230,41
25	-13,6	54,6752	30,10	219,18
26	-14,6	54,7264	30,20	211,63
27	-14,9	55,5053	29,90	211,45
28	-15,7	55,5397	30,00	207,89
29	-16,2	56,0394	30,20	204,76
30	-17,3	57,3815	29,80	200,7
31	-17,8	58,1771	29,70	199,16

32	-19,4	58,3556	30,00	197,03
33	-20,3	58,8996	30,30	195,42
34	-21,3	59,5257	30,20	194,92
35	-21,7	60,2469	29,90	194,35
36	-22,4	60,2549	29,80	192,72
37	-23,4	60,2658	30,80	192,51
38	-24,3	60,4535	29,90	192,44
39	-24,9	60,5318	30,10	192,18
40	-25	60,5512	30,30	191,29
41	-25,5	60,5636	30,20	189,59
42	-26,1	60,5757	29,90	189,47
43	-26,8	60,5794	29,80	189,26
44	-27,4	60,7086	30,20	188,44
45	-28,3	60,7624	29,90	186,61
46	-28,7	60,7883	30,10	186,28
47	-29,2	60,8526	29,90	185,7
48	-29,8	60,8746	30,40	182,64
49	-30,1	60,888	30,30	181,9
50	-30,3	61,0489	29,90	181,77

Fuente: Elaboración propia.

Para el análisis estadístico se utilizó el software (MINITAB 22), donde se diseñó un arreglo ortogonal a partir de los datos experimentales de la obtención de Crudo de CBD para el método Taguchi, Se estipuló 1 factor de ruido (Tiempo extracción (min)) y 3 factores de control (Temperatura de extracción (°C), Concentración de CBD en Crudo GC-FID (%) y Carga Biomasa (kg)), con 5 niveles cada uno dando así 25 corridas $L_{25}(5^3)$.

Tabla 2. Factores de control y niveles seleccionados en obtención de Crudo de CBD

Factor	Nombre	Valores de niveles					Niveles
A	Temperatura de extracción (°C)	-2,1	-7,9	-13,6	-21,7	-28,3	5
B	Concentración de CBD en Crudo GC-FID (%)	43,8	48,5	54,6	60,24	60,76	5
C	Carga Biomasa (kg)	30,20	30,60	30,10	28,90	29,90	5

Fuente: Software Minitab (versión 22, Minitab, LLC, State College, PA).

Tabla 3. Resumen del modelo SN Crudo de CBD

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)
0,2139	98,92%	98,01%

Fuente: Software Minitab (versión 22, Minitab, LLC, State College, PA).

El análisis de varianza en el diseño experimental de Taguchi para Crudo de CBD mostro un R-cuadrado alto en relación con la señal a ruido SN. Indicando que la variación en los resultados está fuertemente influenciada por los factores de control que se evaluaron.

Tabla 4. Análisis de Varianza de Relaciones SN Crudo de CBD.

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
Temperatura De Extracción (°C)	4	52,5496	52,5496	13,1374	287,21	0,000
Concentración CBD Crudo (%)	4	1,8959	1,8959	0,4740	10,36	0,001
Carga Biomasa (kg)	3	0,1635	0,1635	0,0545	1,19	0,351
Error residual	13	0,5946	0,5946	0,0457		
Total	24	55,2037				

Fuente: Software Minitab (versión 22, Minitab, LLC, State College, PA).

Los factores de control de Temperatura De Extracción (°C) y Concentración CBD crudo (%) presentaron un valor P (nivel de significancia) menor a 0,05 por lo cual hay asociación estadísticamente significativa con el Tiempo De Extracción (min).

Tabla 5. Respuesta para relaciones de Señal y ruido más pequeño mejor Crudo de CBD

Nivel	Temperatura De Extracción (°C)	Concentración CBD Crudo (%)	Carga Biomasa (kg)
1	-45,34	-47,42	-46,95
2	-45,70	-47,13	-47,14
3	-46,57	-46,96	-46,90
4	-48,17	-46,78	-46,97
5	-49,13	-46,63	
Delta	3,78	0,79	0,24
Clasificar	1	2	3

Fuente: Software Minitab (versión 22, Minitab, LLC, State College, PA).

Con base a la respuesta para relaciones de señal y ruido, se identificaron los valores de delta, donde el más grande fue 3,78 - Temperatura De Extracción (°C), indicándolo como el factor de control que posee mayor efecto en el Tiempo De Extracción (min).

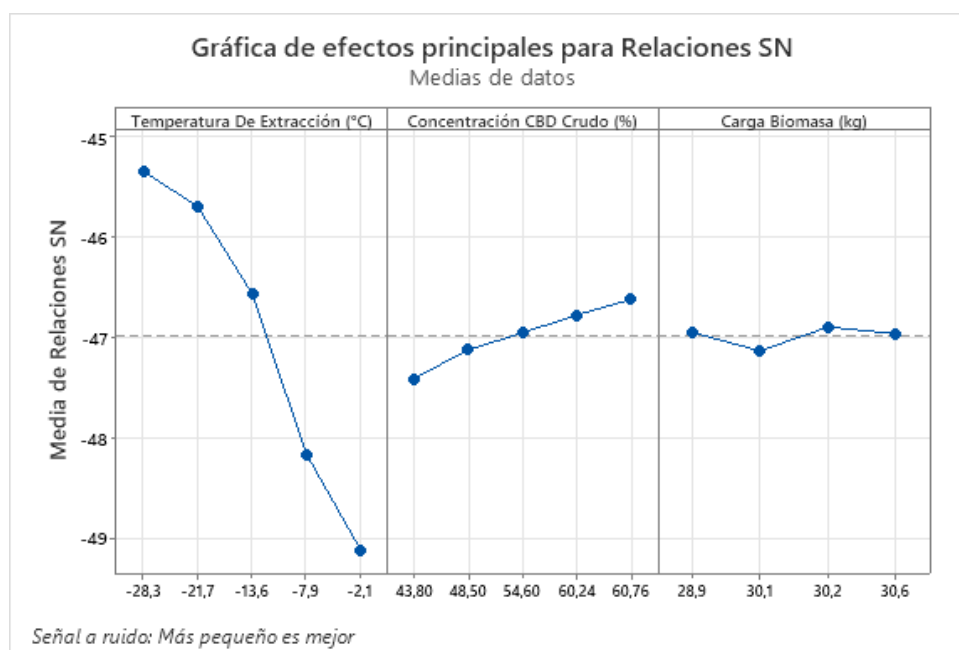


Fig 7. Grafica de efectos principales para relaciones SN con respecto al Tiempo De Extracción (min).

Fuente: Software Minitab (versión 22, Minitab, LLC, State College, PA).

En la Fig 7 se observan los niveles de los factores de control analizados donde aquellos que presentan mayor valor de señal a ruido, proveerá el nivel adecuado, reflejando una menor variabilidad de cada factor de control con el cual disminuirá el Tiempo De Extracción (min).

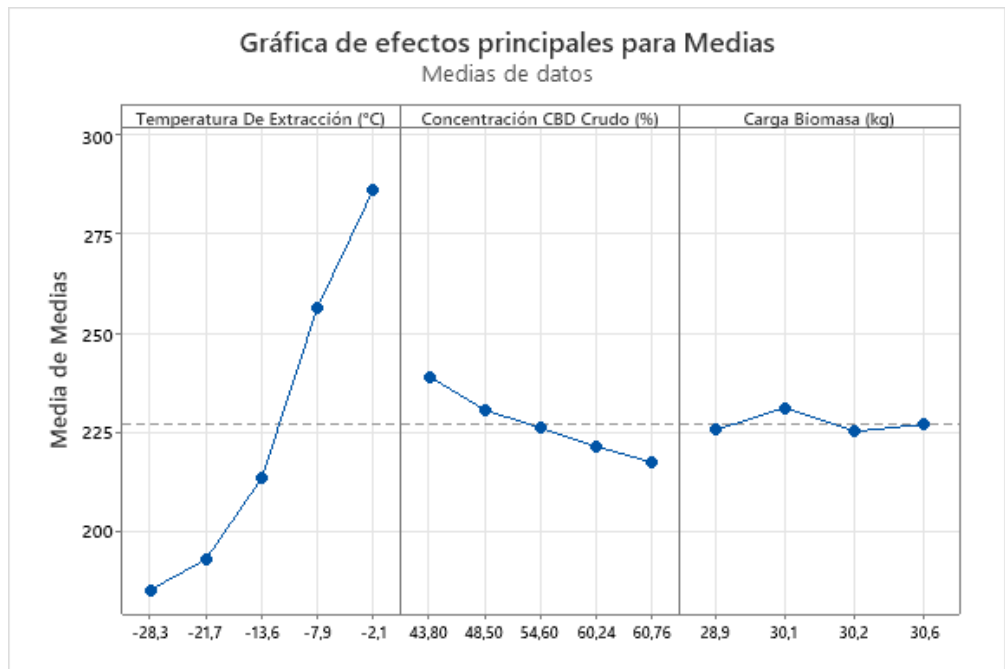


Fig 8. Grafica de efectos principales para medias con respecto al Tiempo De Extracción (min).

Fuente: Software Minitab (versión 22, Minitab, LLC, State College, PA).

En la Fig 8 se observa que los niveles óptimos de cada factor de control son los más bajos con respecto al Tiempo De Extracción (min), con base a la utilización de la función de perdida promedio “Mas pequeño es mejor”.

Tabla 6. Predicción de resultados de Taguchi obtención de Crudo de CBD

Configuración De Niveles Óptimos			Predicción	
Temperatura De Extracción (°C)	Concentración CBD Crudo (%)	Carga Biomasa (kg)	Relación S/R	Media
-28,3	60,76	30,2	-44,9063	183,855

Fuente: Software Minitab (versión 22, Minitab, LLC, State College, PA).

En base al análisis estadístico con Taguchi, se identificó los niveles óptimos para reducir el Tiempo De Extracción (min) de obtención de crudo CBD; A partir de la predicción de resultados que ofrece el software Minitab, se identifican los valores pronosticados de relación (S/R) Y Media; Donde la media es el Tiempo Optimo De Extracción (183,855 min).

