



Trabajo Final
Carrera de Ingeniería Química

**DISEÑO DE UN PROCESO
PARA LA PRODUCCIÓN DE
EXTRACTOS DE CANNABIS
MEDICINAL**

Alumna: Yanina Barrera
Tutor: Dr. Pablo Jeger

2024



Trabajo Final de la carrera de Ingeniería Química presentada a la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán, Argentina, como requisito final para obtener el título de **Ingeniero Químico**.

Trabajo Final evaluado por el tribunal integrado por:

- Dra. María Laura Tereschuk
- Dra. Vanesa Campero
- Dr. Humberto Heluane

y presentado oralmente en el día de la fecha.

San Miguel de Tucumán, 20 de diciembre de 2024

Dra. María Laura
Tereschuk

Dra. Vanesa Campero

Dr. Humberto Heluane



I. Resumen

El presente trabajo aborda el diseño de un proceso para la producción de extractos de cannabis medicinal, consolidando los conocimientos adquiridos durante la carrera de Ingeniería Química.

El trabajo analiza las propiedades químicas de la planta *Cannabis sativa L.* junto con su marco legal en Argentina. Se analiza distintos métodos de extracción existentes, comparando criterios como rendimiento, selectividad, impacto ambiental y viabilidad económica, seleccionando finalmente la extracción con CO₂ supercrítico como la más adecuada para este proyecto.

El proceso diseñado incluye etapas clave: pretratamiento de la materia prima, extracción y purificación del producto final. Como base de cálculo de producción, se realiza una estimación de la demanda local en Tucumán y se selecciona un equipo de extracción que satisface la demanda estimada. A partir de esto, se realizan los balances de materia y selección de los equipos para cada etapa.

El análisis económico incluye el cálculo de costos operativos e inversión, así como la evaluación del Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) para determinar la factibilidad del proyecto.

Los resultados obtenidos validan la implementación del proceso, asegurando productos de calidad farmacéutica y cumpliendo con normativas vigentes. Este diseño contribuye al desarrollo de una industria sostenible y regulada para la producción de derivados de cannabis medicinal en Argentina.



ÍNDICE GENERAL:

Tabla de contenido

I.	RESUMEN.....	1
II.	INTRODUCCIÓN.....	7
III.	OBJETIVOS.....	8
1.	MARCO TEÓRICO	9
1.1.	BIOLOGÍA DE LA PLANTA	9
1.2.	ANATOMÍA DE LA PLANTA.....	10
1.3.	COMPOSICIÓN QUÍMICA	11
1.4.	APLICACIONES DEL CANNABIS	14
1.5.	USO MEDICINAL DEL CANNABIS	14
1.6.	CONTEXTO LEGAL	15
1.7.	CADENA DE VALOR DEL CANNABIS PARA USO MEDICINAL	17
1.7.1.	Producción de semillas.....	18
1.7.2.	Cultivo, Cosecha y poscosecha	19
1.7.3.	Proceso de extracción.....	20
2.	MÉTODOS DE EXTRACCIÓN.....	22
2.1.	PRINCIPIOS DEL MÉTODO DE EXTRACCIÓN	22
2.2.	TIPOS DE MÉTODOS DE EXTRACCIÓN	23
2.3.	EXTRACCIÓN CON ETANOL	23
2.4.	EXTRACCIÓN CON SOLVENTE ASISTIDA POR ULTRASONIDOS.....	25
2.5.	EXTRACCIÓN CON FLUIDOS SUPERCRÍTICOS.....	27
2.6.	RESUMEN COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS DE EXTRACCIÓN	30
2.7.	SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE PROCESO	30
2.8.	CRITERIOS Y ESPECIFICACIONES DE DISEÑO.....	31
2.9.	SELECCIÓN DEL MÉTODO DE EXTRACCIÓN	32
3.	DISEÑO DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN	34
3.1.	ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA POTENCIAL DE ACEITE DE CANNABIS.....	34
3.2.	COMPARACIÓN ENTRE EQUIPOS DE EXTRACCIÓN.....	35
3.3.	MATERIA PRIMA	38
3.4.	ETAPAS DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN CON CO ₂ SUPERCRÍTICO.....	38
3.5.	ETAPA 1: PRETRATAMIENTO.....	39
3.5.1.	Recepción y control.....	39
3.5.2.	Molienda.....	40
3.5.3.	Descarboxilación	43
3.5.4.	Balance de masa total de la etapa de pretratamiento	46
3.6.	ETAPA 2: EXTRACCIÓN CON CO ₂ SUPERCRÍTICO.....	48
3.7.	ETAPA 3: PURIFICACIÓN DEL ACEITE.....	52
3.7.1.	Winterización y recuperación de solvente.....	52
3.8.	RESUMEN DEL BALANCE DE MATERIA.....	57
3.9.	FLOW-SHEET DEL PROCESO GLOBAL	58



3.10. DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS.....	60
3.10.1. ETAPA 1: PRETRATAMIENTO	60
3.10.2. ETAPA 2: EXTRACCIÓN.....	61
3.10.3. ETAPA 3: PURIFICACIÓN	61
4. ANÁLISIS ECONÓMICO	63
4.1. ANÁLISIS DE COSTOS	63
4.1.1. Inversión inicial.....	63
4.1.2. Costos operativos	65
4.2. ANÁLISIS DE INGRESOS.....	67
4.3. EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	69
5. CONCLUSIONES.....	72
IV. BIBLIOGRAFÍA.....	74
V. ANEXO 1: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE EQUIPOS	77



Lista de Figuras:

<i>Figura 1: Subespecies de la planta Cannabis sativa L.</i>	9
<i>Figura 2: Anatomía de la planta</i>	10
<i>Figura 3: Contenido porcentual de cannabinoides en diferentes partes de la planta.</i>	11
<i>Figura 4: Estructura química de los cannabinoides más relevantes. (Villaverde, 2019) .</i>	12
<i>Figura 5: Estructura molecular del THC y del CBD. (Legends recovery center, s.f.)</i>	12
<i>Figura 6: Aplicaciones de las diferentes partes de la planta de Cannabis sativa L. (López, 2021).</i>	14
<i>Figura 7: Países donde el cannabis es legal para uso recreativo y/o medicinal en 2024. (Statista, s.f.)</i>	16
<i>Figura 8: Diagrama de flujo de la cadena productiva de cannabis para uso medicinal ..</i>	17
<i>Figura 9: Transferencia de materia desde la estructura vegetal hacia el solvente. (Marilena Radoiu, 2020)</i>	22
<i>Figura 10: Equipo comercial para la extracción con etanol (separations, s.f.)</i>	24
<i>Figura 11: Esquema de un equipo de extracción asistida por ultrasonidos (SCIENTZ, s.f.)</i>	26
<i>Figura 12: Diagrama de fases. Fluido supercrítico (Páez, 2016)</i>	27
<i>Figura 13: Diagrama PT de fases en cada etapa de la extracción con CO₂SC.</i>	29
<i>Figura 14: Esquema del proceso de extracción y especificaciones de diseño. (Elaboración propia)</i>	31
<i>Figura 15: Potenciales usuarios de cannabis medicinal en Argentina.</i>	34
<i>Figura 16: Diagrama de bloques de las etapas de producción de aceite de cannabis.</i>	38
<i>Figura 17: Diagrama de bloques de la etapa de pretratamiento.</i>	39
<i>Figura 18: Diagrama de flujo de la etapa de molienda.</i>	41
<i>Figura 19: Molino de cuchillas Pulverisette 19 para procesamiento de cannabis. (Lab, s.f.)</i>	41
<i>Figura 20: Imagen del cannabis al finalizar el procesamiento por molino de cuchillas. (Lab, s.f.)</i>	42
<i>Figura 21: Porcentaje de cannabis recuperado según tamaño de partícula. (Simon, 2024)</i>	42
<i>Figura 22: Reacción de descarboxilación al aplicar calor en moléculas THCA y CBDA. (Moreno, 2020).</i>	43
<i>Figura 23: Gráfica de concentración vs tiempo descarboxilación de CBD. (Mei, 2016).</i>	44
<i>Figura 24: Diagrama de flujo de la etapa de descarboxilación.</i>	45
<i>Figura 25: Horno de vacío Vacutherm (Thermo Fisher, s.f.)</i>	45
<i>Figura 26: Diagrama de flujo de la etapa de extracción con CO₂ supercrítico.</i>	48
<i>Figura 27: Solubilidad molar CBD en función de P y T en condiciones supercríticas. (Perrotin, 2011)</i>	49
<i>Figura 28: Imagen del extractor por fluido supercrítico “The Bambino”.</i>	50
<i>Figura 29: Diagrama de flujos de la etapa de purificación.</i>	52
<i>Figura 30: Equipo ApolloXStill de winterización de Socal Biomed (biomed, s.f.).</i>	53
<i>Figura 31: Evaporador rotatorio de recuperación de solvente. (Steinberg-systems, s.f.)</i>	54



Figura 32: Diagrama de flujo de entradas y salidas del proceso global de extracción.... 58



Lista de Tablas:

<i>Tabla 1: Variedades de cannabis con potencial para fines medicinales. (Feruggio).....</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 2: Ventajas y desventajas de la extracción con etanol.</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 3: Ventajas y desventajas de la extracción asistida por ultrasonido.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 4: Polaridad de los compuestos principales de la extracción con CO₂SC</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 5: Ventajas y desventajas de la extracción con fluido supercrítico.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 6: Resumen comparativo entre los tres métodos de extracción analizados.</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 7: Comparativa de los métodos de extracción según criterios de diseño.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 8: Comparativa de parámetros entre equipos de Apeks Supercritical (Anexo 1). ..</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 9: Composición másica de materia prima inicial, variedad “Charlotte’s Angel”. (Ramírez, 2022).....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 10: Compuestos solubles en CO₂ de la variedad “Charlotte’s Angel”.</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 11: Balance de masa de las corrientes principales en la etapa de pretratamiento. 47</i>	
<i>Tabla 12: Variación de solubilidad molar del CBD al modificar presión y temperatura. (Perrotin, 2011)</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 13: Rendimientos de extracción según materia prima.</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 14: Resumen de balance de materia en cada etapa del proceso de extracción. (Elaboración propia).....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 15: Equipos seleccionados para el proceso y sus capacidades.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 16: Equipos utilizados en el diseño del proceso, con su precio y referencia.</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 17: Costos de materia prima e insumos necesarios para la extracción.</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 18: Estimación de costos del personal necesario para el proyecto.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 19: Valores de la evaluación de la viabilidad económica del proyecto.</i>	<i>71</i>



II. Introducción

La industria del cannabis está experimentando un crecimiento acelerado a nivel global. Actualmente, más de 50 países han avanzado en algún tipo de marco legal para el uso de industrial y/o medicinal del cannabis (Conicet, s.f.).

La creciente demanda social de una regulación del uso del cannabis con fines medicinales se ve sustentada principalmente por los avances científicos que respaldan la utilidad terapéutica de extractos de esta planta para el tratamiento paliativo de un número cada vez mayor de enfermedades y dolencias.

El mercado global de cannabis legal alcanzó los 26,5 mil millones de dólares en 2023. De cara al futuro, se espera que el mercado alcance los 144,3 mil millones de dólares para 2032, resultando una tasa de crecimiento anual compuesto del 20,3% durante el período 2024-2032. (imarcgroup, 2024).

En Argentina, las leyes 27.350 y 27.699, así como normativas de ANMAT, han establecido un marco legal para el uso medicinal de la planta de cannabis y el desarrollo de su industria. Este panorama ha llevado al reconocimiento de la importancia de diseñar procesos para la producción de extractos de cannabis medicinal, reduciendo riesgos asociados con productos no regulados y promoviendo estándares de calidad.

Bajo este contexto, este trabajo busca contribuir al desarrollo de procesos eficientes y sostenibles para la producción de extractos de cannabis medicinal de alta calidad.



III. Objetivos

El objetivo fundamental de este proyecto es diseñar un proceso para la producción de extractos de cannabis medicinal de alta calidad.

Objetivos específicos:

1. Analizar las propiedades de la planta de *Cannabis sativa L.*, contexto legal, aplicaciones medicinales y cadena de valor.
2. Comparar diferentes métodos de extracción utilizados en la industria del cannabis con fines medicinales y seleccionar el más adecuado según los criterios y especificaciones de diseño; alta calidad, bajo impacto ambiental y mejor rentabilidad.
3. Diseñar el proceso de extracción del cannabis.
4. Analizar la viabilidad económica del proyecto.

Durante el desarrollo del documento, se busca primero dar a conocer las propiedades de la planta de cannabis (Materia prima) y su composición química. Luego se realiza un análisis y una comparación de los diferentes métodos que son utilizados para la extracción de los compuestos químicos más valiosos. Todo esto se realiza con el fin de tener una perspectiva acerca de cuál método resulta más conveniente para la extracción de compuestos valiosos para uso medicinal, para finalmente realizar un diseño de un proceso eficiente y sostenible y analizar su viabilidad técnica y económica.

1. Marco teórico

La planta de cannabis, conocida científicamente como *Cannabis sativa* L. ha tejido su historia junto con la de las culturas humanas, desde las prácticas religiosas en las primeras civilizaciones mesopotámicas hasta sus diversas aplicaciones en la actualidad (Laura J. Rovetto, 2017).

En este capítulo se analizará la biología y composición química de la planta, destacando sus compuestos más interesantes para su investigación y aplicación en la medicina. Finalmente analizaremos el contexto legal y el marco regulatorio actual en Argentina y en el mundo.

1.1. Biología de la planta

La especie *Cannabis sativa* L. es una planta herbácea anual, perteneciente a la familia Cannabaceae. Es una especie dioica, lo que significa que cuenta con individuos machos y hembras, diferenciados principalmente por sus órganos reproductores. Las plantas machos producen polen, mientras que las hembras producen flores.

La planta de *Cannabis sativa* L. puede clasificarse en tres subespecies:

- Subespecie *sativa*
- Subespecie *indica*
- Subespecie *ruderalis*

Cada subespecie posee características morfológicas, químicas y genéticas distintivas que impactan su fenotipo y aplicaciones.

La *Figura 1* proporciona una visualización de las diferencias morfológicas claves entre estas subespecies.

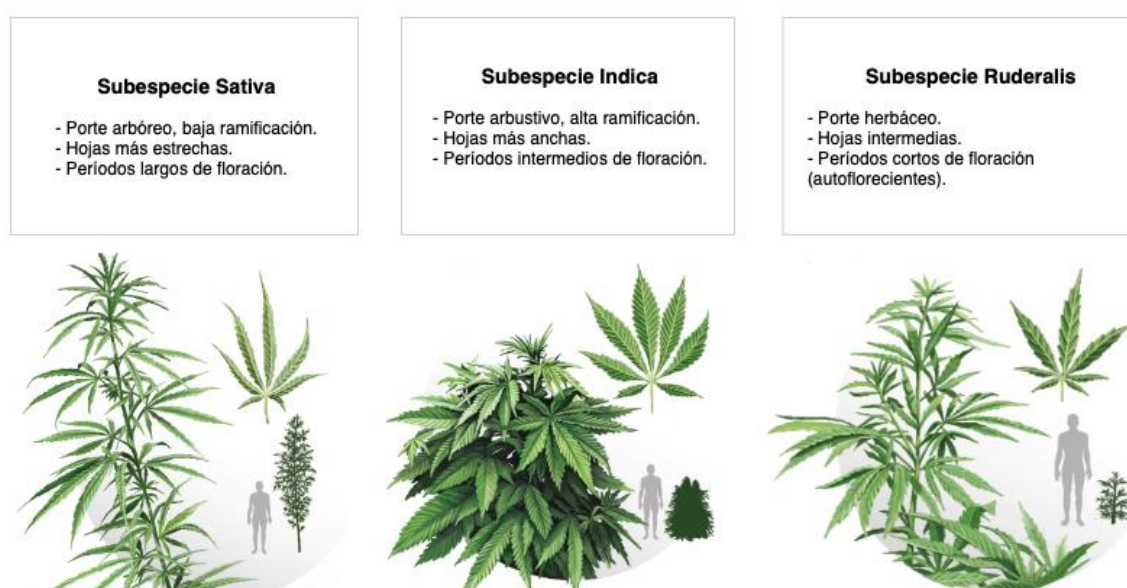


Figura 1: Subespecies de la planta *Cannabis sativa* L.

1.2. Anatomía de la planta

El análisis de la anatomía de la planta de cannabis es fundamental para comprender su fisiología y aplicaciones. En la *Figura 2* se identifican de manera gráfica las diferentes partes de la planta.

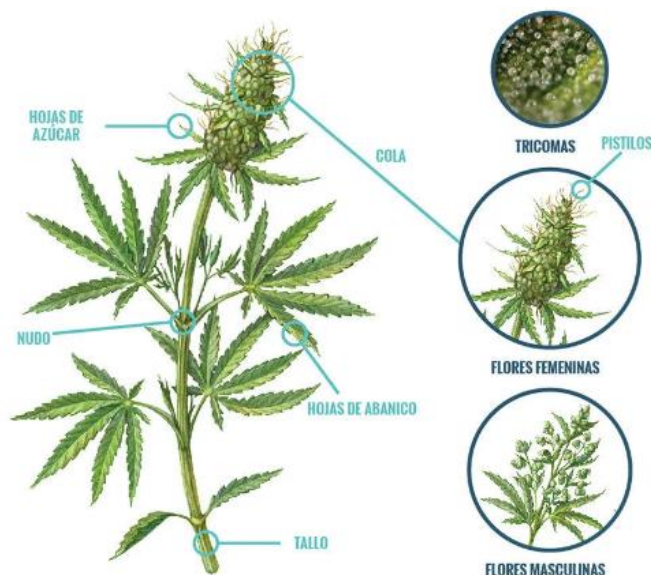


Figura 2: Anatomía de la planta

- **Raíces:** La planta de cannabis posee un sistema radicular robusto que se extiende en el suelo para absorber nutrientes y agua
- **Tallo:** El tallo de la planta de cannabis es la estructura principal que sostiene las hojas, flores y brotes. Es responsable de transportar agua, nutrientes y carbohidratos desde las raíces hasta otras partes de la planta.
- **Nodos:** Los nodos son las articulaciones en el tallo donde las hojas se conectan. En estos nodos, pueden desarrollarse ramas laterales, flores o brotes.
- **Hojas:** Las hojas de la planta de cannabis son palmadas y están compuestas por folíolos dentados. Son el principal sitio de fotosíntesis, donde la planta convierte la luz solar en energía química.
- **Flores:** Las flores son las estructuras reproductivas de la planta de cannabis. Contienen tricomas, glándulas productoras de cannabinoides y terpenos, que son responsables de los efectos psicoactivos y terapéuticos de la planta.
- **Estigmas y pistilos:** Los estigmas y pistilos son las estructuras femeninas de la flor que capturan el polen durante la polinización.
- **Tricomas:** Los tricomas son glándulas microscópicas en la superficie de la planta que producen los compuestos químicos responsables de los efectos medicinales y psicoactivos del cannabis.

- **Cogollos:** Los cogollos son las estructuras densas y resinosas que se forman alrededor de los sitios de polinización en las flores hembra. Contienen altas concentraciones de cannabinoides y terpenos.

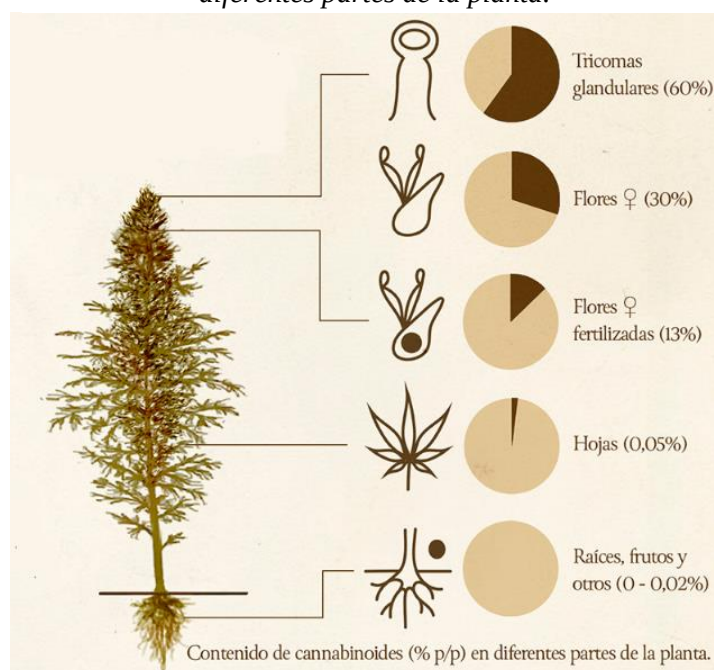
1.3. Composición química

La planta de *Cannabis sativa L* está compuesta por cientos de compuestos químicos, los cuales le confieren valiosas propiedades terapéuticas. Se han identificado aproximadamente 500 compuestos químicos, distribuidos en las distintas partes de la planta, entre los que se destacan los cannabinoides (se conocen alrededor de 140), terpenos (se conocen 200), flavonoides y alcaloides. (Soria, 2017)

Por lo general cuando se habla de cannabinoides se hace referencia a los fitocannabinoides. Los fitocannabinoides encontrados en las plantas se almacenan principalmente en pequeñas estructuras denominadas **tricomas glandulares**, como puede observarse en la *Figura 3*.

