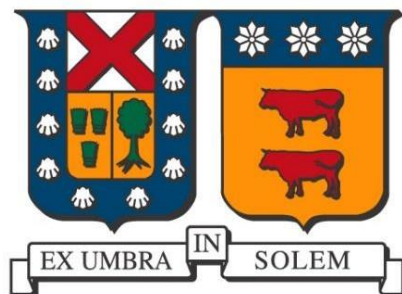


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
SANTIAGO-CHILE



**Evaluación Técnico-Económica para una Planta
de Cultivo y Elaboración de Productos Terapéuticos en
base a Cannabinoides de Grado Farmacéutico**

BENJAMÍN RODRIGO OLIVOS ARANEDA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL QUÍMICO

PROFESOR GUÍA: RODRIGO BENAVIDES
INGENIERO CORREFERENTE: SEBASTIÁN PINO

AGOSTO – 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título; ☐ Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: Evaluación Técnico-Económica para una Planta de Cultivo y Elaboración de Productos Terapéuticos en base a Cannabinoides de Grado Farmacéutico

Nombre del candidato(a): Benjamín Rodrigo Olivos Araneda

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Química

Campus: Santiago San Joaquín ; Departamento: Departamento de Ingeniería Química y Ambiental

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Rodrigo Benavides , en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO** contiene información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 2 oct 2025

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 2 oct 2025

; Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Abstract

A feasibility study was conducted, comprised of a market analysis, and a technical and economic evaluation for a medicinal cannabis cultivation and pharmacological grade extracts production facility to determine the possibility of a circular economy-oriented process design, as well as the economic viability of an integrated cultivation and processing plant with internationally certified health and quality standards.

The project serves as a proposal for LABSUN, a company dedicated to the research and development of high-value natural therapeutic products, which seeks capital injections to increase its current operational capacity.

The use of cannabis for medicinal purposes in Chile constitutes a civil right. Its cultivation, processing and distribution are regulated by the entities SAG and ISP, although recognition of the right by public entities (police, hospitals, etc) is still ongoing, therefore the path towards acceptance of its use represent great investment opportunities (LABSUN, as pioneer in the development of cannabis-based therapeutic products, aims to position itself as one the main players in this industry) and a great opportunity for the public health sector. There are three legal ways to access medicinal cannabis: self-cultivation, sales in pharmacies, and non-profit organizations that cultivate and create products for their members, these associations are commonly known as dispensaries or clubs. LABSUN currently develops its products through a corporation called Club Aldea Secreta.

The current development of Club Aldea Secreta enables research and access to therapeutic cannabis-derived products, which helped define the project's market by identifying the main needs of the target audience, thus developing a proposal for a universe of 2.000 national clients. The scientific approach of the company places it in a privileged position to entry into new markets such as pharmacies and hospitals, in addition to presenting future possibilities of internationalization thanks to the GACP and GMP certifications of the facilities. Based on the estimated universe, a 560 m² closed and partially insulated greenhouse was designed for the cultivation of medicinal cannabis (additionally, different geographic locations were analyzed to compare the effects of climate conditions on the greenhouse and thus determine the optimal location for the project). An

energy balance was used to calculate the heating or cooling demand to maintain optimal cultivation conditions inside the greenhouse and to design a reversible heat pump capable of ensuring these conditions, as well as to calculate the necessary length of a buried HDPE pipe used as a geothermal heat exchanger to increase the heat pump's efficiency.

Alongside the greenhouse design, the production capacity was estimated and the new equipment was proposed for the extraction plant, this resulted in a supercritical extract production capacity of 12 kilograms per year, and a RSO extract production capacity of 14 kilograms per year, in addition to the 441 kilograms per year of medicinal cannabis inflorescences (the greenhouse is designed for an annual cultivation capacity of 735 kilograms of dried flower per year, which is used for both distribution and extract production).

Once the growing and extraction plant was defined energy consumption was determined in order to design a photovoltaic solar energy generation system which, in conjunction with a gas generator, is capable of supplying autonomously the energy requirements of the project and generate the carbon dioxide gas used for the supercritical extraction process and enriching the greenhouse's atmosphere.

Finally, the design of the greenhouse, the extraction plant and the energy generation system were used for the calculation of the initial investment required for the project installation, as well as the projection of the future income and expenses of the project through a cash flow analysis. This allowed to determine the profitability of implementing an integrated project for medicinal cannabis cultivation and therapeutic extract production that complies with all national legal requirements and can obtain international certification for the production of pharmacological grade products, while also incorporating green technologies for energy production and water, waste and energy management. The project yields a net present value (NPV) of 11*MUSD* and an internal rate of return (IRR) of 215 %, based on an initial investment of approximately 0,8 *MUSD*, which is fully recovered in the first year of operation.

For the next stages of the feasibility study of the project, it is recommended to conduct a more in-depth analysis of the greenhouse and heat pump performance through computational modeling of

the system, as well as a comprehensive study of the project's water footprint and management strategies. Finally, it is proposed to assess the inclusion of an outdoor cultivation station or a low-tech greenhouse for cannabis cultivation intended for recreational use

Resumen

Se llevó a cabo una evaluación de mercado, técnica y económica para una planta de cultivo de cannabis medicinal y la producción de extractos farmacológicos, para determinar la factibilidad de la inclusión de aspectos de economía circular en el proceso además de la factibilidad económica de un proyecto integrado de cultivo y extracción, con altos estándares de calidad y salud.

El proyecto desarrollado sirve como propuesta para LABSUN, empresa dedicada a la investigación y desarrollo de productos terapéuticos naturales de alto valor, la cual busca obtener una inyección de capital con el objetivo de aumentar su capacidad de operación.

En Chile, el consumo de cannabis con fines medicinales constituye un derecho civil para las personas, su cultivo, procesamiento y distribución está regulado por el SAG y el ISP, aunque el reconocimiento de este derecho por parte de las entidades públicas (carabineros, centros hospitalarios, etc.) está aún en vías de desarrollo, por lo que el avance la aceptación de su uso supone grandes posibilidades de inversión (LABSUN como pionero en el desarrollo de productos terapéuticos en base a cannabis busca posicionarse como uno de los actores principales en esta industria). Existen tres formas de acceder legalmente a cannabis medicinal; el autocultivo, la venta en farmacias y mediante la participación en organizaciones sin fines de lucro que llevan a cabo el cultivo para sus miembros, estas asociaciones se conocen normalmente como dispensarios o clubes; LABSUN desarrolla actualmente sus productos mediante una corporación llamada Club Aldea Secreta.

El desarrollo actual del proyecto Club Aldea Secreta, permite la investigación y el acceso a productos terapéuticos derivados de cannabis, lo que permitió definir el mercado del proyecto, conociendo las principales necesidades del público objetivo, desarrollándose así una propuesta para un universo de 2.000 clientes nacionales, el enfoque científico pone a la empresa una posición privilegiada para su inserción en nuevos mercados como farmacias y hospitales, además de presentar posibilidades futuras de internacionalización gracias a las certificaciones GACP y GMP de las instalaciones. A partir de esta estimación se pudo diseñar un invernadero cerrado y parcialmente aislado de 560 m^2 para el cultivo de cannabis medicinal (además se estudiaron

distintas ubicaciones geográficas para comparar el efecto de las condiciones climáticas sobre el invernadero y así determinar la mejor ubicación del proyecto), para el cual mediante un balance de energía se pudo calcular la demanda térmica para mantener el cultivo en condiciones óptimas y así dimensionar una bomba de calor reversible que pueda asegurar estas condiciones, además de estimar el largo necesario de una tubería de HDPE enterrada bajo el invernadero que actúa como intercambiador de calor geotérmico para maximizar la eficiencia de la bomba de calor. Junto con el diseño del invernadero se estimó la capacidad de producción y los nuevos equipos requeridos para cumplir con la demanda de la planta de extracción, determinando así una capacidad de producción de aproximadamente 12 kilogramos al año de extracto supercrítico y 14 kilogramos al año de extracto RSO, además de 441 kilogramos al año de inflorescencias de cannabis medicinal (el invernadero considera una capacidad de cultivo de 735 kilogramos al año de flores secas, que se utilizan tanto para su dispensación como para la elaboración de extractos). A partir del diseño de la planta se pudo conocer el consumo energético de esta para diseñar un sistema de generación solar fotovoltaica capaz de abastecer de manera autónoma al proyecto, en conjunto con un generador a gas que además genera dióxido de carbono utilizado para los procesos de extracción y su inyección en el invernadero.

Finalmente el diseño del invernadero, la planta de extracción y el sistema de generación de energía permitió obtener la inversión inicial necesaria para la instalación del proyecto y la proyección de los ingresos y gastos de este mediante un flujo de caja, determinado así si es rentable la instalación de un proyecto integrado de cultivo de cannabis y producción de extractos terapéuticos, que cumpla con todos los requisitos legales nacionales, que pueda obtener certificaciones internacionales para la producción de productos farmacológicos naturales, y que además considere tecnologías verdes de generación y manejo de energía, de gestión hídrica y manejo de residuos, obteniéndose finalmente un valor actual neto de 11 *MUSD* y una tasa interna de retorno del 215% a partir de una inversión inicial de aproximadamente 0,8 *MUSD* la cual se recupera en su totalidad el primer año de operación del proyecto.

Para las siguientes etapas de evaluación del proyecto se recomienda un análisis más detallado de del comportamiento del invernadero y la bomba de calor mediante modelaciones del sistema, así

como un estudio detallado de la huella hídrica del proyecto y el manejo de este recurso, finalmente se propone evaluar la inclusión de una estación de cultivo exterior o un invernadero de baja tecnología para cultivo de cannabis destinado a uso recreativo.

Índice

1.	Introducción	1
2.	Motivación	5
3.	Objetivos	6
3.1.	Objetivo general	6
3.2.	Objetivos específicos.....	6
4.	Antecedentes	6
4.1.	Cannabis medicinal	6
4.2.	Definición de cannabinoides	7
4.3.	Marco legal.....	9
5.	Estado del arte	14
5.1.	Casos internacionales de cultivo integrado en plantas de elaboración de extractos	14
5.2.	Industria nacional de cultivo y elaboración de productos terapéuticos en base a cannabis	16
6.	Marco teórico	17
6.1.	Cultivo de cannabis	17
6.2.	Estrategias de cultivo	24
6.3.	Demanda térmica en invernaderos	29

6.4.	Ciclo termodinámico de la bomba de calor.....	32
6.5.	Intercambiador de calor geotérmico.....	36
6.6.	Métodos de extracción	37
7.	Metodología	43
8.	Resultados	45
8.1.	Estudio de Mercado.....	45
8.1.1.	Necesidad	45
8.1.2.	Producto	46
8.1.3.	Demanda.....	48
8.1.4.	Oferta.....	53
8.1.5.	Precio.....	55
8.1.6.	Análisis del negocio	56
8.1.7.	Canales	58
8.1.8.	Análisis de la ubicación.....	61
8.2.	Estudio Técnico.....	61
8.2.1.	Determinación de la ubicación.....	61
8.2.2.	Balance de materia y energía	64
8.2.2.1.	Balance de materia	64

8.2.2.2.	Balance de energía	68
8.2.3.	Proceso productivo	71
8.2.4.	Programa de producción y forma de producción	83
8.2.5.	Insumos, productos y subproductos	84
8.2.6.	Especificación de equipos	85
8.2.7.	Razones técnicas	90
8.2.8.	Layout de la planta.	93
8.2.9.	Análisis ambiental	94
8.2.10.	Factores de riesgo.....	97
8.2.11.	Estimación de costos de CAPEX y OPEX.....	98
8.3.	Estudio Económico	106
8.3.1.	Antecedentes financieros.....	106
8.3.2.	Flujo de caja	107
9.	Análisis de resultados.....	109
9.1.	Indicadores de rentabilidad	109
9.2.	Análisis de sensibilidad.....	111
10.	Conclusiones	113
11.	Recomendaciones.....	115

Referencias	117
Anexo A	133
Anexo B.....	140
Anexo C.....	147
Anexo D	149
Anexo E.....	152
Anexo F	153
Anexo G	155
Anexo H	156
Anexo I.....	158
Anexo J.....	159
Anexo K	161
Anexo L.....	162

Índice de Figuras

Figura 1: Rutas de biosíntesis de los principales cannabinoides (Duggan, 2021).	9
Figura 2: Diferencias apreciables entre plantas hembra y macho (Sumpter, 2021).....	19
Figura 3: Representación fases de crecimiento de cannabis (Sant Yerbasi, 2016).	19
Figura 4: Diagrama de Mollier para una bomba de calor (Ortega & Larotonda, 2017).	25

Figura 5: Configuración de una BdC aerotérmica para uso doméstico en modo refrigeración (GIZ, 2020).....25

Figura 6: Esquema de una bomba de calor geotérmica con red de captación vertical (izquierda) y horizontal (derecha) (GIZ, 2020). 27

Figura 7: Intercambiadores Slinky; tipología rizada horizontal a la izquierda y tipología rizada vertical a la derecha (GIZ, 2020). 28

Figura 8: Carta psicrométrica, las líneas azules representan las temperaturas mínimas de inyección, las líneas rojas representan las temperaturas máximas de inyección. 35

Figura 9: Técnica TAM SAM SOM para estimación de mercado (Santander Universidades, 2021). 52

Figura 10: Distribución clima mediterráneo en Chile (Mineduc, 2017). 62

Figura 11: Distribución clima mediterráneo en el mundo (The Mediterranean Garden Society, 2009).....63

Figura 12: Diagrama de flujo proceso de cultivo. 73

Figura 13: PFD para una bomba de calor reversible (Davofrío Ingeniería y Climatización, 2022). 74

Figura 14: PFD proceso de extracción por CO2 supercrítico (LABSUN, 2023).....75

Figura 15: PFD proceso de extracción etanólica (LABSUN, 2023). 76

Figura 16: PFD proceso de destilación fraccionada (LABSUN, 2023). 77

Figura 17: Lazo de control para riego tecnificado (Vásquez, Cruz, & Peñarete, 2023). 80