6.2. REPORTE DE RESULTADOS DESTILADO DE CBD

El Crudo de CBD obtenido del proceso anterior es llevado al destilador por Arrastre de Vapor Short Path LAB1ST (20 Litros) donde fue cargado con aproximadamente 10 kg de Crudo de CBD, con temperatura de refrigeración para la condensación de CBD a 0°C y una presión de vacío de 4 Pa para cada experimento (Ver Anexo C y Anexo F)

Tabla 7. Datos experimentales reportados de obtención de Destilado de CBD

N°	Temperatura De Destilación (°C)	Concentración CBD Destilado (%) GC-FID (%)	Carga crudo de CBD (Kg)	Tiempo de Destilación (min)
1	171,4	86,5823	10,07	160,24
2	171,7	86,6047	9,87	170,14
3	172	86,6621	10,11	170,23
4	172,1	87,3177	9,98	170,41
5	172,3	87,3428	9,92	170,61
6	176,2	87,3701	9,85	172,73
7	177,2	87,4881	10,1	173,34
8	178,8	87,6919	10,05	174,47
9	180,7	88,1739	9,97	174,52
10	181,7	88,3522	9,98	176,6
11	187,5	88,5438	9,87	177,17
12	189,3	88,6083	10,05	177,29
13	190,8	88,835	10,13	180,04
14	191,3	88,9032	10,11	181,17
15	193,1	88,9882	9,88	184,43
16	194,4	89,002	9,93	188,17
17	196,2	89,0936	9,89	188,9
18	199,3	89,2756	10,07	189,37
19	202,6	89,2824	10	190,36
20	203,5	89,3918	10,1	190,94
21	204,3	89,5483	9,97	192,8
22	204,4	89,7153	9,88	192,83
23	205	89,8547	10,11	193,67
24	207,3	89,9684	10,09	193,78
25	210,1	90,2499	10	198,35
26	211,3	90,6223	9,97	198,41
27	213,2	90,633	9,95	198,62
28	213,7	90,8118	10,01	199,73
29	213,7	90,8233	9,98	199,75
30	215,1	90,8557	9,89	202,08
31	216	91,0592	9,96	203
32	216,2	91,0689	9,94	208,47
33	217,5	91,131	10,06	208,99
34	218,1	91,2193	10,13	209,56
35	218,5	91,2322	9,82	210,63
36	218,8	91,2989	10,03	210,98
37	219,8	90,9502	10,12	213,19
38	224,8	90,8106	10,03	213,34
39	225,3	90,7587	10	215,69
40	226,3	90,7551	9,87	216,2
41	227,7	90,5585	9,99	217,66

42	228,1	90,4246	9,87	219,93
43	228,8	89,9761	10,01	225,51
44	230,2	89,4126	10,12	229,2
45	232	89,2589	9,82	229,48
46	232,9	88,7356	10,15	230,45
47	233,5	88,3256	9,87	233,66
48	235,2	88,2999	10,13	234,45
49	237,7	87,8995	10,11	234,67
50	239,9	87,8761	9,97	238,66

Fuente: Elaboración propia.

Para el análisis estadístico se utilizó el software (MINITAB 22), donde se diseñó un arreglo ortogonal a partir de los datos experimentales de la obtención de Destilado de CBD para el método Taguchi, Se estipuló 1 factor de ruido (Tiempo de Destilación (min)) y 3 factores de control (Temperatura de extracción (°C), Concentración CBD Destilado (%) GC-FID (%) y Carga crudo de CBD (Kg)), con 5 niveles cada uno dando así 25 corridas $L_{25}(5^3)$.

Tabla 8. Factores de control y niveles seleccionados en obtención de Destilado de CBD

Factor	Nombre	Valores de niveles					Niveles
A	Temperatura De Destilación (°C)	171,4	172,3	193,1	210,1	218,5	5
B	Concentración CBD Destilado (%) GC-FID (%)	86,58	87,34	88,98	90,24	91,23	5
C	Carga crudo de CBD (Kg)	10,07	9,92	9,88	10	9,82	5

Fuente: Software Minitab (versión 22, Minitab, LLC, State College, PA).

Tabla 9. Resumen del modelo SN Destilado de CBD

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)
0,1136	99,28%	98,57%

Fuente: Software Minitab (versión 22, Minitab, LLC, State College, PA).

El análisis de varianza en el diseño experimental de Taguchi para Destilado de CBD mostro un R-cuadrado alto en relación con la señal a ruido SN. Indicando que la variación en los resultados está fuertemente influenciada por los factores de control que se evaluaron.

Tabla 10. Análisis de Varianza de Relaciones SN Destilado de CBD

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
Temperatura De Destilación (°C)	4	20,9558	20,9558	5,23896	406,32	0,000
Concentración CBD Destilado (%)	4	0,4265	0,4265	0,10663	8,27	0,002
Carga crudo de CBD(Kg)	4	0,0393	0,0393	0,00983	0,76	0,569
Error residual	12	0,1547	0,1547	0,01289		
Total	24	21,5764				

Fuente: Software Minitab (versión 22, Minitab, LLC, State College, PA).

Los factores de control de Temperatura De Destilación (°C) y Concentración CBD Destilado (%) presentaron un valor P (nivel de significancia) menor a 0,05 por lo cual hay asociación estadísticamente significativa con el Tiempo De Destilación (min).

Tabla 11. Respuesta para relaciones de Señal y ruido más pequeño mejor Destilado de CBD

Nivel	Temperatura De Destilación (°C)	Concentración CBD Destilado (%)	Carga crudo de CBD(Kg)
1	-44,60	-45,46	-45,65
2	-45,06	-45,61	-45,69
3	-45,55	-45,63	-45,64
4	-45,77	-45,72	-45,71
5	-47,30	-45,86	-45,60
Delta	2,70	0,39	0,11
Clasificar	1	2	3

Fuente: Software Minitab (versión 22, Minitab, LLC, State College, PA).

Con base a la respuesta para relaciones de señal y ruido, se identificaron los valores de delta, donde el más grande fue 2,70 - Temperatura De Destilación (°C), indicándolo como el factor de control que posee mayor efecto en el Tiempo De Destilación (min).

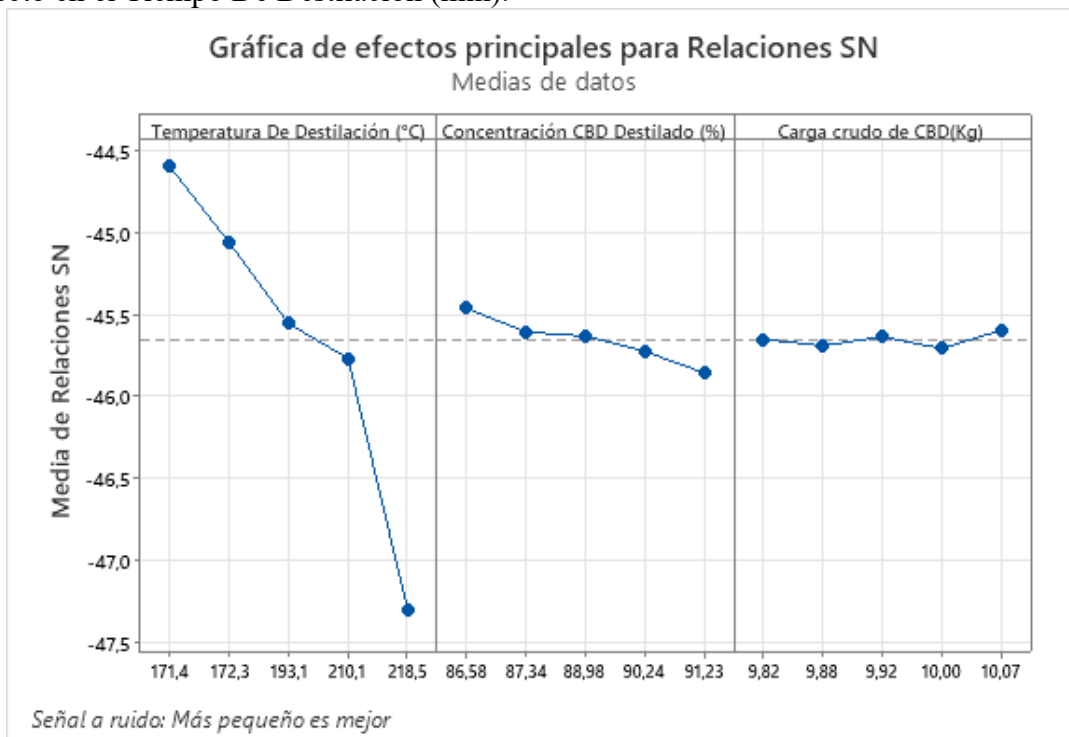


Fig 9. Grafica de efectos principales para relaciones SN con respecto al Tiempo De Destilación (min).

Fuente: Software Minitab (versión 22, Minitab, LLC, State College, PA).

En la Fig 9 se observan los niveles de los factores de control analizados donde aquellos que presentan mayor valor de señal a ruido, proveerá el nivel adecuado, reflejando una menor variabilidad de cada factor de control con el cual disminuirá el Tiempo De Destilación (min).

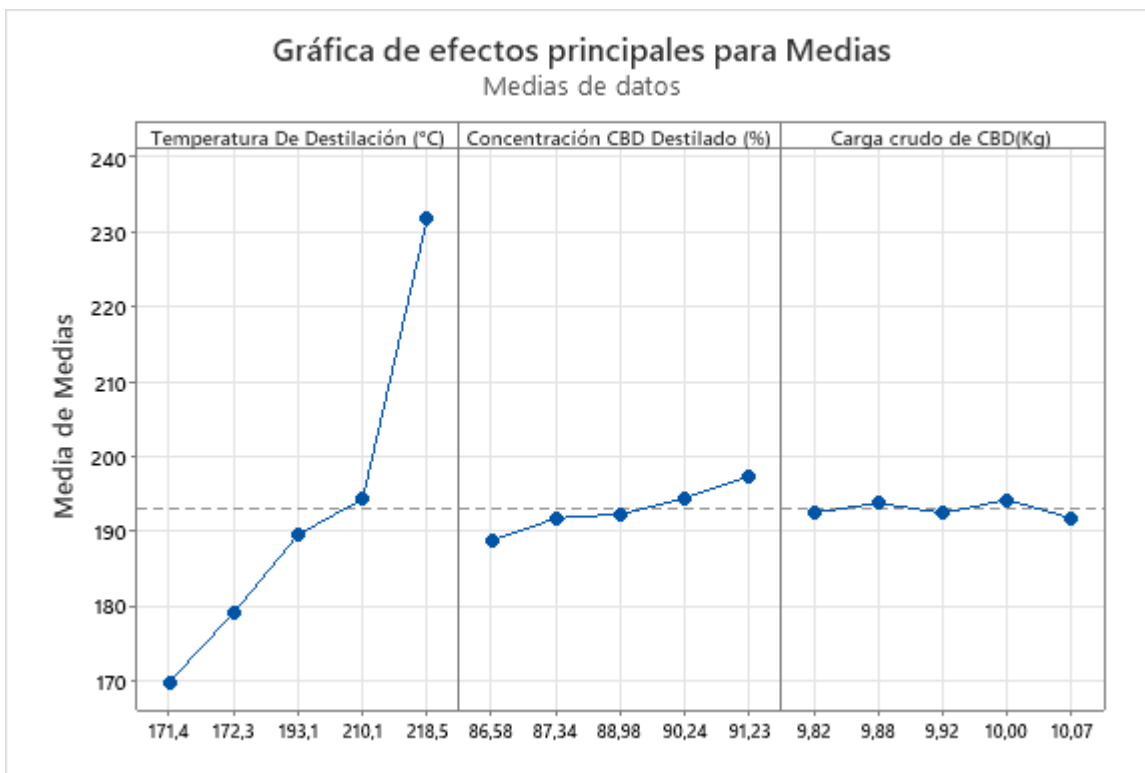


Fig 10. Grafica de efectos principales para medias con respecto al Tiempo De Destilación (min). Fuente: Software Minitab (versión 22, Minitab, LLC, State College, PA).