En estas estructuras, se encuentran también la mayoría de los **terpenos** (monoterpenos y sesquiterpenos), los que confieren aromas y efectos particulares, en función de su combinación y contenido relativo. (Soria, 2017)

Figura 3: Contenido porcentual de cannabinoides en diferentes partes de la planta.



Los fitocannabinoides se caracterizan por presentar 21 átomos de carbono. Los principales fitocannabinoides presentes en el material vegetal fresco son de tipo ácido, como el ácido tetrahidrocannabinol (Δ^9 -THCA), el ácido cannabidiólico (CBDA), el ácido cannabigerólico (CBGA) y el ácido cannabicromeno (CBCA). Sin embargo, el grupo carboxilo presente en estas

moléculas no es muy estable y se pierde fácilmente en forma de CO_2 bajo la influencia del calor o de la luz, lo que provoca la transformación en las formas neutras activas (Δ^9 -THC, CBD, CBG y CBC). La *Figura 4* presenta la estructura química de los cannabinoides más relevantes.

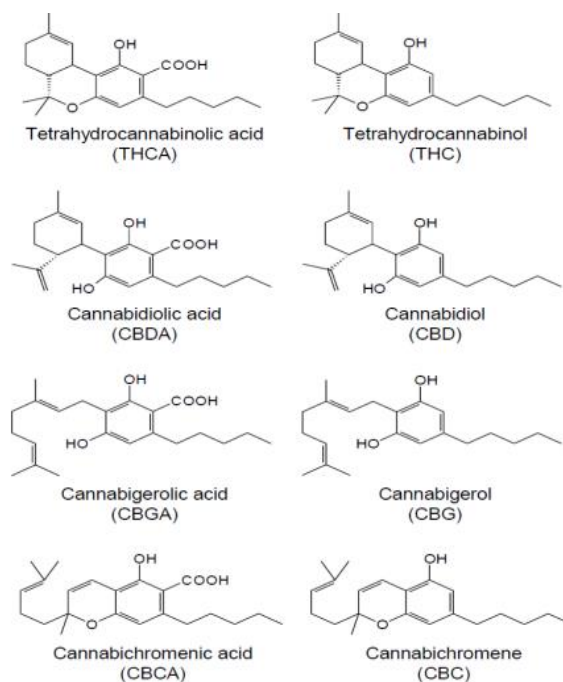


Figura 4: Estructura química de los cannabinoides más relevantes. (Villaverde, 2019)

De todos estos compuestos, los más interesantes por su potencial uso en aplicaciones medicinales, son los cannabinoides, y entre ellos, el delta-9-tetrahydrocannabinol (THC) y cannabidiol (CBD). En la *Figura 5* se presentan sus estructuras químicas, y se puede observar la similitud entre las estructuras de estos dos compuestos.



Figura 5: Estructura molecular del THC y del CBD. (Legends recovery center, s.f.)

El THC y el CBD han sido ampliamente estudiados y analizados debido a los efectos que generan sobre el sistema endocannabinoide del cuerpo humano, el cual es un sistema bioquímico que influye sobre diferentes funciones vitales de nuestro organismo tales como el sistema endocrino, nervioso e inmunológico. Este sistema está compuesto de dos receptores de cannabinoides; CB1 y CB2, los cuales interactúan con dichos cannabinoides.



El THC es conocido por su capacidad para inducir efectos psicoactivos, siendo responsable de las sensaciones eufóricas y la alteración de la percepción asociadas comúnmente con el consumo de cannabis. Este compuesto se une principalmente a los receptores CB1 en el sistema nervioso central, desencadenando respuestas que afectan el estado de ánimo, la cognición y la percepción del dolor. A pesar de sus efectos psicoactivos, el THC también ha demostrado tener grandes propiedades analgésicas y antiinflamatorias.

Por otro lado, el CBD no tiene los efectos psicotrópicos del THC y se le reconocen más efectos beneficiosos para el tratamiento de algunos síntomas y enfermedades, lo cual lo hace foco de investigación clave para su aplicación medicinal. (Atance, 2017)

1.4. Aplicaciones del cannabis

La diversidad de aplicaciones que tiene el cannabis no se limita solo al mercado medicinal y recreacional, también es utilizado con fines industriales y en horticultura, donde se hace uso de las distintas partes de la planta. *Cannabis sativa L.* es una especie vegetal que se puede aprovechar casi en su totalidad, pues puede proporcionar fibras textiles, combustible, alimento y medicamentos. Por ejemplo, las semillas (con nula o indetectable presencia de CBD y THC) se pueden transformar en aceites para aplicaciones en la industria de alimentos y productos de belleza. El tallo se puede utilizar como fibras para la industria textil y de papel, materiales para la construcción, etc.

A partir de (López, 2021) y como se muestra en la *Figura 6*, las partes de la planta de cannabis tiene una gran versatilidad en su utilización para múltiples aplicaciones.

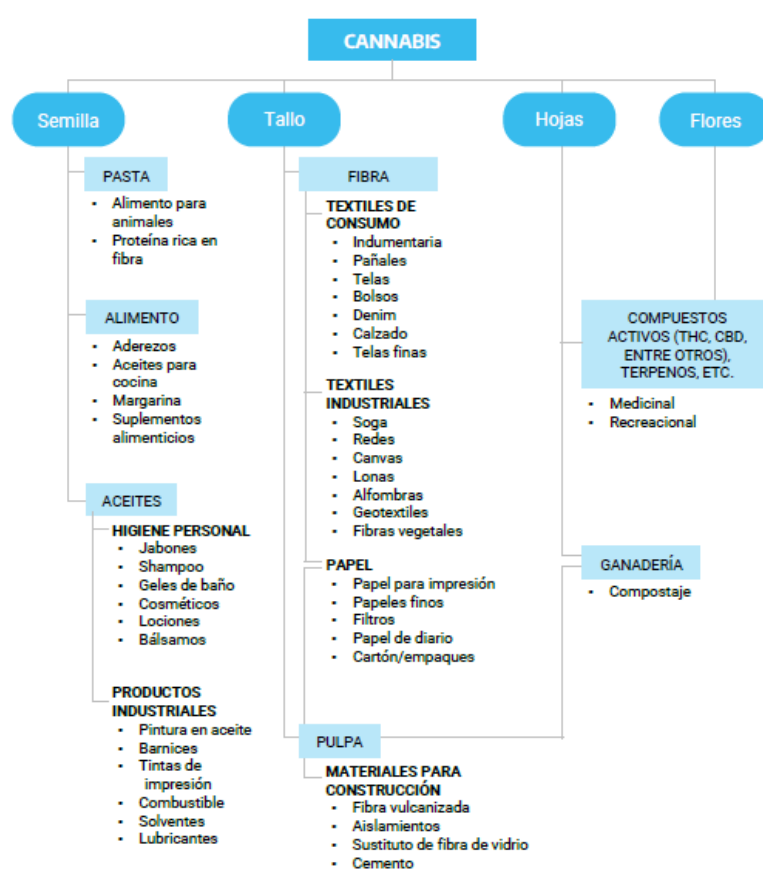


Figura 6: Aplicaciones de las diferentes partes de la planta de *Cannabis sativa L.* (López, 2021).

1.5. Uso medicinal del cannabis

Entre las diversas aplicaciones del cannabis, la de mayor relevancia en el mundo actual es su uso en la medicina; la aplicación terapéutica de productos, preparados o principios activos derivados de la planta de cannabis, específicamente de los cannabinoides.



El cannabis ha demostrado su eficacia en el tratamiento de diversas condiciones médicas (Vincenzo Di Marzo 1). Algunas de las aplicaciones más destacadas incluyen:

- **Alivio del dolor:** Efectivo en el tratamiento de dolores crónicos y neuropáticos.
- **Control de náuseas y vómitos:** Principalmente utilizado en pacientes que experimentan náuseas y vómitos debido a tratamientos como la quimioterapia.
- **Estimulación del apetito:** Ayuda a personas con pérdida de apetito debido a condiciones como el cáncer o el VIH/SIDA.
- **Tratamiento de epilepsia:** Se ha demostrado que reduce las convulsiones en ciertos tipos de epilepsia.
- **Reducción de la presión ocular:** Beneficioso para pacientes con glaucoma.
- **Alivio de espasmos musculares:** Puede actuar como un relajante muscular eficaz.
- **Mejora de la espasticidad en esclerosis múltiple:** Ayuda a controlar los síntomas de la espasticidad.
- **Reducción de la ansiedad:** Algunos estudios sugieren que el cannabidiol puede aliviar la ansiedad.

1.6. Contexto Legal

Durante los últimos años, el cannabis y sus productos derivados están siendo testigos de una creciente regulación y despenalización en numerosas naciones del mundo. Muchos países permiten ahora el uso médico del cannabis para tratar distintas afecciones, como el dolor crónico, el cáncer, la esclerosis múltiple y otras. Además, cada vez más gobiernos están flexibilizando sus leyes respecto al uso recreativo del cannabis.

Aunque existen tratados internacionales, la producción, distribución y consumo de sustancias (incluido el cannabis) siguen estando tradicionalmente regulados por cada país de forma individual. Algunos países siguen considerando el cannabis como una sustancia ilícita peligrosa. Por lo tanto, el panorama legal del cannabis y sus productos derivados resulta muy fragmentado y complicado, lo que dificulta la expansión internacional de la industria cannábica.

En la *Figura 7* puede observarse el estado de la regulación de la utilización de cannabis para uso medicinal y/o recreacional en diferentes partes del mundo.



Figura 7: Países donde el cannabis es legal para uso recreativo y/o medicinal en 2024. (Statista, s.f.)

Contexto Legal en Argentina

En Argentina, el marco legal del cannabis ha evolucionado para permitir su uso medicinal y científico, aunque aún existen limitaciones en torno a su cultivo, producción y venta. Se presentan dos leyes fundamentales en este entorno en evolución:

- La **Ley 27.350** regula la investigación médica y científica del uso medicinal de la planta cannabis y sus derivados. Algunos de sus objetivos son:
 - A. Desarrollar alternativas terapéuticas a problemas de salud que no son abordados en su totalidad por los tratamientos médicos convencionales.
 - B. Investigar los fines terapéuticos y científicos de la planta de cannabis y sus derivados.
 - C. Conocer los efectos secundarios del uso medicinal de la planta de cannabis y sus derivados y establecer limitaciones para su uso.
- La **Ley 27.669**, promueve el desarrollo nacional del sector, regula la cadena de producción, comercialización y exportación de la planta de cannabis, sus semillas y sus productos derivados para uso medicinal. También regula la investigación científica y el uso industrial. Bajo esta ley, se distinguen dos definiciones importantes que se tendrán en cuenta en el desarrollo de este documento:
 - A. “Cannabis psicoactivo”: el cannabis que tiene más de 1% de contenido de tetrahidrocannabinol (THC) en peso seco.



- B. “Cáñamo” o “Cáñamo industrial y/u hortícola”: es la planta de cannabis, sus partes, sus semillas y sus derivados, que tengan hasta un 1 % de concentración del componente químico tetrahidrocannabinol (THC) y tengan como destino los fines industriales u hortícolas.

Por otro lado, la disposición 6431/22 de la ANMAT establece los requisitos para la comercialización de productos de cannabis medicinal en el país, incluyendo parámetros de calidad, seguridad y etiquetado. Esta normativa permite garantizar que los productos cumplan con estándares médicos, ofreciendo seguridad a los consumidores. En esta norma, se define como “Productos vegetales a base de cannabis y sus derivados destinados al uso y aplicación en la medicina humana” a todo producto de composición cuali-cuantitativa claramente definida y comprobable que contenga como Ingrediente/s Farmacéutico/s Activo/s (IFA) uno o más cannabinoides derivados de origen vegetal obtenidos con los requerimientos de buenas prácticas de elaboración establecidas.

Estas leyes y normativas no solo han establecido una base legal para la investigación y uso medicinal del cannabis en Argentina, sino que también han generado oportunidades significativas en la incipiente industria del cannabis medicinal en el país.

1.7. Cadena de valor del cannabis para uso medicinal

La cadena de valor del cannabis abarca un conjunto complejo de procesos interrelacionados, cada etapa de la cadena desempeña un papel fundamental en la determinación de la calidad, consistencia y potencia de los productos derivados del cannabis.

Los principales eslabones en esta cadena son:

- La producción y mejoramiento de semillas.
- El cultivo y el manejo de la planta.
- El proceso de extracción.
- La fabricación de productos derivados (regulados por la ANMAT).
- La distribución y comercialización de productos.

Es importante mencionar que cada uno de los eslabones se desarrollan bajo las regulaciones mencionadas en la sección 1.6: Contexto legal.

En la *Figura 8* se esquematiza la cadena de valor del cannabis, visualizando la interconexión de cada eslabón en la producción de extractos medicinales.

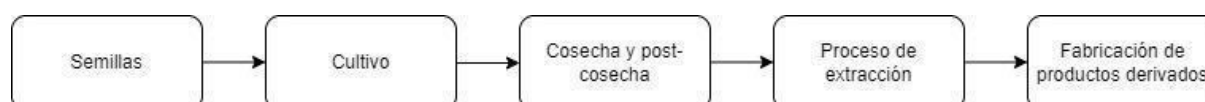


Figura 8: Diagrama de flujo de la cadena productiva de cannabis para uso medicinal



1.7.1. Producción de semillas

La calidad y características genéticas de las semillas de cannabis influyen directamente en la productividad y calidad de la planta y sus derivados. Las empresas que se dedican a este eslabón de la cadena de valor se enfocan en desarrollar semillas de alta calidad, con perfiles genéticos específicos que maximicen la producción de cannabinoides y terpenos deseables, así como en mejorar atributos como la resistencia a plagas y enfermedades.

En la actualidad, existen más de 700 genotipos distintos de cannabis, los cuales se desarrollan y preservan en diversos bancos de semillas en todo el mundo, estas cepas presentan diferentes rendimientos, aplicaciones y propiedades.

La producción de semillas de cannabis medicinal está sujeta a regulaciones específicas en cada país. En Argentina, la Ley 27.359 establece un marco legal para la investigación, producción y comercialización de cannabis medicinal y cáñamo industrial.

En la *Tabla 1* se exhiben variedades de cannabis de distintos orígenes y bancos de semillas, con sus respectivas concentraciones de los cannabinoides más importantes, las cuales tienen potencial de ser utilizadas con fines medicinales.

Tabla 1: Variedades de cannabis con potencial para fines medicinales. (Feruggio)

[Identificación de semillas]	[Banco de semilla/origen]	[thc]	[cbd]
CBD Charlotte's Angel Dutch Passion (Holanda)		0.70%	15.00%
CBD Charlotte's auto Dutch Passion (Holanda)		0.70%	15.00%
Lemon Z Kompolti (España, Suiza)		0.19%	6.50%
Green mango Viridi (Suiza)		0.50%	15-20%
Super silver CBD Viridi (Suiza)		0.40%	15-20%
Rocky M. Berry Viridi (Suiza)		0.50%	15-23%
Sweet Pure CBD Sweet seeds (España)		0.80%	8-15%
Black Mamba Blimburn seeds (EE UU)		4.00%	9.00%
CBD Skunk haze Dutch Passion (Holanda)		7.00%	8.00%
Antioquia Ancestros CyM (Colombia)		0.22%	23.00%
Jerico Ancestros CyM (Colombia)		0.45%	19.00%
Carolina Ancestros CyM (Colombia)		0.55%	18.53%
Israel Ancestros CyM (Colombia)		0.28%	20.90%



1.7.2. Cultivo, Cosecha y poscosecha

- **Cultivo**

El proceso de producción agrícola puede tomar entre 3 y 10 meses, dependiendo de la genética que se esté utilizando y las condiciones agronómicas provistas.

Las técnicas de producción agrícola son determinantes para el tipo de biomasa que se obtendrá luego de la cosecha, por lo que se requiere del desarrollo de buenas prácticas agropecuarias para la provisión de materia prima de calidad en la etapa de extracción.

Se ha demostrado que factores externos como la duración de la luz, el oxígeno y el tiempo de cosecha (madurez floral) influyen en la producción de metabolitos secundarios en el cannabis.

El gran reto del cultivo de Cannabis con fines médicos respecto a otros cultivos es lograr una producción uniforme, estandarizada, homogénea y repetible, con un proceso meticuloso de trazabilidad, para conseguir un producto con destino medicinal que cumpla los estándares de la industria farmacéutica y cubra las necesidades de los pacientes.

- **Cosecha**

El proceso de cosecha se centra en recolectar las flores maduras, también conocida como inflorescencia o “cogollo”, ya que es la parte de la planta que concentra la mayor cantidad de cannabinoides y terpenos.

La elección del momento preciso es fundamental y varía según la cepa, la genética y los objetivos del productor. Generalmente, se realiza cuando los tricomas (glándulas que contienen cannabinoides y terpenos) han alcanzado su desarrollo máximo. La observación de los tricomas bajo un microscopio permite determinar su madurez.

- **Poscosecha**

Una vez cosechadas, las plantas de cannabis se someten a una serie de procesos poscosecha para prepararlas para la extracción. Estos procesos pueden incluir la separación y clasificación de las partes de la planta para su posterior procesamiento. El secado de las flores, pasando de una humedad relativa de entre el 70-80 % hasta un 5-10 %, no solo evita el crecimiento de microorganismos y moho, sino que también permite el almacenamiento a largo plazo manteniendo la potencia, el sabor, las propiedades medicinales y la eficacia.

La calidad de los procesos poscosecha puede tener un impacto significativo en la calidad y la consistencia del producto final de la extracción.

Una vez que se completa el proceso de poscosecha, los cogollos de cannabis secos y curados se envasan para ser utilizados en la etapa de extracción.



1.7.3. Proceso de extracción

Esta etapa implica la separación de los compuestos deseables (cannabinoides y terpenos) del material vegetal de cannabis.

El proceso de extracción de cannabis propuesto en este trabajo inicia con la recepción de insumos y materia prima (flores secas de cannabis), seguida de un análisis y control de cannabinoides. Luego, esta materia prima pasa por una etapa de pre-extracción o acondicionamiento, donde se realiza una molienda y descarboxilación.

Posteriormente, se realiza un método de extracción. La elección del método dependerá de diversos factores, como el tipo de producto deseado, la escala de producción, el costo y las regulaciones aplicables. Aquí se obtiene el primer extracto de cannabis o “aceite crudo de cannabis”, que suele contener entre un 10 y un 30 % de cannabinoides, así como compuestos no deseados, como ceras vegetales y clorofila.

Este extracto pasa luego por una etapa de purificación. Esta etapa permite refinar el extracto inicial, eliminando impurezas. Aquí se obtiene un aceite refinado, llamado también “aceite de espectro completo”, el cual contiene todos los fitoquímicos de la planta, fitocannabinoides y terpenos.

Se pueden realizar procesos adicionales de refinamiento y concentración para obtener productos como:

- Destilados: Fracciones de cannabinoides específicos con mayor pureza.
- Terpenos aislados: Terpenos individuales purificados para su uso en aromaterapia o formulaciones específicas.
- Cristales de cannabinoides: Cannabinoides puros en forma cristalina.

Cada etapa posterior agrega valor al producto inicial, permitiendo la creación de extractos y aceites de cannabis más concentrados y especializados.

Fabricación de Productos

El «uso médico del cannabis y los cannabinoides» puede hacer referencia a una amplia variedad de preparados y productos, que pueden contener principios activos diferentes y utilizar vías de administración diferentes.

Los extractos de cannabis se utilizan para fabricar una amplia variedad de productos derivados, como aceites, tinturas, cápsulas, comestibles, cremas y otros productos de consumo. Todo esto se encuentra regulado por ANMAT.

Análisis de calidad de cannabinoides

El cannabis es una planta que absorbe todas las sustancias presentes en el suelo, desde nutrientes y minerales hasta metales pesados, pesticidas, moho y bacterias. Si bien es importante



que el proceso de extracción se lleve a cabo en un entorno controlado, cumpliendo las normas de calidad exigidas, también es crucial que se aplique el mismo nivel de control estricto a la fase de cultivo y cosecha, garantizando así la calidad y seguridad del producto final.

La flor seca de cannabis, que será derivada al proceso de extracción, debe ser analizada en un laboratorio analítico. Las determinaciones analíticas imprescindibles son: contenido de agua, cannabinoides, carga microbiológica, metales pesados, pesticidas y presencia de aflatoxinas y ocratoxina.

Estos laboratorios disponen de equipos y métodos de análisis validados para analizar los cannabinoides, como la cromatografía líquida de alto resolución (HPLC) y Cromatografía Líquida de Ultra Alta Presión (UPLC).

2. Métodos de extracción

En la industria del cannabis, la extracción de cannabinoides representa un paso crítico para la obtención de compuestos terapéuticos y recreativos de alta calidad. Este proceso es fundamental para aislar los principios activos presentes en la planta y convertirlos en productos listos para su uso medicinal.