Figura 18: Propuesta de layout del proyecto. 94

Figura 19: Layout del invernadero.	158
Figura 20: Layout de la planta de extracción.	159
Figura 22: Tabla de estimación de CAPEX (Peters, Timmerhouse, & West, 2002).	160
Figura 23: Tabla de estimación de OPEX (Peters, Timmerhouse, & West, 2002).	160

Índice de Tablas

Tabla 1: Presentación de productos.	47
Tabla 2: Demanda estimada de productos.	50
Tabla 3: Precios establecidos.	56
Tabla 4: Resultados balance de materia.	65
Tabla 5: Flujo de refrigerante de la bomba de calor.	67
Tabla 6: Temperatura de inyección de aire al invernadero.	67
Tabla 7: Flujo de aire del invernadero.	68
Tabla 8: Ciclo real bomba de calor.	70
Tabla 9: Capacidad real bomba de calor.	70
Tabla 10: Coeficiente de desempeño real bomba de calor.	71
Tabla 11: Condiciones cromatográficas.	81
Tabla 12: Gradiente de la fase móvil.	82
Tabla 13: Indicadores de estimación de precios bomba de calor.	86

Tabla 14: Especificación sistema geotérmico, sistema en serie modo calefacción.	86
Tabla 15: Especificación sistema geotérmico, sistema en serie modo refrigeración.	87
Tabla 16: Especificación sistema geotérmico, sistema en paralelo modo calefacción.	87
Tabla 17: Especificación sistema geotérmico, sistema en paralelo modo refrigeración.	87
Tabla 18: Indicadores de estimación de precio del sistema de intercambio de calor geotérmico..	88
Tabla 19: Consumo eléctrico total del proyecto.....	88
Tabla 20: Simulación sistemas de generación solar fotovoltaica (Explorador Solar).....	89
Tabla 21: Indicadores de consumo eléctrico del proyecto.	91
Tabla 22: Indicadores de consumo hídrico del proyecto.....	92
Tabla 23: Indicadores de consumo de dióxido de carbono del proyecto.	93
Tabla 24: Estimación de costo de equipos invernadero.	99
Tabla 25: CAPEX invernadero baja tecnología.	100
Tabla 26: CAPEX invernadero alta tecnología.	100
Tabla 27: Costos de producción invernadero.	101
Tabla 28: OPEX invernadero baja tecnología.	102
Tabla 29: OPEX invernadero alta tecnología.....	102
Tabla 30: Estimación de costo de equipos planta de extracción.	103
Tabla 31: CAPEX planta de extracción.	104

Tabla 32: Costos de producción.	104
Tabla 33: OPEX planta de extracción.	105
Tabla 34: Flujo de caja primer año de operación.	108
Tabla 35: Indicadores de rentabilidad.	110
Tabla 36: Análisis de sensibilidad del proyecto.	111
Tabla 37: Parámetros para el cálculo de radiación solar.	134
Tabla 38: Parámetros para el cálculo de radiación térmica.	135
Tabla 39: Parámetros para el cálculo de radiación reflejada.	135
Tabla 40: Parámetros para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor.	136
Tabla 41: Parámetros utilizados para cálculo de pérdidas de calor por renovación de aire.	138
Tabla 42: Parámetros utilizados para el cálculo de pérdidas de calor a través del suelo.	138
Tabla 43: Coeficientes de cultivo utilizados para el cálculo de pérdidas de calor por evapotranspiración.	139
Tabla 44: Radiación solar extraterrestre (mm/día) utilizada para el cálculo de pérdidas de calor por evapotranspiración.	140
Tabla 45: Estimación temperatura subterránea, clima costero.	141
Tabla 46: Estimación temperatura subterránea, clima interior.	142
Tabla 47: Diámetro máximo del intercambiador de calor geotérmico.	144
Tabla 48: Diámetro mínimo del intercambiador de calor geotérmico.	145

Tabla 49: Parámetros físicos utilizados para el cálculo del largo del IdC geotérmico.	147
Tabla 50: Resultados cromatografía extractos SC-CO ₂	147
Tabla 51: Resumen meteorológico clima mediterráneo costero (estación meteorológica Aeródromo Rodelillo, Viña del mar, año 2023).	149
Tabla 52: Resumen meteorológico clima mediterráneo interior (estación meteorológica Aeródromo Rancagua, año 2023).	150
Tabla 53: Consumo eléctrico total del proyecto.....	151
Tabla 54: Simulación sistemas de generación solar fotovoltaica, capacidad 72 kW (Explorador Solar.	152
Tabla 55: Balance de energía diurno del invernadero, clima costero.	153
Tabla 56: Balance de energía nocturno del invernadero, clima costero.....	154
Tabla 57: Balance de energía diurno del invernadero, clima interior.	154
Tabla 58: Balance de energía nocturno del invernadero, clima interior.	155
Tabla 59: Ciclo ideal bomba de calor.....	155
Tabla 60: Capacidad ideal bomba de calor.	156
Tabla 61: Coeficiente de rendimiento ideal bomba de calor.....	156
Tabla 62: Consumo eléctrico bomba de calor, clima costero.	157
Tabla 63: Consumo eléctrico de la bomba de calor, clima interior.....	157
Tabla 64: FLujo de caja (USD), caso base.....	161

Tabla 65: Flujo de caja del proyecto (USD).	161
---	-----

Índice de gráficos

Gráfico 1: Evolución de clientes en el tiempo.	51
Gráfico 2: Consumo versus generación eléctrica clima costero.	63
Gráfico 3: Consumo versus generación eléctrica clima interior.	64
Gráfico 4: Evolución de la producción de flores secas en el tiempo.	66
Gráfico 5: Evolución de la producción extractos en el tiempo.	66
Gráfico 6: Demanda térmica diurna del invernadero.	69
Gráfico 7: Demanda térmica nocturna del invernadero.	69
Gráfico 8: Consumo versus generación eléctrica.	90
Gráfico 9: Ingresos versus gastos del proyecto.	109
Gráfico 10: Cambio de precio del producto (flores secas), manteniendo crecimiento de producción y precio.	112
Gráfico 12: Análisis de sensibilidad, extractos vaporizables.	163
Gráfico 13: Análisis de sensibilidad, aceite sublingual.	164
Gráfico 14: Análisis de sensibilidad, productos edibles.	165

1. Introducción

La industria farmacéutica es una de las más importantes a nivel mundial, alcanzando un volumen de ingresos de 1.607 *MMUSD* (miles de millones de dólares) durante el año 2023 (Orús, 2024), en el caso nacional el mercado farmacéutico tiene aproximadamente un valor de 1.514 *MUSD* en ventas a los consumidores, representando aproximadamente un 0,73% del PIB nacional (Solucion, 2023). Si bien esta industria contribuye directamente en el bienestar de las personas, no está exenta de problemas ni desafíos, uno de estos son los problemas ambientales que pueden ocasionar los medicamentos sintéticos, cuando estos son liberados al medio ambiente a través de desechos y subproductos industriales, excreciones humanas, animales, basura doméstica, entre otros, estos medicamentos se convierten en agentes contaminantes causantes de efectos nocivos como problemas reproductivos fallo renal, muerte, resistencia a antibióticos e incluso desórdenes endócrinos en diferentes especies animales (Moreno-Ortiz et al., 2013). Otro de los principales problemas asociados a la farmacología sintética son los efectos adversos provocados, como reacciones alérgicas, trastornos gastrointestinales, cardiovasculares o psiquiátricos que pueden ocasionar los medicamentos, el presente trabajo se enfoca en los tratamientos de patologías neurodegenerativas, enfermedades oncológicas y tratamiento de dolor crónico.

Las enfermedades neurodegenerativas como Alzheimer, Parkinson, epilepsia, esclerosis lateral amiotrófica (ELA), entre otras, se caracterizan por la disminución del número de células en determinadas zonas neuronales, esta pérdida neuronal se ve reflejada en la aparición de disfuncionalidades como alteración en los procesos de memoria y habla, disminución en las capacidades intelectuales, cognitivas o el deterioro de habilidades motoras (Jordán, 2003).

La oncología, por otro lado, se define como la rama de la medicina que se especializa en el diagnóstico y tratamiento de cáncer, esta enfermedad se produce por la evolución anómala de algún grupo de células normales del organismo formando un tumor, siendo capaz de extenderse dentro del cuerpo hasta provocar la muerte.

Una de las dolencias más comunes en los chilenos es el dolor crónico. Se entiende por dolor crónico como las dolencias físicas que se extienden por semanas, meses e incluso años, estas

dolencias por lo general no presentan cura, sino que son tratadas con medicamentos analgésicos, terapias físicas o técnicas alternativas como acupuntura, dichas dolencias pueden ser producidas por lesiones, infecciones o enfermedades como cáncer, esclerosis, artrosis, fibromialgia, etc.

Estas enfermedades conllevan por lo general tratamientos sumamente invasivos sobre el cuerpo humano, presentando una serie de efectos secundarios sobre el organismo; las reacciones adversas o efectos secundarios son uno de los principales motivos que alejan a los usuarios de los medicamentos sintéticos, llegando incluso en muchos casos a afectar la calidad de vida de las personas tanto como la propia enfermedad que se está tratando; tomando como ejemplo el tratamiento de Alzheimer, medicamentos como Donepezil y Aducanumab han reportado efectos secundarios graves como bradicardia, que puede llegar a provocar severos casos de arritmia o edemas vasogénicos en un 41% de los usuarios (Kandelshein & Bloemer, 2022).

En el caso de los opioides como tratamiento para el dolor crónico su uso conlleva grandes riesgos, estos medicamentos actúan sobre los receptores opioides del cuerpo causando una serie de respuestas fisiológicas, principalmente tienen un efecto analgésico, sin embargo estos también actúan sobre los mecanismos de recompensa del cerebro, por lo que su uso prolongado ocasiona una dependencia física a estas sustancias, como respuesta adaptativa de estos receptores, el uso de opioides además, genera tolerancia, es decir, se hace necesaria una dosis mayor para alcanzar los efectos deseados lo que aumenta el riesgo de sufrir una sobredosis, otro problema del uso de opioides es el síndrome de abstinencia, una serie de síntomas como escalofríos, insomnio, náusea, vómitos, diarrea y dolores musculares que aparecen una vez discontinuado el uso de medicamentos de este tipo (Volkow & McLellan, 2016).

La naturaleza del mercado de fármacos sintéticos en Chile, es otra de las razones que lleva a los usuarios a buscar alternativas, el mercado nacional está altamente desregulado y es ampliamente dominado por las empresas del retail farmacéutico, donde tres grandes cadenas tienen una participación en el mercado cercana al 80%, estas empresas presentan por lo general una gran acumulación de costos y márgenes en su cadena productiva, asociadas a las ganancias de los laboratorios que producen los medicamentos, los costos de operación de las farmacias o gastos en publicidad lo que se traduce en costos elevados para los consumidores finales (Atal, 2021). Si bien

existen mecanismos para combatir estas situaciones como las farmacias municipales, los medicamentos bioequivalentes o sistemas de cobertura financiera como el plan GES, muchas veces no dan abasto a la demanda de medicamentos que gran parte de la población requiere o presentan dificultades como listas de medicamentos desactualizadas.

Una de las principales alternativas al mercado de medicamentos sintéticos es la medicina en base a extractos herbales, industria en la cual Chile presenta una gran posibilidad de desarrollo debido a la variedad de plantas nativas con gran potencial terapéutico y a las condiciones ambientales que favorecen el cultivo de ciertas plantas con potencial medicinal. Las plantas, producto de su complejo metabolismo presentan un universo de sustancias químicas, de las cuales en la actualidad solo se ha logrado describir un tercio.

El médico y químico suizo de la era renacentista Paracelso fue el primero en describir las propiedades medicinales de las plantas, radicadas en principios químicos aislables mediante técnicas de alquimia, sentando así las bases de la farmacología moderna; en la actualidad, y en especial en los últimos 20 años, se ha observado un gran interés en las plantas medicinales en el mundo occidental, definiéndose el concepto de fitoterapia como un tipo de terapia complementaria que utiliza plantas o partes de ellas donde el empirismo de la medicina tradicional se transforma en fundamento científico, la fitoterapia se diferencia de la farmacología sintética o de la medicina tradicional (autóctona o ancestral) en que esta utiliza matrices vegetales complejas, es decir, plantas en su totalidad o parte de ellas sometidas a tratamientos directos con el fin de concentrar los compuestos de interés y facilitar su administración, formando sustancias llamadas extractos, la mezcla de sustancias activas o acompañantes presentes en el extracto se conoce como fitocomplejo y buscan actuar para lograr un fin terapéutico que no sería posible obtener utilizando estas sustancias por separado.

Las sustancias activas que forman el fitocomplejo se denominan metabolitos secundarios y se originan como productos secundarios del proceso de fotosíntesis e intervienen en otros procesos vegetales como la defensa frente a patógenos, y protección a los rayos UV; las características de los metabolitos secundarios están dadas principalmente por la genética vegetal, pero también se ven afectadas por factores fisiológicos como el estrés, la procedencia geográfica y condiciones de

recolección del vegetal; los metabolitos pueden ser biosintetizados mediante diversas rutas biológicas, formando distintos tipos de compuestos como los compuestos de las familias fenólica, terpénica, alcaloidea, esteroidea o la familia de los polímeros (Marcia Avello & Isabel Cisternas, 2010).

Una de las plantas de mayor potencial fitoterapéutico es la planta *Cannabis Sativa*, conocida normalmente como cáñamo o marihuana, debido a que en su composición se encuentran moléculas llamadas cannabinoides (o fitocannabinoides), las cuales pueden actuar sobre el sistema endocannabinoide (normalmente regulado por cannabinoides producidos por el cuerpo), el cual actúa principalmente sobre el cerebro, los músculos, el tejido adiposo y las células inmunitarias mediante la regulación de la señalización de las células nerviosas en el cerebro, controlando funciones como el sueño, el estado de ánimo, el apetito, el aprendizaje, la memoria, la temperatura corporal, el dolor, las funciones inmunitarias y la fertilidad (Nagarkatti & Nagarkatti, 2023).