En la Fig 10 se observa que los niveles óptimos de cada factor de control son los más bajos con respecto al Tiempo De Destilación (min), con base a la utilización de la función de perdida promedio “Mas pequeño es mejor”.

Tabla 12. Predicción de resultados de Taguchi obtención de Destilado de CBD

Configuración De Niveles Óptimos			Predicción	
Temperatura De Destilación (°C)	Concentración CBD Destilado (%)	Carga Crudo de CBD (kg)	Relación S/R	Media
171,4	86,58	10,07	-44,3429	164,469
171,4	90,24	10,07	-44,6061	170,139

Fuente: Software Minitab (versión 22, Minitab, LLC, State College, PA).

En base al análisis estadístico con Taguchi, se identificó los niveles óptimos para reducir el Tiempo De Destilación (min) de obtención de Destilado CBD; A partir de la predicción de resultados que ofrece el software Minitab, se identifican los valores pronosticados de relación (S/R) Y Media; Donde la media es el Tiempo Optimo De Destilación (164,469 min).

En los niveles óptimos se aprecia que la concentración de CBD Destilado es 86,58%, para reducir el Tiempo De Destilación, como condición de control en la etapa de proceso de obtención de destilado, la concentración de CBD debe ser mayor al 90%, por lo cual se selecciona una nueva configuración en el nivel de concentración que cumpla la condición para efecto de la predicción de relación (S/R) Y Media, donde la media adecuada de Tiempo de destilación es (170,139 min).

6.3. REPORTE DE RESULTADOS AISLADO DE CBD

El destilado de CBD obtenido del proceso anterior es llevado a un Reactor químico de vidrio con revestimiento de LAB1ST (100 L), donde fue cargado con aproximadamente 15 Kg de Destilado CBD y mezclado con 15 Kg de pentano (C₅H₁₂) para cada experimento (Ver Anexo D y Anexo G).

Tabla 13. Datos experimentales reportados de obtención de Aislado de CBD

N°	Temperatura Aislamiento (°C)	Concentración de CBD en Aislado GC-FID (%)	Carga Destilado de CBD (kg)	Tiempo de Aislamiento (min)
1	0	99,0278	15,22	376,04
2	-1,6	99,0605	15,40	370,15
3	-1,7	99,0714	15,27	369,99
4	-1,9	99,0761	15,35	367,48
5	-2	99,1128	14,97	364,25
6	-3,1	99,122	14,78	356,97
7	-4,9	99,1239	14,60	354,45
8	-5,3	99,1352	14,66	352,62
9	-6,9	99,1447	14,80	352,18
10	-7,9	99,1695	15,21	351,68
11	-8,4	99,2122	15,49	351,63
12	-9,2	99,2127	14,60	346,94
13	-10,2	99,2258	14,93	338,45
14	-10,4	99,2464	15,18	329,41
15	-13,6	99,2488	14,99	328,94
16	-13,7	99,2602	14,90	317,81
17	-14,1	99,3139	14,70	314,26
18	-14,2	99,3203	15,40	313,87
19	-14,3	99,3759	14,50	303,09
20	-16,3	99,3773	15,11	301,21
21	-16,8	99,4127	15,15	296,41
22	-17,5	99,4375	14,54	294,73
23	-17,9	99,4727	15,27	291,99
24	-18,5	99,4826	14,65	287,11
25	-18,7	99,5012	14,92	287,06
26	-19,3	99,5074	14,74	285,92
27	-19,6	99,5083	15,29	283,5
28	-20,2	99,5137	15,02	281,6
29	-21,5	99,5493	14,89	277,28
30	-21,5	99,5525	15,20	270,57
31	-21,7	99,5536	15,04	268,78
32	-22	99,5589	15,20	268,63
33	-24,5	99,5595	15,40	268,6
34	-25,7	99,5605	14,61	261,83
35	-26,6	99,5612	15,32	261,06
36	-26,9	99,5641	14,81	254,8
37	-27,5	99,5654	15,41	254,19
38	-28,1	99,5689	14,75	253,96
39	-29,2	99,5706	14,81	246,35
40	-30,3	99,5722	14,61	245,03
41	-32,9	99,5866	15,08	239,57
42	-32,9	99,5888	14,59	239,44

43	-32,9	99,5915	15,08	238,89
44	-34	99,5947	15,12	228,14
45	-37,4	99,5961	15,33	223
46	-37,7	99,6016	14,58	217,56
47	-38	99,6027	14,54	213,83
48	-38,6	99,6056	15,47	213,19
49	-39,2	99,6059	15,18	210,73
50	-39,5	99,6109	14,50	210,32

Fuente: Elaboración propia.

Para el análisis estadístico se utilizó el software (MINITAB 22), donde se diseñó un arreglo ortogonal a partir de los datos experimentales de la obtención de Aislado de CBD para el método Taguchi, Se estipuló 1 factor de ruido (Tiempo de Aislamiento (min)) y 3 factores de control (Temperatura de Aislamiento (°C), Concentración de CBD en Aislado GC-FID (%), Carga Destilado de CBD (kg)), con 5 niveles cada uno dando así 25 corridas $L_{25}(5^3)$.

Tabla 14. Factores de control y niveles seleccionados en obtención de Aislado de CBD

Factor	Nombre	Valores de niveles					Niveles
A	Temperatura Aislamiento (°C)	-2	-13,6	-18,7	-26,6	-37,4	5
B	Concentración de CBD en Aislado GC-FID (%)	99,11	99,24	99,50	99,56	99,59	5
C	Carga Destilado de CBD (kg)	14,97	14,99	14,92	15,32	15,33	5

Fuente: Software Minitab (versión 22, Minitab, LLC, State College, PA).

Tabla 15. Resumen del modelo SN Aislado de CBD

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)
0,5414	91,05%	82,11%

Fuente: Software Minitab (versión 22, Minitab, LLC, State College, PA).

El análisis de varianza en el diseño experimental de Taguchi para Aislado de CBD mostro un R-cuadrado alto en relación con la señal a ruido SN. Indicando que la variación en los resultados está fuertemente influenciada por los factores de control que se evaluaron.

Tabla 16. Análisis de Varianza de Relaciones SN Aislado de CBD

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
Temperatura De Aislamiento (°C)	4	30,899	30,899	7,7249	26,35	0,000
Concentración CBD Aislado (%)	4	3,853	3,853	0,9632	3,29	0,049
Carga Aislado de CBD(Kg)	4	1,051	1,051	0,2629	0,90	0,496
Error residual	12	3,517	3,517	0,2931		
Total	24	39,321				

Fuente: Software Minitab (versión 22, Minitab, LLC, State College, PA).

Los factores de control de Temperatura De Aislamiento (°C) y Concentración CBD Aislado (%) presentaron un valor P (nivel de significancia) menor a 0,05 por lo cual hay asociación estadísticamente significativa con el Tiempo De Aislamiento (min).

Tabla 17. Respuesta para relaciones de Señal y ruido más pequeño mejor Aislado de CBD

Nivel	Temperatura De Aislamiento (°C)	Concentración CBD Aislado (%)	Carga Aislado de CBD (Kg)
1	-48,02	-50,30	-49,65
2	-49,37	-50,16	-50,05
3	-49,98	-50,05	-50,02
4	-50,72	-49,48	-49,57
5	-51,20	-49,31	-50,01
Delta	3,18	0,99	0,47
Clasificar	1	2	3

Fuente: Software Minitab (versión 22, Minitab, LLC, State College, PA).

Con base a la respuesta para relaciones de señal y ruido, se identificaron los valores de delta, donde el más grande fue 3,18 - Temperatura De Aislamiento (°C), indicándolo como el factor de control que posee mayor efecto en el Tiempo De Aislamiento (min).



Fig 11. Grafica de efectos principales para relaciones SN con respecto al Tiempo De Aislamiento (min).

Fuente: Software Minitab (versión 22, Minitab, LLC, State College, PA).

En la Fig 11 se observan los niveles de los factores de control analizados donde aquellos que presentan mayor valor de señal a ruido, proveerá el nivel adecuado, reflejando una menor variabilidad de cada factor de control con el cual disminuirá el Tiempo De Aislamiento (min).

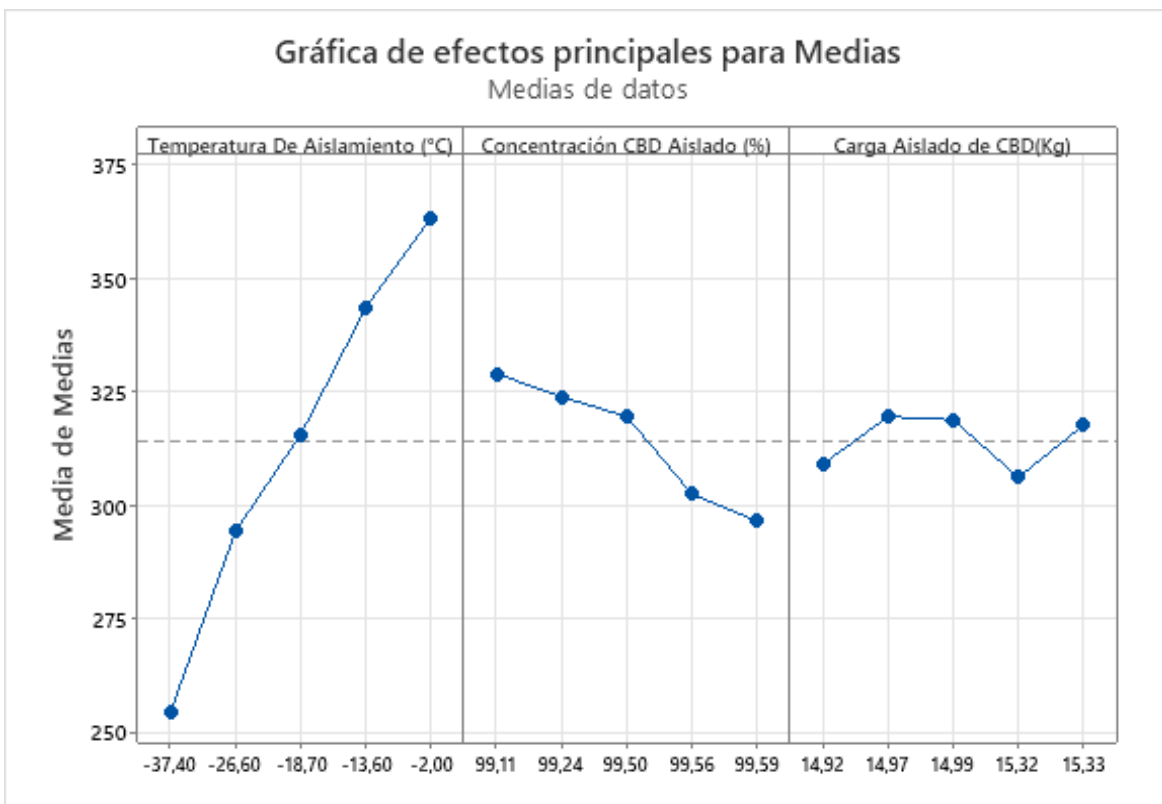


Fig 12. Grafica de efectos principales para medias con respecto al Tiempo De Aislamiento (min).