El enfoque principal de este capítulo es analizar los métodos más utilizados en la extracción de cannabis con fines medicinales, explorando las ventajas y limitaciones de cada uno. Posteriormente, se realizará la selección del método de extracción más adecuado para este contexto.

2.1. Principios del método de extracción

El proceso de extracción de principios activos de la planta de cannabis consiste en una operación unitaria de transferencia de materia, en la que los compuestos deseados migran desde la estructura vegetal hacia un medio externo, impulsados por una fuerza motriz, como se representa en la *Figura 9*.

Existen diferentes métodos de extracción, los cuales presentan sus propias características y aplicaciones específicas en la extracción de cannabinoides, siendo fundamental evaluar detalladamente sus ventajas y limitaciones en el contexto del proceso que se va a diseñar y del producto que se quiere obtener.

- En métodos de extracción mecánicos, como el prensado clásico, la fuerza impulsora será la presión y/o el calor, aplicado sobre la materia vegetal, la cual ayuda a romper las estructuras celulares y favorece la liberación de los cannabinoides al exterior. Este tipo de métodos no es muy utilizado en la industria debido a su bajo rendimiento.
- En métodos de extracción químicos que utilizan un solvente, la fuerza impulsora que gobierna esta transferencia es la diferencia de concentración entre el interior de la estructura vegetal y el medio de extracción. Los cannabinoides migrarán desde la estructura vegetal al solvente debido a la diferencia de concentración. Este tipo de método es el más utilizado en los procesos de extracción de cannabis. (Villaverde, 2019)

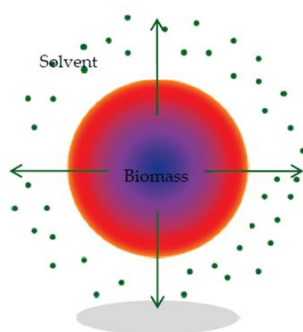


Figura 9: Transferencia de materia desde la estructura vegetal hacia el solvente. (Marilena Radoiu, 2020)



Los métodos de extracción aprovechan las diferencias en las propiedades de los compuestos involucrados, como la presión de vapor, la solubilidad y la difusividad para facilitar su separación.

2.2. Tipos de Métodos de extracción

La industria del cannabis emplea diversos métodos de extracción, cada uno con sus fortalezas y limitaciones. Un análisis de sus características permite obtener una visión más completa a la hora de seleccionar el proceso más adecuado para su utilización en la producción de extractos medicinales de cannabis.

Extracción con solventes

Estos métodos se caracterizan por su sencillez técnica, y costos relativamente bajos. Hacen uso de solventes orgánicos, ya que la solubilidad de los cannabinoides en agua es muy baja. Los más utilizados son el etanol, y solventes no polares como propano y butano.

La naturaleza química del solvente es muy importante, ya que afecta la solubilidad y selectividad de los cannabinoides. La elección del solvente se realiza considerando sus propiedades químicas y físicas, así como su capacidad para disolver específicamente los principios activos de interés.

El butano es un hidrocarburo común utilizado para la extracción, y es una opción popular entre los fabricantes debido a su bajo costo. La naturaleza no polar del disolvente significa que no extrae los compuestos hidrosolubles indeseables, como la clorofila y los metabolitos de las plantas.

El propano se utiliza de forma similar al butano. La principal desventaja de este tipo de extractos es que requieren de un control y regulación estrictos para garantizar la seguridad del consumidor, debido a la posibilidad de residuos de butano en los productos finales.

Teniendo en cuenta la naturaleza de estos solventes, se detallará la extracción usando etanol como solvente.

2.3. Extracción con etanol

La extracción etanólica permite producir casi cualquier derivado cannabinoide porque es un disolvente muy versátil. Esto hace que sea uno de los solventes más utilizados en la industria. El etanol es menos explosivo y tóxico y, por lo tanto, se considera en gran medida más seguro de operar que los sistemas de extracción de hidrocarburos.

La extracción con etanol consta de una serie de etapas, como se muestra en la *Figura 10* que luego además puede refinarse a través de un procesamiento post extracción. Las mismas se detallan a continuación, de acuerdo al artículo (Garrido, 2021):

1. Enfriamiento del etanol a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ para simplificar el post-procesamiento.
2. Extracción, sumergiendo y agitando la biomasa en el etanol frío (en relación mínima de 8 L etanol/kg cáñamo) para extraer los compuestos cannabinoides durante tiempos variables de minutos hasta horas dependiendo del equipo.
3. Filtración de las partículas en suspensión.
4. Evaporación del disolvente. Es una etapa que requiere la aportación de mucha energía y debe realizarse con eficacia para dejar la menor cantidad de residuos de etanol (y sus desnaturalizantes) en el extracto. Los equipos que se utilizan son rotavapores, evaporadores de película fina o descendente. De la biomasa se retira el etanol típicamente por decantación o más eficazmente con métodos mecánicos tales como filtros prensa o centrífugas. Da como resultado un extracto crudo.
5. Descarboxilación (o activación). El crudo se calienta ($>150\text{ }^{\circ}\text{C}$) preferiblemente a vacío de 2 a 4 horas para liberar el grupo carboxilo de las formas ácidas de las moléculas de cannabinoides (como THCA, CBDA y CBGA) y convertirlas en las formas más asimilables THC (Δ^9 -tetrahidrocannabinol), CBD (cannabidiol) y CBG (cannabigerol), respectivamente.

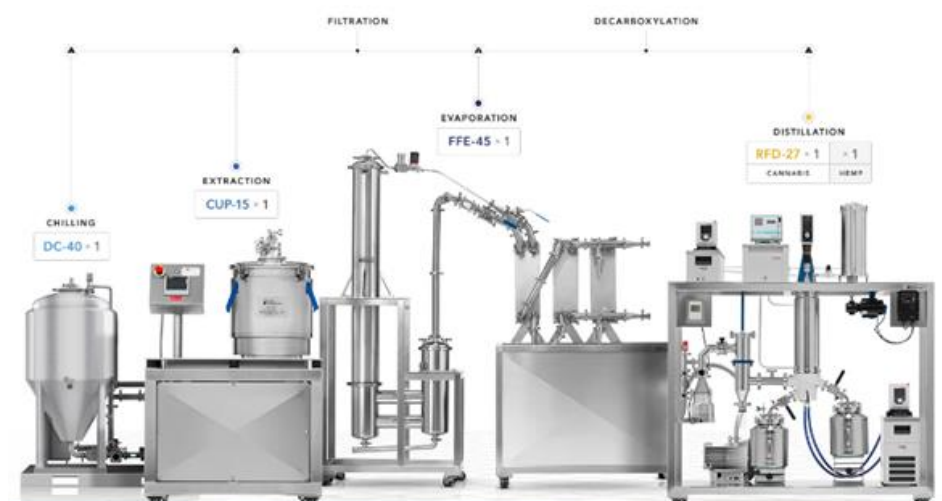


Figura 10: Equipo comercial para la extracción con etanol (separations, s.f.)

El resultado es el aceite crudo, que se puede utilizar para cartuchos de vapeo, tapas de gel, comestibles, tinturas, gotas sublinguales y tópicos.

Los procesos siguientes corresponden a la post extracción, donde se puede realizar:

- Destilación para eliminar pigmentos, productos de descarboxilación, y otros subproductos y así, obtener un aceite de mayor calidad y consistencia. En este proceso se pierden los terpenos que dan el aroma y olor típicos al cannabis y pueden modificar las acciones farmacológicas de los cannabinoides.



- Separación y aislamiento del THC, CBD, CBG u otras moléculas deseables. Para alcanzar un nivel muy alto de pureza ($> 98\%$) se utiliza fundamentalmente cromatografía y cristalización.

Parámetros claves que influyen en el rendimiento de la extracción con etanol:

1. Temperatura de extracción.
2. Presión de extracción.
3. Tiempo de contacto: La duración variará según el tamaño de las partículas iniciales, la polaridad del disolvente y la temperatura de extracción.

En la *Tabla 2* se muestran las principales ventajas y desventajas de la extracción utilizando etanol como solvente.

Tabla 2: Ventajas y desventajas de la extracción con etanol.

Ventajas	Desventajas
• Costos relativamente bajos. • Simple de implementar	• Puede dejar residuos de disolventes en el producto final. • Menos selectivo, lo que significa que se extraen una variedad de compuestos, algunos no deseados. • Posible riesgo de incendio y seguridad. • Requiere grandes cantidades de solventes

2.4. Extracción con solvente asistida por ultrasonidos

La extracción asistida por ultrasonido (EUA) o ultrasonicación se ha utilizado ampliamente para la extracción de compuestos bioactivos.

El proceso consiste en poner en contacto la materia vegetal con el solvente y someter esta mezcla a la acción de ultrasonidos. En la *Figura 11* se presenta un esquema de las partes de este equipo.



Figura 11: Esquema de un equipo de extracción asistida por ultrasonidos (SCIENTZ, s.f.)

Este proceso de ultrasonificación se basa en la aplicación de ondas ultrasónicas de alta frecuencia (generalmente entre 20 kHz y 100 kHz), generando cavidades o burbujas en un líquido. Cuando estas burbujas colapsan, se crean micro turbulencias que rompen la pared celular, permitiendo que los compuestos de interés o solutos se disuelven en el disolvente. Este colapso aumenta la transferencia de masa, mejorando así el rendimiento de extracción en un tiempo mucho menor a otros métodos, lo cual lo vuelve un método más eficiente.

Parámetros claves que influyen en el rendimiento de la extracción con solvente asistida por ultrasonido:

1. Potencia ultrasónica
2. Frecuencia ultrasónica
3. Tiempo de exposición

En la *Tabla 3* se muestran las principales ventajas y desventajas de la extracción utilizando solvente, y a su vez asistida por ultrasonido.

Tabla 3: Ventajas y desventajas de la extracción asistida por ultrasonido.

Ventajas	Desventajas
• Alta eficiencia en comparación con métodos convencionales • Puede ser sintonizado para extraer compuestos específicos, lo que permite una mayor selectividad.	• La inversión en equipos de ultrasonidos tiene un alto costo. • Los costos operativos también son altos.

- Necesita menor cantidad de disolvente, haciendo el proceso más sostenible que los convencionales.
- Puede ser escalado para aplicaciones a nivel industrial.

2.5. Extracción con fluidos supercríticos

La extracción supercrítica es una operación unitaria de transferencia de masa, muy similar a la extracción convencional. Una de las principales diferencias entre ambas extracciones radica en la utilización de un fluido supercrítico como agente extractor en lugar de un líquido.

Propiedades de fluidos supercríticos

Cuando una sustancia está por encima de sus valores críticos de presión y temperatura, área representada en color rojo en la *Figura 12*, recibe el nombre de fluido supercrítico. En estas condiciones, la sustancia no se licua por más que se aumente la presión ni se vaporiza por más que se eleve la temperatura, lo que hace que la fase líquida sea indistinguible de la fase gaseosa.

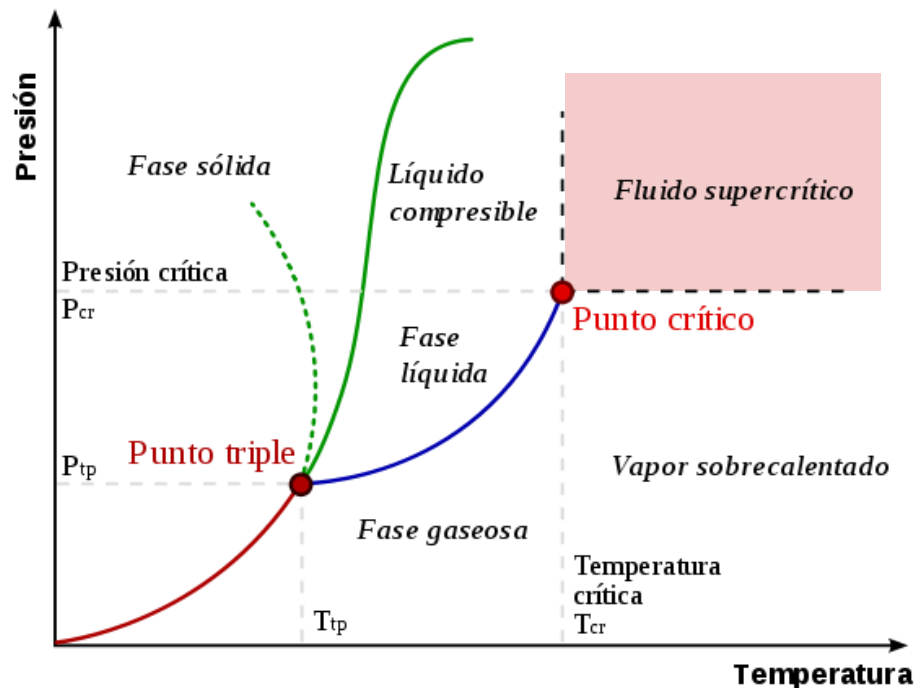


Figura 12: Diagrama de fases. Fluido supercrítico (Páez, 2016)

Al presentar propiedades tanto de líquido como de gas, tiene capacidad de disolver compuestos que normalmente no disolvería o disolvería muy poco en estado gaseoso o líquido. La densidad de un fluido supercrítico es similar a la de los líquidos, lo que le brinda la característica de poseer un gran poder solvatante (pudiendo actuar con gran cantidad de



solutos), la viscosidad es similar a la de los gases y la difusividad es superior a la de los líquidos, lo que favorece la capacidad de penetración en los poros de la muestra.

El uso de fluidos supercríticos tiene algunas ventajas sobre los disolventes orgánicos convencionales. La más importante de ellas es la capacidad de modificar el poder disolvente (que se correlaciona con la densidad del fluido) variando las condiciones de presión y temperatura por encima del punto crítico del fluido, lo que permite la extracción selectiva de diferentes moléculas.

En el caso de la extracción de cannabis, el fluido supercrítico más comúnmente utilizado es el dióxido de carbono (CO_2). Debido a que el CO_2 alcanza su punto crítico a una temperatura y presión relativamente bajas ($31,1^\circ\text{C}$ y $73,7$ bar, respectivamente), lo que permite la extracción de componentes térmicamente lábiles y, por lo tanto, la preservación de los perfiles cannabinoides y terpenos de la planta. Como puede verse en la *Tabla 4*, el CO_2 supercrítico ($\text{CO}_{2\text{SC}}$) es un solvente no polar, lo que le permite disolver los cannabinoides no polares.

Tabla 4: Polaridad de los compuestos principales de la extracción con $\text{CO}_{2\text{SC}}$

COMPONENTE	POLARIDAD
sc CO_2	No polar
Cannabinoides	Poco polar

Además, el CO_2 es no tóxico, no inflamable, abundante en la naturaleza, económico, puede reciclarse en plantas industriales y no deja residuos en los extractos resultantes ya que el solvente se elimina fácil y eficientemente al disminuir la presión. Por ello, la técnica de extracción supercrítica suele ser la preferida para aplicaciones medicinales y farmacéuticas, que requieren productos de alta calidad y sin residuos tóxicos.

Proceso de extracción con CO_2 supercrítico

Como se representa en la *Figura 13*, el proceso de extracción por fluidos supercríticos consta básicamente de cuatro etapas:

- **Presurización:** En esta etapa, la presión se eleva por encima de la presión crítica de la sustancia a emplear como solvente.
- **Ajuste de temperatura:** La temperatura se eleva o disminuye con el fin de llevar el solvente a la temperatura adecuada de extracción.
- **Extracción:** El fluido supercrítico entra en contacto con la muestra que contiene el soluto de interés en el extractor.
- **Separación:** El soluto se libera mediante la descompresión del solvente a una presión inferior.

La muestra se coloca en una cámara de extracción, y el CO_2 supercrítico se hace pasar a través de ella. Al entrar en contacto con la muestra, el CO_2 disuelve los compuestos deseados, y luego, al reducir la presión, se recupera el extracto.

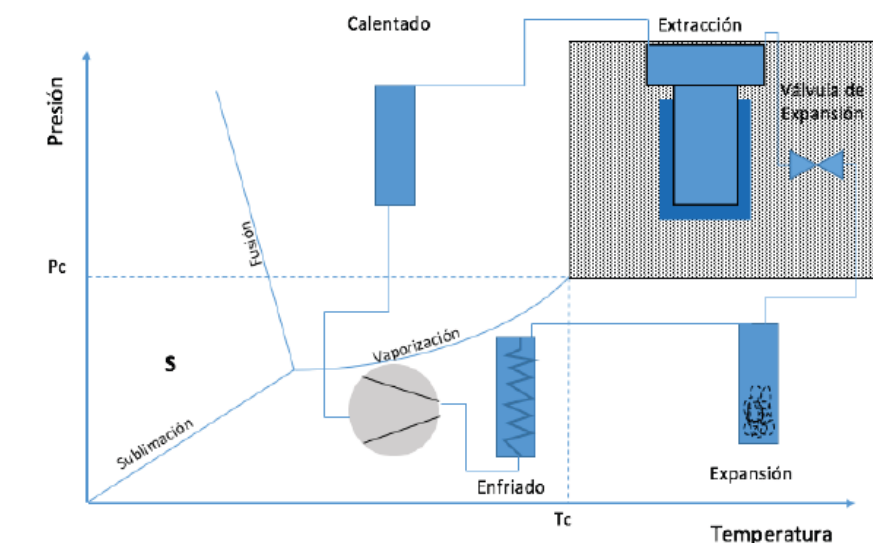


Figura 13: Diagrama PT de fases en cada etapa de la extracción con $\text{CO}_{2\text{SC}}$

Parámetros claves que influyen en el rendimiento de la extracción con fluido supercrítico:

- Temperatura y presión: Ajustando estos parámetros, se puede modificar la solubilidad y la selectividad del CO_2 .
- Relación CO_2 / muestra: Controlar esta relación afecta la eficiencia de la extracción.

En la Tabla 5 se muestran las principales ventajas y desventajas de la extracción utilizando fluido supercrítico.

Tabla 5: Ventajas y desventajas de la extracción con fluido supercrítico.

Ventajas	Desventajas
• Se pueden ajustar la temperatura y presión para mejorar la selectividad de los compuestos extraídos. • El CO_2 supercrítico es altamente selectivo, lo que resulta en extractos de alta pureza sin residuos de solventes. • El proceso es generalmente rápido y eficiente, permitiendo altos rendimientos. • Es un método rápido y puede ser escalado fácilmente para aplicaciones a nivel industrial.	• La adquisición de equipos puede tener un costo inicial más alto. • Requiere equipos especializados y conocimientos técnicos.



2.6. Resumen comparativo entre métodos de extracción

En la *Tabla 6* se muestra un resumen de la comparación realizada entre los tres métodos de extracción evaluados, analizando cualitativamente el rendimiento de la extracción y sus principales ventajas y desventajas.

Tabla 6: Resumen comparativo entre los tres métodos de extracción analizados.

Método de extracción	Rendimiento cannabinoides	Rendimiento extracción	Ventajas	Desventajas
Extracción con etanol	Medio-Bajo	Medio	Accesible y relativamente rápido; el etanol es reciclable y económico. Costos bajos y simplicidad técnica.	Puede arrastrar compuestos indeseables y residuos de solvente si no se purifica bien. Menos selectivo que otros métodos.
Extracción asistida por ultrasonido	Medio	Medio-Alto	Bajo impacto ambiental ya que usa solventes suaves. Proceso rápido.	Menor escalabilidad y rendimiento. Eficacia limitada en extracciones a gran escala.
Extracción con CO₂ supercrítico	Alto	Alto	Mayor estabilidad oxidativa del aceite. Alta selectividad, permitiendo extracción de cannabinoides específicos. Producción de extractos de alta pureza y calidad. Baja toxicidad y riesgo medioambiental.	Alto consumo energético. Alto costo de equipos y de operación. Se utiliza alta presión

2.7. Selección de alternativas de proceso

En el diseño de procesos en ingeniería continuamente se presenta el problema de tener que elegir entre una serie de alternativas. La toma de decisiones tiene, generalmente, múltiples criterios, y que muchas veces se contraponen entre ellos, lo que hace más complejo el proceso de seleccionar la alternativa más adecuada.

A continuación, se definirán los criterios y especificaciones de diseño que se tendrán en cuenta para decidir entre las diferentes alternativas de métodos de extracción:

- A1 - Método de extracción con Etanol
- A2 - Método de extracción con solvente asistida por ultrasonidos
- A3 - Métodos de extracción con fluidos supercríticos

2.8. Criterios y especificaciones de diseño

- Obtención de un extracto de cannabis de alta calidad, concentración y pureza.
- Proceso técnicamente eficiente y amigable con el medio ambiente.
- Cumplimiento de las regulaciones legales de la región.
- Capacidad de producción
- Disponibilidad de materia prima.

En la *Figura 14* se muestra un esquema simplificado del proceso de extracción, junto a un conjunto de especificaciones y criterios de diseño que cumplirían los requisitos para la producción de extractos de cannabis para uso medicinal.