El principal desafío de la fitoterapia en base a cannabinoides es que actualmente la planta y los derivados del cannabis se encuentran categorizados dentro del listado de sustancias ilícitas y estupefacientes, penalizando su consumo, porte, cultivo, procesamiento y comercialización; lo que se traduce en limitaciones para el desarrollo de la industria en el país. El uso terapéutico de cannabis está autorizado mediante el DS N°84 del año 2015, siempre y cuando exista una necesidad médica o terapéutica que lo justifique y documentada mediante una receta médica debidamente emitida por un médico cirujano, odontólogo o médico veterinario; por otro lado el cultivo de cannabis se encuentra penalizado por el artículo 9 de la Ley N° 20.000, sin embargo, este puede ser autorizado por el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG) luego de presentar una solicitud a la Dirección Regional del SAG del lugar donde se desarrolle el cultivo, con al menos cuatro meses de antelación al inicio de este, mientras que la elaboración de productos derivados del cannabis como resina de cannabis, extractos y tinturas de cannabis para fines medicinales y de investigación en uso humano puede ser autorizada por el Instituto de Salud Pública (ISP) (Weidenslaufer & Cavada, 2022).

El estudio científico acerca de los efectos de la fitoterapia en base a cannabinoides y el avance en la legislación asociada a la industria cannábica, hace de esta una industria con un gran potencial en Chile, bajo esta premisa la empresa LABSUN busca posicionarse como una alternativa accesible

y sustentable a la industria farmacéutica y cosmética, contando actualmente con un laboratorio dedicado a la investigación, desarrollo y producción a menor escala de productos para el bienestar de las personas, contando además con planes para la instalación de una planta de cultivo y elaboración de productos terapéuticos a gran escala, sin embargo, mantener las condiciones óptimas del cultivo a lo largo del año supone un proceso energéticamente intensivo, lo que presenta un desafío a la hora de diseñar una planta de cultivo limpia y eficiente.

2. Motivación

El presente trabajo de memoria de título nace como una respuesta a la necesidad de ampliar la capacidad de producción de LABSUN, desarrollando una propuesta de cultivo y elaboración de extractos de cannabis de grado farmacológico que justifica la inyección de capital necesaria para la siguiente de la ruta de negocios de la empresa.

El proyecto de LABSUN comienza el 2018, con un enfoque en investigación y desarrollo a través de proyectos como Fitolab, dedicada a la biocosmética en base a terpenos y extractos naturales, Botrys, proyecto de desarrollo la creación de un biofungicida a partir de aceites esenciales y extractos, y Vapolab, dedicada a la investigación del potencial terapéutico del cannabis. Esta etapa se caracterizó por una gran inversión en un laboratorio y la contracción en las ventas debido al enfoque en la investigación mediante colaboraciones con instituciones como la Universidad Técnica Federico Santa María y la Universidad de Valparaíso.

El 2023 comienza una etapa de la empresa caracterizada por la reducción del personal y la estabilización de la producción y el modelo de negocios, mediante la creación de la corporación sin fines de lucro Club Aldea Secreta, la cual busca dar acceso a información y productos terapéuticos de cannabis a sus miembros. Mediante la creación de la corporación se obtiene una nueva fuente de ingresos que permite mantener el funcionamiento del club y al mismo tiempo otorgar sostenibilidad legal y económica al desarrollo científico de productos en base a cannabis, aspecto crucial para el crecimiento de la empresa en el futuro.

La siguiente etapa de LABSUN, considera el crecimiento de la capacidad productiva con el aumento de equipos y del personal, para fortalecer el desarrollo de la propiedad intelectual, junto con avanzar en los procesos de formalización y certificación de los productos para abarcar nuevos mercados como farmacias o la exportación de productos de alto valor. De esta necesidad nace la propuesta desarrollada de un invernadero de cultivo de alta tecnología unido a una planta de elaboración de productos terapéuticos con estándares de calidad internacionales que ayuden a la empresa en los procesos de certificación y a obtener el financiamiento necesario para el progreso del proyecto.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

- Determinar los procesos y el diseño de la zona de cultivo y el laboratorio de procesamiento para la elaboración de productos terapéuticos con cannabinoides de grado farmacéutico para el proyecto de expansión de LABSUN.

3.2. Objetivos específicos

- Diseñar la zona de cultivo considerando criterios de economía circular como valorización de residuos y eficiencia hídrica y energética.
- Diseñar el laboratorio de elaboración de extractos y productos terapéuticos (RSO, Extracto SC-CO₂, flores secas, aceites sublinguales y productos edibles).
- Evaluar la factibilidad técnica y económica de un proyecto integrado de cultivo y elaboración de extractos farmacológicos y productos terapéuticos.

4. Antecedentes

4.1. Cannabis medicinal

Como se mencionó anteriormente, el potencial medicinal de la planta cannabis sativa radica en la presencia de moléculas como cannabinoides y terpenos, las cuales pueden actuar sobre el sistema

endocannabinoide, ya sea por si solas, como en su conjunto luego de ingresar al organismo por vías como la vaporización o la ingesta en forma de tinturas, las cuales son utilizadas para el consumo en forma de aceites sublinguales o para la elaboración de productos comestibles.

4.2. Definición de cannabinoides

Los cannabinoides son cualquier sustancia química capaz de unirse a los receptores endocannabinoides de los mamíferos, actualmente se han descrito 150, los cuales pueden ser categorizados según su origen como fitocannabinoides, aquellos presentes en plantas, endocannabinoides, aquellos presentes naturalmente en los animales, y cannabinoides sintéticos, es decir, aquellos que son sintetizados en un laboratorio. El principal precursor de los fitocannabinoides más abundantes en la flor del cannabis es el ácido cannabigerólico (CBGA), el cual se forma en los tricomas de la planta producto de reacciones enzimáticas entre el pirofosfato de geranilo y ácido olivetólico presentes en la planta, una vez formado el CBGA este puede interactuar con otras enzimas para formar los principales cannabinoides de interés medicinal en sus formas ácidas; ácido cannabidiólico (CBDA), ácido tetrahidrocannabinólico (THCA) y ácido cannabícroménico (CBCA).

4.2.1. Definición de terpenos

Los terpenos corresponden a los metabolitos secundarios de mayor importancia presentes en la planta luego de los cannabinoides, estas moléculas son las responsables de los sabores y olores asociados al consumo de cannabis, y pueden ser formados por 10 átomos de carbono (mono terpenos) o 15 átomos de carbono (sesquiterpenos). El perfil de terpenos de una planta se puede ver fuertemente afectado por factores ambientales y del cultivo, y su efecto inhibidor o potenciador de los efectos de los cannabinoides los hace un factor clave en el uso medicinal del cannabis (Duggan, 2021).

4.2.2. Farmacología en base a cannabinoides

Al consumir cannabis, los cannabinoides actúan sobre los receptores del sistema endocannabinoide del cuerpo humano, afectando principalmente los receptores del tipo C1, C2 y en menor medida (o

en casos particulares) los gabbareceptores, estos receptores controlan una gran variedad de funciones biológicas, por lo que el efecto de los cannabinoides, en conjunto con los terpenos presenta una gran diversidad de aplicaciones en la medicina.

Los cannabinoides se encuentran en la planta en su forma ácida, por lo que para ser capaces de actuar sobre el sistema endocannabinoide deben pasar por un proceso de decarboxilación (normalmente a temperaturas entre los 105 °C y los 160 °C. El THC (forma activa del THCA) actúa sobre los receptores CB1, presentes principalmente en el cerebro, y presenta efectos farmacológicos asociados principalmente al placer, el aprendizaje, la memoria, el apetito, la regulación del sueño y la sensación de dolor. El CBD por otro lado (la forma decarboxilada del CBDA), a diferencia de THC no produce alteraciones cognitivas o sensación de euforia, sino que actúa sobre los receptores CB2 presentando efectos antiinflamatorios, ansiolíticos, así como neuroprotector y antioxidante por lo que se presenta como una terapia efectiva en enfermedades como esclerosis múltiple, enfermedad de Parkinson, acné, soriasis, depresión, epilepsia, enfermedades bacterianas, neuropatía diabética, enfermedad de Lyme, déficit de atención e hiperactividad, artritis reumatoide, esclerosis lateral, náusea, ansiedad y síndrome de intestino irritable.

La terapia mediante el uso de cannabinoides puede ser aislada o de espectro completo, es decir utilizando sólo un tipo de cannabinoide puro, o un su conjunto con otras sustancias como son los terpenos; los terpenos que se encuentran principalmente en la planta de cannabis son mirceno, cariofileno, lenalool, pineno, limoneno y humuleno (Rubio Escalona, 2021). Los terpenos tienen la capacidad de actuar sobre el cuerpo en conjunto con los cannabinoides, inhibiendo o incrementando sus efectos, por ejemplo, disminuyendo los efectos psicoactivos del THC o potenciando los efectos analgésicos del CBD, esta sinergia entre las moléculas se conoce como efecto *entourage*.

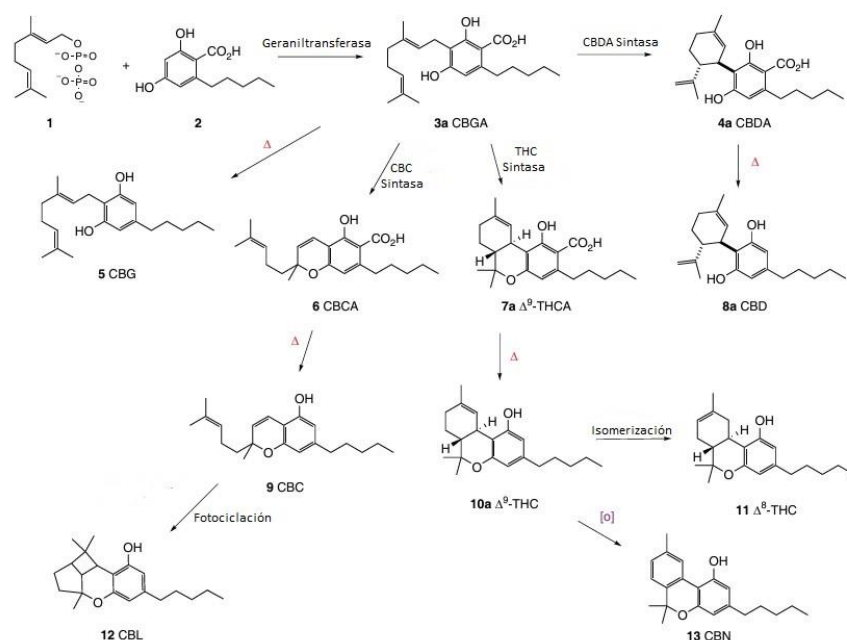


Figura 1: Rutas de biosíntesis de los principales cannabinoides (Duggan, 2021).

4.3. Marco legal

4.3.1. Marco legislativo de cannabis en Chile

El cannabis tiene una amplia historia dentro del país, fue introducido en la época colonial en el año 1545 para la fabricación de fibras y su uso fue ampliamente reconocido, pero su producción fue desacelerando constantemente hasta principios de 1890 debido a la aparición de nuevos textiles. El uso de cannabis por sus propiedades psicoactivas se remonta a la década de 1960, cuando los hijos de diplomáticos estadounidenses la ingresan al país, extendiéndose su uso entre la población chilena, la primera ley persecutoria del uso y tráfico de drogas nace en 1973 (Ley N° 17.9349), por otro lado en 1994 se establece la primera distinción entre sustancias estupefacientes y psicotrópicas, permitiendo a las farmacias disponer del uso del cannabis, pero no a las personas naturales (Cámara de Diputadas y Diputados, 2025).

Si bien el uso para fines de investigación científica era posible, el primer paso hacia el marco regulador existente el día se dio mediante el decreto supremo N° 84, promulgado el 2015, el cual modifica los reglamentos anteriormente establecidos autorizando la investigación científica y el

uso de cannabis para elaboración de productos de uso humano. Hoy en día se reconoce como un derecho civil el acceso a terapias basadas en cannabinoides, sujeto a una receta médica debidamente emitida (esta debe considerar diagnóstico, tratamiento, duración y vía de administración), sin embargo, los órganos legisladores del país aún están trabajando en mecanismos para asegurar su cumplimiento, principalmente frente a persecución indebida por parte de carabineros y para su inclusión en establecimientos de salud. El uso recreativo por otro lado se cataloga como una falta (no un delito), siempre y cuando el cultivo, porte y/o consumo sea para uso exclusivo y próximo en el tiempo, pero, a pesar de esto no existe una herramienta para justificar este uso aparte de una licencia médica, por lo que el avance legislativo en este ámbito es crucial para la industria.

El marco regulatorio que sustenta el desarrollo del proyecto puede ser distinguido en tres partes según la entidad regulatoria y los protocolos a seguir, entre estos aspectos se distingue el cultivo de cannabis, la elaboración de productos terapéuticos a base de cannabis y la distribución de estos.

Cultivo de cannabis: Se describe en los artículos 7° y 8° de ley N°20.000, estos establecen que la plantación, cultivo y cosecha se pueden llevar a cabo solo si cuentan con previa autorización del Servicio agrícola y Ganadero (SAG) (BCN, 2024), entidad encargada de revisar la solicitud, autorizar el cultivo y fiscalizar el cumplimiento de sus condiciones mediante fiscalizaciones periódicas. El protocolo establecido por el SAG contempla una solicitud de cultivo, la cual se debe enviar con al menos cuatro meses de antelación a la realización de este, esta solicitud debe incluir información relevante como identificación del solicitante, ubicación, superficie del terreno, tipo de plantas, cantidad de plantas, fecha de siembra, fecha de cosecha, declaración acerca del tipo de cierre de las instalaciones, manejo o destrucción de rastrojos y destino de los productos.

El proyecto contempla la realización de tres ciclos de cultivo a lo largo del año, por lo que se debe realizar esta solicitud en tres instancias, tanto el protocolo como las exigencias en las fiscalizaciones para evitar desviaciones ilícitas y garantizar trazabilidad del cultivo deben ser informadas por el SAG, por otro lado, su aplicación ya se ha demostrado en otros casos como el de Fundación Daya y la empresa Má Botanics, que han recibido licencias para el cultivo de cannabis con fines terapéuticos.