Fuente: Software Minitab (versión 22, Minitab, LLC, State College, PA).

En la Fig 12 se observa que los niveles óptimos de cada factor de control son los más bajos con respecto al Tiempo De Aislamiento (min), con base a la utilización de la función de perdida promedio “Mas pequeño es mejor”.

Tabla 18. Predicción de resultados de Taguchi obtención de Aislado de CBD

Configuración De Niveles Óptimos			Predicción	
Temperatura De Aislamiento (°C)	Concentración CBD Aislado (%)	Carga Aislado de CBD(kg)	Relación S/R	Media
-37,4	99,59	15,32	-47,1842	228,375

Fuente: Software Minitab (versión 22, Minitab, LLC, State College, PA).

En base al análisis estadístico con Taguchi, se identificó los niveles óptimos para reducir el Tiempo De Aislamiento (min) de obtención de Aislado CBD; A partir de la predicción de resultados que ofrece el software Minitab, se identifican los valores pronosticados de relación (S/R) Y Media; Donde la media es el Tiempo Optimo De Aislamiento (228,375 min).

Proceso	Tiempo procesó (min)	Horas																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Recepción flor seca	60	■													■										
Extracción por solvente centrifugación	65		■													■									
Destilación Crudo - Solvente	118			■	■												■	■							
Descarboxilación	100					■	■												■	■					
Destilación CBD	170							■	■	■											■	■	■		
Aislamiento CBD	228										■	■	■	■										■	■
Tiempo Total	741	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■											
Tiempo Total (h)	13																								

Fig 13. Tiempo de procesos y tiempo total desde recepción de flor seca hasta obtención de Aislado de CBD optimo.

Fuente: Elaboración propia.

Con base a los niveles óptimos de los factores de control para predecir el tiempo de obtención de crudo, destilado y aislado de CBD optimo, se logró reducir el tiempo total de recepción de flor seca hasta obtención de Aislado de CBD en un 31,64%, reduciendo tiempos de proceso de Crudo de CBD en un 40,9%, Destilado de CBD 28,7% y Aislado de CBD 39,1%.

Tabla 19. Comparación de valor de producción por hora y mes Crudo de CBD con el valor de producción por hora Crudo de CBD optimo

Crudo de CBD	
Carga de biomasa (kg)	
30	
Rendimiento de proceso (%)	
13	
Crudo de CBD por carga (kg)	
3,9	
Tiempo de proceso (min)	Tiempo de proceso optimo (min)
311,11	183,85
Tiempo de proceso (h)	Tiempo de proceso optimo (h)
5,18	3,05
Cantidad de Crudo de CBD por hora (kg/h)	Cantidad de Crudo de CBD por hora optimo (kg/h)
0,75	1,27
Valor de venta Crudo de CBD (USD/kg)	
2300	
Valor de producción por hora Crudo de CBD (VPH-USD/h)	Valor de producción por hora Crudo de CBD optimo (VPH-USD/h)
1.725	2.921
Valor de producción por mes Crudo de CBD (VPH-USD/mes)	Valor de producción por mes Crudo de CBD optimo (VPH-USD/mes)
828.000	1.402.080

Fuente: Elaboración propia.

La optimización del tiempo de proceso para la producción de crudo de CBD paso de 5,18 horas a 3,05 horas, donde incrementa la producción de 0,75 kg/h a 1,27 kg/h, lo que aumenta el valor de producción por hora de 1.725 USD a 2.921 USD. Este cambio se traduce en un incremento del valor de producción mensual de 828.000 USD a 1.402.080 USD, representando una mejora del 69,3% y un aumento de ingresos de aproximadamente 574.080 USD por mes.

Tabla 20. Comparación de valor de producción por hora y mes Destilado de CBD con el valor de producción por hora Destilado de CBD optimo

Destilado de CBD	
Carga de crudo (kg)	
10	
Rendimiento de proceso (%)	
60	
Destilado de CBD por carga (kg)	
6	
Tiempo de proceso (min)	Tiempo de proceso optimo (min)
238,66	170,13
Tiempo de proceso (h)	Tiempo de proceso optimo (h)
3,96	2,83
Cantidad de Destilado de CBD por hora (kg/h)	Cantidad de Destilado de CBD por hora optimo (kg/h)
1,51	2,12
Valor de venta Destilado de CBD (USD/kg)	
2700	
Valor de producción por hora Destilado de CBD (VPH-USD/h)	Valor de producción por hora Destilado de CBD optimo (VPH-USD/h)
4.077	5.724
Valor de producción por mes Destilado de CBD (VPH-USD/mes)	Valor de producción por mes Destilado de CBD optimo (VPH-USD/mes)
1.956.960	2.747.520

Fuente: Elaboración propia.

La optimización del tiempo de proceso para la producción de destilado de CBD paso de 3,96 horas a 2,83 horas, donde incrementa la producción de 1,51 kg/h a 2,12 kg/h, lo que aumenta el valor de producción por hora de 4.077 USD a 5.724 USD. Este cambio se traduce en un incremento del valor de producción mensual de 1.956.960 USD a 2.747.520 USD, representando una mejora del 40,4% y un aumento de ingresos de aproximadamente 790.560 USD por mes.

Tabla 21. Comparación de valor de producción por hora y mes Aislado de CBD con el valor de producción por hora Aislado de CBD optimo

Aislado de CBD	
Carga de crudo (kg)	
15	
Rendimiento de proceso (%)	
96	

Aislado de CBD por carga (kg)	
14,5	
Tiempo de proceso (min)	Tiempo de proceso optimo (min)
376,04	228,37
Tiempo de proceso (h)	Tiempo de proceso optimo (h)
6,25	3,8
Cantidad de Aislado de CBD por hora (kg/h)	Cantidad de Aislado de CBD por hora optimo (kg/h)
2,32	3,81
Valor de venta Aislado de CBD (USD/kg)	
3200	
Valor de producción por hora Aislado de CBD (VPH-USD/h)	Valor de producción por hora Aislado de CBD optimo (VPH-USD/h)
7.424	12.192
Valor de producción por mes Aislado de CBD (VPH-USD/mes)	Valor de producción por mes Aislado de CBD optimo (VPH-USD/mes)
3.563.520	5.852.160

Fuente: Elaboración propia.

La optimización del tiempo de proceso para la producción de aislado de CBD paso de 6,25 horas a 3,8 horas, donde incrementa la producción horaria de 2,32 kg/h a 3,81 kg/h, lo que aumenta el valor de producción por hora de 7.424 USD a 12.192 USD. Este cambio se traduce en un incremento del valor de producción mensual de 3.563.520 USD a 5.852.160 USD, representando una mejora del 64,3% y un aumento de ingresos de aproximadamente 2.288.640 USD por mes.

7. CONCLUSIONES

En los tres procesos de obtención de derivados del CBD, se evidencia la influencia significativa de la temperatura como factor de control en el tiempo requerido para cada proceso. Tanto en la extracción de crudo, destilación y aislamiento de CBD, se observa que las temperaturas más bajas conducen a tiempos de proceso más cortos, lo que sugiere una mayor eficiencia en la operación. El resultado resalta la importancia de mantener un control preciso de la temperatura en cada fase del proceso para optimizar la producción y minimizar el tiempo de procesamiento, lo que a su vez puede traducirse en una mejora de la rentabilidad y la calidad del producto final.

la concentración de CBD en el producto final también emerge como un factor crítico de control. Se observa que niveles más altos de concentración de CBD están asociados con tiempos de procesamiento más cortos en la extracción de crudo, destilación y aislamiento de CBD. Sugiriendo que una concentración óptima de CBD en cada etapa del proceso puede acelerar la producción y mejorar la eficiencia global. Mantener una concentración adecuada de CBD puede ser crucial para maximizar la

rentabilidad y la calidad del producto final, lo que resalta la importancia de un monitoreo cuidadoso y una gestión precisa del parámetro en cada proceso de producción.

En los tres procesos de obtención de productos derivados del CBD, la carga de material no demostró una influencia estadísticamente significativa en los tiempos de procesamiento para la obtención de productos derivados del CBD, su consideración sigue siendo crucial para comprender la complejidad y la variabilidad inherente al proceso. Aunque no esté directamente asociada con los tiempos de procesamiento, la carga puede impactar otros aspectos operativos, como la eficiencia general y la capacidad de los equipos en cada etapa, ya sea en la obtención de crudo, destilado o aislado de CBD. Por tanto, aunque no se haya establecido una relación estadística con los tiempos de procesamiento, la vigilancia y el control de este factor es esencial para garantizar la consistencia y calidad en la producción de productos derivados del CBD.

Con base en los resultados obtenidos, se ha logrado una reducción significativa en los tiempos de cada etapa del proceso de producción. El tiempo de extracción de crudo se redujo de 311 minutos a 183 minutos, lo que representa una mejora del 40,9%. Asimismo, el tiempo de destilación disminuyó de 238 minutos a 170 minutos, reflejando una optimización del 28,7%. Por último, el tiempo de aislamiento se redujo de 375 minutos a 228 minutos, demostrando una mejora del 39,1%. En conjunto, estas mejoras permitieron reducir el tiempo total desde la recepción de la flor seca hasta la obtención del aislado de CBD en un 31,6%. Estos resultados indican que el control y ajuste preciso de la temperatura en cada proceso son cruciales para reducir significativamente los tiempos de producción y mejorar la eficiencia global del proceso de obtención de derivados de CBD.

Tabla 22. Comparación de Tiempos de Producción Antes y Después de la Implementación del Método Taguchi en la obtención de crudo, destilado y aislado de CBD

Etapa del proceso	Tiempo inicial (min)	Tiempo final (min)	Reducción (min)	Mejora (%)
Extracción de Crudo	311	183	128	40,9%
Destilación	238	170	68	28,7%
Aislamiento	375	228	147	39,1%
Total	924	581	343	31,6%

Fuente: Elaboración propia.

La optimización del tiempo de proceso en la producción de crudo, destilado y aislado de CBD ha demostrado ser fundamental para mejorar la eficiencia operativa y aumentar significativamente los ingresos. Al optimizar los tiempos en los tres procesos, se logra un incremento de valor de producción mensual global del 58%, lo que se traduce en un ingreso total adicional de aproximadamente 3.653.280 USD por mes. Estas mejoras se consideran en un contexto de producción continua de 24 horas al día, durante 5 días a la semana y 4 semanas al mes. Esto subraya la importancia del mejoramiento continuo en los procesos de producción, ya que no solo aumenta la eficiencia, sino que también genera un impacto económico significativo, impulsando así la rentabilidad y competitividad en el mercado de productos derivados del CBD.

El análisis con el método Taguchi con la función de pérdida y el índice de señal y ruido (S/N), ha sido fundamental para identificar los factores de control más influyentes en cada etapa del proceso de producción de crudo, destilado y aislado de CBD, permitiendo así determinar los niveles óptimos de estos factores. La metodología ha demostrado su eficacia al minimizar el tiempo de proceso mediante ajustes precisos en la temperatura, concentración de CBD y carga de material de proceso en cada etapa. Los hallazgos resaltan la importancia de emplear herramientas estadísticas avanzadas en la optimización de procesos industriales complejos como la producción de derivados de CBD, ofreciendo una guía clara para mejorar la eficiencia global y obtener productos de mayor calidad.