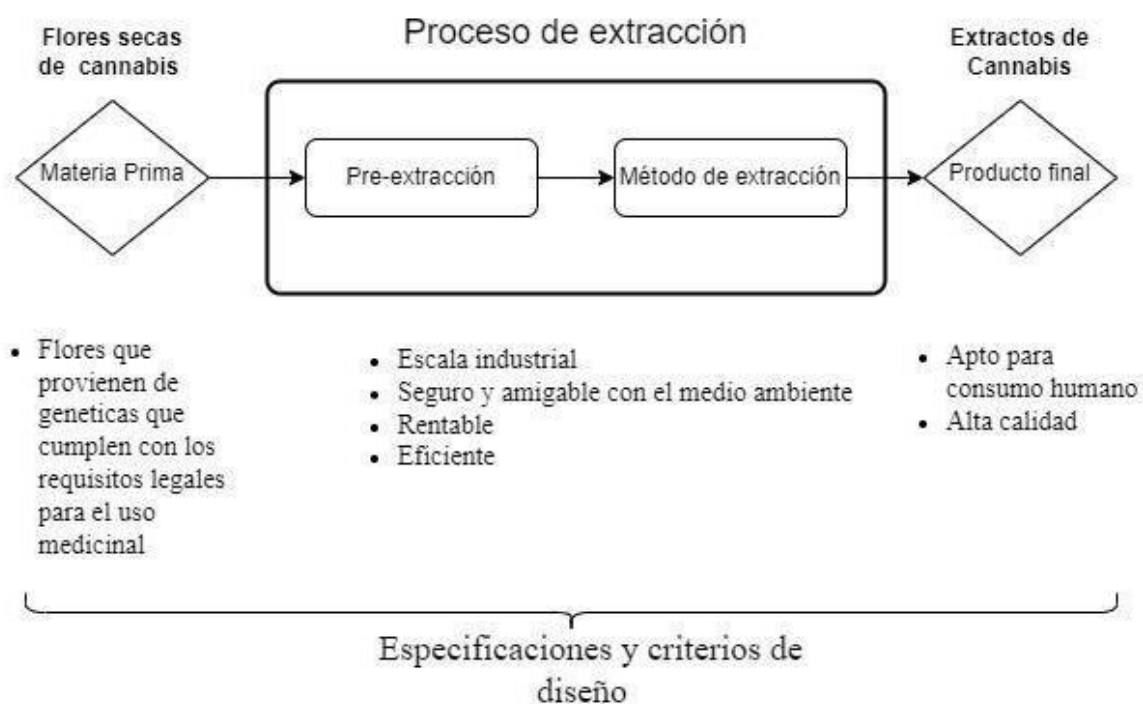


Figura 14: Esquema del proceso de extracción y especificaciones de diseño. (Elaboración propia)



2.9. Selección del método de extracción

Mientras que los hidrocarburos supercríticos y el CO₂ generalmente se usan para extracciones de calidad superior, el etanol se usa en el procesamiento industrial a gran escala de los aceites de CBD.

La técnica más utilizada para la extracción de los cannabinoides es la que utiliza como solvente el etanol. Sin embargo, las condiciones de rendimiento, eficiencia, condiciones de seguridad y cuidado con el medio ambiente, requieren la utilización de un método que reduzca la obtención de residuos, siendo la técnica de fluidos supercríticos la más favorable para procesos a nivel industrial.

Según (Cotera Curi & Yauri Cantorin, 2018), la eficacia de la técnica de fluidos supercríticos radica en su poder de disolución en forma controlada, puesto que, en estado compresible, los fluidos se comportan como un gas denso que ha inducido que esta práctica de extracción despierte altos intereses científicos para aplicación en procesos farmacéuticos y ambientales, que requieren disolventes compresibles, con densidades variables y tensión superficial muy baja y baja viscosidad. Una circunstancia favorable de los fluidos supercríticos es la posibilidad de manejar CO₂ como disolvente, puesto que en estado supercrítico el dióxido de carbono admite la extracción sin el manejo de disolventes orgánicos, lo que los convierte en un magnífico disolvente en métodos de extracción de productos farmacéuticos y cosméticos.

Según (Velásquez Valderrama, 2008), la tecnología de fluidos supercríticos actualmente tiene un gran recibimiento dentro del sector industrial, puesto que es esta técnica desarrolla procesos innovadores que son conocidos y divulgados dentro del medio de la investigación con un alto impacto tecnológico y ambiental que es amigable con las tecnologías verdes, factor determinante, puesto que otros métodos convencionales utilizados para la extracción de resinas vegetales resultan costosas y tóxicas, debido a los solventes y las temperaturas utilizadas.

Teniendo en cuenta los aspectos más trascendentales para una producción a nivel industrial, como la calidad y cantidad del extracto en contenido de CBD, el rendimiento y seguridad del proceso, la extracción utilizando fluidos supercríticos resulta ser la técnica más conveniente.

Para establecer el método de extracción más adecuado, se han comparado en la *Tabla 7* los tres métodos en términos de escalabilidad, rendimiento, tipo de solvente, consumo energético, tiempo de extracción, costo de insumos y equipos, y su impacto ambiental. En la misma se utilizó una escala de 1 a 5, donde 5 representa el valor más alto en cada criterio.



Tabla 7: Comparativa de los métodos de extracción según criterios de diseño.

Criterio de evaluación	A1 - Etanol	A 2 - Ultrasonidos	A3 - CO ₂ supercrítico
Escalabilidad	5	3	5
Rendimiento de la extracción	3	4	5
Rendimiento de cannabinoides	3	3	5
Tipo de solvente	3	3	5
Consumo energético	3	3	3
Tiempo de extracción	2	5	4
Costo de insumos y equipos	4	2	3
Impacto medioambiental	3	3	4
TOTAL	26	26	34

De acuerdo con esta evaluación cuantitativa y cualitativa, el método de extracción con CO₂ supercrítico obtiene la puntuación más alta (34). Los principales factores que respaldan esta elección son:

- **Alta Eficiencia de Extracción:** El CO₂ en estado supercrítico permite la extracción de cannabinoides con una pureza y concentración excepcionales, ya que permite ajustar las condiciones de operación para extraer compuestos específicos y minimizar la presencia de contaminantes.
- **Sostenibilidad y Seguridad:** Al emplear CO₂ como disolvente, el proceso evita el uso de solventes orgánicos peligrosos, lo cual reduce el riesgo de residuos tóxicos y minimiza el impacto ambiental.
- **Adaptabilidad Industrial:** La tecnología de CO₂ supercrítico es ampliamente adoptada en la industria de extracción de cannabis debido a su flexibilidad para escalabilidad industrial, su reputación como tecnología verde y su capacidad para cumplir con regulaciones de pureza y seguridad.
- **Reciclaje de Solvente:** El CO₂ utilizado en el proceso puede ser reciclado y reutilizado, reduciendo significativamente los costos operativos y el consumo de recursos. Esta capacidad de reciclaje también favorece la sostenibilidad del proceso.

3. Diseño del Proceso de extracción

En este capítulo se llevará a cabo un análisis de las operaciones unitarias involucradas y los parámetros de operación en el proceso de extracción propuesto teniendo en cuenta datos de bibliografía y/o datos proporcionados por los fabricantes de equipos seleccionados. Es importante aclarar que no se han realizado pruebas de laboratorio ni validaciones experimentales. Por lo tanto, este capítulo corresponde a una “Ingeniería Básica”, cuyo propósito es proponer un esquema preliminar de diseño para el proceso y estimar los parámetros fundamentales.

Para poder elegir los equipos que se utilizarán en el proceso, necesitamos estimar la cantidad de producto final que es viable de comercializar en la zona donde se ubicaría el proyecto. Por este motivo primero se realiza un análisis de la demanda estimada de extracto, la cual luego se tendrá en cuenta para la elección del tamaño de equipos, el cálculo de producción y los balances de materia.

3.1. Estimación de la demanda potencial de aceite de cannabis

Para la estimación de la demanda de extractos de cannabis en la Argentina, y específicamente en la provincia de Tucumán, se utiliza como base los datos del informe "La cadena de valor del cannabis: situación y tendencias internacionales, y oportunidades para la Argentina" (López, 2021).

Según este informe, y como se muestra en la *Figura 15*, en Argentina hay aproximadamente 5,3 millones de personas que son potenciales usuarios de productos derivados del cannabis para uso medicinal, lo que equivale al 10% del total de la población.

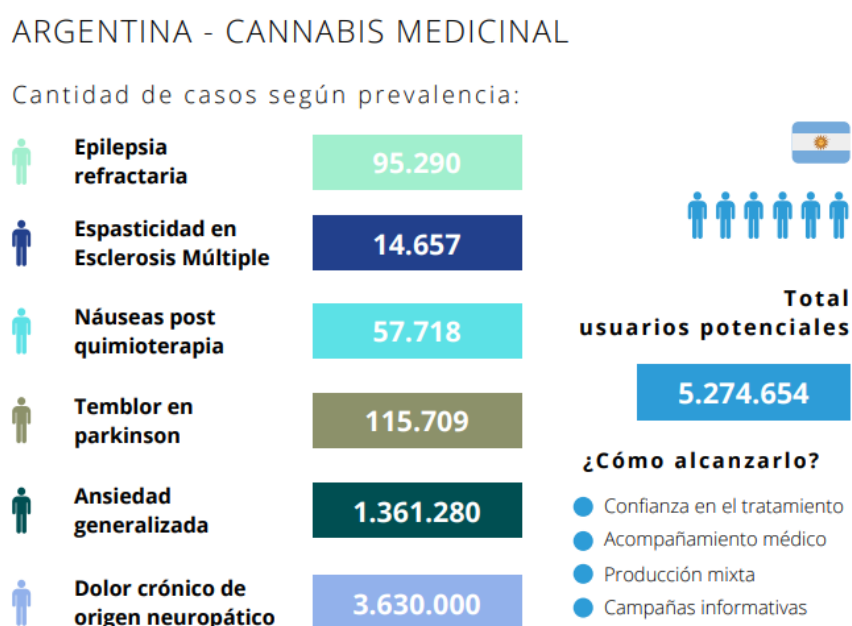


Figura 15: Potenciales usuarios de cannabis medicinal en Argentina.



Extrapolando esta cifra a la población de Tucumán, que es de aproximadamente 1,6 millones de personas, el 10% de este valor serían unas **160.000 personas** sólo en Tucumán que entrarían dentro de los **potenciales usuarios de productos derivados del cannabis**.

Consumo promedio de un potencial usuario

El cálculo del consumo promedio de un potencial usuario es complejo y varía según varios factores, como el tipo de dolencia, su intensidad, y las características del usuario, como su peso, sexo y edad.

Para los propósitos de este trabajo, se estimará una dosis promedio de aceite de cannabis para un usuario típico.

Según datos recolectados de páginas de ventas de productos de extractos de cannabis (Naturecan, 2024), se estima:

- Consumo de aceite de cannabis de un potencial usuario de baja dosis: 30 mg de aceite de cannabis por día, equivalente a 900 mg al mes.
- Consumo de aceite de cannabis de un potencial usuario de alta dosis: 50 mg de aceite de cannabis por día, equivalente a 1.500 mg al mes.

Asumiendo un consumo promedio de 1.200 mg de aceite de cannabis por usuario al mes, se obtiene una estimación representativa para los cálculos de demanda.

Dado que la densidad promedio del aceite de cannabis es de 0,93 g/ml, el consumo promedio mensual de 1.200 mg corresponde aproximadamente a **1,29 ml de aceite por usuario al mes**.

Considerando las 160.000 personas en Tucumán que asumimos como potenciales usuarios de productos derivados del cannabis, se estima **una demanda mensual de unos 20,5 litros de extracto de cannabis**.

3.2. Comparación entre equipos de extracción

Para llevar a cabo el cálculo del dimensionamiento de los equipos, los balances de materia y el análisis económico del proyecto, se considerarán dos tamaños de extractores diferentes, obtenidos de hojas de datos de equipos de extracción de cannabis del proveedor “Apeks Supercritical (USA)”, las mismas se encuentran en el *Anexo 1*. Las alternativas de tamaños propuestas son:

- Alternativa A: Extractor “The Bambino”
- Alternativa B: Extractor “The force”

En la *Tabla 8* se comparan los principales parámetros de estos dos equipos.

Tabla 8: Comparativa de parámetros entre equipos de Apeks Supercritical (Anexo 1).



	Parámetros	A: The Bambino	B: The Force
Tanque extractor	Cantidad de tanques	1	2 (20Lx20L)
	Volumen total [L]	5	80
	Capacidad de MP en el extractor [kg]	1,36	9
	Presión máxima - Extractor [Bar]	137	344
	Temperatura máxima - Extractor [°C]	71	71
Bomba CO2	Caudal CO _{2SC} [kg/min]	0,4 - 0,8	3.5 - 4,2
	Recuperación CO ₂	95%	95%
Separador	Cantidad	1	2
	Presión máxima - Separador [bar]	41	41
	Temperatura máxima - Separador [°C]	71	71
Datos de operación del equipo	Tiempo total de funcionamiento del equipo al día [horas]	24	24
	Tiempo de ciclo [h]	5	3,4
	Nº de ciclos por día	4	7
	Cantidad de MP procesada por día [kg/día]	4,54	63,71
	Rendimiento total de extracción	20%	20%
	Cantidad de Extracto teórico obtenido por día [kg/día]	0,91	12,74
	Cantidad de Extracto teórico obtenido por día [L/día]	0,97	13,69
	Costo de equipo [USD]	114.250	568.560
	Consumo de energía [kW]	12,9	80,1
	Costo operativo diario [USD]	186	585



Considerando una operación continua de 30 días, la producción mensual teórica de cada equipo será:

- Equipo A (The Bambino): $0,97 \text{ L/día} \times 30 \text{ días} = \mathbf{29 \text{ L/mes}}$
- Equipo B (The Force): $13,69 \text{ L/día} \times 30 \text{ días} = \mathbf{410 \text{ L/mes}}$

Teniendo en cuenta que la demanda mensual de extractos de cannabis en la provincia de Tucumán es de 20,55 L. Se elige trabajar con el Equipo A, ya que con su capacidad de producción se podría cubrir la demanda estimada. El Equipo B, tiene una capacidad superior a la demanda actual, produciendo 410 L/mes, lo cual podría ser más adecuado si se planea expandir la producción o vender a otras regiones en el futuro.

Utilizando los parámetros del Equipo A seleccionado, la **cantidad de materia prima necesaria para obtener 29 L/mes de extracto es de: 136,2 Kg/mes**. Estos valores se tendrán en cuenta como base de cálculo para este proyecto.



3.3. Materia prima

La materia prima (MP) para el proceso de extracción de cannabis medicinal son las flores de cannabis, también conocidas como "cogollos" obtenidas de la planta hembra de cannabis o cáñamo en su estado natural. Las flores se forman en la parte superior de los tallos principales y las ramas grandes de la planta, y en ellas se concentran la mayoría de los tricomas, que son pequeños crecimientos que se asemejan a pelos, y que contienen los compuestos deseables como cannabinoides y terpenos.

Consideraciones a tener en cuenta a la hora de seleccionar la materia prima:

- La calidad de la materia prima impacta directamente en la calidad del extracto final.
- Es importante seleccionar flores de alta calidad, libres de pesticidas y contaminantes.
- La preparación adecuada de la materia prima asegura una extracción eficiente y efectiva.

3.4. Etapas del proceso de extracción con CO₂ supercrítico

En la *Figura 16* se muestra un diagrama de bloques simplificado de las etapas de producción de aceite de cannabis separado en tres bloques:

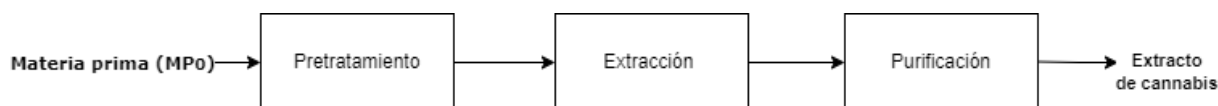


Figura 16: Diagrama de bloques de las etapas de producción de aceite de cannabis.

1. Pretratamiento
2. Extracción
3. Purificación

Para obtener un alto rendimiento en el proceso de extracción, es importante elegir los parámetros de operación apropiados y tener en cuenta los factores del proceso que influyen en el rendimiento final.

A continuación, se analizan las operaciones unitarias involucradas y los parámetros de operación en cada paso del proceso de extracción propuesto.

3.5. Etapa 1: Pretratamiento

La materia prima, en este caso, la flor de cannabis seca se somete a un proceso de pretratamiento para garantizar una siguiente extracción eficiente y de alta calidad.

El pretratamiento propuesto consta de las siguientes tres subetapas:

1. Recepción y control
2. Molienda
3. Descarboxilación

En la *Figura 17* se presenta un diagrama de bloques de la etapa de pretratamiento, en la cual ingresa materia prima (MP_0), en forma de flores de cannabis, y se obtiene materia prima seleccionada, molida y descarboxilada.

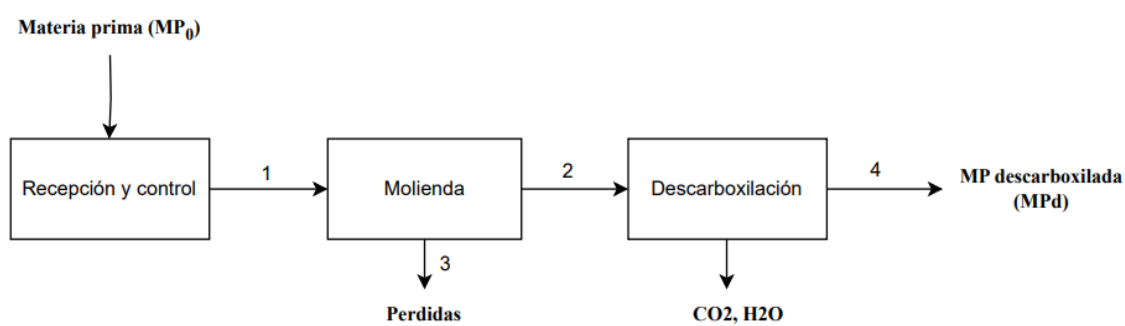


Figura 17: Diagrama de bloques de la etapa de pretratamiento.

3.5.1. Recepción y control

El proceso comienza con la recepción de los insumos y la materia prima, seguido del control de laboratorio, para asegurar que la materia prima cumple con los estándares requeridos en términos de contenido de cannabinoides y otras características fisicoquímicas.

A partir de bibliografía (Ramírez, 2022), se elige trabajar con la genética llamada comercialmente “*Charlotte’s Angel*”, ya que es rica en CBD y tiene una concentración másica de THC menor al 1%, concentraciones que la convierten en materia prima ideal para producir extractos de cannabis para uso medicinal.

En el trabajo de (Ramírez, 2022) se realiza una cromatografía líquida (HPLC) y una espectrometría de masas (GC-MSD) para obtener un perfil de cannabinoides y un perfil de terpenos de la materia prima. Con estos datos, se indica la caracterización de la materia prima inicial para este proyecto. En la *Tabla 9* se muestran la composición másica inicial de la materia prima.

Tabla 9: Composición másica de materia prima inicial, variedad “Charlotte’s Angel”. (Ramírez, 2022)



Compuesto	(%p/p)
CBDA	6,71
CDB	6,24
CBG	0,06
THC	0,22
CBC	0,23
Terpenos	0,52
Ceras	10,00
Inertes	66,02
Humedad	10,00
Total	100

De los cuáles, se puede diferenciar aquellos compuestos solubles en el solvente propuesto, como se muestra en la *Tabla 10: Compuestos solubles en CO₂ de la variedad “Charlotte’s Angel”*.

Tabla 10: Compuestos solubles en CO₂ de la variedad “Charlotte’s Angel”.

Compuestos solubles en CO ₂	(%p/p)
Cannabinoides	13,46
Terpenos	0,52
Ceras	10,00

3.5.2. Molienda

En esta etapa, la materia prima se muele para obtener un tamaño de partícula uniforme. El objetivo es reducir el tamaño de partícula para aumentar la superficie de contacto entre el CO₂ y la materia prima y mejorar así la transferencia de masa en la etapa de extracción.

El tamaño de las partículas de la biomasa afecta la cinética de extracción. Las partículas demasiado pequeñas pueden producir fenómenos de canalización, fenómenos de obstrucción y sobrepresión en la extracción líquida, lo cual afecta negativamente el rendimiento de la extracción. Por el contrario, las partículas demasiado grandes aumentan los tiempos de extracción.

En la *Figura 18* se muestra un diagrama de flujo simplificado de la etapa de molienda, con los números de las corrientes que corresponden a las del Flowsheet global del proceso:

1. Entrada de Materia prima (MP₀)
2. Salida de Materia prima molida (MP_m)
3. Pérdidas

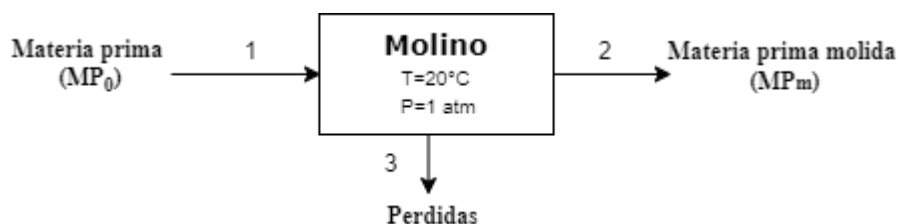


Figura 18: Diagrama de flujo de la etapa de molienda.