Producción: La producción de cannabis o productos derivados está regulada principalmente por el decreto supremo N°84 y el Código Sanitario. El decreto supremo N° 84 modifica los Reglamentos de Estupefacientes y Psicotrópicos reconociendo el cannabis en la lista de sustancias permitidas para fines médicos, estableciendo al Instituto de Salud Pública (ISP) como el principal órgano regulador, el cual debe autorizar y fiscalizar la fabricación, preparación, almacenamiento y elaboración de productos farmacéuticos que contenga cannabis, resina de cannabis, extractos y tinturas (BCN, 2015); la producción sólo puede realizarse por laboratorios farmacéuticos, centros de investigación o instituciones autorizadas, los cuales deben someterse a fiscalización por parte del ISP cumpliendo con exigencias como autorización de uso de materias primas (como cannabis o extractos), estándares de calidad de las instalaciones (como la certificación GMP detallada más adelante), protocolos de control de calidad, farmacovigilancia y trazabilidad. El Código Sanitario establece, mediante los artículos 98 y 102 que todo producto destinado a la utilización por parte de terceros debe contar con registro sanitario entregado por el ISP, sin embargo, el ISP también tiene la capacidad de autorizar la elaboración de productos sin registro sanitario cuando se trate de un medicamento preparado para un paciente específico (con receta médica), se use para ensayos clínicos, validación de productos o si la institución solicitante está autorizada y supervisada por el ISP (BCN, 2024).

Los protocolos para autorizaciones (ya sea para la elaboración de productos o para obtener el registro sanitario) deben ser presentados por el ISP y su aplicabilidad ya se ha visto en otros casos, tanto de éxito como de fracaso por parte de Laboratorios Knop, quienes recibieron la autorización para la producción de un medicamento en base a CBD, cuyo registro sanitario fue posteriormente rechazado; actualmente existen dos medicamentos en base a cannabinoides (de elaboración extranjera) que cuentan con registro sanitario.

Distribución: Al igual que el caso de la elaboración de productos terapéuticos, el decreto supremo N° 84, establece que la distribución de productos terapéuticos en base a cannabis debe ser autorizada y fiscalizada por el ISP. También se indica en el Código Sanitario (artículos 98° y 100°) que los productos farmacológicos destinados al uso humano deben contar con el registro sanitario o con una autorización excepcional del ISP, de la misma manera se debe pedir esta autorización para la importación/exportación de productos o materias primas sujetas a control sanitario. En el

caso de las farmacias (o laboratorios) los productos terapéuticos pueden ser comercializados bajo receta médica retenida con control de existencias, siempre y cuando cuenten con el registro sanitario o con previa autorización por motivos especiales como que no exista una alternativa disponible en el país, se presente una receta médica individualizada, o sea parte de un estudio clínico. En el caso de los dispensarios o agrupaciones conformadas de acuerdo a la ley N° 20.500 (sobre participación ciudadana), los usuarios traspasan sus derechos de autocultivo a la corporación para que sea esta la que se encargue tanto de la elaboración de productos terapéuticos como de su distribución, estas asociaciones deben recibir la autorización del ISP para la elaboración de productos que respondan a las recetas médicas de los miembros, los cuales mediante membresías o aportes financian las operaciones del club, de esta manera los usuarios pueden tener acceso a productos sin incurrir en un acto ilícito de venta de sustancias controladas.

4.3.2. Certificaciones internacionales para uso farmacológico de especies vegetales

La industria farmacéutica es una de las más severas en cuanto a parámetros de control de calidad, es por esto que se deben seguir rigurosos procesos de certificación para poder elaborar productos de este tipo, en el caso de la fitoterapia estas certificaciones tienen una crucial importancia debido a la variabilidad existente en el cultivo de especies vegetales. El cultivo y procesamiento de cannabis para fines medicinales se rige principalmente mediante dos certificaciones, estas son la certificación *Good Agricultural and Collection Practices* (GACP), correspondiente a la parte de cultivo de especies vegetales para su uso en la elaboración de fármacos; y la certificación *Good Manufacturing Practices* (GMP) para la manipulación de especies vegetales en la elaboración de productos farmacológicos (Veit, 2022).

Good Agricultural and Collection Practices: Con el objetivo de asegurar la calidad de los materiales iniciales para la elaboración de fármacos esta certificación fue desarrollada por la Organización Mundial de Salud en el 2003, y establece una serie de parámetros a controlar establecidos en el anexo 7 de la guía GACP, entre estos requerimientos se destacan aspectos como:

- Control de calidad
- Calificación del personal involucrado y medidas de higiene
- Instalaciones destinadas a secado, procesamiento inicial y almacenamiento

- Equipamiento a utilizar
- Documentación
- Producción de semillas, clones u otras especies con fines de propagación
- Cultivo y cosecha
- Secado y procesamiento inicial
- Almacenamiento, packaging y distribución

Good Manufacturing Practices: Esta certificación corresponde a una serie de reglas y regulaciones que se deben seguir en la elaboración de medicamentos en la Unión Europea y se divide en dos partes; la primera parte establece los requerimientos para la elaboración de productos medicinales, mientras que la parte dos regula la elaboración de ingredientes medicinales activos (API) e indica que partes del proceso se deben regir por la certificación GACP y que partes se deben regir por los parámetros GMP. La certificación GMP abarca todas las fases del proceso de producción, así como el control de calidad de los productos, entre los factores de producción a considerar para obtener esta certificación se tiene:

- Definición y homogeneidad de lotes: Para la elaboración de productos farmacológicos se debe tener clara la procedencia de los ingredientes activos, para esto se deben tener en cuenta los ciclos de cultivo y los espacios para este, definiendo cada cosecha como un lote distinto según su fecha de cultivo y el lugar donde se llevó a cabo, cabe destacar que para la venta de cannabis en forma de flores secas se debe asegurar una variabilidad permitida entre el 10% y el 20% en la concentración de cannabinoides y, para el caso del cultivo destinado a la elaboración de extractos, esta parte del proceso se rige por la certificación GACP.
- Sistema de mitigación de riesgos: Para la producción se debe asegurar un sistema enfocado en riesgos de nivel farmacéutico.
- Demarcación de zonas: Las zonas que operaran bajo estándares GACP y GMP deben estar adecuadamente separadas y claramente demarcadas, además las zonas GMP deben ser zonas estériles para disminuir el riesgo inherente de contaminación microbiana presente al trabajar con especies vegetales.
- Sistemas suplementarios: Todos los servicios como ventilación, calefacción, suministro de agua, luz y manejo de desechos deben estar correctamente certificados y mantenidos de manera óptima.
- Higiene: Tanto los espacios como los equipos destinados al manejo y almacenamiento se deben mantener limpios.
- Estrategias de control: Para asegurar la calidad y conformidad de cada lote producido se deben establecer adecuadamente los parámetros de control.

- Validación: El anexo 15 de la guía EU GMP establece los requerimientos tanto para los procesos de la planta, como para los parámetros de higiene y la calificación de equipos e instrumentos.
- Métodos de pruebas analíticas: Se deben establecer métodos cualitativos como cromatografía de capa fina para asegurar la composición de los productos.
- Documentación: Toda la documentación competente a aspectos de la certificación GMP debe ser archivada y administrada de manera clara, con al fin de obtener un certificado válido mediante una inspección GMP.

La Unión Europea establece además una serie de parámetros de calidad a controlar para asegurar un producto para su uso farmacológico, entre los parámetros de calidad que se deben controlar se tiene:

- Identificación
- Pureza
- Calidad microbiológica.
- Productos de degradación
- Prueba de valoración
- Estabilidad
- Toma de muestras

Cabe destacar que para la elaboración de extractos estos parámetros de deben asegurar tanto para las flores secas destinadas utilizadas como materias primas como para los extractos producidos.

5. Estado del arte

5.1. Casos internacionales de cultivo integrado en plantas de elaboración de extractos

Actualmente en el mundo existen diversos países en donde la industria del cannabis ha avanzado al punto de tener plantas de cultivo y procesamiento totalmente desarrolladas, con certificaciones internacionales como la certificación GACP (Good Cultivation and Collection Practices for Medicinal Plants) la cual presenta las directrices técnicas generales necesarias para obtener materiales de plantas medicinales de buena calidad para la producción sostenible de medicamentos, estas normas fueron definidas por la OMS y se aplican a las instalaciones del cultivo; la certificación GMP (Good Manufacturing Practices) en cambio establece directrices para asegurar

la calidad de los productos medicinales, estableciendo estándares en áreas como la capacitación de los trabajadores, mantenimiento de equipos, uso correcto de productos químicos, identificación y almacenamiento de residuos, control de trazabilidad, limpieza y control de plagas, entre los países que han desarrollado la industria de cultivo y elaboración de productos fitoterapéuticos en base a cannabinoides se encuentran Alemania, Argentina, Colombia, Estados Unidos, Uruguay, entre otros, a continuación se presentan algunos de estos casos.

Alemania: El caso alemán comienza con la legalización del uso de cannabis con fines medicinales en 2017, entregando a tres compañías una licitación que permitió el cultivo de 10.400 *kg* en territorio alemán en un plazo de cuatro años (Biopharma, 2020), las empresas autorizadas fueron la empresa canadiense Aurora (al día de hoy cuentan con una producción anual de 1.000 *kg* de cannabis de grado medicinal con una superficie de cultivo de 3.600 *m*²), la empresa estadounidense Tirlay, y la única empresa alemana independiente, Demecan, la cual al día de hoy cuenta con una superficie de cultivo de 12 *ha* en la ciudad de Dresden. Existe una entidad gubernamental llamada German Cannabis Agency (Cannabisagentur), la cual en conjunto con la empresa privada Cansativa Group, se encargan de la regulación, supervisión y licitación de estas empresas, actualmente y, a partir del 1 de abril del 2024, se legalizó el uso y cultivo recreacional de cannabis, removiendo totalmente esta sustancia de la lista de narcóticos, lo que permite, entre otras, la producción ilimitada de biomasa, con la previa autorización y certificación de la German Cannabis Agency (New Zealand Embassy Berlin, 2024). Los métodos más utilizados para la producción de extractos de grado farmacéutico en Alemania son la extracción por dióxido de carbono supercrítico (Aurora) y extracción por solvente mediante etanol (Tirlay).

Argentina: El caso de Argentina es sumamente particular, ya que parte como una iniciativa estatal de la Provincia de Jujuy, en 2018, con la creación de la empresa Cannava, la cual plantea una integración vertical de todo el proceso productivo, desde el análisis genético de las especies a cultivar hasta la producción de aceites medicinales (RSO) mediante el método de extracción por solvente utilizando etanol, y la posterior comercialización. Desde el 2021 que la empresa tiene permitida la venta de sus productos dentro de la provincia y el año 2023 fue permitida su comercialización en el resto del país, actualmente Cannava cuenta con las instalaciones más

sofisticadas de América Latina, con una superficie de 35 *ha* destinadas al cultivo, las cuales pueden llegar a expandirse hasta las 240 *ha*, un área de postcosecha de 4.200 *m*² que permite el tratamiento de 80 *toneladas* de material vegetal al año y una planta farmacéutica de 600 *m*² con una capacidad de procesamiento de aproximadamente 40 *kg/h* (Cannava S.E, 2024).

Estados Unidos: En Estados Unidos, existen diversas empresas dedicadas al desarrollo de productos elaborados a partir de cannabis, sujetas a distintas legislaciones estatales, una de estas empresas es Curio Wellnes, la cual cuenta con instalaciones destinadas al cultivo en 1,2 *ha* además de un laboratorio de procesamiento de 0,5 *ha* de superficie, existen proyectos para instalar plantas de mayor tamaño como lo es proyecto de la empresa HWY35 Cannabis, la cual planea instalar un centro de cultivo y manufactura en un terreno de 138 *ha* antes ocupadas por un aserradero en la ciudad de Grand Rapids, Minnesota, con una inversión de 67 *MUSD*. La empresa Curio Wellnes, no solo comercializa sus productos en forma de flores secas, sino una variedad de presentaciones como productos comestibles, tópicos, tabletas y extractos para vaporizar, todos fabricados a partir de extractos obtenidos mediante la técnica de extracción con dióxido de carbono supercrítico.

5.2. Industria nacional de cultivo y elaboración de productos terapéuticos en base a cannabis

Actualmente en Chile no existe ninguna planta de cultivo integrado en centros de investigación asociada a productos derivados del cannabis, sin embargo, existen casos de empresas que cultivan y procesan materias primas por separado como lo son los casos de MA Botanics y Patagonia Farms.

La empresa MA Botanics fue la primera en Chile en obtener autorización para cultivar cannabis, en la región del Maule con una producción estimada entre 2 y 2,5 *toneladas* (en una superficie de 5 *ha*, proyectando una expansión de 20 *ha* hacia el año 2025), inicialmente exportadas en su totalidad a Uruguay en la actualidad exportan materias también a laboratorios en Suiza, en 2023 inauguraron un laboratorio para la elaboración de productos farmacéuticos y cosméticos (Donoso, 2022); La empresa Patagonia Farms, aunque actualmente no se encuentran en operación, logró en conjunto con la facultad de medicina de la Universidad de Chile obtener la autorización para la elaboración de sus productos, además contó con dos permisos para el cultivo de cannabis, y la

autorización para construir un laboratorio de 1.600 m^2 , el cual buscaba producir extractos de grado farmacéutico utilizando los métodos de extracción supercrítica mediante dióxido de carbono junto con extracción mediante etanol criogénico.

El caso de LABSUN se destaca por respaldo científico desarrollado a la par con la creación de productos terapéuticos, con líneas de investigación como el estudio del potencial anticancerígeno, antiinflamatorio, antiepiléptico, ansiolítico y antiemético de los extractos de cannabis de grado farmacéutico, presentando en 2023 un artículo acerca del potencial antioxidante de distintos tipos de extractos de cannabis y efecto de estos sobre el desarrollo de células cancerígenas en cáncer de mama, próstata y colon (Pino, y otros, 2023).