REFERENCIAS

- [1] United Nations Office on Drugs and Crime, *World drug report 2023*. N.Y, EE.UU: U.N., 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.unodc.org/res/WDR-2023/WDR23_ExSum_Spanish.pdf
- [2] Prohibition Partners, “The global cannabis report”, London, England, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://prohibitionpartners.com/reports/the-uk-cannabis-report/>
- [3] A. D. P. Zambrano Muñoz, F. Romero Perdomo, J. Santana Medina, J. C. Ovalle Másmela, y C. P. Uribe Galvis, “Análisis competitivo del cultivo de cannabis spp. y erythroxylum coca en Colombia”, Mosquera, Colombia, 2023. doi: 10.21930/agrosavia.estudiodevigilancia.2023.1.
- [4] J. M. Ramirez, “La industria del cannabis medicinal en Colombia”, Bogotá, Colombia, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.repository.fedesarrollo.org.co/handle/11445/3823>
- [5] H. A. Bustamante Matoma, V. Murillo Ortega, H. A. Bustamante Matoma, y V. Murillo Ortega, “Panorama del cannabis medicinal en el contexto rural integral colombiano”, *Pod.*, n.º 44, pp. 37-52, nov. 2023, doi: 10.31095/PODIUM.2023.44.3.
- [6] L. Calvo, “Extracción supercrítica de cáñamo”, *Rev. Farm. Ind.*, n.º 144, pp. 40-42, feb. 2024, [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/378129784>

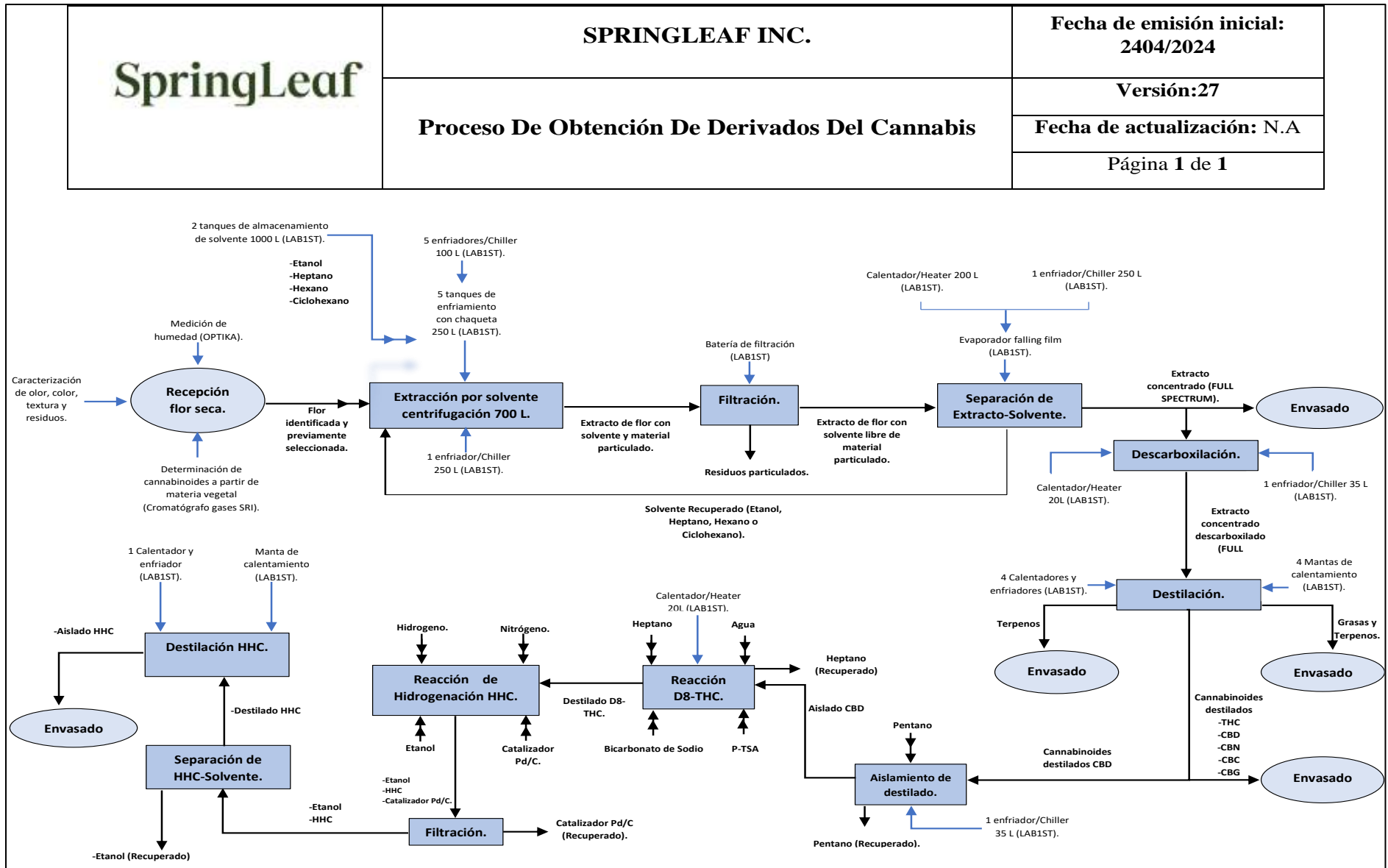
- [7] S. S. Castañeda, “Análisis de la recuperación de terpenos y cannabinoides provenientes del cannabis utilizando destilación de película agitada al vacío”, Tesis de Maestría, Fac. Ing., Depto. Ing. Quím. y Ambiental., U. NAL, Bogotá, Colombia, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/84916>
- [8] S. Genovese, F. Epifano, L. Palumbo, C. Collevicchio, y S. Fiorito, “An easy way for the removal of residual hydrocarbon fractions from crystallized cannabigerol and cannabidiol”, *Food Bioprod. Process.*, vol. 142, pp. 50-58, nov. 2023, doi: 10.1016/j.fbp.2023.09.001.
- [9] Prohibition partners, “The cannabis extraction report”, London, England, nov. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://prohibitionpartners.com/reports/the-cannabis-extraction-report/#:~:text=The%20Extraction%20Report%20takes%20a,current%20state%20of%20the%20market.>
- [10] H. Toloza, O. Y. Buitrago, A. Orjuela, M. A. Santaella, A. M. Hurtado, y D. E. Arturo, “Solvent extraction of Cannabis sativa under cryogenic conditions”, *Sep. Purif. Technol.*, vol. 329, p. 124906, ene. 2024, doi: 10.1016/J.SEPPUR.2023.124906.
- [11] P. W. Addo *et al.*, “Cold Ethanol Extraction of Cannabinoids and Terpenes from Cannabis Using Response Surface Methodology: Optimization and Comparative Study”, *Mol.*, vol. 27, n.º 24, dic. 2022, doi: 10.3390/molecules27248780.
- [12] M. Valizadehderakhshan, A. Shahbazi, M. Kazem-Rostami, M. S. Todd, A. Bhowmik, y L. Wang, “Extraction of cannabinoids from Cannabis sativa L. (hemp)-review”, *Agric.*, vol. 11, n.º 5, p. 348, abr. 2021, doi: 10.3390/agriculture11050384.
- [13] C. N. Pegoraro, D. Nutter, M. Thevenon, y C. L. Ramirez, “Chemical profiles of cannabis sativa medicinal oil using different extraction and concentration methods”, *Nat. Prod. Res.*, vol. 35, n.º 13, pp. 2249-2252, sep. 2021, doi: 10.1080/14786419.2019.1663515.
- [14] M. D. Kostić, N. M. Joković, O. S. Stamenković, K. M. Rajković, P. S. Milić, y V. B. Veljković, “Optimization of hempseed oil extraction by n-hexane”, *Ind. Crops Prod.*, vol. 48, pp. 133-143, jul. 2013, doi: 10.1016/j.indcrop.2013.04.028.
- [15] S. U. K. Reddy Sagili *et al.*, “Optimization of wiped-film short path molecular distillation for recovery of cannabinoids from cannabis oil using response surface methodology”, *Ind. Crops Prod.*, vol. 195, p. 116442, may 2023, doi: 10.1016/J.INDCROP.2023.116442.
- [16] S. Palmieri *et al.*, “Effect of the distillation time on the chemical composition, antioxidant potential and antimicrobial activity of essential oils from different cannabis sativa L. Cultivars”, *Mol.*, vol. 26, n.º 16, p. 4770, ago. 2021, doi: 10.3390/molecules26164770.
- [17] V. D. Zheljaskov y F. Maggi, “Valorization of CBD-hemp through distillation to provide essential oil and improved cannabinoids profile”, *Sci. Rep.*, vol. 11, n.º 1, p. 19890, dic. 2021, doi: 10.1038/s41598-021-99335-4.
- [18] A. Salami *et al.*, “Complementary chemical characterization of distillates obtained from industrial hemp hurds by thermal processing”, *Ind. Crops Prod.*, vol. 155, n.º 112-760, p. 112760, nov. 2020, doi: 10.1016/j.indcrop.2020.112760.

- [19] G. Micalizzi *et al.*, “Development of a novel microwave distillation technique for the isolation of cannabis sativa l. Essential oil and gas chromatography analyses for the comprehensive characterization of terpenes and terpenoids, including their enantio-distribution”, *Mol.*, vol. 26, n.º 6, p. 1588, mar. 2021, doi: 10.3390/molecules26061588.
- [20] S. Genovese, F. Epifano, L. Palumbo, C. Collevicchio, y S. Fiorito, “An easy way for the removal of residual hydrocarbon fractions from crystallized cannabigerol and cannabidiol”, *Food Bioprod. Process.*, vol. 142, pp. 50-58, nov. 2023, doi: 10.1016/j.fbp.2023.09.001.
- [21] “Crystallization of cannabinoids,” por W. Lainer, P. Michael, and W. Winget. (2022, Apr. 14). Patent WO 2022/076956 A1 [Online]. Available: <https://patentimages.storage.googleapis.com/25/72/29/53a54e141c3c64/WO2022076956A1.pdfv>
- [22] “Continuous crystallization of cannabinoids in a stirred-tank reactor,” por C. Adair, B. Geiling. (2021, Jan. 28). Patent WO 2021/012044 A1 [Online]. Available: <https://patentimages.storage.googleapis.com/c8/78/dc/8436bc88b7ae45/WO2021012044A1.pdf>
- [23] M. Toledo, “Crystallization of CBD Steps for Successfully Scaling Up”, Columbus, EEUU, oct. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.mt.com/mx/es/home/library/white-papers/automated-reactors/cbd-crystallization-equipment.html>
- [24] “Cannabidiol isolate production systems and methods,” por A. Ferraro, B. Edwards. (2020, Oct. 28). Patent EP 3815761 A1[Online]. Available: <https://patentimages.storage.googleapis.com/e3/18/fd/79ab9c6bd6b093/EP3815761A1.pdf>
- [25] United Nations Office on Drugs and Crime., *Métodos recomendados para la identificación y el análisis del cannabis y los productos del cannabis : manual para uso de los laboratorios nacionales de estupefacientes*. New York, EEUU, 2010. [En línea]. Disponible en: https://www.unodc.org/documents/scientific/Cannabis_manual-Sp.pdf
- [26] D. A. Gallón Ramírez, “CBD Extraction from Industrial Hemp with using ethanol”, Comunicación personal, Medellín, Colombia, nov., 2021.
- [27] D. A. Gallón Ramirez, “CBD Distillation”, Comunicación personal, Medellín, Colombia, nov., 2021.
- [28] D. A. Gallón Ramírez, “CBD isolation by Crystallization”, Comunicación personal, Medellín, Colombia, nov., 2021.
- [29] BDSA, “Bdsa’s top five predictions for 2024”, BDSA. Accedido: 19 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://bdsa.com/content/bdsa-2024-cannabis-industry-predictions/>
- [30] O. Y. Buitrago, R. Ardila, A. Orjuela, M. A. Santaella, D. E. Arturo, y A. Hurtado, “Affordable method for batch supercritical extraction using solid carbon dioxide–Extraction of cannabis threshing residues”, *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, vol. 198, p. 109721, abr. 2024, doi: 10.1016/j.cep.2024.109721.
- [31] S. Lustenberger, G. Boczkaj, y R. Castro-Muñoz, “Cannabinoids: Challenges, opportunities and current techniques towards its extraction and purification for edibles”, *Food Biosci.*, vol. 49, p. 101835, jun. 2022, doi: 10.1016/j.fbio.2022.101835.