Equipo de molienda

El equipo propuesto para esta etapa es un molino de cuchillas. Estos tipos de molinos son usados para la trituración de material vegetal, blando, fibroso y materiales sensibles a la temperatura.

En la *Figura 19* se muestran algunas imágenes del equipo propuesto. El equipo elegido es de la empresa fabricante *Laval Lab*, debido a sus características técnicas, capacidad y compatibilidad con el material a procesar. Las especificaciones técnicas del equipo, se pueden ver en el *Anexo 1*.

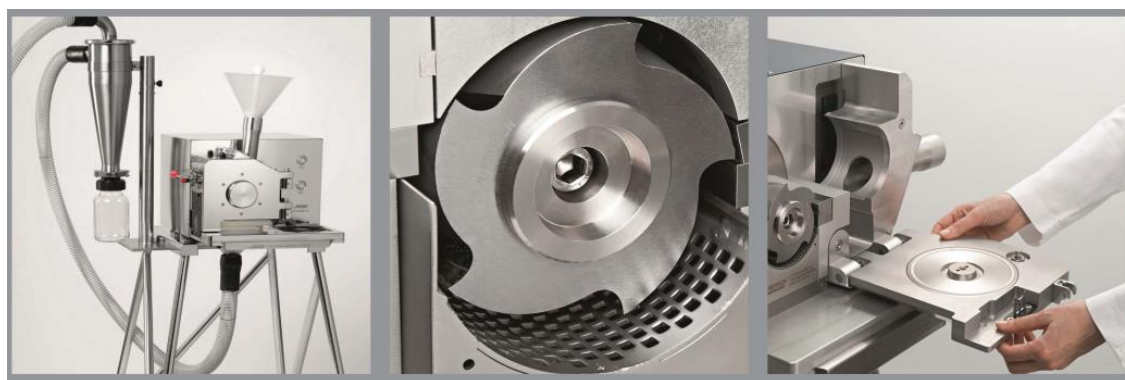


Figura 19: Molino de cuchillas Pulverisette 19 para procesamiento de cannabis. (Lab, s.f.)

Además, en la *Figura 20* se muestra en una imagen como sale el cannabis al finalizar la etapa de molienda a través del molino de cuchillas.



Figura 20: Imagen del cannabis al finalizar el procesamiento por molino de cuchillas. (Lab, s.f.)

El equipo seleccionado ofrece un rango ajustable de tamaño final de partícula. Además, este equipo opera una velocidad de rotor variable (300-3000 rpm), permitiendo trabajar a bajas velocidades para evitar la degradación térmica de los compuestos activos de la planta.

A partir de un análisis realizado por la empresa fabricante del molino, se recomienda configurar el equipo para que, a la salida, el **tamaño de partícula sea de 2 mm**. Como puede verse en la Figura 21, este tamaño de partícula es la que mayor porcentaje de cannabis recupera, al garantizar un área superficial adecuada para que el solvente pueda tener un contacto total con el material y aumentar así el rendimiento en la siguiente etapa (Simon, 2024). Teniendo en cuenta este análisis se define un tamaño de partículas de 2 mm, con el cuál se ingresa a la etapa de extracción.

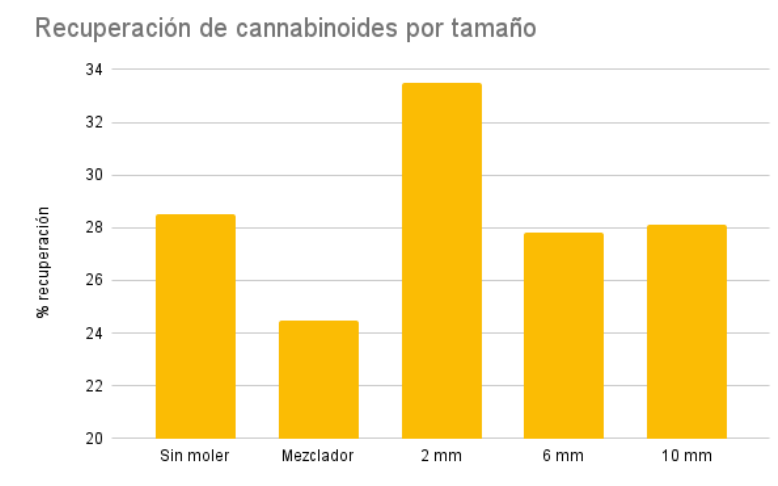


Figura 21: Porcentaje de cannabis recuperado según tamaño de partícula. (Simon, 2024)

Balances de materia de la etapa de molienda

A continuación, se llevarán a cabo las consideraciones necesarias para luego plantear las ecuaciones para los balances de materia en esta etapa.

Consideraciones:

- Se establece un margen de pérdidas del 3% de la materia prima teniendo en cuenta posibles adherencias de masa a las cuchillas del molino.
- Se asume una perfecta homogeneidad del material triturado y ausencia de segregación.

Se plantea un balance de materia total en el horno:

$$M1 = M2 + M3$$

Considerando las pérdidas, el flujo másico de la corriente 3 se calcula como:

$$M3 = 0.03 \times M1$$

Considerando que no hay segregación ni cambio en la composición durante la molienda, la composición másica de la corriente de salida será la misma que la de la materia prima:

$$w_{i,1} = w_{i,3}$$

3.5.3. Descarboxilación

La descarboxilación se lleva a cabo para convertir los cannabinoides ácidos (THCA y CBDA) en sus formas neutras (THC y CBD), responsables de las propiedades medicinales del cannabis. Este proceso se realiza aplicando calor de manera controlada para eliminar el grupo carboxilo y liberar CO₂, como se muestra en la *Figura 22*.

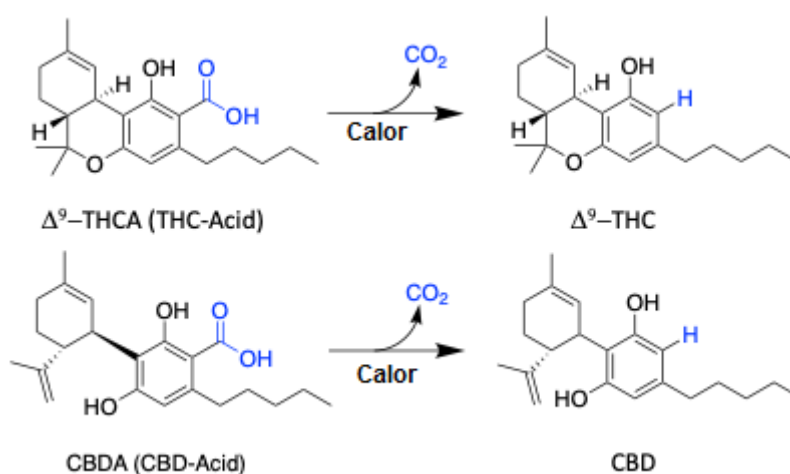


Figura 22: Reacción de descarboxilación al aplicar calor en moléculas THCA y CBDA. (Moreno, 2020)

La descarboxilación sigue una cinética de primer orden (Moreno, 2020), por lo que la cantidad de cannabinoides neutros (como el CBD o el THC) que se producen después de la descarboxilación es proporcional a la cantidad de cannabinoides ácidos (como el CBDA o el THCA) presentes en la muestra original.

La descarboxilación antes de la extracción con CO₂ supercrítico se elige con el propósito de maximizar el rendimiento de la extracción y la calidad del extracto final. Esto se basa en el hecho de que los cannabinoides ácidos presentes en la planta de cannabis, como el THCA y el CBDA, son menos solubles en CO₂ en comparación con sus formas neutras (THC y CBD). Al utilizar un disolvente no polar como el CO₂, la polaridad de los cannabinoides influye en su solubilidad, favoreciendo la extracción de los compuestos neutros.

Es importante seleccionar las condiciones de descarboxilación (temperatura y tiempo) para evitar la degradación de los cannabinoides o la formación de compuestos no deseados. Según el estudio (Mei, 2016), las condiciones de descarboxilación a temperaturas entre 130 y 145 °C durante un período de 15 a 30 minutos permiten obtener concentraciones residuales de cannabinoides ácidos cercanas a cero, maximizando la conversión sin generar productos de degradación. En el estudio se analiza el comportamiento de distintos cannabinoides, se toma el del CBD a modo de representación. En la *Figura 23*, se muestra una curva de concentración vs tiempo para la descarboxilación de moléculas de CBD.

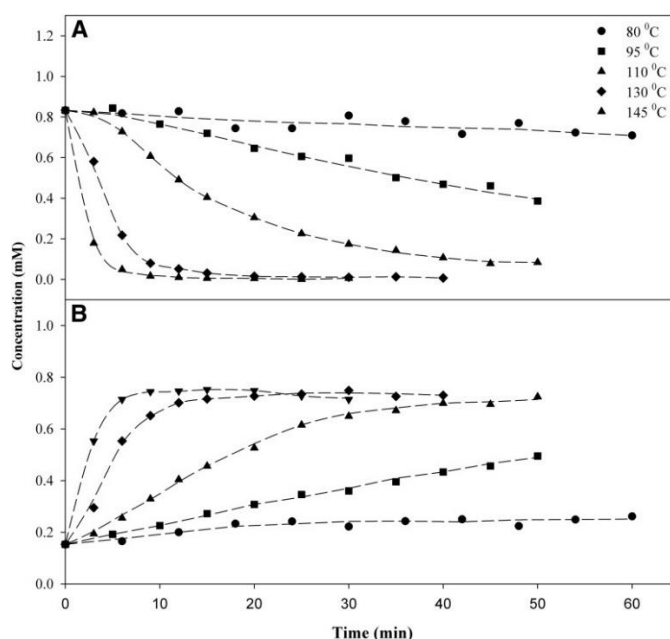


Figura 23: Gráfica de concentración vs tiempo descarboxilación de CBD. (Mei, 2016)

En la *Figura 24*, se muestra un diagrama de bloques simplificado de la etapa de descarboxilación, con los números de las corrientes que corresponden a las del Flowsheet global del proceso:

- 2- Entrada de Materia prima molida (MP_m)
4. Salida de Materia prima descarboxilada (MP_d)
5. Salida de CO₂

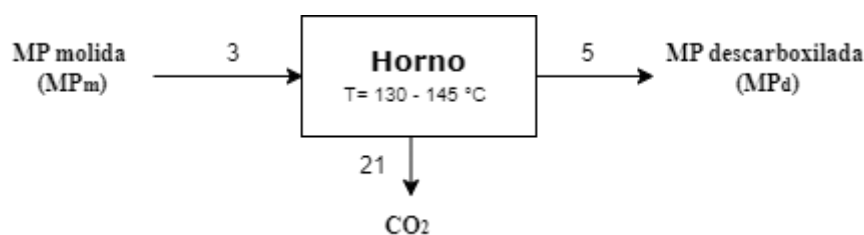


Figura 24: Diagrama de flujo de la etapa de descarboxilación.

Equipo de descarboxilación

El equipo propuesto para esta etapa es un horno de vacío, ya que, proporciona un entorno controlado de temperatura para este proceso y minimiza la exposición del material al oxígeno, lo que evita la degradación de los cannabinoides y los terpenos debido a la oxidación. Además, el vacío reduce el punto de ebullición de los compuestos volátiles, disminuyendo los riesgos de degradación térmica de los componentes sensibles de la materia prima.

En la Figura 25 puede verse una imagen del horno de vacío seleccionado. Para más detalles, la ficha técnica del equipo, del fabricante *Thermo Fisher Scientific*, en la siguiente referencia (Thermo Fisher, s.f.). También se visualizan las características principales del equipo en el Anexo 1.



Figura 25: Horno de vacío Vacutherm (Thermo Fisher, s.f.).

Balances de materia en la etapa de descarboxilación

A continuación, se llevarán a cabo las consideraciones necesarias para luego plantear las ecuaciones para los balances de materia en esta etapa.

Consideraciones:



La reacción química de descarboxilación del CBDA a CBD y dióxido de carbono (CO₂) se representa por la siguiente ecuación:



En términos de moles, la relación estequiométrica es 1:1, lo que significa que se requiere un mol de CBDA para producir un mol de CBD y un mol de CO₂. Sin embargo, debido a las diferencias en los pesos moleculares del CBDA y el CBD, se debe utilizar un factor de conversión para calcular la cantidad de CBD formado por gramo de CBDA.

La ecuación propuesta por (Laura J. Rovetto, Supercritical carbon dioxide extraction of cannabinoids from *Cannabis sativa L.* plant material, 2017) para calcular el porcentaje total de CBD después de la descarboxilación, considerando tanto el CBD como el CBDA inicial, es:

$$\%CBD_{TOTAL} = \%CBD + (\%CBDA * 0.877)$$

Donde:

- $\%CBD_{TOTAL}$: Porcentaje total de CBD después de la descarboxilación
- $\%CBD$: Porcentaje de CBD en su forma neutra antes de la descarboxilación
- $\%CBDA$: Porcentaje de CBDA en su forma ácida antes de la descarboxilación
- El factor de conversión de 0.877 se deriva de la relación entre los pesos moleculares del CBD (314 g/mol) y el CBDA (358 g/mol).

Esta ecuación permite estimar el potencial de CBD que puede alcanzar una planta vegetal después de la descarboxilación completa.

Según (Laura J. Rovetto, Supercritical carbon dioxide extraction of cannabinoids from *Cannabis sativa L.* plant material, 2017), una vez culminado este proceso se espera que la humedad sea aproximadamente del 2,5%.

Se plantea un balance de materia total en el horno:

$$M3 = M21 + M5$$

Y se relaciona la composición másica de CBD en la corriente de salida ($w_{CBD,4}$) con las composiciones másicas de CBD y CBDA en la corriente de entrada ($w_{CBD,2}$ y $w_{CBDA,2}$) según la siguiente ecuación.

$$w_{CBD,4} = w_{CBD,2} + w_{CBDA,2} * 0,877$$

3.5.4. Balance de masa total de la etapa de pretratamiento

En la sección 3.2, se definió el equipo de extracción del proyecto teniendo en cuenta la estimación de demanda calculada en la sección 3.1. Teniendo en cuenta, que el extractor



“The Bambino” tiene capacidad de procesar 4,54 kg/día de materia prima se considera como base de cálculo para los balances de materia, un flujo de materia prima de 5 kg/día.

Además teniendo en cuenta todas las consideraciones y ecuaciones indicadas en cada etapa, se muestra en la *Tabla 11* el balance de masa total de las corrientes de la etapa de pretratamiento.

Tabla 11: Balance de masa de las corrientes principales en la etapa de pretratamiento.

Corriente	1	2	3	4
Flujo total [kg/día]	5,00	4,85	0,15	4,85

Finalmente, en la corriente 4 se obtienen 4,85 kg de materia prima molida y descarboxilada lo cual se procesa en la etapa de extracción.

3.6. Etapa 2: Extracción con CO₂ supercrítico

Una vez realizados los tratamientos previos, el material vegetal se encuentra en las condiciones apropiadas para realizar la extracción con CO₂ supercrítico.

En la *Figura 26* se presenta un diagrama de bloques simplificado de la etapa de extracción con CO₂ supercrítico.

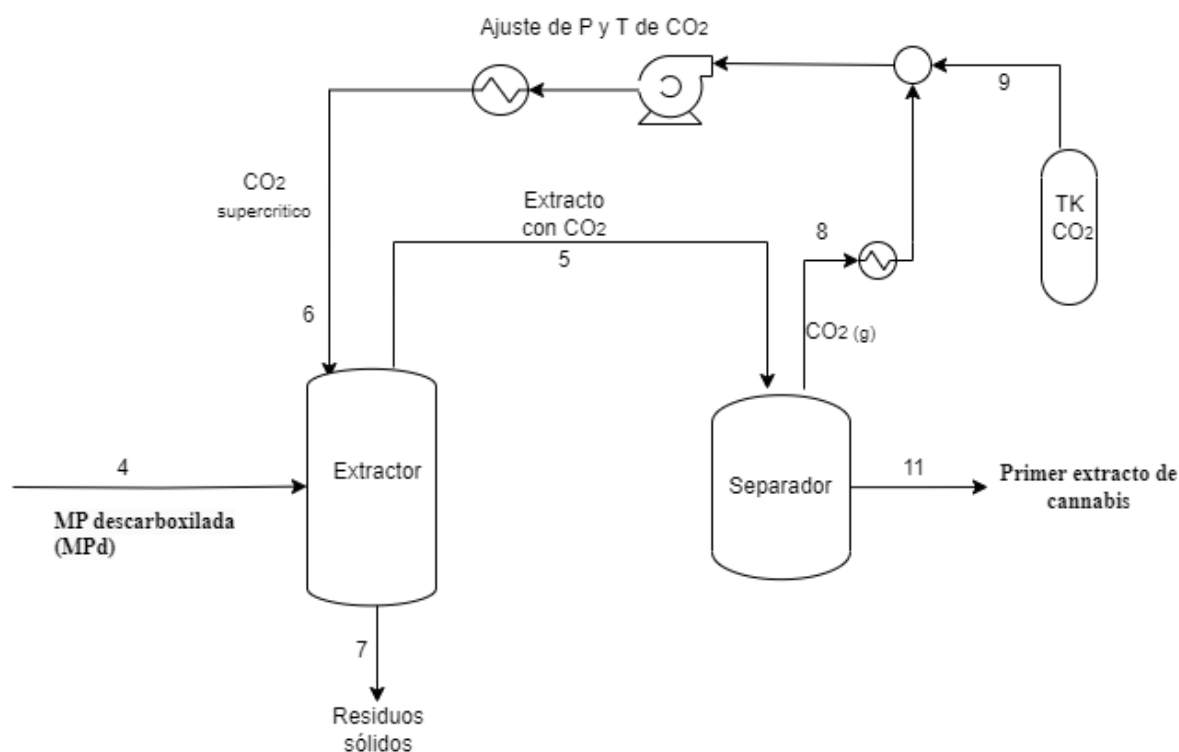


Figura 26: Diagrama de flujo de la etapa de extracción con CO₂ supercrítico.

Este método de extracción cuenta con las siguientes subetapas:

- 1 Carga del extractor:** La materia prima pretratada se carga en el extractor.
- 2 Ajuste de P y Temperatura de CO₂:** Se sabe que el punto crítico del CO₂ es: $T_c = 31,06\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $P_c = 73,8\text{ bar}$. Por lo cual se realiza:
 - Presurización, en el cual se debe alcanzar la presión crítica necesaria del solvente mediante una bomba o un compresor.
 - Ajuste de temperatura, donde el CO₂ alcanza la temperatura crítica necesaria a través de un intercambiador de calor.
- 3 Contacto con la materia prima:** El CO₂ supercrítico se pone en contacto con la materia prima en el extractor. Los cannabinoides y otros compuestos solubles se disuelven en el CO₂.

- 4 **Separación del extracto:** El CO₂ rico en cannabinoides se separa de la materia prima residual. En el separador, se reduce la presión y/o se ajusta la temperatura para cambiar el CO₂ supercrítico de vuelta a su estado gaseoso, dejando los compuestos disueltos en forma líquida o en un extracto
- 5 **Recolección del extracto:** El extracto de cannabis se recolecta y se almacena en un recipiente adecuado.

La extracción con CO₂ supercrítico es un proceso altamente versátil y controlable. Varios estudios sobre la extracción de cannabinoides con fluidos supercríticos han destacado la importancia de optimizar las variables del proceso, especialmente la presión y la temperatura, para lograr un rendimiento óptimo de extracción.

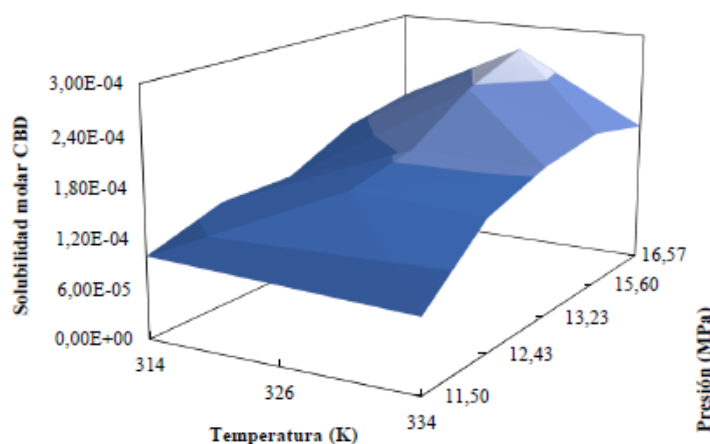


Figura 27: Solubilidad molar CBD en función de P y T en condiciones supercríticas. (Perrotin, 2011)

La Figura 27 representa la variación de la solubilidad molar del CBD con la presión y la temperatura en condiciones supercríticas. Puede observarse que tanto la presión como la temperatura influyen de forma conjunta en la solubilidad molar del CBD en CO₂ supercrítico. Cabe resaltar además, como se ve en la

Tabla 12 que la presión tiene un mayor predominio dado que en todo el rango evaluado de esta variable al incrementar su valor se obtiene un mayor aumento en la solubilidad respecto al aumento de la temperatura.