6. Marco teórico

6.1. Cultivo de cannabis

6.1.1. Ciclo de crecimiento

La especie Cannabis Sativa L. es una planta de día corto, es decir, que no necesita grandes fotoperiodos para su crecimiento, normalmente la planta alcanza la madurez necesaria para ser cosechada en un periodo de entre 3 a 6 meses, dependiendo de la variedad y la configuración del cultivo, el periodo de crecimiento se puede dividir en cuatro etapas; etapa de germinación, etapa de semillero, etapa vegetativa y etapa de floración.

Las plantas macho y hembra presentan diferencias clave para el desarrollo de productos, ya que las plantas hembra son las únicas que producen flores con concentraciones de cannabinoides aprovechables para su uso terapéutico, las flores macho por otro lado presentan una producción considerablemente menor de principios activos por lo que su uso se destina principalmente a la producción de cáñamo industrial o para fines genéticos como la obtención de semillas. El desarrollo del proyecto considera solamente la utilización de plantas hembra.

En la etapa de germinación el objetivo es obtener las primeras raíces desde la semilla, esta etapa tiene una duración de 1 a 10 días, requiere de un ciclo de luz de 18 horas de luz seguido de 6 horas

de oscuridad, la temperatura óptima en esta etapa va desde los 21 °C durante la noche hasta los 30°C durante el día, además la humedad relativa requerida durante este periodo está entre 65 – 70%;

La etapa de plántulas comienza con el crecimiento de los cotiledones de la planta seguido de la transformación de estos en las primeras hojas, este periodo tiene una duración de 2 a 3 semanas, las condiciones de iluminación y humedad relativa se mantienen respecto a la etapa anterior, la temperatura optima durante este periodo debe oscilar entre los 20 – 25 °C durante el día y puede disminuir a un rango entre 15 – 20 °C durante la noche, en esta etapa se debe tener especial cuidado con el riesgo de riego excesivo debido a que las raíces aun no tienen un tamaño adecuado para soportar un suelo demasiado húmedo.

La etapa vegetativa se caracteriza por un intenso crecimiento de tallos, ramas, hojas y raíces, el periodo de luz se debe mantener en el rango de 18 horas de luz seguido de 6 horas de oscuridad, mientras que el rango de temperatura se debe mantener entre 21 °C durante la noche y 28 °C durante el día, la humedad relativa en esta etapa se debe encontrar entre 40 – 60 %, la duración de este periodo puede variar entre 3 a 16 semanas dependiendo del tipo de semilla y la disposición del cultivo, sin embargo generalmente tiene una duración de entre 3 a 4 semanas.

La última etapa del ciclo corresponde a la etapa de floración, caracterizada por la disminución del ciclo de luz a 12 horas de oscuridad y 12 horas de luz, en esta etapa comienzan a formarse las flores de la planta o cogollos, los cuales presentan la mayor concentración de compuestos de interés fitoterapéutico, esta etapa se puede extender por un periodo de entre 7 a 12 semanas, esta etapa requiere temperaturas más cálidas, en un rango de 25 – 30 °C, además es importante que durante este periodo la humedad relativa disminuya a un rango de 35 – 45 % para evitar problemas como putrefacción o proliferación de hongos (Malík et al., 2021).



Figura 2: Diferencias apreciables entre plantas hembra y macho (Sumpter, 2021).

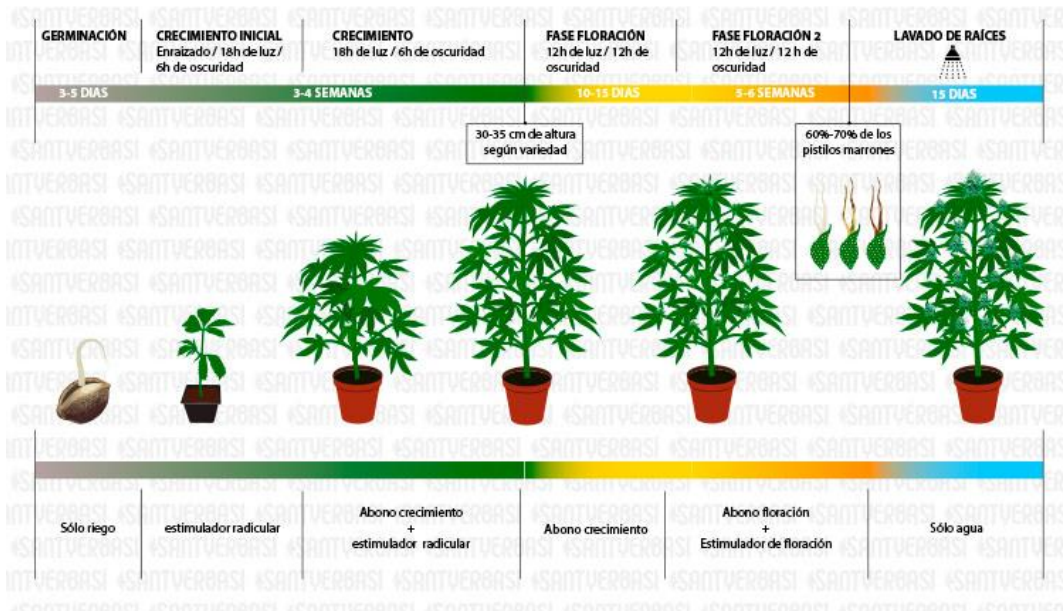


Figura 3: Representación fases de crecimiento de cannabis (Sant Yerbasi, 2016).

6.1.2. Factores que afectan el ciclo

Uno de los desafíos de la industria del cannabis medicinal es la producción de biomasa con un perfil químico definido, ya que los cultivos son sumamente susceptibles al estrés provocado por los cambios en las condiciones ambientales, provocando un aumento en la variabilidad de la composición del producto final, especialmente cuando el cultivo se lleva a cabo en exteriores, por lo que para lograr un cultivo de grado farmacológico se recomienda el uso de invernaderos o salas de cultivo para mantener un control sobre los factores ambientales, a continuación se presentan los principales factores que pueden afectar el crecimiento de las plantas o la productividad del cultivo.

Concentración de dióxido de carbono: El dióxido de carbono desempeña un rol fundamental en proceso de fotosíntesis de las plantas, proceso que controla el crecimiento de esta; los estudios realizados sobre el efecto de la concentración de CO_2 sobre la productividad de cultivos de cannabis han permitido concluir que aumentar la concentración de este gas en la zona de cultivo favorece el proceso de fotosíntesis y por lo tanto el crecimiento de la planta permitiendo alcanzar una mayor producción, además de incrementar la resistencia al estrés producido por aumentos en la temperatura, por otro lado, existe evidencia científica que permitió evidenciar que al aumentar la concentración de CO_2 de 390 *ppm* a 700 *ppm* se logró un aumento en la eficiencia de la absorción de agua y un aumento de entre 38 – 48 % en la tasa de fotosíntesis.

Luz artificial: Al llevar a cabo un cultivo, tanto en interiores como en invernaderos, es importante considerar fuentes de iluminación artificial para cumplir con los ciclos de luz necesarios de cada fase de crecimiento de la planta, más aún, el desarrollo en las distintas fases se ve favorecido por fuentes lumínicas con distintas longitudes de onda, siendo favorables las luces azules en la fase vegetativa (con longitudes de onda entre 420 – 460 *nm*) y las luces rojas en la fase de floración (longitudes de onda entre 600 – 680 *nm*). Otros factores importantes a considerar en la iluminación son la intensidad de esta (alcanzando valores óptimos de 400 – 600 $\mu mol/m^2s$ para la fase vegetativa y 600 – 900 $\mu mol/m^2s$ para la fase de floración), la cual va a favorecer la tasa de fotosíntesis conforme aumenta, pero puede ocasionar la saturación de los cloroplastos, en rangos cercanos a los 300 W/m^2 ; el tipo de luz a utilizar también puede afectar las condiciones de la planta, por ejemplo la iluminación HPS o lámparas de sodio pueden favorecer la producción

aumentando el crecimiento, mientras que las luces LED pueden aumentar la concentración de cannabinoides presentes en las flores.

Nutrición: El cultivo de cannabis, al igual que cualquier cultivo vegetal, se ve afectado por la presencia de nutrientes en el sustrato, para obtener productos de grado farmacológico, en particular es de suma importancia conocer los nutrientes y las cantidades requeridas por la especie a cultivar para obtener un producto de calidad y replicable, los nutrientes requeridos por este tipo de plantas se pueden dividir en macronutrientes y micronutrientes según su función.

Los macronutrientes; nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) tienen un rol fundamental en crecimiento de la planta y la producción de cannabinoides en la etapa de floración, el nitrógeno en particular es esencial para el crecimiento de tallos y hojas, mientras que el fosforo se encarga de regular el crecimiento de las raíces y las flores, por otro lado el potasio regula el aprovechamiento de agua y la resistencia a enfermedades o plagas por lo que la presencia de estos nutrientes determinara la eficiencia del cultivo, sin embargo la falta o exceso de estos puede provocar deficiencias en el desarrollo del cultivo o problemas de contaminación del suelo, si bien los requerimientos exactos de cada nutriente varía según la variedad que se busque cultivar, el rango optimo en condiciones de interior para el nitrógeno varía entre 190 – 400 *mg/L* (considerando el valor óptimo de 389 *mg/L*), si bien no se han llevado a cabo estudios para evaluar la concentración de nitrógeno en cultivos de invernadero, estos datos son consistentes con estudios realizados en cultivos de tomates en invernaderos, para el caso del fosforo y el potasio se ha reportado que la concentración optima durante la etapa vegetativa es de 126 *mg/L* y 165 *mg/L* respectivamente, mientras que en la etapa de floración, cuando la concentración optima de nitrógeno es de 238 *mg/L*, las concentraciones de fosforo y potasio deben ser de 123 *mg/L* y 470 *mg/L* respectivamente, otros macronutrientes que favorecen el crecimiento saludable de las plantas son el calcio (C), el magnesio (Mg) y el azufre (S) que favorecen procesos naturales de las especies vegetales como división celular y fotosíntesis.

Los micronutrientes necesarios para favorecer el crecimiento saludable del cultivo, promueven procesos celulares como la fotosíntesis o la producción de proteínas, entre estos nutrientes se encuentra el hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn), cobre (Cu), boro (B), y molibdeno (Mo), estos

micronutrientes se deben suministrar en menores cantidades respecto a los macronutrientes principales, ya que existe la posibilidad de ocasionar efectos adversos, como lo es en el caso del fierro que puede facilitar la degradación de cannabinoides ácidos como el CBDA (el principal compuesto de interés medicinal en su forma neutral, CBD).

PH: El PH del medio de cultivo esta dado por la solución que contiene los nutrientes suministrados a la planta, en los cultivos realizados mediante el uso de sustratos el PH recomendado se encuentra en un rango entre 5,8 – 7,2 alcanzando un óptimo cuando el PH es igual a 6,5, una disminución del PH puede ocasionar una disminución en la disponibilidad de los macronutrientes provocando una deficiencia de macronutrientes, alternativamente una deficiencia de micronutrientes puede ocurrir cuando el PH aumenta respecto al rango establecido.

Bioestimulantes: Los bioestimulantes son cualquier sustancia o microorganismo añadido al medio de cultivo con la intención de aumentar la resistencia al estrés abiótico, la disponibilidad de nutrientes o la producción del cultivo, entre los principales bioestimulantes estudiados en encuentran el humus o sustancias húmicas, proteínas hidrolizadas, extractos botánicos o en base a algas, bacterias beneficiosas y hongos beneficiosos; si bien se ha demostrado que los bioestimulantes mejoran los aspectos del cultivo antes mencionados, se ha detectado una disminución en concentración de fitocannabinoides en plantas suplementadas con sustancias húmicas, mientras que para los otros tipos de bioestimulantes principalmente se han llevado a cabo estudios sobre su efecto en plantas de cáñamo, es decir cannabis producido con el objetivo de obtener fibras vegetales, por lo que son necesarios estudios de investigación adicionales para determinar el efecto de los distintos tipos de bioestimulantes en especies de cannabis destinadas al uso medicinal (Malík et al., 2021).

Calidad de agua: El agua de riego utilizada para el cultivo es uno de los factores más determinantes para la salud de este ya que es la encargada de servir como medio de transporte para los nutrientes hacia las plantas, ya se habló sobre el PH y la disponibilidad de nutrientes, sin otro factor importante a considerar en la calidad del agua es su dureza, ya que además de poder dañar equipos de riego, puede afectar el equilibrio de nutrientes como calcio y magnesio, la dureza recomendada o

considerada como aceptable para el cultivo de cannabis considera una concentración de carbonato de calcio entre 100 *mg/L* y 150 *mg/L* (Canna Research, 2014).

Factores bióticos: Junto con los factores abióticos, que se pueden controlar directamente durante el cultivo, también se deben considerar los factores bióticos que pueden afectar a estos, corresponden a plagas que afectan el desarrollo de las plantas y enfermedades producidas principalmente por hongos o bacterias (Dutch Passion, 2022).

Las plagas afectan los cultivos ya que pueden alimentarse del material vegetal o establecer colonias en raíces, tallos u hojas lo que puede afectar el aprovechamiento de nutrientes o la capacidad fotosintética de las plantas, limitando el crecimiento o la producción de principios activos. Entre las principales plagas que afectan los cultivos de cannabis se encuentran los pulgones, cochinillas, arañas blancas o arañas rojas, minadores, mosca blanca y larvas. Además de los aspectos de diseño como los sistemas de presión positiva que previene el ingreso de plagas al invernadero, la constante supervisión del cultivo permite identificar oportunamente el ingreso de estos para actuar de manera adecuada, el uso de pesticidas de considerarse cuidadosamente para cumplir con las exigencias de calidad establecidas.

Las plantas también pueden sufrir enfermedades producidas principalmente por hongos y bacterias, entre las principales enfermedades se encuentran el *budrot* podredumbre gris o botrytis, producida principalmente por el hongo *botrytis cinérea* provoca la aparición de moho en las flores y causa efectos necróticos sobre estas lo que puede llevar a la pérdida de las cosechas y se presenta cuando el nivel ronda el 70%.