- [32] P. W. Addo *et al.*, “Cold Ethanol Extraction of Cannabinoids and Terpenes from Cannabis Using Response Surface Methodology: Optimization and Comparative Study”, *Mol.*, vol. 27, n.º 24, p. 8780, dic. 2022, doi: 10.3390/molecules27248780.
- [33] G. Spigno y D. M. De Faveri, “Antioxidants from grape stalks and marc: Influence of extraction procedure on yield, purity and antioxidant power of the extracts”, *J. Food Eng.*, vol. 78, n.º 3, pp. 793-801, ene. 2007, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2005.11.020.
- [34] G. Spigno, L. Tramelli, y D. M. De Faveri, “Effects of extraction time, temperature and solvent on concentration and antioxidant activity of grape marc phenolics”, *J. Food Eng.*, vol. 81, n.º 1, pp. 200-208, jul. 2007, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2006.10.021.
- [35] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado, y Pilar. Baptista Lucio, *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill., 2014. [En línea]. Disponible en: https://www.uv.mx/personal/cbustamante/files/2011/06/Metodologia-de-la-Investigaci%C3%83%C2%B3n_Sampieri.pdf
- [36] P. L. González-R, J. M. Framinan, y R. Ruiz Usano, “Optimización de sistemas vesiculares mediante métodos Taguchi”, Leganes, España, sep. 2004. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/255642108>
- [37] P. D. Medina, E. A. Cruz, y J. H. Restrepo, “Aplicación del modelo de experimentación Taguchi en un ingenio azucarero del Valle Del Cauca”, *Sci. Tech.*, pp. 373-341, may 2007, [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/849/84934057.pdf>
- [38] A. B. Hernández, M. De, L. P. Guillon, y L. A. García, “La metodología de Taguchi en el control estadístico de la calidad”, Bahía Blanca, Argentina, may 2015. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/epio/article/view/11986/12697>
- [39] W. Salvatore y R. Guzmán, “Optimización del desempeño funcional de los sacos de polipropileno mediante el diseño experimental de Taguchi.”, Quito, Ecuador, ene. 2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/6887/688773656002.pdf>
- [40] E. Arturo, C. Trejos, P. Daniel Medina Varela, C. Andrés, y S. Diaz, “Una revisión crítica de la razón señal ruido usada por Taguchi”, *Sci. Tech*, n.º 50, abr. 2012, [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/849/84923878009.pdf>

ANEXOS

Anexo A. Diagrama de flujo de procesos de obtención de Derivados del Cannabis



Fuente: Elaboración propia

Anexo B. Datos experimentales obtenidos Crudo de CBD

Datos experimentales obtenidos Crudo CBD.																	
N°	Biomasa (kg)	Solvente Etanol 96% (L)	Temperatura de extracción (°C)	Tiempo de centrifugación (min)	Tiempo de evaporación (min)	Tiempo extracción (min)	Crudo (kg)	Rendimiento (Biomasa-Crudo)	Perfil cannabinoide Crudo (Cromatografía de gases)								
									Masa M (mg)	CBG(%)	CBDV(%)	THCV(%)	CBD(%)	THC(%)	CBC(%)	CBN(%)	T.C (%)
1	30,20	401,4	-0,1	65	246,11	311,11	5,10	16,88%	87,44	0,6010	0,2018	0,1604	42,977	1,6924	0,6635	0,0803	46,3763
2	30,10	400,2	-0,3	65	242,27	307,27	4,98	16,54%	94,31	0,6102	0,2025	0,1619	43,134	1,6975	0,6686	0,0810	46,5560
3	30,90	399,8	-1,4	65	239,45	304,45	5,08	16,43%	88,67	0,6107	0,203	0,1624	43,196	1,7244	0,6719	0,0814	46,6496
4	29,40	401,2	-1,6	65	233,28	298,28	4,80	16,32%	93,92	0,6169	0,2035	0,1630	43,582	1,7368	0,6756	0,0814	47,0596
5	30,20	400,1	-2,1	65	218,93	283,93	4,90	16,21%	86,89	0,6174	0,204	0,1630	43,883	1,7878	0,6887	0,0815	47,4254
6	29,20	399,7	-2,8	65	218,29	283,29	4,71	16,12%	89,12	0,6188	0,2041	0,1633	44,2	1,7900	0,6936	0,0822	47,7522
7	30,30	399,9	-3,3	65	218,05	283,05	4,80	15,84%	92,32	0,6264	0,2046	0,1637	44,409	1,8102	0,6936	0,0828	47,9900
8	29,90	400,8	-3,7	65	215,95	280,95	4,70	15,71%	89,54	0,6293	0,2059	0,1645	44,439	1,8959	0,6992	0,0830	48,1167
9	29,80	399,7	-4,6	65	215,6	280,6	4,57	15,34%	91,63	0,6313	0,2061	0,1647	45,129	1,8981	0,7075	0,0831	48,8197
10	30,20	400,8	-4,9	65	213,64	278,64	4,61	15,28%	85,23	0,6347	0,2063	0,1651	45,569	1,9539	0,7275	0,0838	49,3404
11	30,10	400,1	-5,2	65	210,52	275,52	4,55	15,12%	86,49	0,6431	0,2085	0,1661	46,853	1,9659	0,7362	0,0840	50,6567
12	30,40	399,9	-6,2	65	208,48	273,48	4,55	14,96%	87,32	0,6472	0,2091	0,1669	47,193	1,9914	0,7493	0,0840	51,0413
13	30,20	401,1	-6,6	65	206,5	271,5	4,46	14,78%	90,27	0,6489	0,2097	0,1672	48,017	2,0643	0,7538	0,0853	51,9466
14	29,30	400,2	-7,1	65	204,38	269,38	4,26	14,54%	94,25	0,6505	0,21	0,1674	48,022	2,0996	0,7545	0,0854	51,9889
15	30,60	399,7	-7,9	65	203,56	268,56	4,41	14,42%	85,65	0,6508	0,2112	0,1678	48,562	2,1339	0,7592	0,0858	52,5705
16	31,00	400,8	-8,4	65	194,69	259,69	4,41	14,22%	86,34	0,6529	0,2113	0,1692	48,605	2,1548	0,7685	0,0860	52,6472
17	29,70	399,9	-8,7	65	191,81	256,81	4,18	14,08%	91,78	0,6541	0,2117	0,1692	48,694	2,1689	0,7734	0,0865	52,7574
18	29,80	400,2	-9,6	65	184,77	249,77	4,13	13,87%	89,53	0,6573	0,2142	0,1703	49,727	2,1817	0,7889	0,0866	53,8263
19	29,90	400,1	-10,4	65	181,48	246,48	4,04	13,52%	95,95	0,6626	0,2143	0,1708	51,293	2,2122	0,7924	0,0873	55,4329
20	30,10	400,7	-11,4	65	176,82	241,82	4,05	13,46%	91,87	0,6653	0,2152	0,1714	51,446	2,2190	0,7938	0,0882	55,5987
21	29,70	400,3	-11,8	65	172,21	237,21	3,96	13,34%	95,21	0,6732	0,2168	0,1724	52,661	2,2298	0,8153	0,0887	56,8570
22	29,80	399,3	-12,3	65	168,46	233,46	3,95	13,25%	88,52	0,6831	0,2169	0,1733	52,857	2,2565	0,8197	0,0887	57,0947
23	29,90	401,1	-12,5	65	167,29	232,29	3,93	13,16%	87,34	0,6845	0,2173	0,1752	52,86	2,2766	0,8218	0,0889	57,1238
24	30,40	399,8	-13,2	65	165,41	230,41	3,96	13,02%	95,81	0,6858	0,218	0,1760	53,323	2,2856	0,822	0,0892	57,5992
25	30,10	399,7	-13,6	65	154,18	219,18	3,88	12,88%	94,62	0,6870	0,2206	0,1763	54,675	2,3434	0,8231	0,0894	59,0150
26	30,20	400,8	-14,6	65	146,63	211,63	3,87	12,82%	91,36	0,6883	0,2251	0,1769	54,726	2,3494	0,8274	0,0898	59,0833
27	29,90	400,4	-14,9	65	146,45	211,45	3,82	12,78%	90,41	0,6886	0,2271	0,1771	55,505	2,3517	0,8327	0,0900	59,8725
28	30,00	399,8	-15,7	65	142,89	207,89	3,82	12,73%	91,93	0,6893	0,2273	0,1780	55,54	2,3550	0,8329	0,0915	59,9137
29	30,20	400,1	-16,2	65	139,76	204,76	3,81	12,62%	88,05	0,6925	0,2289	0,1800	56,039	2,3875	0,8377	0,0916	60,4576
30	29,80	399,4	-17,3	65	135,7	200,7	3,75	12,57%	95,24	0,7019	0,2296	0,1801	57,382	2,4085	0,8383	0,0917	61,8316
31	29,70	401,1	-17,8	65	134,16	199,16	3,69	12,44%	85,09	0,7066	0,2301	0,1805	58,177	2,4594	0,8467	0,0918	62,6922
32	30,00	399,8	-19,4	65	132,03	197,03	3,70	12,32%	93,32	0,7071	0,2312	0,1809	58,356	2,4773	0,8488	0,0919	62,8928
33	30,30	401,2	-20,3	65	130,42	195,42	3,71	12,26%	95,87	0,7074	0,2318	0,1817	58,9	2,4875	0,8516	0,0920	63,4516
34	30,20	399,9	-21,3	65	129,92	194,92	3,68	12,18%	95,11	0,7076	0,2338	0,1822	59,526	2,5039	0,8522	0,0922	64,0976
35	29,90	399,9	-21,7	65	129,35	194,35	3,62	12,12%	91,78	0,7120	0,2339	0,1834	60,247	2,5730	0,8654	0,0928	64,9074
36	29,80	399,6	-22,4	65	127,72	192,72	3,59	12,04%	90,67	0,7203	0,2352	0,1836	60,255	2,5751	0,8752	0,0928	64,9371
37	30,80	399,7	-23,4	65	127,51	192,51	3,68	11,94%	94,14	0,7245	0,2352	0,1840	60,266	2,6096	0,8801	0,0930	64,9922
38	29,90	401,1	-24,3	65	127,44	192,44	3,56	11,89%	93,1	0,7252	0,2365	0,1844	60,454	2,6096	0,8809	0,0931	65,1832
39	30,10	399,0	-24,9	65	127,18	192,18	3,54	11,75%	88,53	0,7255	0,2366	0,1844	60,532	2,6097	0,8819	0,0932	65,2631
40	30,30	400,3	-25	65	126,29	191,29	3,55	11,72%	91,64	0,7257	0,2367	0,1845	60,551	2,6099	0,8823	0,0934	65,2837