Tabla 12: Variación de solubilidad molar del CBD al modificar presión y temperatura. (Perrotin, 2011)

$T=315\text{ K}$		$T=326\text{ K}$		$T=334\text{ K}$	
$P\text{ (MPa)}$	$10^4\ \gamma_{CBD}$	$P\text{ (MPa)}$	$10^4\ \gamma_{CBD}$	$P\text{ (MPa)}$	$10^4\ \gamma_{CBD}$
11.3	1.00 ± 0.10	11.8	0.94 ± 0.09	11.4	0.88 ± 0.09
11.8	1.25 ± 0.12	12.4	1.67 ± 0.17	11.8	1.22 ± 0.12
12.3	1.30 ± 0.13	12.8	1.90 ± 0.19	12.6	1.59 ± 0.16
13.2	1.30 ± 0.13	13.3	1.86 ± 0.19	13.2	1.85 ± 0.18
13.7	1.41 ± 0.14	13.6	2.22 ± 0.22	14.6	1.75 ± 0.17
14.3	1.66 ± 0.17	15.5	2.37 ± 0.24	15.9	1.97 ± 0.20
15.4	1.70 ± 0.17	16.5	2.67 ± 0.27	16.4	1.79 ± 0.18
15.7	1.61 ± 0.16	19.4	2.69 ± 0.27	17.0	1.74 ± 0.17
16.8	1.87 ± 0.19			17.5	1.86 ± 0.19
17.3	1.85 ± 0.18			18.8	1.84 ± 0.18

Como el fluido supercrítico tiene la capacidad de modificar su densidad, y por tanto su capacidad disolvente, al ir ajustando las condiciones de extracción (presión y temperatura), es posible obtener distintos extractos tanto en composición como en color según las condiciones de operación de los equipos.

Dado que el CO_2 es gas en condiciones atmosféricas, el extracto del fondo del separador se recoge libre de disolvente. Se obtiene un extracto crudo de cannabis (primer extracto de cannabis) el cual contiene todos los cannabinoides y otros compuestos presentes en la planta.

Equipo de extracción

El equipo propuesto para esta etapa corresponde a un extractor por fluido supercrítico de los datos del proveedor *Apeks Supercritical*, incluido en el *Anexo 1*.



Figura 28: Imagen del extractor por fluido supercrítico “The Bambino”.

Este equipo consta de:



- Tanque presurizado donde se lleva a cabo la extracción (Extractor).
- Bomba para comprimir el CO₂ y alcanzar la presión crítica
- Intercambiador de calor para alcanzar la temperatura crítica
- Separador: Recipiente donde se separa el CO₂ rico en cannabinoides de la materia prima residual.

Acorde a la ficha técnica y las referencias mencionadas los parámetros de operación elegidos serán:

- Presión max. extractor: 137 bar
- Temperatura max. extractor: 71 °C
- Flujo de CO₂: 0,4 Kg/min
- 95% recuperación de gas CO₂, sistema de circuito cerrado

Balances de materia en la etapa de extracción con fluido supercrítico

El **rendimiento total del proceso de extracción** se puede definir como la cantidad de extracto obtenido con respecto a la cantidad de materia prima (flores secas de cannabis) que ingresa al proceso de extracción. Matemáticamente, esto se presenta en la siguiente ecuación.

$$R_{total} = \frac{M_{extracto}}{M_{MP}} * 100$$

Donde:

- R_{total}: Cantidad de extracto obtenido con respecto a la cantidad de materia prima que ingresa (%).
- M_{extracto}: Masa de extracto obtenida (kg), en este caso será la masa de extracto en la corriente 11.
- M_{MP}: Masa de materia prima, en este caso la materia prima molida y descarboxilada.

Se toman en cuenta los datos proporcionados por el fabricante, por utilizar una genética rica en CBD, se considera un rendimiento del 20 %, tal como se indica en la *Tabla 13*.

Tabla 13: Rendimientos de extracción según materia prima.

Material original	Duración del ciclo (hr)	Ejecución/Día	Materia prima procesada por Día (g/día)	Materia prima procesada por Día (lbs/día)	Calidad del material original	Rendimiento medio (%)	Rendimiento medio por Ejecución (g)	Rendimiento medio por Día (g/día)
Cannabis	5,0	4,0	4540	10	Bajo	7%	79	318
					Medio	14%	159	636
					Alto	20%	227	908

Por lo tanto, se tiene que el caudal de extracto obtenido en la corriente 11, se calcula con la siguiente ecuación.

$$M_{ext} = M_{11} = M_{MP,4} * 0,20 = 4,85 * 0,20 = 0,97 \text{ kg/día}$$



Teniendo en cuenta que el equipo realiza 4 ciclos por día. Por ciclo de extracción se obtienen 0,24 kg de extracto crudo/ciclo.

El caudal de CO₂ se especifica en 0,4 kg/min, por cada ciclo de 5 horas se utilizarán 120 kg/ciclo, y en un día se necesitarán 480 kg de CO₂

La corriente 11 será un aceite rico en cannabinoides y terpenos, separado de los sólidos inertes presentes en la materia prima vegetal en el extractor. Por lo que la cantidad de residuos sólidos inertes se obtienen con la siguiente ecuación.

$$M_{inertes} = M_7 = M_4 \times w_{inertes,4} = 4,85 \times 0,66 = 3,21 \text{ kg/día}$$

Dado que el CO₂ es gas en condiciones atmosféricas, el extracto del fondo del separador se recoge libre de disolvente. A este extracto se le denomina “Aceite crudo de cannabis”.

3.7. Etapa 3: Purificación del aceite

Después de la etapa de extracción con CO₂ supercrítico, se obtiene el extracto crudo de cannabis, el cual es rico en una variedad de compuestos, como cannabinoides, terpenos y flavonoides, pero también puede contener ceras y otros componentes no deseados.

A medida que se llevan a cabo las operaciones unitarias en la etapa de purificación se pueden obtener varios productos y subproductos de mayor valor agregado.

Para este trabajo se utilizarán las operaciones de winterización y evaporación. En el proceso de winterización se eliminan los lípidos, grasas y ceras sólidas del extracto crudo, lo que mejora la claridad, estabilidad y pureza del aceite final, luego se evapora el etanol del extracto y se obtiene un aceite de cannabis purificado.

3.7.1. Winterización y recuperación de solvente

En la Figura 29 se presenta el diagrama de bloques simplificado de la etapa de purificación:

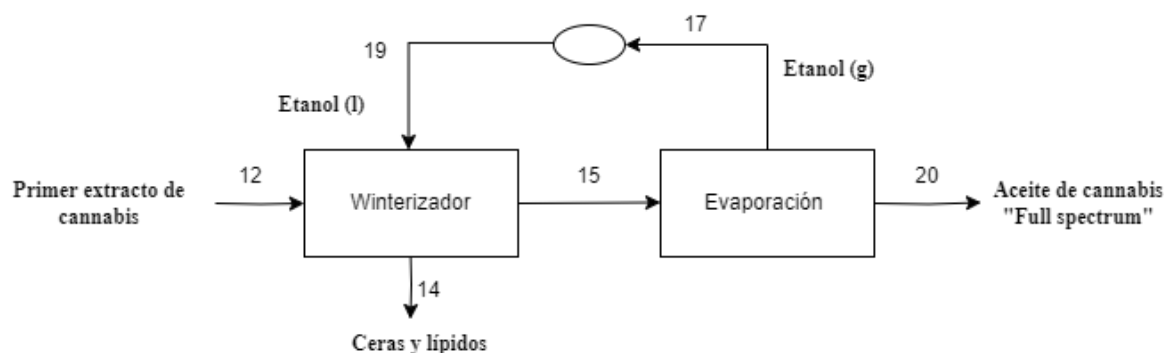


Figura 29: Diagrama de flujos de la etapa de purificación.

Según (Garrido, 2021) consiste en las siguientes subetapas:

1. **Mezcla del extracto con etanol:** el primer paso es disolver el extracto crudo de cannabis en un solvente, generalmente etanol, para crear una solución homogénea. El etanol disuelve los cannabinoides deseados, separándolos de los materiales vegetales no deseados.
2. **Enfriamiento de la mezcla:** la solución de disolvente y extracto de cannabis se enfría a una temperatura de entre -20 °C y -40 °C durante 24 a 48 horas. Este proceso hace que las grasas, ceras y lípidos se solidifiquen, lo que permite separarlos de los cannabinoides, que permanecen disueltos en el etanol frío.
3. **Filtración:** la mezcla enfriada se pasa a través de un sistema de filtración para separar las grasas y ceras solidificadas, el resultado es un extracto de cannabis con etanol. El grupo de grasas y ceras son de origen vegetal, por lo que pueden ser procesadas y obtener productos como aceites vegetales, esto es tenido en cuenta como posible subproducto.
4. **Evaporación de etanol y obtención del producto final:** el etanol se elimina por evaporación en el extracto. El producto final es un extracto concentrado libre de materiales vegetales no deseados, denominado también aceite de cannabis “full spectrum” ya que contiene variedad de cannabinoides y terpenos.

Finalmente, el extracto de cannabis resultante se recolecta en un tanque de almacenamiento.

Equipos de la etapa de purificación

El equipo propuesto para esta etapa de winterización llamado *ApolloXStill* de *Socal Biomed* se muestra en la *Figura 30*. El mismo incluye el tanque de mezcla con chaqueta de enfriamiento, y un filtro que permite cambiar el método de filtración. Los métodos de filtración utilizados y la medida en que se utilizan varían en función del tipo de producto y la calidad deseada del producto final.



Figura 30: Equipo ApolloXStill de winterización de Socal Biomed (biomed, s.f.).

Para la recuperación de solvente, se decide utilizar un evaporador rotatorio del fabricante *Steinberg Systems*, como el que se muestra en la *Figura 31*.



Figura 31: Evaporador rotatorio de recuperación de solvente. (Steinberg-systems, s.f.)

Las características técnicas de ambos equipos se pueden ver en el *Anexo 1*.

Teniendo en cuenta estos equipos para la etapa de winterización, según lo indicado por los fabricantes se utilizan los siguientes parámetros operativos:

Winterizador

- Temperatura de enfriamiento: Rango de -20 a -40 °C.
- Tiempo de enfriamiento: 24 horas.
- Tipo de solvente: Etanol de grado alimenticio.
- Relación extracto/solvente: 1 g/10 ml etanol

Evaporador

Según lo indicado por el fabricante, tiene una velocidad de rotación de 120 rpm. En un rango de trabajo de 0-99 °C, la temperatura puede ajustarse al grado exacto para garantizar la temperatura óptima de evaporación del líquido.

Balances de materia en la etapa de purificación

Dado que la etapa de winterización se opera en batch con un tiempo de operación de 24 hs, lo que ingresa a esta etapa será lo obtenido en un día de la etapa de extracción, entonces se asume que:

$$M_{12} = 0,97 \frac{kg}{batch}$$



Por cada g de extracto se emplean 10 ml de etanol frío (densidad 0,79 kg/L) en el proceso de winterización. Por lo que la cantidad necesaria de etanol se representa según la siguiente ecuación:

$$M_{19} = 970 \text{ g} \times 10 \frac{\text{ml}}{\text{g}} = 9,7 \frac{\text{L}}{\text{batch}} = 7,66 \frac{\text{kg}}{\text{batch}}$$

Se asume que se separa al 100 % de las ceras del extracto. Por lo que la composición másica de ceras y lípidos en el extracto crudo será igual a la cantidad de ceras que ingresan, lo cual es igual a lo que se separa en la corriente 14:

$$M_{14} = w_{\text{ceras},11} \times M_{12} = 0,10 \times 0,97 \frac{\text{kg}}{\text{batch}} = 0,097 \frac{\text{kg}}{\text{batch}}$$

El balance de masa total en el winterizador, se representa con la siguiente ecuación:

$$M_{12} + M_{19} = M_{14} + M_{15}$$

Obteniendo el caudal de extracto de cannabis con etanol, el cual se evapora completamente en el evaporador. Se considera que la recirculación de etanol es del 95 %, considerando que existen pérdidas. La corriente de entrada al evaporador será:

$$M_{15} = 8,53 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

Cuya composición másica (%p/p) será de 89 % etanol, y 11 % soluto (cannabinoides y otros compuestos).

Finalmente, la ecuación de balance de masa total de la etapa de purificación será:

$$M_{12} = M_{14} + M_{20} + \text{perdidas de etanol}$$

Donde $M_{18} = 0,38 \frac{\text{kg etanol}}{\text{día}}$ y las pérdidas de etanol en el evaporador, se obtiene haciendo un balance de etanol en el mismo, obteniendo 0,32 kg/día.

Despejando de la ecuación de balance total, se obtiene:

$$M_{20} = 0,94 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

Considerando un balance de CBD total en todo el proceso, se obtiene la composición de CBD en la corriente 20, representado en la siguiente ecuación,

$$M_4 \times w_{\text{CBD},4} = M_{19} \times w_{\text{CBD},19}$$

La composición másica de CBD en la corriente 4 se obtuvo luego de la etapa de descarboxilación de la materia prima. Con la ecuación:

$$w_{\text{CBD},4} = w_{\text{CBD},2} + w_{\text{CBDA},2} \times 0,877 = 0,12$$



Por lo tanto, se calcula la composición másica de CBD con la siguiente ecuación:

$$w_{CBD,20} = \frac{(4,85 * 0,12)}{0,94} = 0,62$$

Finalmente, se obtiene una producción total de **0,94 Kg/día** de aceite de cannabis de espectro completo, libre de solventes, con un 62 % de CBD.



3.8. Resumen del balance de materia

Se presenta a modo de resumen en la

Tabla 14 las cantidades de materia prima, insumos y productos finales obtenidas en cada etapa del proceso.

Tabla 14: Resumen de balance de materia en cada etapa del proceso de extracción. (Elaboración propia).

Etapa	Cantidad	Valor [Kg/día]
Pretratamiento	Materia prima inicial	5
Extracción	Materia prima pretratada	4,85
	Aceite crudo de cannabis obtenido	0,97
	CO ₂ que ingresa al extractor	480
Purificación	Etanol que ingresa al winterizador	7,66
	Aceite de cannabis obtenido	0,94

3.9. Flow-sheet del proceso global

En la *Figura 32* se muestra el diagrama de flujo de las corrientes de entrada y salida de todo el proceso de extracción, con las correspondientes referencias de los equipos involucrados.

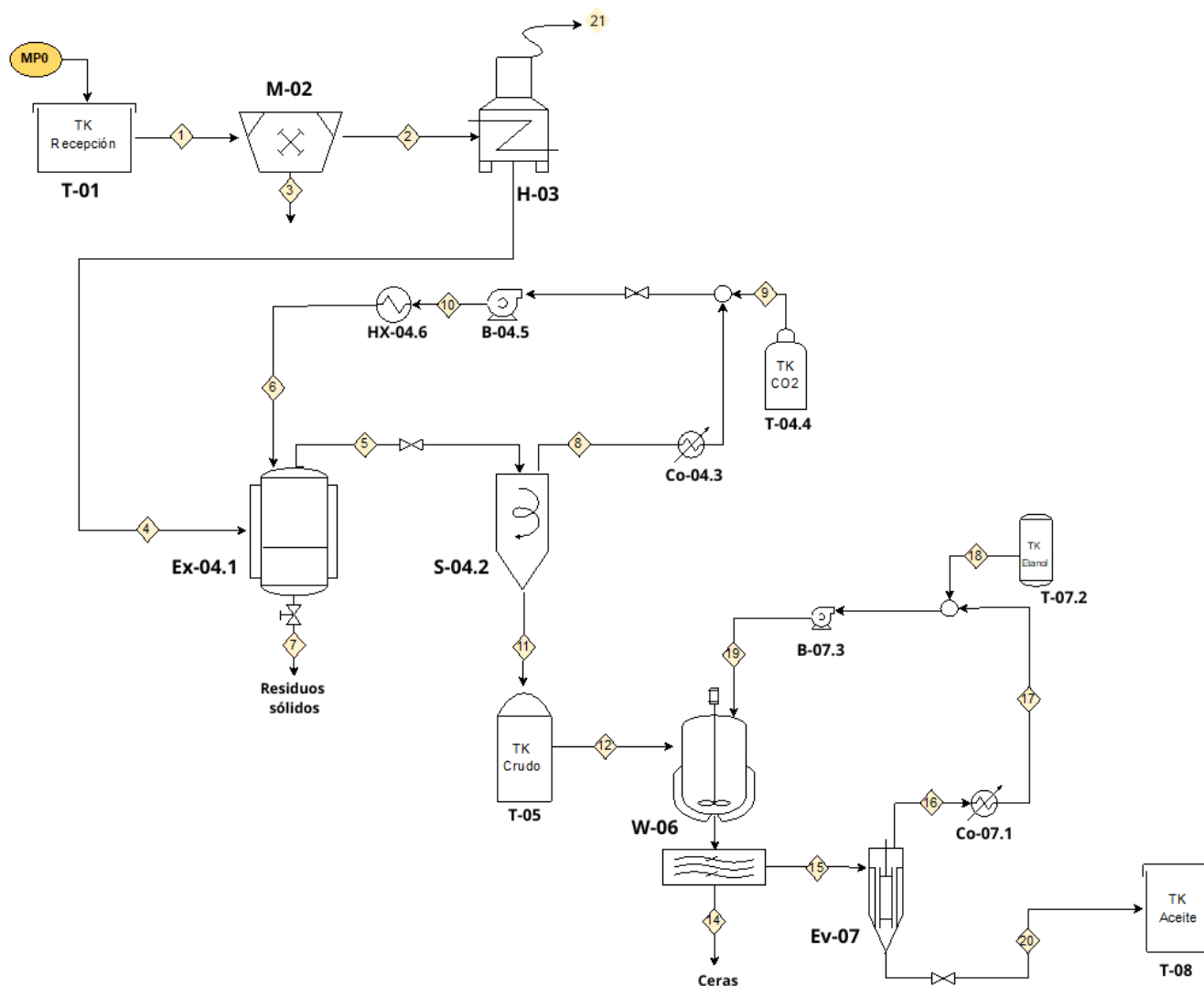


Figura 32: Diagrama de flujo de entradas y salidas del proceso global de extracción.



Referencias del Flowsheet:

T-01: Tanque de recepción de Materia prima
M-02: Molino
H-03: Horno de descarboxilación
Ex- 04.1: Tanque de extracción
S-04.2: Separador
Co-04.3: Condensador
T-04.4: Tanque de almacenamiento de CO ₂
B-04.5: Bomba impulsora de CO ₂
HX-04.6: Intercambiador de calor
T-05: Tanque de recepción del primer extracto crudo
W-06: Winterizador (Tanque de mezcla + Filtro)
Ev-07: Evaporador
Co-07.1: Condensador
T-07.2: Tanque de almacenamiento de etanol
B-07.3: Bomba
T-08: Tanque de almacenamiento de producto final



3.10. Dimensionamiento de equipos

A partir del balance de masa realizado para el proceso de extracción de aceite de cannabis, se realizó el dimensionamiento y selección de los equipos necesarios para el mismo.

Se tiene como base, la selección del extractor “*The Bambino*”, el cual tiene una capacidad de procesar 4,54 kg de materia prima por día. La planta operará 30 días al mes, 20 horas al día (4 ciclos de 5 horas cada uno).

En la siguiente sección, se detallan en profundidad los equipos mencionados.

3.10.1. Etapa 1: Pretratamiento

Equipo 1: Tanque de recepción

El tanque de recepción debe ser capaz de almacenar la cantidad de materia prima necesaria para garantizar la producción. Por lo tanto, el volumen de almacenamiento requerido se calcula considerando, como margen de seguridad, el inventario necesario de materia prima para al menos 3 días de operación, esto asegura que el proceso pueda continuar funcionando en caso de retrasos en la logística, o problemas operativos.

Por lo tanto, la capacidad de almacenamiento de materia prima del tanque será:

$$\text{Capacidad del tanque} = 4,54 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \times 3 \text{ días} = 13,62 \text{ kg}$$

De acuerdo con el trabajo (ROGGEN, 2017), se indica que el material de la planta de cannabis no molido experimenta densidades de empaquetamiento de 100-125 g/L. Por lo tanto, el volumen del tanque requerido será:

$$\text{Volúmen del tanque} = \frac{13,62}{0,1} = 136 \text{ L}$$

Las especificaciones operativas del tanque de recepción serán

- Material: Acero inoxidable 304, resistente a la corrosión y adecuado para productos naturales.
- Forma: Cilíndrico con fondo cónico para facilitar la descarga.
- Capacidad: 136 L
- Condiciones de operación: Temperatura ambiente, sellado hermético para evitar la entrada de humedad y contaminantes.



Equipo 2: Molino de cuchillas

Se ha seleccionado el equipo *Pulverisette 19* (Lab, s.f.) del fabricante *FRITSCH*. Este equipo, cumple con todos los requisitos técnicos y operativos del proceso, incluyendo capacidad, tamaño de partícula y control térmico.