La podredumbre de raíces o pythium, corresponde a mohos acuáticos oportunistas por lo que pueden ocasionarse debido a riego excesivo, el producida por lo patógenos del género *pythium* y provoca la descomposición y debilitamiento de las raíces, afecta principalmente a la planta en la etapa de plántulas.

El moho blanco u oídio, es una enfermedad producida por los hongos de la familia *erysiphaceae* se caracteriza por la aparición de moho o polvo blanco en las hojas y se puede extender a tallos o

flores debilitando a la planta y reduciendo su productividad, esta enfermedad afecta principalmente a plantaciones de interior cuando el cultivo experimenta cambios significativos en la humedad.

Otra de las infecciones más comunes corresponde al marchitamiento fúngico o *damping off* esta puede ser producida por una variedad de patógenos que habitan en la zona de las raíces de la planta y afecta a plántulas o plantas jóvenes debilitándolas rápidamente, causando su muerte, esta infección se produce principalmente por el exceso de riego, humedad elevada o falta de drenaje.

Las principales fuentes de aparición y propagación de enfermedades corresponde al uso de sustratos infectados, por lo que la adecuada elección de sustratos o esterilización de estos es clave para mantener la salud del cultivo, así como el control que se debe tener en la realización de esquejes, ya que la clonación de especies infectadas puede provocar la contaminación del cultivo, al igual que el control de plagas, el uso de fungicidas debe realizarse con cuidado, asegurándose que estos sean permitidos por las entidades que fiscalizan el cultivo.

6.2. Estrategias de cultivo

6.2.1. Bombas de calor geotérmicas en invernaderos

La mayor dificultad a la hora de diseñar un proyecto basado en el cultivo de especies vegetales en invernaderos es la alta demanda energética que supone mantener un cultivo dentro de los rangos óptimos de temperatura y humedad relativa, tanto en el día como en la noche, durante todo el año, en especial cuando se trata de materias primas para uso farmacológico, el control preciso de estos parámetros permite asegurar el perfil químico de la materia vegetal y obtener una cosecha óptima. Una de las tecnologías más estudiadas, para esto son las bombas de calor, ya que estas permiten enfriar y calentar sin la necesidad de sistemas separados, además presentan una gran eficiencia térmica y pueden funcionar mediante energía eléctrica, por lo que su uso aporta a la reducción de gases de efecto invernadero.

Una bomba de calor es un equipo mecánico que utiliza el principio del ciclo de potencia para transferir calor de un lugar a otro y está compuesto, esencialmente, por un compresor, un condensador, una válvula de expansión y un evaporador; por el sistema circula un fluido

denominado refrigerante, el cual es el encargado de transportar la energía térmica. El fluido se enfría al pasar por el evaporador, extrayendo calor del medio (desde el punto 1 al punto 2), luego ingresa al compresor, donde aumenta su presión y temperatura (desde el punto 2 al punto 3) para liberar calor al pasar por el condensador (punto 3 a punto 4), y finalmente pasa por una válvula de expansión donde vuelve a bajar su temperatura y presión para completar el ciclo (ver figura 3).

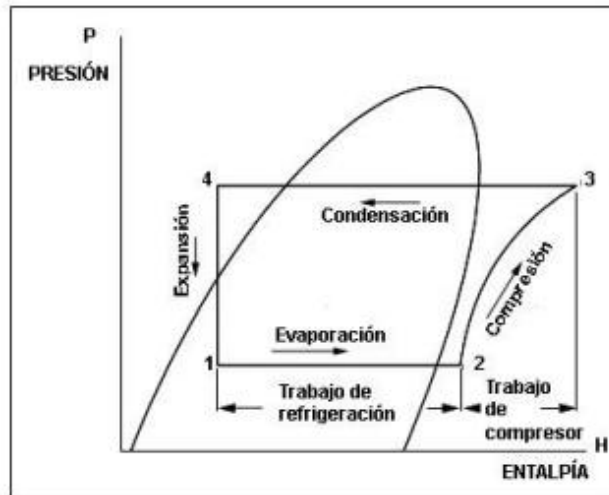


Figura 4: Diagrama de Mollier para una bomba de calor (Ortega & Larotonda, 2017).

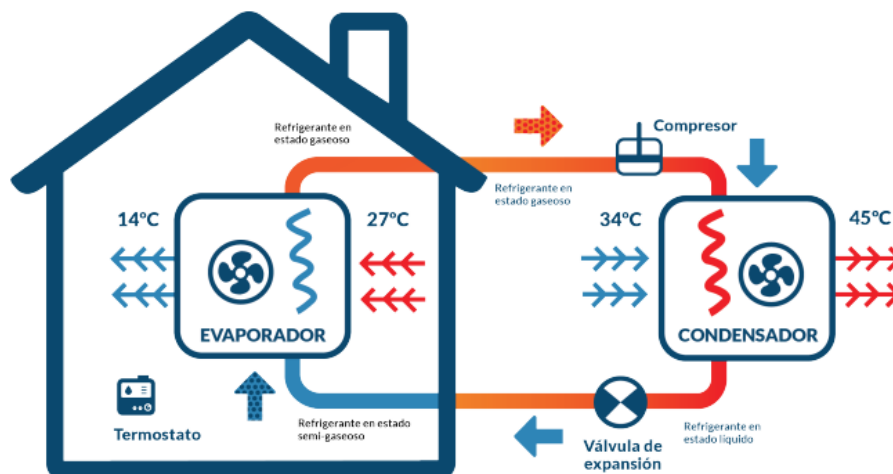


Figura 5: Configuración de una BdC aerotérmica para uso doméstico en modo refrigeración (GIZ, 2020).

Las bombas de calor pueden intercambiar calor de manera directa con los medios que se busca climatizar, o pueden tener intercambiadores de calor que cumplen esta función, además se pueden clasificar según el medio utilizado como fuente de energía y el medio de destino de la energía; de acuerdo con esta clasificación las bombas pueden ser: aire-aire, aire-agua, agua-aire, agua-agua, tierra-aire y tierra-agua, siendo estas últimas conocidas como bombas calor geotérmicas. Una de las principales razones de porque las bombas de calor se consideran uno de los métodos más eficientes de calefacción (y refrigeración), es que son capaces de generar (o transportar) más energía de la que necesitan para operar, aprovechando las propiedades térmicas del fluido refrigerante; esta eficiencia se representa mediante el coeficiente de operatividad o COP (*coefficient of performance*), el cual está dado por la razón entre el calor suministrado (o extraído) y el trabajo realizado por el equipo:

$$COP = \frac{\dot{Q}}{\dot{W}} \quad (1)$$

Donde:

$\dot{Q}$: Calor entregado por la bomba [W]

$\dot{W}$: Trabajo consumido por la bomba [W]

Las bombas de calor geotérmicas aprovechan la energía térmica contenida en la tierra del subsuelo como fuente de calor, pudiendo extraer o disipar calor en ella según las necesidades del sistema, lo que las hace una opción más eficiente que las bombas de calor de aire ya que el ambiente debajo de la tierra presenta menores fluctuaciones de temperatura en comparación con la superficie, pudiendo alcanzar valores del COP entre 3-5, mientras que las bombas de calor de aire normalmente presentan un COP entre 2,3-3,5, de esta forma se puede evidenciar la alta eficiencia de las BdC al compararlas con otros sistemas convencionales como calefactores eléctricos (presentan un COP de 1) o hornos de gas natural (COP entre 0,78-0,97) (Self et al., 2013). La alta eficiencia estos sistemas parece facilitar la decisión a la hora de diseñar sistemas de climatización, sin embargo, las bombas de calor geotérmicas presentan una mayor inversión inicial asociada a la construcción del circuito a tierra y la compra del equipo principal.

Las bombas de calor geotérmicas poseen distintas configuraciones, en primer lugar, se puede distinguir sistemas abiertos y sistemas cerrados, estos sistemas utilizan una red de tuberías para absorber o disipar el calor proveniente del subsuelo o alguna fuente hídrica, mientras que los sistemas abiertos el calor se transporta directamente desde el subsuelo, o una fuente de agua superficial o subterránea. A su vez los sistemas cerrados se pueden separar según la configuración de las tuberías subterráneas, las principales configuraciones son:

- Red Horizontal: Se utiliza cuando se tiene una gran área disponible o no se pueden realizar perforaciones profundas, es la configuración más sencilla, compuesta por una tubería larga que “serpentea” a través del suelo, esta puede ser una sola tubería (sistema en serie) o varios tramos unidos a una tubería principal (sistema en paralelo), la profundidad de este circuito normalmente se encuentra entre 60 centímetros y 1 metro.
- Red Vertical: Este tipo de sistemas permite utilizar menos terreno y obtener un rendimiento mayor, sin embargo, supone una mayor inversión ya que la o las perforaciones de este tipo de circuitos va desde los 30 metros a los 150 metros.
- Intercambiador Slinky: Esta configuración se utiliza cuando no se tiene mucho terreno disponible y no se pueden realizar perforaciones profundas, y consiste en una serie de zanjas en las cuales se instala un tubo en forma de espiral, lo que permite aumentar la longitud total de la tubería utilizando menos espacio, el costo de estos sistemas es mayor a las redes horizontales debido a su complejidad.

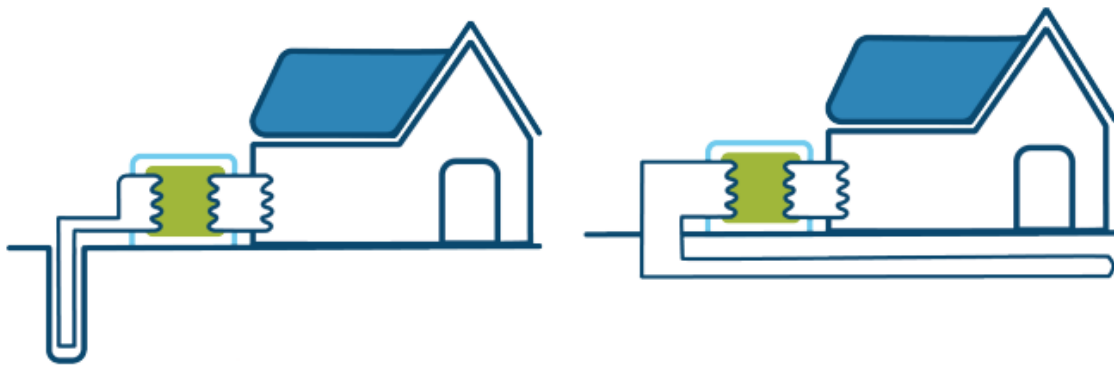


Figura 6: Esquema de una bomba de calor geotérmica con red de captación vertical (izquierda) y horizontal (derecha) (GIZ, 2020).

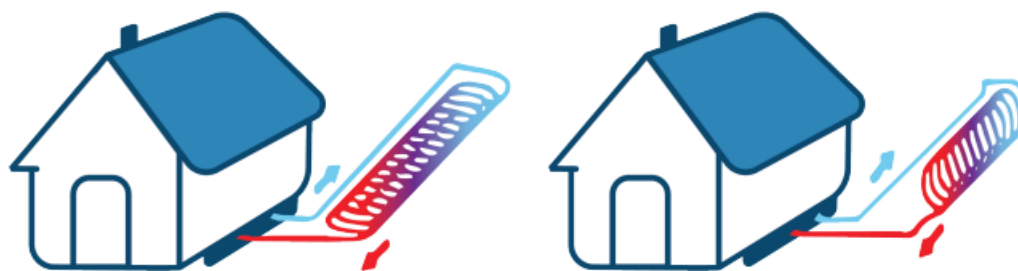


Figura 7: Intercambiadores Slinky; tipología rizada horizontal a la izquierda y tipología rizada vertical a la derecha (GIZ, 2020).

6.2.2. Sistemas de presión positiva

Uno de los aspectos más importantes a la hora de obtener cultivos de grado farmacológico es el control de plagas, más aún cuando la principal forma de controlar el ingreso de insectos u otros tipos de pestes es el uso de pesticidas que pueden alterar la composición de la materia vegetal o generar problemas de contaminación.

Una manera innovadora de controlar el ingreso de plagas a los invernaderos sin la necesidad de pesticidas es el uso de los sistemas de presión positiva, esta tecnología es aplicada a los sistemas de ventilación de los invernaderos y consiste en el uso de ventiladores de tal manera que el flujo de aire que entra al invernadero sea mayor al flujo de aire que sale de este, de esta forma la velocidad del aire en las posibles zonas de ingreso de plagas será mayor que la velocidad de vuelo de los insectos, evitando que estos ingresen a la zona de cultivo.

Estudios realizados sobre este tipo de invernaderos han demostrado su efectividad en cultivos de tomates cuando se utiliza en conjunto con mallas con un tamaño entre $0,4 - 1,0 \text{ mm}$ (Sugiyama et al., 2014), más aún, este tipo de sistemas se utiliza actualmente en cultivos de cannabis medicinal, como lo es el caso de la empresa J. Huent Greenhouses en Portugal y la empresa Bosman Van Zaal en Sudáfrica, la cual utiliza en conjunto con el sistema de presión positiva un sistema de distribución vertical de aire mediante ductos perforados lo que permite obtener un perfil de temperatura más homogéneo en el interior del invernadero y disminuir el uso de agua (tanto para el enfriamiento del aire como para el riego del cultivo).

6.3. Demanda térmica en invernaderos

El balance de energía del invernadero permite determinar la capacidad de calefacción y/o refrigeración necesaria para mantener las condiciones óptimas, considerando características de la zona de interés como intensidad máxima de la radiación solar, la temperatura y humedad, la dirección y velocidad del medio, así como también características de la infraestructura del invernadero, ya que una correcta aislación permite un uso eficiente de la energía, el balance de materia se realiza en base a lo estipulado en el informe de “Ahorro y eficiencia energética en invernaderos” formulado por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2008), el cual presenta la siguiente ecuación:

$$\dot{R}_n + \dot{Q}_{cal} = \dot{Q}_{cc} + \dot{Q}_{ren} + \dot{Q}_{evap} + \dot{Q}_{suelo} \quad (2)$$

Donde:

$\dot{R}_n$: Radiación neta [W]

$\dot{Q}_{cal}$: Energía requerida por el invernadero [W]

$\dot{Q}_{cc}$: Calor transferido por conducción-convección con el ambiente [W]

$\dot{Q}_{ren}$: Calor sensible y latente por la renovación del aire interior [W]

$\dot{Q}_{evap}$: Calor latente consumido en la evapotranspiración de las plantas y el suelo [W]

$\dot{Q}_{suelo}$: Conducción a través del suelo [W]

Para determinar cuál es la mejor zona geográfica para la realización del proyecto y para considerar las distintas condiciones a lo largo del tiempo y del día, el balance de energía se realiza para los tres lugares seleccionados, de manera mensual y además se usan los casos de día y de noche para conocer la carga térmica máxima que los invernaderos propuestos requieren.