41	30,20	400,8	-25,5	65	124,59	189,59	3,50	11,59%	92,73	0,7296	0,2368	0,1847	60,564	2,61	0,8859	0,0937	65,3043
42	29,90	401,2	-26,1	65	124,47	189,47	3,37	11,27%	86,82	0,7301	0,237	0,1848	60,576	2,6102	0,8868	0,0939	65,3185
43	29,80	400,0	-26,8	65	124,26	189,26	3,32	11,15%	88,53	0,7311	0,2373	0,1849	60,579	2,6104	0,887	0,0939	65,3240
44	30,20	399,7	-27,4	65	123,44	188,44	3,33	11,03%	90,14	0,7315	0,2374	0,1849	60,709	2,6105	0,8878	0,0944	65,4551
45	29,90	401,2	-28,3	65	121,61	186,61	3,28	10,98%	95,12	0,7316	0,2377	0,1853	60,762	2,611	0,8885	0,0947	65,5112
46	30,10	399,7	-28,7	65	121,28	186,28	3,27	10,87%	90,91	0,7319	0,2383	0,1853	60,788	2,6111	0,8887	0,0948	65,5384
47	29,90	401,8	-29,2	65	120,70	185,7	3,17	10,59%	92,13	0,7342	0,2385	0,1857	60,853	2,6117	0,8891	0,0951	65,6069
48	30,40	401,2	-29,8	65	117,64	182,64	3,18	10,46%	92,82	0,7346	0,2386	0,1859	60,875	2,6123	0,8896	0,0951	65,6307
49	30,30	399,6	-30,1	65	116,90	181,9	3,12	10,31%	85,67	0,7358	0,2387	0,1860	60,888	2,6123	0,8907	0,0951	65,6466
50	29,90	401,0	-30,3	65	116,77	181,77	3,04	10,17%	89,03	0,7362	0,2388	0,1863	61,049	2,6129	0,8931	0,0954	65,8116

Fuente: Elaboración propia

Anexo C. Datos experimentales obtenidos de Destilado de CBD

Datos experimentales obtenidos de Destilado CBD															
N°	Descarboxilado (kg)	Temperatura destilación(°C)	Tiempo de Destilación (min)	Destilado (kg)	Rendimiento (Descarboxilado-Destilado)	Perfil cannabinoide Destilado (Cromatografía de gases)									
						Masa M (mg)	CBG(%)	CBDV(%)	THCV(%)	CBD(%)	THC(%)	CBC(%)	CBN(%)	T.C (%)	
1	10,07	171,4	160,24	6,82	67,73%	55,57	0,1239	0,8484	0,0150	86,582	0,7051	0,1421	0,032	88,4488	
2	9,87	171,7	170,14	6,82	69,10%	65,09	0,1239	0,8658	0,0163	86,605	0,7058	0,1436	0,0326	88,4927	
3	10,11	172	170,23	6,83	67,56%	53,57	0,1273	0,8742	0,0166	86,662	0,7060	0,1456	0,0348	88,5666	
4	9,98	172,1	170,41	6,89	69,04%	52,83	0,1292	0,8806	0,0201	87,318	0,7065	0,1594	0,0393	89,2528	
5	9,92	172,3	170,61	6,92	69,76%	50,76	0,1302	0,8928	0,0216	87,343	0,7319	0,1772	0,0453	89,3418	
6	9,85	176,2	172,73	6,93	70,36%	61,58	0,1317	0,8955	0,0221	87,37	0,7340	0,1788	0,0529	89,3851	
7	10,1	177,2	173,34	6,94	68,71%	55,6	0,1338	0,8998	0,0234	87,488	0,7390	0,1839	0,0584	89,5264	
8	10,05	178,8	174,47	6,95	69,15%	56,93	0,1341	0,9304	0,0242	87,692	0,7448	0,1841	0,0602	89,7697	
9	9,97	180,7	174,52	6,96	69,81%	57,5	0,1399	0,9432	0,0249	88,174	0,7488	0,185	0,0612	90,2769	
10	9,98	181,7	176,6	6,96	69,74%	57,34	0,1442	0,9459	0,0258	88,352	0,7539	0,1898	0,0629	90,4747	
11	9,87	187,5	177,17	6,98	70,72%	64,68	0,1459	0,9467	0,0271	88,544	0,7555	0,1976	0,0715	90,6881	
12	10,05	189,3	177,29	6,99	69,55%	61,03	0,1462	0,9482	0,0274	88,608	0,7566	0,2076	0,0738	90,7681	
13	10,13	190,8	180,04	7,00	69,10%	63,92	0,1464	0,9626	0,0279	88,835	0,7693	0,2109	0,0798	91,0319	
14	10,11	191,3	181,17	7,02	69,44%	56,15	0,1492	0,9674	0,0286	88,903	0,7696	0,2134	0,082	91,1134	
15	9,88	193,1	184,43	7,05	71,36%	63,23	0,1510	0,9737	0,0289	88,988	0,7747	0,2307	0,0838	91,2310	
16	9,93	194,4	188,17	7,06	71,10%	53,03	0,1517	0,9759	0,0331	89,002	0,7897	0,2371	0,085	91,2745	
17	9,89	196,2	188,9	7,07	71,49%	56,74	0,1536	0,9942	0,0333	89,094	0,7919	0,2472	0,086	91,3998	
18	10,07	199,3	189,37	7,08	70,31%	59,96	0,1567	1,0072	0,0349	89,276	0,7962	0,2496	0,0873	91,6075	
19	10	202,6	190,36	7,12	71,20%	65,01	0,1579	1,0361	0,0362	89,282	0,8017	0,252	0,0977	91,6640	
20	10,1	203,5	190,94	7,12	70,50%	58,29	0,1596	1,0720	0,0370	89,392	0,8567	0,2578	0,1053	91,8802	
21	9,97	204,3	192,8	7,19	72,12%	52,39	0,1607	1,0726	0,0388	89,548	0,8628	0,2593	0,1094	92,0519	
22	9,88	204,4	192,83	7,19	72,77%	52,35	0,1690	1,1107	0,0389	89,715	0,8706	0,2725	0,1114	92,2884	
23	10,11	205	193,67	7,20	71,22%	58,3	0,1711	1,1185	0,0395	89,855	0,8951	0,273	0,1153	92,4672	
24	10,09	207,3	193,78	7,20	71,36%	61,34	0,1733	1,1192	0,0421	89,968	0,9075	0,2863	0,1268	92,6236	
25	10	210,1	198,35	7,22	72,20%	63,05	0,1744	1,1223	0,0426	90,25	0,9344	0,2959	0,1317	92,9512	
26	9,97	211,3	198,41	7,30	73,22%	64,97	0,1747	1,1227	0,0428	90,622	0,9351	0,297	0,1339	93,3285	
27	9,95	213,2	198,62	7,31	73,47%	62,72	0,1755	1,124	0,0438	90,633	0,9392	0,2993	0,1352	93,3500	

28	10,01	213,7	199,73	7,31	73,03%	54,93	0,1758	1,1258	0,0439	90,812	0,9465	0,3024	0,1371	93,5433
29	9,98	213,7	199,75	7,32	73,35%	50,91	0,1772	1,1303	0,0447	90,823	0,9553	0,3026	0,1382	93,5716
30	9,89	215,1	202,08	7,33	74,12%	64,13	0,1783	1,132	0,0454	90,856	0,9688	0,3028	0,1399	93,6229
31	9,96	216	203	7,35	73,80%	52,05	0,1793	1,1326	0,0459	91,059	0,9688	0,3091	0,1403	93,8352
32	9,94	216,2	208,47	7,35	73,94%	58,83	0,1803	1,1338	0,046	91,069	0,9691	0,312	0,1425	93,8526
33	10,06	217,5	208,99	7,35	73,06%	54,26	0,1821	1,1352	0,0466	91,131	0,9718	0,3242	0,1492	93,9401
34	10,13	218,1	209,56	7,37	72,75%	63,61	0,1823	1,1365	0,0468	91,219	0,9768	0,3392	0,1507	94,0516
35	9,82	218,5	210,63	7,40	75,36%	63,92	0,1832	1,1403	0,0477	91,232	0,9816	0,3411	0,1509	94,0770
36	10,03	218,8	210,98	7,43	74,08%	61,1	0,1839	1,1409	0,0479	91,299	0,9882	0,3433	0,1556	94,1587
37	10,12	219,8	213,19	7,44	73,52%	56,04	0,1837	1,1400	0,0467	90,95	0,9645	0,3371	0,1533	93,7755
38	10,03	224,8	213,34	7,50	74,78%	53,23	0,1827	1,1389	0,0466	90,811	0,9231	0,3292	0,1511	93,5822
39	10	225,3	215,69	7,53	75,30%	53,7	0,1768	1,1385	0,0455	90,759	0,9222	0,3242	0,1503	93,5162
40	9,87	226,3	216,2	7,56	76,60%	58,22	0,1582	1,1379	0,0453	90,755	0,9174	0,3204	0,1466	93,4809
41	9,99	227,7	217,66	7,56	75,68%	60,47	0,1580	1,1365	0,0452	90,559	0,9154	0,3183	0,1456	93,2775
42	9,87	228,1	219,93	7,58	76,80%	57,8	0,1579	1,1364	0,0445	90,425	0,9089	0,3181	0,1452	93,1356
43	10,01	228,8	225,51	7,60	75,92%	50,99	0,1563	1,1350	0,0429	89,976	0,887	0,3156	0,1447	92,6576
44	10,12	230,2	229,2	7,64	75,49%	57,49	0,1501	1,1338	0,0408	89,413	0,8787	0,3059	0,1446	92,0665
45	9,82	232	229,48	7,66	78,00%	50,8	0,1500	1,1331	0,0406	89,259	0,8762	0,3055	0,1445	91,9088
46	10,15	232,9	230,45	7,66	75,47%	52,5	0,1477	1,1309	0,0399	88,736	0,8676	0,3055	0,1441	91,3713
47	9,87	233,5	233,66	7,72	78,22%	53,46	0,1453	1,1304	0,0396	88,326	0,8647	0,2869	0,1396	90,9321
48	10,13	235,2	234,45	7,73	76,31%	59,57	0,1452	1,1275	0,0394	88,3	0,844	0,2863	0,1389	90,8812
49	10,11	237,7	234,67	7,73	76,46%	51,7	0,1445	1,1272	0,0393	87,9	0,8404	0,285	0,138	90,4739
50	9,97	239,9	238,66	7,74	77,63%	50,49	0,1425	1,1265	0,0387	87,876	0,823	0,285	0,1371	90,4289