El molino tiene una capacidad de 60 L/h de material seco. De acuerdo con el trabajo (ROGGEN, 2017), se indica que el material de la planta de cannabis molido generalmente experimenta densidades de empaquetamiento de 225-250 g/L. Por lo tanto, este equipo puede procesar aproximadamente 15 kg/h de materia prima. Las necesidades del proceso de extracción son de 4.54 kg/día de materia prima, lo que representa solo una fracción de la capacidad del molino, asegurando una operación eficiente y libre de sobrecargas. Aunque las necesidades actuales del proceso son inferiores a la capacidad del molino, esta diferencia proporciona un margen para futuras expansiones de la capacidad de producción, permitiendo mantener el equipo en operación incluso si se aumenta significativamente la escala del proyecto.

Equipo 3: Horno de descarboxilación

Los hornos de vacío *Vacutherm* (Thermo Fisher, s.f.) del fabricante *Thermo Fisher*, ha sido elegido en función de los requerimientos técnicos y operativos del proceso, asegurando un desempeño eficiente y seguro para convertir los cannabinoides en su forma neutra mediante la aplicación controlada de calor.

Para nuestros propósitos se selecciona el tamaño de 25 L. Esto se adecúa a las necesidades de producción diaria estimadas de 4.54 kg/día. Además, esta capacidad asegura un margen operativo adicional, permitiendo absorber posibles incrementos de escala en el proyecto sin necesidad de reemplazar el equipo.

3.10.2. Etapa 2: Extracción

Equipo 4: Equipo de extracción con CO₂

Para la etapa de extracción de cannabinoides, se seleccionó el Extractor “*The Bambino*” de *Apeks Supercritical* (USA) (ver *Anexo 1*). Este equipo fue elegido con base en su capacidad de producción, adecuación a la demanda actual del proyecto, analizado en la *sección 3.2* de este trabajo. Este equipo tiene un volumen del tanque extractor de 5 L, con una capacidad de carga de materia prima de 1,36 kg por ciclo.

3.10.3. Etapa 3: Purificación

Equipo 5: Winterizador

Se selecciona el equipo *ApolloXStill* (biomed, s.f.), diseñado específicamente para la filtración de soluciones.



Dado que el proceso de winterización se lleva a cabo en lotes de 24 horas, el tanque debe tener capacidad para al menos 9 kg de mezcla. Por lo cual se selecciona un tanque con una capacidad de 10-15 L, contemplando un margen.

Equipo 6: Evaporador

Con este equipo, se pretende evaporar todo el etanol del extracto winterizado.

El caudal de entrada al evaporador sería de 0,35 kg/h. El evaporador *Steinberg Systems SBS-RV-2000* (Steinberg-systems, s.f.) tiene una capacidad máxima de evaporación de 1,5 L/h, pudiendo cumplir con la demanda diaria, y asegurando un margen de seguridad en caso de incrementos en la producción o ajustes operativos. Contiene un matraz de baño de 5 L y un matraz giratorio de 5 L. El matraz colector tiene un volumen de 1 L.

En la *Tabla 15* se muestran los equipos utilizados en el diseño de este proceso.

Tabla 15: Equipos seleccionados para el proceso y sus capacidades.

Etapa	Equipo	Tamaño
Recepción	Tanque de recepción	Volumen = 136 L
Molienda	Molino de cuchillas	Capacidad = 15 kg/h
Descarboxilación	Horno de vacío	Capacidad = 25 L
Extracción	Extractor “ <i>The bambino</i> ”	Capacidad de MP extractor = 1,36 kg
Winterización	Equipo de filtración	Volumen = 10 L
Evaporación	Evaporador rotativo	Volumen colector = 1 L



4. Análisis económico

El objetivo de este capítulo es evaluar la factibilidad económica del proyecto de extracción de cannabis para uso medicinal. Para esto, se calculará la inversión inicial y los costos operativos recurrentes, se determinarán los ingresos esperados cuando el proyecto ya se encuentre en marcha y se calcularán los flujos netos de caja. A partir de esto, se calcularán dos indicadores de rentabilidad: el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR). En la evaluación de los costos de equipos, y los precios de la materia prima y los productos terminados se utiliza la moneda del dólar estadounidense (USD).

4.1. Análisis de costos

A continuación, se realizará la estimación de los costos para cada una de las etapas del proceso, contemplando el costo de las materias primas requeridas para cumplir con la producción estimada, así como el precio de los equipos que fueron determinados en el capítulo anterior.

4.1.1. Inversión inicial

La inversión inicial abarca todos los gastos necesarios para que el proyecto esté completamente operativo. Se calcula como la suma del capital fijo, más el capital circulante. Para la estimación del capital fijo (CF), se utiliza el método de los factores relativos para plantas de proceso basados en el costo de equipos, se utiliza la columna que contiene los factores para Planta que procesa sólidos y fluidos. (Peters, 1978)

Costos Directos

Equipos: Se analizan los costos de los principales equipos del proceso. En la *Tabla 16* se especifican sus precios, y la referencia de donde se obtiene el valor.



Tabla 16: Equipos utilizados en el diseño del proceso, con su precio y referencia.

Equipos	Costo FOB [USD]	Referencia
Tanque de recepción	1.200	(TANKS, s.f.)
Molino de cuchillas	26.800	(globalgilson, s.f.)
Horno de vacío	7.700	(thermobid, s.f.)
Extractor “The bambino”	114.250	(SUPERCRITICAL, s.f.)
Winterizador	8.990	(biomed, s.f.)
Evaporador	940	(Steinberg-systems, s.f.)
Total	159.880	

En base a este valor y teniendo en cuenta que los equipos son importados, se considera que el costo de equipos puestos en el lugar de instalación de la planta como un 25% más del costo FOB total, por lo tanto, el **costo de equipos adquiridos y entregados en la planta será de 199.850 USD.**

- **Costos de instalación:** Incluye la puesta en marcha del proyecto, costos de permisos y licencias, costos de las instalaciones y calibración de los equipos e instalaciones eléctricas. De acuerdo a la tabla, se estima que representan un 39% del costo de los equipos principales.
- **Costo de Instrumentación y controles (instalados):** se estima que representan un 13% del costo de los equipos principales.
- **Cañerías y tuberías:** El costo de las cañerías e instalaciones se estima que representan un 31% del costo de los equipos principales.
- **Instalaciones eléctricas:** El costo de las instalaciones eléctricas consiste principalmente en mano de obra y materiales necesarios para suministrar potencia e iluminación al proceso, estos representan un 10% del costo de los equipos principales.
- **Obras civiles (incluyendo servicios):** Este costo incluye los gastos de mano de obra, materiales, y suministros involucrados en la construcción de todos los edificios conectados con la planta. De acuerdo a la tabla, se estima que representan un 29% del costo de los equipos principales.
- **Servicios auxiliares:** Corresponden a las instalaciones para proveer los servicios auxiliares de la planta como vapor, agua, energía, aire comprimido, etc. Esto se representa como un 55% del costo de los equipos principales.



Costos Indirectos

Se refiere a los costos de los factores que no están directamente relacionados con la instalación de la planta, como la ingeniería y supervisión, gastos de construcción, cuestiones legales, honorarios de contratistas, y eventuales. Estos costos representan aproximadamente un 120% del costo de los equipos principales.

A partir de este análisis, para calcular el monto de la inversión de capital fijo, se suma el total de costos directos e indirectos, lo que resulta en el siguiente cálculo:

$$\text{Inversión capital fijo} = \text{Costos directos} + \text{Costos indirectos} = 793.404 \text{ USD}$$

Además, el capital circulante de trabajo (CCN) se considera como un 15% de la inversión total. Por lo cual, la inversión inicial total se calcula como:

$$\text{Inversión inicial total} = \frac{793.404}{0.85} \text{ USD} \approx 933.418 \text{ USD}$$

4.1.2. Costos operativos

Los costos operativos corresponden a los gastos recurrentes durante la operación continua del proyecto. Estos costos incluyen las siguientes categorías:

- **Materia prima e insumos:** Los costos más importantes de materia prima son los relacionados con la adquisición de las flores de cannabis secas. Los mismos se estiman teniendo en cuenta que en mercados como EE.UU. y Europa, el precio promedio para cogollos medicinales oscila entre 2 y 5 USD por gramo, dependiendo de la calidad y certificación del producto. En Argentina, empresas como *Cannava*, con base en Jujuy, operan bajo un marco de acceso regulado para el cannabis medicinal. Aunque no publican precios explícitos, los costos en el mercado argentino suelen ser más bajos debido a factores como salarios locales más competitivos y políticas de promoción de cultivos medicinales locales (Infobae, s.f.). Se estima un precio de 1 USD por gramo de materia prima.

Con el proceso diseñado, se estimó una cantidad inicial de materia prima de 5 kg/día, si la planta opera 365 días al año, entonces serán necesarios 1.825 kg/año.

En cuanto a los insumos necesarios, se necesitan:

- 24 kg/día de CO₂, lo que equivale a 8760 kg/año.
- 0,383 kg/día de etanol, equivalente a 139 kg/año.

El costo de materia prima junto con los costos de los insumos necesarios para cumplir con la proyección anual, se detallan en la *Tabla 17*.



Tabla 17: Costos de materia prima e insumos necesarios para la extracción.

Materia prima / Insumo	Precio por kg [USD]	Cantidad necesaria [kg/año]	Costo anual [USD/año]
Flores de cannabis secas	1.000	1.825	1.825.000
CO ₂	2,5	8.760	21.900
Etanol	1	139	139
Total			1.847.039

- **Mano de Obra:** Salarios y beneficios del personal técnico, administrativo y de apoyo. Se incluye una estimación de los costos por empleado, incluyendo cargas sociales. En la Tabla 18 se muestra una estimación del personal necesario, su sueldo mensual con cargas sociales (se estiman en un 40% extra).

Tabla 18: Estimación de costos del personal necesario para el proyecto.

Personal	Sueldo mensual [USD]	Cargas sociales mensuales [USD]	Costo anual [USD]
3 operadores	1.800	720	30.240
Mantenimiento	500	200	8.400
Administrativo	450	180	7.560
Jefe de producción	700	280	11.760
Total			57.960

- **Mantenimiento:** Gastos periódicos de mantenimiento y reparación de equipos, incluyendo actualizaciones tecnológicas y posibles reemplazos de componentes críticos. Esto se estima en un 15% de los costos de los equipos principales, lo que equivale aproximadamente a 24.000 USD.
- **Costos de los servicios:** Esto incluye los costos de electricidad, agua y gas. Según datos del fabricante, el equipo de extracción (equipo que más electricidad utiliza del proceso) consume unos 13 kW, multiplicando por las 24 horas de operación al día, por los 365 días del año, serían unos 113.880 kWh/año. Para la provincia de Tucumán, el costo del kWh es de aproximadamente 0,1 USD/kWh. Este cálculo resultaría en unos 11.388



USD/año. Si consideramos que este costo representa el 40% del costo total de los servicios, entonces obtenemos el siguiente cálculo:

$$\text{Costos de servicios} = \frac{11.388 \frac{\text{USD}}{\text{año}}}{0,4} = 28.740 \text{ USD/año}$$

Sumando todos los valores estimados anteriormente, se obtienen los costos operativos anuales del proyecto, los que se componen de la siguiente manera:

$$\text{Costos operativos} = (1.847.039 + 57.960 + 24.000 + 28.740) \text{ USD/año}$$

$$\text{Costos operativos} = 1.957.739 \frac{\text{USD}}{\text{año}} \approx 1.960.000 \frac{\text{USD}}{\text{año}}$$

4.2. Análisis de ingresos

Para determinar los ingresos potenciales del proyecto, se han considerado las variables del volumen de producción de extracto y el precio de venta del mismo.

Basado en el análisis realizado en el *Capítulo 3*, el volumen de producción diario de aceite estimado es de 0,94 kg/día, equivalente a 343,1 kg/año. Considerando la densidad del aceite igual a 0,94 kg/L (Idárraga, Gil, & Orozco, 2023), se obtienen 365 L/año.

El producto será un aceite de cannabis denominado de “espectro completo”, ya que contiene diferentes cannabinoides, terpenos, flavonoides, además de otros compuestos activos de la planta de cannabis. La composición varía de acuerdo con la composición inicial de la materia prima. En este proyecto, al final del proceso de purificación se obtiene un producto con aproximadamente un 62% de CBD.

El mercado minorista de aceites de cannabis en frascos de 10 ml, con concentraciones de CBD entre el 5% y el 30%, presenta precios que oscilan hasta los 100 USD para el producto más concentrado. En este proyecto, el aceite producido tiene una concentración excepcionalmente alta del 62% de CBD, lo que lo posiciona como una materia prima ideal para proveedores que diluyen y producen aceites en las concentraciones más comunes para el consumidor final.

Los productos de aceites de cannabis medicinal que se encuentran en el mercado minorista, se encuentran generalmente en frascos de 10 ml, con concentraciones de CBD entre el 5 y el 30%. El precio de venta de un frasco de 10 ml de extracto al 30% de concentración de CBD es de alrededor de 100 USD. Como mencionamos anteriormente, en este proyecto el aceite producido tiene una concentración del 62% de CBD, lo que lo posiciona como una materia prima ideal para proveedores que necesitan aceites de alta concentración, o bien para aquellos que los diluyen y producen aceites en las concentraciones más bajas para el consumidor final.



Basándonos en los precios del mercado minorista y ajustando para la capacidad de dilución, el precio de venta al por mayor de un litro de aceite al 62% podría situarse alrededor de los 20.000 USD/L.

Teniendo en cuenta que el proyecto se llevará a cabo en Argentina, y que el aceite que se obtiene tiene una concentración superior al 60%, se toma un precio de venta unitario de 200 USD, por cada 10 ml de aceite al 60% de concentración de CBD, lo que equivale a 20.000 USD por cada litro de aceite.

Con estos valores podemos calcular la proyección de ingresos por ventas estimadas anuales:

$$\text{Ingresos por ventas} = 365 \frac{\text{L}}{\text{año}} * 20.000 \frac{\text{USD}}{\text{L}} = 7.300.000 \frac{\text{USD}}{\text{año}}$$



4.3. Evaluación económica

A continuación, se desarrollará la evaluación económica del proyecto de extracción de cannabis para uso medicinal, con el objetivo de determinar su rentabilidad y viabilidad a largo plazo. Para ello, se realizará una proyección de flujos de caja futuros y se utilizarán indicadores financieros clave, como el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR).

Proyecciones de flujo de caja

Las proyecciones de flujo de caja consisten en una estimación detallada de los ingresos y egresos del proyecto a lo largo de un horizonte de planificación de 10 años.

El flujo de caja neto (FCN) se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$FCN = -CF - CCN + R + (V - C - D) - t(V - C - D) + D$$

Donde:

- CF : Capital fijo
- CCN : capital circulante neto o capital de trabajo.
- R : Valor residual al año 11
- V : Ingresos por venta
- C : Costos operativos
- D : Depreciación (lineal)
- t : tasa de impuestos a las ganancias



Cálculo del Valor Actual Neto (VAN)

El VAN se utiliza para evaluar la viabilidad del proyecto calculando el valor presente de los flujos de caja futuros descontados a una tasa de descuento específica. La fórmula para el VAN se muestra en la siguiente ecuación.

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{FCN_t}{(1+r)^t} - Inversión\ Inicial$$

Donde:

- FCN_t = Flujo de caja neto en el año t
- r = Tasa de descuento (costo de oportunidad del capital)
- n = Número total de años en el horizonte de planificación

Cálculo de la Tasa Interna de Retorno (TIR)

La TIR es la tasa de descuento que hace que el VAN sea igual a cero. Se utiliza para medir la rentabilidad del proyecto. La fórmula implícita es:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{FCN_t}{(1+TIR)^t} - Inversión\ Inicial$$

La TIR se encuentra iterativamente y representa el rendimiento anual esperado del proyecto.

**Tabla con valores de la evaluación de la viabilidad económica del proyecto**

En la *Tabla 19* se muestran los valores para la evaluación de la viabilidad económica del proyecto de puesta en marcha de la planta para la producción de extractos de cannabis para uso medicinal analizada anteriormente.

Tabla 19: Valores de la evaluación de la viabilidad económica del proyecto.

Año	Inversión inicial [USD]	Ingresos por ventas [USD]	Costos operativos [USD]	Depreciación [USD]	Flujo de caja neto [USD]	Flujo de caja descontado [USD]
0	-933.418				-933.418	-933.418
1		7.300.000	-1.960.000	-57.600	5.282.400	4.593.391
2		7.300.000	-1.960.000	-57.600	5.282.400	3.994.253
3		7.300.000	-1.960.000	-57.600	5.282.400	3.473.264
4		7.300.000	-1.960.000	-57.600	5.282.400	3.020.229
5		7.300.000	-1.960.000	-57.600	5.282.400	2.626.286
6		7.300.000	-1.960.000	-57.600	5.282.400	2.283.727
7		7.300.000	-1.960.000	-57.600	5.282.400	1.985.850
8		7.300.000	-1.960.000	-57.600	5.282.400	1.726.826
9		7.300.000	-1.960.000	-57.600	5.282.400	1.501.588
10		7.300.000	-1.960.000	-57.600	5.282.400	1.305.728
Valor residual					51.273	11.021
					VAN	25.588.746
					TIR	479%

Donde:

- $\text{Flujo de caja descontado} = \text{Flujo de Caja Neto} / (1+r)^t$
- r : Tasa de descuento = 0,15
- t : Año



5. Conclusiones

Este trabajo se centró en el estudio teórico de la producción de extracto de cannabis medicinal.

Se realizó un análisis bibliográfico para estudiar las características de la planta de cannabis, su perfil químico y potencial medicinal. Además, se analizó el marco regulatorio vigente en Argentina, concluyéndose que la legislación actual ofrece un marco propicio, aunque aún en desarrollo, para la producción de cannabis medicinal bajo normativas estrictas y controladas.

Para la obtención del producto, se compararon diversos métodos de extracción, considerando parámetros como escalabilidad, rendimiento de la extracción, pureza del extracto, impacto ambiental y costos. Aunque la extracción con etanol presentó ventajas en términos de simplicidad y costos iniciales, se optó por la extracción con CO₂ supercrítico debido a su capacidad para garantizar un producto de calidad farmacéutica, minimizando residuos y alineándose con los requerimientos del proceso: Obtención de un extracto de cannabis de alta calidad, concentración y pureza. Proceso técnicamente eficiente y amigable con el medio ambiente. Cumplimiento de las regulaciones legales de la región.

En términos de demanda, se estimó una necesidad de 20,5 litros mensuales de extracto de cannabis medicinal para satisfacer el mercado objetivo en la región de Tucumán. Con base en estos datos, se diseñó un flujo de procesos (Flow-sheet) que incluyó las etapas de recepción, molienda, descarboxilación, extracción y purificación. A partir de dicho diseño, se realizaron balances de materia que permitieron determinar las cantidades necesarias de materia prima y los rendimientos en cada etapa del proceso.

Adicionalmente, se procedió al dimensionamiento de los equipos principales del proceso, seleccionando como equipo principal un sistema de extracción con CO₂ supercrítico a partir de los cálculos de la demanda. La selección de todos los equipos consideró las necesidades actuales de producción, y también se consideró la posibilidad de expandir la escala en el futuro, garantizando la flexibilidad operativa y la sostenibilidad del proyecto.

Finalmente, se realizó un análisis económico del proyecto, considerando un precio estimado de venta del aceite de cannabis medicinal al 60% de CBD de 20.000 USD/L. Los resultados indicaron un Valor Actual Neto (VAN) positivo de 25.588.746 USD y una Tasa Interna de Retorno (TIR) de 479% confirmando la viabilidad técnica y financiera del proyecto. Estos resultados evidencian que la propuesta es muy rentable.

En términos de impacto, este proyecto promueve la adopción de procesos estandarizados, seguros y sostenibles, fomentando el crecimiento de una industria con alto potencial terapéutico y económico. Asimismo, sienta las bases para futuras investigaciones y aplicaciones, posicionando a Tucumán como un referente en la producción de cannabis medicinal de alta calidad.



Por último, la sostenibilidad fue un pilar fundamental en el diseño del proceso. El uso de CO₂ supercrítico como solvente, junto con estrategias de reciclaje y minimización de residuos, asegura un impacto ambiental reducido y refuerza el compromiso con las tecnologías verdes. A medida que la regulación y el mercado del cannabis medicinal continúen evolucionando, el diseño planteado puede expandirse para satisfacer una mayor demanda, tanto en el ámbito local como internacional.