- Radiación neta: Corresponde al calor suministrado al invernadero proveniente del sol y corresponde a la suma de la radiación solar y radiación térmica:

$$\dot{R}_n = \dot{R}_{sol} + \dot{R}_{ter} \quad (3)$$

$\dot{R}_{sol}$: Radiación solar [W]

$\dot{R}_{ter}$: Radiación térmica [W]

Los parámetros utilizados para el cálculo, así como las ecuaciones de radiación solar y térmica se presentan en el Anexo A.

- Calor transferido por conducción-convección: Existe una transferencia de calor entre el invernadero y el ambiente, la cual está dada por la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_{cc} = S_c \cdot U_{cc} \cdot (T_{int} - T_{ext}) \quad (4)$$

S_c : Superficie de la cubierta del invernadero [m^2]

U_{cc} : Coeficiente global de transferencia de calor [$W/(m^2 \cdot K)$]

T_{int}, T_{ext} : Temperaturas del interior y exterior del invernadero respectivamente [K]

Los parámetros utilizados, así como el cálculo del coeficiente global de transferencia se encuentran en el Anexo A.

- Calor sensible y latente por la renovación del aire interior: Existe una pérdida o ganancia de energía proveniente de las diferencias de temperatura y humedad entre el aire interior y exterior, como el invernadero es de diseño cerrado estas pérdidas serán menores al resto, sin embargo, de todas formas, deben ser consideradas según la expresión:

$$\dot{Q}_{ren} = V_{inv} \cdot \left(\frac{R_{aire}}{3600} \right) \cdot \rho_{aire} \cdot [c_{pa}(T_{int} - T_{ext}) + \lambda_0(x_{int} - x_{ext}) + c_{pv}(x_{int} \cdot T_{int} - x_{ext} \cdot T_{ext})] \quad (5)$$

V_{inv} : Volumen del invernadero [m^3]

R_{aire} : Tasa de renovación de aire [h^{-1}]

ρ_{aire} : Densidad del aire [kg/m^3]

c_{pa} : Calor específico del aire $[J/(kg \cdot K)]$

λ_0 : Calor latente de vaporización $[J/kg]$

x_{int}, x_{ext} : Humedad absoluta interior y exterior respectivamente $[kg/kg]$

c_{pv} : Calor específico del vapor sobrecalentado (a $0^\circ C$ es $1.875,7 [J/(kg \cdot K)]$)

Los parámetros utilizados, además del cálculo del calor latente de vaporización y la humedad absoluta se encuentran en el Anexo A.

- Conducción a través del suelo: Al igual que la transferencia de calor con el ambiente, existe una diferencia de temperatura entre el invernadero y el suelo, la cual produce una transferencia de calor que está dada por:

$$\dot{Q}_{sue} = \lambda_s \cdot S_s \cdot \frac{T_{int} - T_{sub}}{z} \quad (6)$$

λ_s : Coeficiente de conductividad térmica del subsuelo $[W/(m \cdot K)]$

S_s : Superficie del suelo $[m^2]$

T_{sub} : Temperatura del subsuelo $[K]$

z : Profundidad a la que se mide la diferencia de temperatura $[m]$

Los parámetros utilizados y el cálculo de la temperatura del subsuelo se encuentran en el Anexo A.

- Calor latente consumido en la evapotranspiración: Corresponde al proceso a través del cual las plantas pierden humedad, ya sea mediante evaporación en su superficie o mediante el proceso de respiración vegetal, estos mecanismos ocurren de manera simultánea e independiente, por lo que para facilitar su análisis ambos se engloban en la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_{evap} = \lambda_0 \cdot ET_c \cdot S_{sc} \quad (7)$$

ET_c : Evapotranspiración del cultivo [m/h]

S_{sc} : Superficie del suelo cultivado [m^2]

Los parámetros utilizados y el cálculo de la evapotranspiración del cultivo se presentan en el Anexo A.

- Radiación reflejada: Como el diseño del invernadero considera la utilización de paneles aislantes en las caras que no reciben radiación solar de manera directa, se debe considerar el calor que estas caras reflejan debido a la radiación que reciben en su interior, esta radiación está dada por:

$$\dot{Q}_{ref} = G_g \cdot S_c \cdot \rho \quad (8)$$

G_g : Irradiancia solar global [W/m^2]

ρ : Coeficiente de emisividad o albedo de la cubierta interior.

Los parámetros utilizados y el cálculo del coeficiente de emisividad se detallan en el Anexo A.

6.4. Ciclo termodinámico de la bomba de calor

Mediante el balance de energía del ciclo de refrigeración/calefacción del sistema, este balance permite estimar además otros factores de operación como la masa de fluido refrigerante y de aire, además de sus temperaturas. Para la caracterización de este ciclo se hace uso de la herramienta Refprop, la cual permite conocer todas las propiedades termodinámicas de un fluido a partir de dos valores conocidos, para el cálculo se utiliza como fluido refrigerante el R-410a, debido que es uno de los refrigerantes más utilizados y sus características se encuentran ampliamente estudiadas, sin embargo, este tipo de refrigerantes fluorados son rápidamente reemplazados por nuevas opciones por su posible daño al medio ambiente, por lo que se sugiere estudiar la utilización de otros fluidos refrigerantes en el futuro (se ha estudiado en el último tiempo la utilización de dióxido de carbono como fluido refrigerante en este tipo de equipos, sin embargo la inclusión de este en el proyecto requería de la inclusión de aspectos de seguridad considerables debido a la alta presión de trabajo que este fluido requiere).

Inicialmente se calcula el ciclo ideal, considerando las presiones de trabajo utilizadas normalmente para el refrigerante R-410, es decir, 8,96 *bar* en la zona de baja presión y 28,82 *bar* en la zona de alta presión (Prah, 2001).

El ciclo se calcula partiendo a la salida del evaporador, lo que corresponde al punto 2 presentado en la figura 3, en este punto se puede asumir que el refrigerante corresponde en su totalidad a vapor, es decir con una calidad igual a 1, lo que junto al valor de baja presión permite conocer las condiciones en este punto. Siguiendo el ciclo a la salida del compresor (punto 3), se asume un proceso isoentrópico, por lo tanto, conociendo la entropía en el punto anterior y el valor de alta presión se puede caracterizar este punto. El punto 4 del diagrama corresponde a la salida del condensador, donde se asume un refrigerante líquido y, por ende, una calidad de vapor de 0, además debido a que este paso corresponde a un proceso isobárico se conoce la presión obtenida en el punto anterior y, por lo tanto, las demás características en este estado. Finalmente, el punto 1 del diagrama corresponde a la salida de la válvula de expansión, lo que se considera como un proceso isoentálpico, donde el fluido vuelve a la presión baja, por lo tanto, con la entalpía y la presión en este punto, el ciclo queda caracterizado en su totalidad.

Una vez calculado el ciclo, se puede conocer la capacidad de los equipos a través de la diferencia de entalpía entre la entrada y la salida del condensador, el evaporador y el compresor, lo que permite a su vez obtener el coeficiente de desempeño dividiendo el calor obtenido por el evaporador sobre el trabajo realizado por el compresor, cuando la bomba opera en modo calefacción; y dividiendo el calor obtenido para el condensador sobre el trabajo del compresor, cuando la bomba opera en modo refrigeración.

El cálculo previo corresponde a un ciclo ideal, es necesario reajustarlo para que corresponda a la realidad, para esto se considera una temperatura de sobrecalentamiento de 5 °C a la salida del evaporador y una temperatura de subenfriamiento de 5°C a la salida del condensador, luego de esto se vuelve a realizar el procedimiento anterior, cabe destacar que para calcular la entalpía real a la salida del compresor, se debe considerar el trabajo ideal, en conjunto con una eficiencia adiabática del 88%.

El balance de energía para la bomba del calor del sistema, esto permite conocer los estados termodinámicos de todos los puntos de operación de la bomba, sabiendo esto posible conocer el flujo de refrigerante requerido para la bomba, en función de la potencia requerida del evaporador (calor requerido por el invernadero) y el calor que requiere para el ciclo de refrigeración, de esta forma y con el calor del evaporador calculado en apartado de balance de energía se tiene que:

$$\dot{m}_{ref} = \frac{\dot{Q}_{ref}}{Q_{evap}} \quad (9)$$

El servicio más importante de esta parte del proceso corresponde al aire, ya que este se encarga de mantener la temperatura, humedad y concentración de dióxido de carbono dentro del invernadero, para conocer el flujo de aire que requiere el invernadero es necesario conocer primero la temperatura de inyección del aire, de acuerdo con el siguiente procedimiento.

- Primero se debe conocer el factor de calor sensible (FCS), el cual se define como la relación entre el calor sensible y el calor latente al interior del invernadero. Un valor aceptado normalmente para sistema de aire acondicionado es un FCS de 0,75 para viviendas, sin embargo, para el caso de un invernadero se tienen valores más bajos debido a la evapotranspiración de las plantas en su interior, por lo que se utiliza para el cálculo un factor de 0,5 (Harbick, 2025).
- Una vez conocido el FCS, se debe utilizar una carta psicrométrica para determinar los rangos de temperatura de inyección. Primero se debe trazar una recta desde el punto del FCS escogido y que atravesase el punto 0 (es decir una temperatura igual a 25 °C y humedad relativa igual al 50%).
- Luego se deben marcar los puntos del rango de confort que se busca obtener, es decir, las condiciones de temperatura y humedad que se deben mantener dentro del invernadero.
- Posteriormente se debe trazar una línea paralela a la recta formada por el FCS, la cual debe ser deslizada a lo largo de la carta hasta que se obtenga una intersección con la curva de humedad relativa igual a 90% (el aire nunca saldrá saturado), desde dicha intersección se traza una recta hacia abajo intersectando la recta de temperatura de bulbo seco, esta temperatura corresponde a la temperatura de inyección.

Mediante este procedimiento se obtuvieron los rangos de temperatura de inyección para los modos de calefacción y refrigeración, ac continuación, se presenta la carta psicrométrica y los resultados obtenidos:

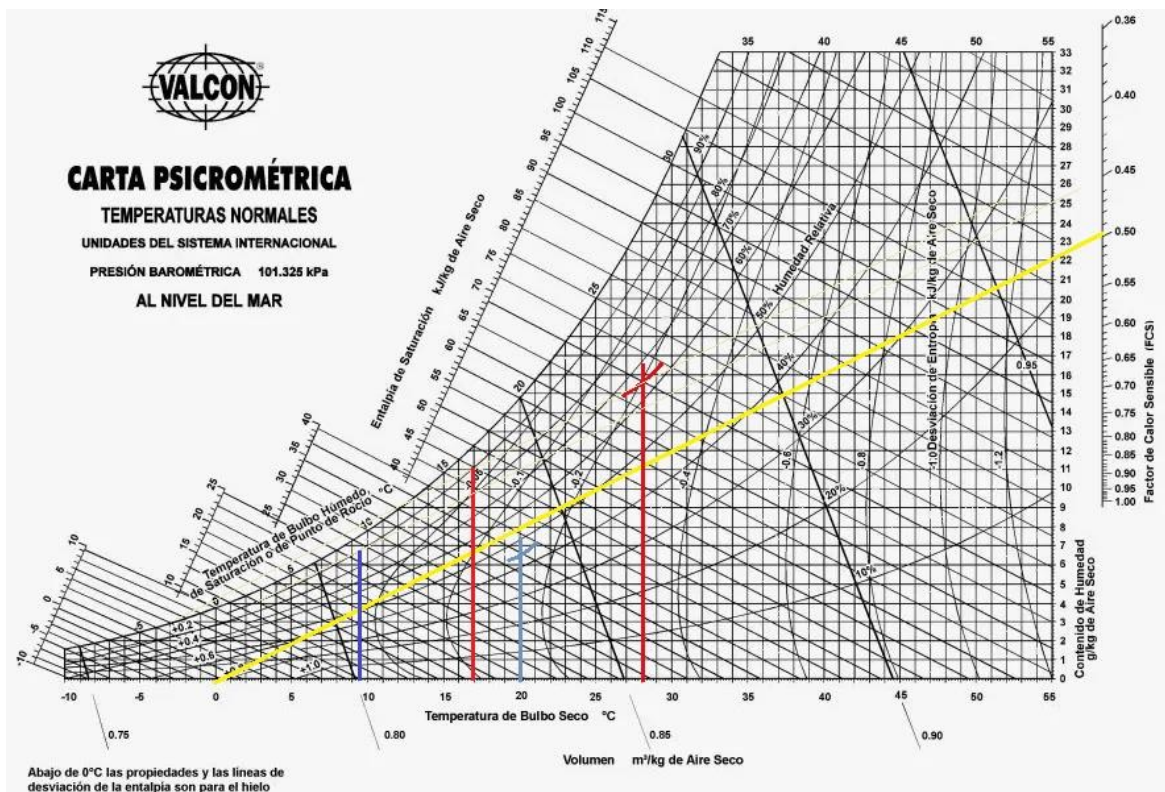


Figura 8: Carta psicrométrica, las líneas azules representan las temperaturas mínimas de inyección, las líneas rojas representan las temperaturas máximas de inyección.

Finalmente se utiliza información sobre las temperaturas mínimas de la zona, en conjunto con las temperaturas de inyección para obtener un rango de operación para el flujo de aire, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$Q = \dot{m}_{aire} \cdot c_{paire} \cdot (T_2 - T_1) \quad (10)$$

Dependiendo del modo de funcionamiento se puede utilizar la potencia del condensador o del evaporador, también dependiendo del modo se pueden utilizar las temperaturas máximas (para el caso de refrigeración) o mínimas (en el modo calefacción) ambientales y las temperaturas de inyección.