Fuente: Elaboración propia

Anexo D. Datos experimentales obtenidos de Aislado de CBD

Datos experimentales obtenidos de Aislado CBD														
N°	Destilado (kg)	Temperatura Aislamiento (°C)	Tiempo de Aislamiento (min)	Aislado (kg)	Rendimiento (Destilado-Aislado)	Perfil cannabinoide Aislado (Cromatografía de gases)								
						Masa M (mg)	CBG(%)	CBDV(%)	THCV(%)	CBD(%)	THC(%)	CBC(%)	CBN(%)	T.C (%)
1	15,22	0	376,04	8,61	56,57%	42,59	0,0066	0,0011	0,0316	99,028	0,0806	0,005	0,0001	99,1528
2	15,40	-1,6	370,15	8,62	55,97%	40,84	0,0066	0,0011	0,0279	99,061	0,081	0,0051	0,0001	99,1823
3	15,27	-1,7	369,99	8,64	56,58%	42,27	0,0067	0,0011	0,0322	99,071	0,083	0,0051	0,0001	99,1996
4	15,35	-1,9	367,48	8,65	56,35%	49,31	0,0067	0,0011	0,0025	99,076	0,0862	0,0052	0,0002	99,1780
5	14,97	-2	364,25	8,88	59,32%	42,15	0,0067	0,0012	0,0308	99,113	0,087	0,0052	0,0002	99,2439
6	14,78	-3,1	356,97	8,92	60,35%	48,44	0,007	0,0012	0,0042	99,122	0,0909	0,0053	0,0002	99,2308
7	14,60	-4,9	354,45	8,98	61,51%	47,73	0,0071	0,0012	0,0189	99,124	0,091	0,0054	0,0002	99,2477
8	14,66	-5,3	352,62	9,01	61,46%	41,46	0,0072	0,0013	0,0142	99,135	0,0917	0,0056	0,0002	99,2554
9	14,80	-6,9	352,18	9,04	61,08%	53,04	0,0073	0,0013	0,017	99,145	0,0933	0,0057	0,0002	99,2695
10	15,21	-7,9	351,68	9,08	59,70%	42,02	0,0073	0,0014	0,0348	99,17	0,0937	0,0057	0,0003	99,3127
11	15,49	-8,4	351,63	9,34	60,30%	44,12	0,0073	0,0014	0,0115	99,212	0,0939	0,0057	0,0003	99,3323
12	14,60	-9,2	346,94	9,35	64,04%	44,61	0,0073	0,0015	0,0285	99,213	0,0952	0,0057	0,0003	99,3512
13	14,93	-10,2	338,45	9,56	64,03%	47,9	0,0074	0,0016	0,0104	99,226	0,096	0,0057	0,0003	99,3472

14	15,18	-10,4	329,41	9,59	63,18%	50,11	0,0075	0,0016	0,0141	99,246	0,0971	0,0058	0,0003	99,3728
15	14,99	-13,6	328,94	9,69	64,64%	42,78	0,0075	0,0017	0,0227	99,249	0,0984	0,0058	0,0003	99,3852
16	14,90	-13,7	317,81	9,8	65,77%	42,12	0,0076	0,0017	0,014	99,26	0,0988	0,0059	0,0003	99,3885
17	14,70	-14,1	314,26	9,81	66,73%	43,26	0,0076	0,0017	0,0238	99,314	0,0996	0,0059	0,0004	99,4529
18	15,40	-14,2	313,87	9,89	64,22%	46,7	0,0076	0,0017	0,0065	99,32	0,1006	0,0062	0,0004	99,4433
19	14,50	-14,3	303,09	10,05	69,31%	46,43	0,0077	0,0018	0,0119	99,376	0,1016	0,0062	0,0004	99,5055
20	15,11	-16,3	301,21	10,08	66,71%	45,07	0,0079	0,0018	0,0232	99,377	0,1024	0,0064	0,0004	99,5194
21	15,15	-16,8	296,41	10,09	66,60%	46,78	0,0079	0,0019	0,0318	99,413	0,1027	0,0065	0,0004	99,5639
22	14,54	-17,5	294,73	10,14	69,74%	46,31	0,0082	0,0019	0,0182	99,438	0,1031	0,0066	0,0004	99,5759
23	15,27	-17,9	291,99	10,14	66,40%	44,39	0,0082	0,0019	0,0087	99,473	0,1048	0,0067	0,0004	99,6034
24	14,65	-18,5	287,11	10,24	69,90%	42,79	0,0084	0,0019	0,0075	99,483	0,1049	0,0067	0,0004	99,6124
25	14,92	-18,7	287,06	10,27	68,83%	42,75	0,0084	0,0019	0,0079	99,501	0,1061	0,0068	0,0005	99,6328
26	14,74	-19,3	285,92	10,27	69,67%	43,14	0,0085	0,0019	0,0166	99,507	0,1066	0,0069	0,0005	99,6484
27	15,29	-19,6	283,5	10,47	68,48%	45,21	0,0086	0,0019	0,0039	99,508	0,1083	0,007	0,0005	99,6385
28	15,02	-20,2	281,6	10,48	69,77%	44,56	0,0086	0,002	0,016	99,514	0,1112	0,007	0,0006	99,6591
29	14,89	-21,5	277,28	10,49	70,45%	41,79	0,0087	0,002	0,0126	99,549	0,1114	0,0071	0,0006	99,6917
30	15,20	-21,5	270,57	10,50	69,08%	45,35	0,0088	0,002	0,0129	99,553	0,1114	0,0071	0,0006	99,6953
31	15,04	-21,7	268,78	10,50	69,81%	49,34	0,0088	0,002	0,0133	99,554	0,1115	0,0072	0,0006	99,6970
32	15,20	-22	268,63	10,50	69,08%	46,41	0,0088	0,0021	0,0134	99,559	0,1115	0,0072	0,0006	99,7025
33	15,40	-24,5	268,6	10,51	68,25%	43,55	0,0088	0,0021	0,0135	99,56	0,1117	0,0072	0,0006	99,7034
34	14,61	-25,7	261,83	10,52	72,01%	46,55	0,0088	0,0021	0,0146	99,561	0,1119	0,0072	0,0006	99,7057
35	15,32	-26,6	261,06	10,52	68,67%	46,18	0,0089	0,0021	0,0148	99,561	0,1119	0,0074	0,0006	99,7069
36	14,81	-26,9	254,8	10,52	71,03%	47,05	0,0089	0,0021	0,015	99,564	0,1119	0,0074	0,0006	99,7100
37	15,41	-27,5	254,19	10,52	68,27%	43,12	0,0089	0,0022	0,0153	99,565	0,1121	0,0075	0,0006	99,7120
38	14,75	-28,1	253,96	10,52	71,32%	47,78	0,0089	0,0022	0,0155	99,569	0,1121	0,0075	0,0006	99,7157
39	14,81	-29,2	246,35	10,53	71,10%	51,29	0,0089	0,0022	0,0167	99,571	0,1123	0,0076	0,0006	99,7189
40	14,61	-30,3	245,03	10,54	72,14%	50,25	0,0089	0,0022	0,0167	99,572	0,1124	0,0076	0,0006	99,7206
41	15,08	-32,9	239,57	10,55	69,96%	51,92	0,0089	0,0022	0,0168	99,587	0,1125	0,0076	0,0006	99,7352
42	14,59	-32,9	239,44	10,56	72,38%	41,19	0,0089	0,0022	0,0169	99,589	0,1125	0,0077	0,0006	99,7376
43	15,08	-32,9	238,89	10,56	70,03%	51,19	0,0089	0,0023	0,0171	99,592	0,1128	0,0077	0,0006	99,7409
44	15,12	-34	228,14	10,57	69,91%	42,5	0,0089	0,0023	0,0171	99,595	0,113	0,0077	0,0006	99,7443
45	15,33	-37,4	223	10,57	68,95%	49,09	0,0089	0,0023	0,0172	99,596	0,113	0,0078	0,0006	99,7459
46	14,58	-37,7	217,56	10,57	72,50%	47,87	0,0089	0,0024	0,0177	99,602	0,1132	0,0078	0,0006	99,7522
47	14,54	-38	213,83	10,58	72,76%	49,42	0,009	0,0024	0,0178	99,603	0,1134	0,0078	0,0006	99,7537
48	15,47	-38,6	213,19	10,60	68,52%	45,92	0,009	0,0024	0,018	99,606	0,1134	0,0078	0,0006	99,7568
49	15,18	-39,2	210,73	10,60	69,83%	47,89	0,009	0,0025	0,018	99,606	0,1134	0,0078	0,0006	99,7572
50	14,50	-39,5	210,32	10,60	73,10%	48,56	0,009	0,0025	0,0183	99,611	0,1135	0,0078	0,0006	99,7626

Fuente: Elaboración propia

Anexo E. Equipos de producción Crudo de CBD

Equipos de producción Crudo de CBD		
Centrifuga LAB1ST (700 L)	Batería de Filtración LAB1ST	Evaporados falling film LAB1ST
		

Fuente: Elaboración propia

Anexo F. Equipo de producción de Destilado de CBD

Equipo de producción Destilación de CBD
Destilador por Arrastre de Vapor Short Path LAB1ST 20 Litros

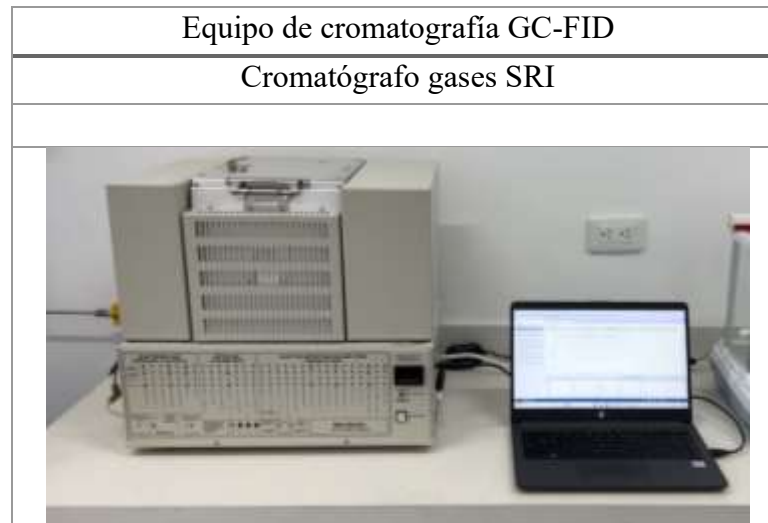

Fuente: Elaboración propia

Anexo G. Equipo de producción de Aislado de CBD



Fuente: Elaboración propia

Anexo H. Equipo de cromatografía GC-FID



Fuente: Elaboración propia