IV. Bibliografía

- Argentina, M. d. (2017). *Ley 27.350 - Cannabis Medicinal*.
- Argentina, M. d. (2022). *Ley 27.669: Desarrollo de la industria del cannabis medicinal y el cáñamo industrial*.
- Atance, J. A. (2017). EFECTOS TERAPÉUTICOS DE LOS CANNABINOIDES.
- biomed, S. (s.f.). Obtenido de <https://www.socalbiomed.com/by-application/cannabis/winterization/apolloxstill-industrial-winterization-filter-system.html>
- Conicet. (s.f.). Obtenido de <https://www.conicet.gov.ar/cannabis/por-que-esta-empresa/>
- Feruggio, A. C. (s.f.). Obtenido de https://www.industriacannabis.com.ar/documents/8/PRODUCCION_DE_CANNABIS_py_privado.pdf
- Garrido, L. (2021). Extracción de cáñamo.
- globalgilson. (s.f.). Obtenido de <https://www.globalgilson.com/fritsch-standard-universal-cutting-mill>
- Idárraga, A. M., Gil, V. D., & Orozco, C. G. (2023). *Densities and Viscosities of Cannabis Extracts and Distillates, and Densities, Viscosities, Fusion Enthalpy, and Melting Point of Cannabidiol*.
- imarcgroup. (2024). *Informe del mercado de cannabis legal por fuente (marihuana, cáñamo), derivados (cannabidiol (CBD), tetrahidrocannabinol (THC)), canal de distribución (tiendas recreativas, farmacias, tiendas en línea y otros), usuario final (uso médico, uso recreativo, u.* Obtenido de <https://www.imarcgroup.com/report/es/legal-cannabis-market>
- Infobae. (s.f.). Obtenido de <https://www.infobae.com/sociedad/2020/12/06/marihuana-legal-en-jujuy-viaje-al-interior-de-la-primera-finca-de-cannabis-del-pais/>
- Lab, L. (s.f.). Obtenido de <https://lavallab.com/products/crushers/cutting-mill/>
- Laura J. Rovetto, N. V. (2017). *Supercritical carbon dioxide extraction of cannabinoids*.
- Laura J. Rovetto, N. V. (2017). *Supercritical carbon dioxide extraction of cannabinoids from Cannabis sativa L. plant material*.
- Legends recovery center. (s.f.). Obtenido de <https://www.legendsrecovery.com/blog/difference-between-cbd-vs-thc>
- López, A. (2021). *La cadena de valor del cannabis*.



- Marilena Radoiu, H. K. (2020). *Microwave-Assisted Industrial scale cannabis extraction* .
- Mei, Y.-H. W. (2016). *Decarboxylation Study of Acidic Cannabinoids: A Novel Approach Using Ultra-High-Performance Supercritical Fluid Chromatography/Photodiode Array-Mass Spectrometry*.
- Moreno, T. (2020). Extraction of cannabinoids from hemp (*Cannabis sativa* L.) using high pressure solvents.
- Naturecan. (2024). Obtenido de <https://www.naturecan.es/pages/calculadora-dosis-cbd>
- Páez, M. A. (2016). *Guía de extracción por fluidos supercríticos: fundamentos y aplicaciones*.
- Perrotin. (2011). Sustainable Production of Cannabinoids with Supercritical Carbon Dioxide Technologies.
- Peters, M. (1978). *Diseño de Plantas y Su Evaluación Económica Para Ingenieros Químicos*,. Buenos Aires, Argentina.: Ed. Géminis.
- Ramírez, D. A. (2022). PROPUESTA DE DISEÑO DEL PROCESO DE OBTENCION DE CBD A PARTIR DE LA PLANTA DE CANNABIS CHARLOTTE'S ANGEL.
- ROGGEN, M. y. (2017). *Optimization of cannabis extraction yield by controlled milling*. Obtenido de <https://thecannabisscientist.com/testing-processing/optimization-of-cannabis-extraction-yield-by-controlled-milling>
- SCIENZT. (s.f.). Obtenido de <https://www.cnsientz.net/ultrasonic-homogenizer/ultrasonic-extractor-for-chinese-herbal.html>
- separations, D. (s.f.). *Extractiontek*. Obtenido de <https://extractiontek.com/equipment/ethanol-filtration-skid-delta/?portfolioCats=14>
- Simon, W. (2024). *Sample preparation of cannabis plants for efficient extraction*. Obtenido de https://www.fritsch-international.com/fileadmin/Redakteur/Downloads/Reports_milling/Cannabis/Sample_preparation_of_cannabis_plants_for_efficient_extraction.pdf
- Soria, N. E. (2017). ASPECTOS QUÍMICOS Y FARMACOLÓGICOS DE LOS COMPONENTES DE CANNABIS SATIVA “MARIHUANA”. *UCV-Scientia* , Volumen 9, Suplemento 1, <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7114830>.
- Statista. (s.f.). Obtenido de <https://es.statista.com/grafico/32130/cannabis-legalizacion-mapa/>
- Steinberg-systems. (s.f.). Obtenido de <https://www.expondo.es/steinberg-systems-evaporador-rotativo-de-laboratorio-matriz-de-recepcion-de-1-l-10030663>
- SUPERCritical, A. (s.f.). Obtenido de <https://www.bid-on-equipment.com/pharmaceutical-equipment/pharmaceutical-equipment---other/370439~apeks-supercritical-5000-5l->



supercritical-co2-extraction-system.htm?srsId=AfmBOorgYQWJuvjo1SBI-5g6esHUFiVMjhTyFQaR8hk0TOwIHYyYFhDL

TANKS, I. (s.f.). Obtenido de <https://ibctanks.com/stainless-steel>

Thermo Fisher. (s.f.). Obtenido de <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/51014551>

thermobid. (s.f.). Obtenido de <https://thermobid.com/shop/thermo-scientific-vacutherm-vacuum-heating-drying-oven-vt6025-51014551/>

Villaverde, P. S. (2019). *Técnicas de extracción y caracterización de cannabinoides a partir de la planta Cannabis sativa L.* .

Vincenzo Di Marzo 1, M. B. (s.f.). The endocannabinoid system and its therapeutic exploitation.



V. Anexo 1: Especificaciones técnicas de equipos

1. Extractor: “The Bambino” - ApeksSupercritical.com
2. Extractor: “The Force” - ApeksSupercritical.com
3. Molino: “Universal Cutting Mill Pulverisette 19” – Lavallab.com
4. Horno de vacío: “Thermo scientific Vacutherm” – Thermofisher.com
5. Winterizador: “ApolloXStil” – SocalBiomed.com
6. Evaporador rotatorio: steinbergsystems.de



1. Extractor: “The Bambino” - ApeksSupercritical.com



SYSTEM SPECIFICATIONS

The Bambino®

Extraction Vessel

- Comes standard with 5-liter vessel. This system is not expandable to additional sizes.
- Volume – 5L vessel holds up to 3 pounds of dry, ground material
- Pressure – maximum pressure = 2000 psi (137 bar)
- Temperature – max 160F (71C)
- Materials – 304 stainless steel. Vessel interior is polished to food grade level.
- Closures – Hammer Union (commonly used in oil and gas industry for temporary piping), top with integral hinge
- Sealing mechanism – spring energized cup seal
- Filter – integral filters on closure heads. 20 micron.
- Temperature measurement – internal K type thermocouple senses actual extraction temperature
- Safety – non-isolable spring loaded safety relief valve prevents accidental over-pressurization

CO₂ Recirculation Pump

- Electric motor driven diaphragm compressor
- Flowrate – 0.4-0.8 kg/min
- Construction – hydraulically actuated diaphragm
- Materials – all wetted parts are 316 stainless steel
- Safety – non-isolable spring loaded safety relief valve prevents accidental over-pressurization

Separators

- 1 separator bank
- Pressure – Maximum pressure = 600 psi (41 bar)
- Temperature – max 160F (71C)
- Materials – 304 stainless steel
- Closures – FDA sanitary style bolted
- Sealing mechanism – sanitary gasket, cured silicone
- Safety – non-isolable spring loaded safety relief valve prevents accidental over-pressurization

Separation Mechanism

- Valveless Expansion Technology (VET) – flow path from extractor to 1st separator is continuous diameter with no constrictions. Separation occurs in 1st separator utilizing centrifugal separation and depressurization.

Heat Exchangers

- Construction – tube in tube style
- Materials – 304 stainless steel
- Cooling/Heating media – water

Chiller/Heater

- Recirculating chiller/heater
- Temperature range: -10C to 50C (14F to 158F)
- System operating range 60F-140F

Control System

- Functions – Fully automatic Programmable Logic Controller (PLC) touch screen interface with first level safety functionality and user programmable pressure, temperature and time. Also has built in hour and maintenance timers, and alarm log.
- Safety – pressure transducers monitor system pressure and shut down system to prevent accidental over-pressurization
- Data acquisition
- Push alerts for system messaging
- UL-508A listed



apeks
supercritical
The Power of CO₂ Extraction®

Made in USA at: 31 Greenscape Court, Johnstown, OH 43031 | 740 809-1160 | ApeksSupercritical.com



2. Extractor: “The Force” - ApeksSupercritical.com

SYSTEM SPECIFICATIONS

The Force®

Extraction Vessel

- **Volume** – 80L vessel holds around 40 pounds of dry, ground material
- **Pressure** – maximum pressure = 5000 psi (344 bar)
- **Temperature** – max 160F (71C)
- **Materials** – 304 stainless steel. Vessel interior is polished to food grade level.
- **Closures** – Quick open closure with hoist
- **Sealing mechanism** – spring energized cup seal/o-ring
- **Filter** – integral filters on closure heads. 20 micron.
- **Temperature measurement** – internal K type thermocouple senses actual extraction temperature
- **Safety** – non-isolable spring loaded safety relief valve prevents accidental over-pressurization

CO₂ Recirculation Pump

- Electric motor driven diaphragm compressor
- **Flowrate** – 3.5-4.2 kg/min
- **Construction** – hydraulically actuated diaphragm
- **Materials** – all wetted parts are 316 stainless steel
- **Safety** – non-isolable spring loaded safety relief valve prevents accidental over-pressurization

Separators

- 2 separator banks on each unit
- **Pressure** – Maximum pressure = 600 psi (41 bar)
- **Temperature** – up to 160F (71C)
- **Materials** – 304 stainless steel
- **Closures** – FDA sanitary style bolted
- **Sealing mechanism** – sanitary gasket, cured silicone
- **Safety** – non-isolable spring loaded safety relief valve prevents accidental over-pressurization

Separation Mechanism

- Valveless Expansion Technology (VET) – flow path from extractor to 1st separator is continuous diameter with no constrictions. Separation occurs in 1st separator utilizing centrifugal separation and depressurization.

Heat Exchanger

- **Construction** – tube in tube style
- **Materials** – 304 stainless steel
- **Cooling/Heating media** – water

Chiller/Heater

- Recirculating chiller/heater
- Temperature range: -10C to 50C (14F to 158F)
- System operation range: 70F-140F

Control System

- **Functions** – Fully automatic Programmable Logic Controller (PLC) touch screen interface with first level safety functionality and user programmable pressure, temperature and time. Also has built in hour and maintenance timers, and alarm log.
- **Safety** – pressure transducers monitor system pressure and shut down system to prevent accidental over-pressurization
- Data acquisition
- Push alerts for system messaging
- UL508A Listed



Made in USA at: 31 Greenscape Court, Johnstown, OH 43031 | 740 809-1160 | ApeksSupercritical.com

apeks
supercritical
The Power of CO₂ Extraction®



3. Molino: Universal Cutting Mill Pulverisette 19” – Lavallab.com

PULVERISETTE 19

PRECISION CUTTING MILL



APPLICATIONS

- ✱ Optimize particle size & distribution for CO₂ or EtOH extraction yield
- ✱ Create material for premium pre-rolls
- ✱ Homogenize isolates



PERFORMANCE ADVANTAGES

- ✱ Variable-speed motor 300-3000rpm
- ✱ Designed with GLP/GMP processes in mind
- ✱ Adjustable, controllable particle size output with tight particle size distribution
- ✱ Reproducible performance regardless of end user
- ✱ High-throughput, continuous processing 1-5+ lbs. per-minute avg.*
- ✱ Dust-free, easy to clean - stainless steel product contact surfaces
- ✱ Cyclone sample collection system provides heat mitigation and prevents resin build up.
 - Heat Mitigation- Maintain chemical profile & product integrity

System

- PULVERISETTE 19 Universal Cutting Mill
- V-groove cutting rotor - stainless steel with hardened stainless steel blades
- Standard Inlet funnel - stainless steel
- Cyclone sample collection system, 56 L stainless steel collection tank, vacuum
- Sieve cassettes, set of three - stainless steel
- Aluminum stand with casters
- Cleaning tools

Specifications & Warranty

- Engineered & manufactured in Germany. Two year factory warranty.
- Electrical: 100-120 V / 15 amps North America
- Weight: Wood Crate > 325 lbs. P19 Mill alone approx. 150 lbs.
- Dimensions: Footprint P19 on stand—28"x28"x60" high
- CE Listed
- FRITSCH PN: 19.2130.00.KIT.01

Resources

- How-to videos: Installation, operation, cleaning
- Cannabis Industry feedback & application notes
- ROI tools
- On-site assistance & training available

Laval Lab Inc.

2567 Chomedey
LAVAL, QC, CANADA H7T 2R2
Info@lavallab.com
1-888-667-7077
www.lavallab.com

4. Horno de vacío: “Thermo scientific Vacutherm” – Thermofisher.com

Hornos de vacío Thermo Scientific Vacutherm

Los hornos de vacío Vacutherm satisfacen los requisitos de precisión en el tratamiento térmico al vacío, desde rutinas sencillas de calentamiento hasta procesos complejos con temperaturas de hasta 400 °C. A partir de los modelos de alta calidad, es posible implementar configuraciones específicas con una amplia selección de opciones de equipos.

Características principales:

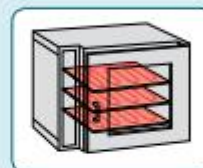
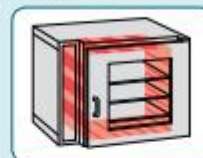
- 3 cómodos tamaños de cámara de 25 l a 128 l
- Selección de modelos de calentamiento con forro y calentamiento con estante:
 - > Calentamiento con forro, modelo M, los 3 tamaños: rango de temperatura, de ambiente, +15 °C a 200 °C
 - > Calentamiento con estante, modelo P: solo los 2 tamaños más grandes: Rango de temperatura: de ambiente, +10 °C a 300 °C/400 °C. Los estantes tienen serpentines de calentamiento incorporados que transfieren calor directo a la carga.
- Cómodo control con pantalla digital para un punto de referencia único:
 - > Controlador por microprocesador Kelvitron™ para los hornos de calentamiento con forro
 - > Controlador multicanal Digicon™ para los hornos de calentamiento con estante, con control de temperatura en cada estante (un punto de referencia)
- Interruptor para límite superior para el horno y protección de las muestras
- Válvula de ventilación rápida para ventilar rápidamente la cámara
- Válvula de precisión adicional para ventilación suave
- Conexión de gases inertes para atmósfera controlada. Una válvula de seguridad evita la sobrepresión dentro de la cámara de vacío
- Puerto de acceso DN 25 en la parte posterior
- Accesorios de vacío, tubos y válvula de bola de acero inoxidable
- Seguridad certificada (aprobado por la CE)



Modelos VT6060 y VT6130

Modelo M, calentamiento con forro

- Temperatura nominal de 200 °C
- Los elementos calefactores grandes de contacto directo están reforzados en la parte frontal para garantizar una temperatura homogénea en todo el estante.



Modelo P, calentamiento con estante

- Temperatura nominal de 300/400 °C
- Tiempos rápidos de calentamiento
- La transferencia directa de calor garantiza tiempos cortos de procesamiento
- La temperatura está controlada en cada estante con protección de exceso de temperatura



La protección ajustable de clase 2 contra exceso de temperatura es estándar

5. Winterizador: “ApolloXStil” – SocalBiomed.com

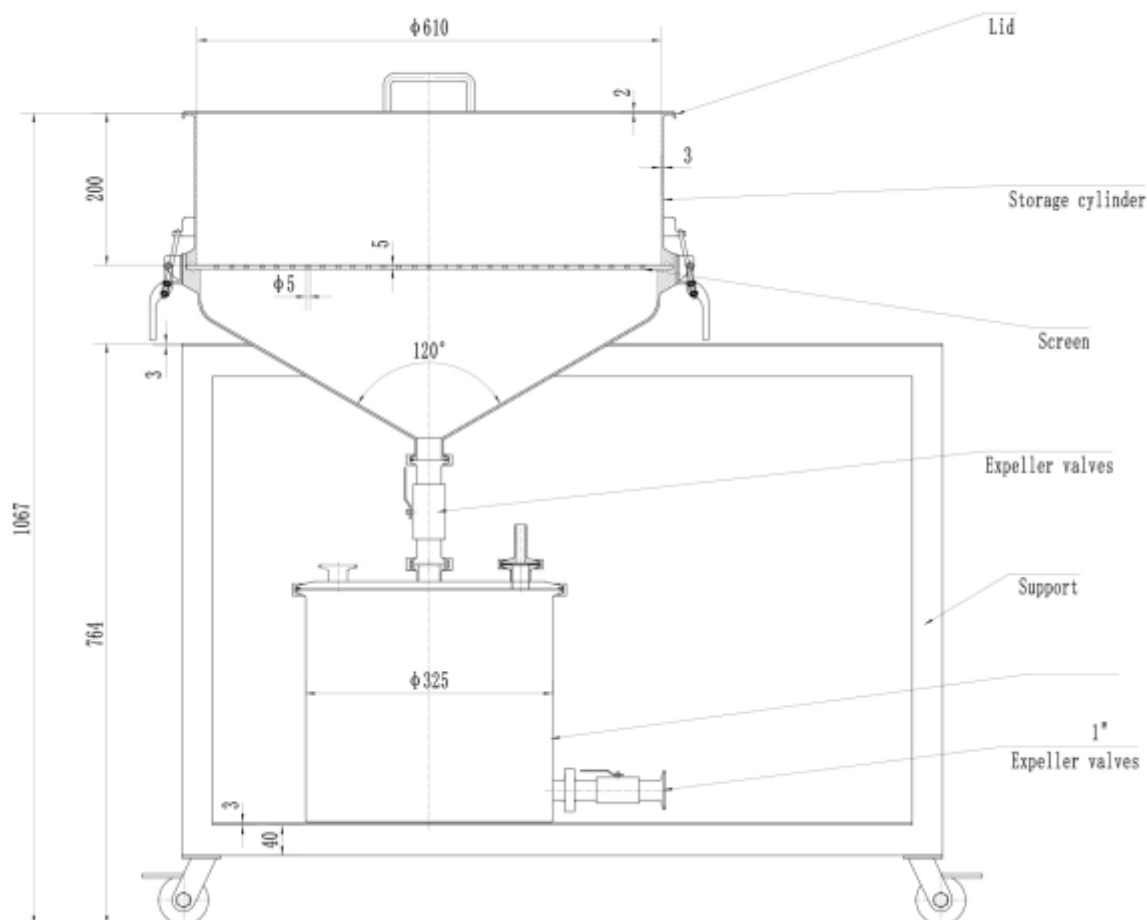


El equipo de filtración ApolloXStil permite la eliminación de cera de alto rendimiento de soluciones de etanol invernadas. Diseñado desde cero para atender a nuestro mercado en particular, el embudo AXS incorpora características clave que incluyen:

- Tasas de filtración de hasta 2 galones por minuto.
- Construcción de acero inoxidable 304 100 % apto para uso alimentario para una limpieza excelente. Aprobación de la FDA.
- Varios medios filtrantes disponibles para diferentes niveles de acabado.
- Incorporación opcional de diversos medios absorbentes para la decoloración.
- Ruedas de altura ajustable para portabilidad.
- Incorporación de vaso de contención para un mejor aislamiento del entorno
- Contención de producto integrada que cumple con las normas GMP para la seguridad y eliminación de la contaminación
- Se integra fácilmente en el proceso existente

Varios beneficios que incluyen:

- Eliminar horas y horas de trabajo
- Reducir el número de pasos incorporando decoloración, sorbentes hidrófobos o hidrófilos para eliminar pigmentos y matriz, lo que genera menos mano de obra y extractos de mejor calidad.
- Eliminación de la posible contaminación de lotes mediante contención



6. Evaporador rotatorio: steinbergsystems.de

Características técnicas

Descripción del parámetro	Valor del parámetro	
Denominación del producto	SET DE EVAPORADOR ROTATORIO	
Modelo	SBS-RV-5000	SBS-RV-2000
Voltaje de alimentación [V~] / Frecuencia [Hz]	230/50	
Potencia nominal [W]	2000	1500
Potencia del motor [W]	40	40
Velocidad de giro [rev./min]	0-120	0-120
Temperatura de calentamiento [°C]	0-99	0-99
Capacidad del tanque de baño [l]	6	5
Gama de ajuste vertical del tanque de baño [mm]	120	120
Precisión de temperatura [°]	±1	±1
Presión de vacío [Mpa]	0,098	0,098
Matraz receptor [l]	2	1
Matraz giratorio [l]	5	5
Grado de protección IP	IP20	IP20
Dimensiones [anchura × profundidad × altura; mm]	800x400x1000	730x330x1000
Peso [kg]	33	25



1. refrigerador
2. regulador de velocidad de giro
3. abrazadera de protección
4. vacuómetro
5. motor
6. matraz giratorio
7. baño termostático
8. tornillo de ajuste vertical del tanque de baño
9. regulador de temperatura
10. válvula de llenado
11. grapa de protección
12. matriz receptor
13. apoyo redondo
14. válvula de vaciado del matraz receptor
15. soporte
16. base del soporte