6.5. Intercambiador de calor geotérmico

El sistema de intercambio de calor geotérmico consta de una tubería de HDPE que se encuentra enterrada a 1,5 m de profundidad, cuyo objetivo es disipar o extraer el calor transferido al fluido refrigerante de la bomba de calor, al igual que la bomba de calor, el costo de este sistema se realiza a través de un indicador, el cual se obtiene a partir del área utilizada para la instalación de la tubería, sin embargo, primero es necesario estimar la longitud requerida por el sistema para cumplir con la demanda térmica siguiendo la siguiente secuencia, para asegurarse de que el área disponible es suficiente:

Primero se debe conocer el flujo de agua que atraviesa el sistema utilizando la ecuación 10, considerando como fluido de trabajo agua (alternativamente se puede utilizar una mezcla con 10% de glicol para evitar problemas de congelamiento) además de las temperaturas mínimas registradas en la zona (en modo calefacción) y las temperaturas máximas (en modo refrigeración) junto con la temperatura del subsuelo en ese momento (cuyo cálculo se presenta en el Anexo B), además se debe estimar el calor transferido al subsuelo, el cual se relaciona con el calor requerido por el invernadero y el desempeño de la bomba según la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{sub} = \dot{Q}_{req} \cdot \frac{COP - 1}{COP} \quad (11)$$

Luego, como parámetros de diseño que limitan al sistema se tiene el diámetro máximo para la tubería, el cual debe asegurar un flujo turbulento, es decir un numero de Reynolds mayor a 4.000, por otro lado, el diámetro mínimo se conoce a través de la pérdida de carga del sistema, la cual debe ser menor a la pérdida máxima que soportan las tuberías.

Una vez conocidos estos parámetros se procede realizar un proceso iterativo, donde se calcula el calor transferido al subsuelo, considerando este como una fuente o receptor de calor con un espesor pequeño y una longitud infinita, por lo que el subsuelo mantiene una temperatura constante mientras varía la temperatura del fluido, el flujo de calor estará dado por:

$$\dot{Q}_{sub} = U_{sub} \cdot A_{tub} \cdot \Delta T_{LMTD} \quad (12)$$

U_{sub} : Coeficiente global de intercambio de calor del subsuelo [$W/(m^2 \cdot K)$]

A_{tub} : Área interior de la tubería [m^2], donde $A_{tub} = \pi \cdot d_{int} \cdot L_{tub}$

d_{int} : Diámetro interno de la tubería [m]

L_{tub} : Largo de la tubería [m]

ΔT_{LMTD} : Diferencia media logarítmica de la temperatura [K]

Una vez calculado este flujo de calor, se procede a ajustar el largo requerido de la tubería mediante el método de mínimos cuadrados entre la diferencia entre los valores de calor obtenidos de las ecuaciones 11 y 12, este análisis se puede hacer para los modos de calefacción y refrigeración, así como también se pueden proponer distintas configuraciones como sistemas en paralelo, los cuales permiten dividir el flujo en distintas partes y reducir el diámetro de las tuberías (los parámetros físicos considerados y los cálculos intermedios se presentan en el Anexo B).

6.6. Métodos de extracción

6.6.1. Proceso de extracción

El proceso de elaboración de extractos a partir de la biomasa obtenida del cultivo consta de una serie de etapas complementarias a la etapa de extracción, principalmente un proceso de pretratamiento de la materia vegetal para facilitar el proceso de extracción y el post tratamiento del extracto para eliminar los solventes residuales o aumentar la pureza del producto.

El pretratamiento de la materia vegetal consiste principalmente en una etapa de secado para disminuir la humedad hasta un valor entre 0 – 15 % *p/p* y una etapa de conminucion para alcanzar un tamaño de partículas cercano a 3 *mm*, ya que un menor tamaño de partículas favorece la difusión del solvente en la materia vegetal, sin embargo, un tamaño excesivamente menor de las partículas puede llegar a producir problemas operacionales como atasco y canalización dentro de los equipos.

El proceso de secado puede ser un proceso complejo debido a la necesidad de espacio y tiempo para llevar a cabo el proceso, la susceptibilidad a la degradación de cannabinoides y volatilización de terpenos en procesos térmicos; normalmente el secado de la materia vegetal se lleva a cabo mediante la técnica de secado lento (*slow drying*) la cual consiste en colgar las ramas de la planta o posicionarlas sobre bandejas de secado en una habitación oscura a condiciones de temperatura y humedad controladas, este proceso normalmente requiere un tiempo de secado entre 5 y 6 días, la extensión del periodo de secado o la falla en el control de las condiciones ambientales puede ocasionar merma del producto debido a la aparición de moho.

Alternativamente se pueden usar equipos de deshumidificación o secadores para disminuir el tiempo entre la cosecha y la extracción, sin embargo esto supone un mayor gasto energético y la posibilidad de alterar la materia prima producto de la exposición a altas temperaturas; existen métodos alternativos de secado como la liofilización, proceso descrito en la patente US010307447B2, el cual disminuye la humedad del producto en condiciones de vacío y bajas temperaturas, permitiendo obtener un producto pulverizado sin la pérdida de compuestos de interés (Estados Unidos Patente nº US010307447B2, 2019), si bien este proceso favorece a la extracción ya que presenta tamaños de partículas uniformes y una mayor superficie de contacto, su implementación puede llegar a ser entre 4 y 10 veces más costosa otros métodos de secado; otro método no convencional para el secado de la materia vegetal es método descrito en la patente US009981203B2, en el cual se utilizan campos de pulsos eléctricos (*PEF*) (en un rango entre 0,1 – 12 kJ/kg a 20 – 30 kV) para provocar la electroporación del material, liberando las moléculas de agua presente (de menor tamaño en comparación a las moléculas interés) alcanzando humedades cercanas al 10% y generando microcanales que facilitan la difusión del solvente, la combinación de campos de pulsos eléctricos aplicado a una tasa de 6 kJ/kg y una etapa de compresión a 100 bar permiten alcanzar tiempos de secado de aproximadamente 2 horas (Estados Unidos Patente nº US009981203B2, 2017).

Otra etapa necesaria previa a la extracción es descarboxilación, la cual consiste en la exposición de la materia vegetal a una fuente de calor con el objetivo de provocar la oxidación de los cannabinoides presentes en la planta para hacerlos pasar de su forma ácida (forma en la que se

encuentran naturalmente) a su forma neutral (forma en la que se puede unir a los receptores endocannabinoides) ya que en esta forma presentan una alta solubilidad en solventes apolares, como es el caso del ácido tetrahidrocannabinólico que se transforma en Δ^9 -tetrahidrocannabinol (THC). Esta etapa depende del tiempo y la temperatura y puede ser llevada a cabo de manera simultánea con el proceso de secado en una, o múltiples etapas, y puede ser obviada en caso de que se busque obtener un extracto en base a terpenos (López-Olmos et al., 2022).

6.6.2. Extracción mediante dióxido de carbono supercrítico

La producción de extractos herbales de grado farmacológico está limitada por las regulaciones establecidas respecto a la concentración de residuos tóxicos provenientes de las sustancias utilizadas como solventes en estos procesos, por lo que poder eliminar los restos de solventes es una etapa crucial en los procesos de extracción. El dióxido de carbono destaca como fluido de servicio debido a su carácter inerte, no tóxico, no inflamable y de bajo costo, además de encontrarse en forma gaseosa en condiciones atmosféricas por lo que lograr la remoción total de este solvente en los extractos no representa un desafío, más aún, debido a su compresibilidad, especialmente en condiciones cercanas a las supercríticas (el dióxido de carbono alcanza un estado supercrítico a 31,1 °C y 73,8 bar) las propiedades físicas del CO_2 varían de tal forma que este pasa a ser un poderoso solvente apolar similar a los solventes líquidos, pero con propiedades de transporte similares a un gas (del Valle et al., 2011), volviéndose una alternativa eficiente y de alto rendimiento para la extracción de cannabinoides.

La modelación fenomenológica de los procesos de extracción supercrítica de materia vegetal se puede realizar basándose en la teoría de absorción de Brunauer-Emmett-Teller (BET), utilizando los balances de materia en la fase fluida y la fase sólida y el modelo de equilibrio BET (Pardo-Castaño et al., 2015).

La ecuación de balance de materia para el fluido en estado supercrítico considera una dispersión axial despreciable, y una acumulación de soluto en el fluido supercrítico (SCF) despreciable respecto a la cantidad de soluto en el material sólido, obteniéndose una expresión en función de la velocidad intersticial del solvente (u), la porosidad del material sólido (ϵ), la fracción de soluto

presente en el SCF (y_f), el área de contacto efectiva (a_{sf}), el coeficiente de transferencia de materia del soluto a través de la capa de fluido alrededor de las partículas sólidas (k_{sf}), y la fracción de soluto en el SFC que está en equilibrio con la fase sólida (y_f^*); la expresión tiene la siguiente forma:

$$u\varepsilon \frac{\partial y_f}{\partial z} = k(y_f^* - y_f) \quad (13)$$

Donde:

$$k = (1 - \varepsilon)a_{sf}k_{sf} \quad (14)$$

Al integrar esta expresión con las condiciones de borde usuales para este tipo de reactores (en $z = 0$, $y_f = 0$, y en $z = L$, $y_f = y_{fL}$) se obtiene la siguiente ecuación:

$$y_{fL} = y_f^* \left(1 - \exp \left(-\frac{kL}{u\varepsilon} \right) \right) \quad (15)$$

Donde y_{fL} corresponde a la composición de soluto en el fluido a la salida del reactor y L corresponde al largo del reactor.

Luego el balance de masa para el soluto contenido en la fase sólida está dado por la composición de soluto en la fase sólida (x_s), el flujo que ingresa al reactor ($\dot{m}_f$), la cantidad de soluto extraíble en la materia vegetal (m_0), y los factores y_f^* , k , L , u , y ε anteriormente mencionados:

$$\frac{dx_s}{dt} = -\frac{\dot{m}_f}{m_0} y_f^* \left(1 - \exp \left(-\frac{kL}{u\varepsilon} \right) \right) \quad (16)$$

Esta ecuación se puede utilizar en conjunto con la expresión de equilibrio tipo BET:

$$\frac{x_s}{x_m} = \frac{KX}{(1 - X)(1 + (K - 1)X)} \quad (17)$$

Donde x_m corresponde a la concentración de soluto presente en la primera monocapa, X corresponde la razón entre la fracción de masa de solvente en equilibrio y la fracción de masa de solvente en la fase saturada del SCF, y K corresponde al coeficiente de equilibrio de absorción.

Resolviendo esta ecuación cuadrática y considerando el momento en el que el SCF se encuentra saturado por el soluto, se obtiene la expresión:

$$X = \frac{s - K \pm K}{2(1 - K)} \quad (18)$$

La resolución de la ecuación 18 corresponde a un proceso analítico complejo, el cual puede ser simplificado para llegar a las expresiones para la solubilidad del soluto en el SCF y^* y el tiempo de residencia de este:

$$y^* = y_{sat} \left(1 - \exp \left(- \frac{Bi}{Re Sc} \right) \right) \quad (19)$$

$$t = \frac{m_0}{\dot{m}_f y^*} (x - x_m \ln(1 - x)) \quad (20)$$

Donde x corresponde a la obtención de la extracción, x_m corresponde a la razón entre la cantidad de soluto presente en la primera monocapa y la cantidad de soluto total, estos valores corresponden a parámetros ajustables con datos experimentales, por otro lado, los números adimensionales de Biot, Reynolds y Schmidt se definen mediante las siguientes ecuaciones:

$$Bi = \frac{hL}{D} = \frac{KL}{\varepsilon} \quad (21)$$

$$Re = \frac{ud_p}{\nu} \quad (22)$$

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (23)$$

Donde D corresponde al coeficiente de difusión del soluto, h corresponde al coeficiente de transferencia de masa, ν corresponde a la viscosidad cinemática, y d_p corresponde al diámetro de partículas.

6.6.3. Extracción etanólica (extracción por solvente)

El proceso de extracción por solvente consiste en la maceración de la materia vegetal, con el objetivo de separar los tricomas de la planta, obteniendo así un extracto de amplio espectro, es decir, que contiene todos los tipo de compuestos de interés fitoterapéutico (cannabinoides y terpenos) así como también compuestos indeseados como clorofila o celulosa, por lo que el tiempo de extracción es crucial para minimizar la presencia de estos compuestos, también este tipo de extracciones requieren de una etapa de eliminación del solvente como evaporación por calor o rotavapor; la elección del etanol como solvente se debe a su alto poder como solvente y debido a que es apto para el consumo humano y menos peligroso que otros tipo de solventes como el butano (López-Olmos et al., 2022).

El objetivo de la maceración es que compuestos de interés se disuelvan desde la fase sólida a la fase líquida hasta que estas alcancen su estado de equilibrio, este estado de equilibrio se puede modelar de distintas formas como diagramas ternarios, la teoría BET (ecuación 17) y los modelos de Langmuir y Anti-Langmuir (Vega Duarte, 2022), los cuales tienen la siguiente forma:

$$q_{eq} = \frac{q_s K_L c_\infty}{(1 + K_L c_\infty)} \quad (24)$$

$$q_{eq} = \frac{q_s K_L c_\infty}{(1 - K_L c_\infty)} \quad (25)$$

Donde q_{eq} corresponde a la carga de equilibrio del material extraíble, q_s corresponde a la carga del solido en saturación, K_L corresponde a la constante de equilibrio de adsorción, y c_∞ corresponde a las concentraciones del solvente en el equilibrio las cuales se obtienen mediante modelo de ley de velocidad por medio de los balances de masa:

$$q_{eq} = \frac{m_{ext}}{m_{inext}} \quad (26)$$

$$m_{ext} = \frac{g_{inic}}{g_{MV}} - \frac{g_{eq}}{g_{MV}} \quad (27)$$

$$m_{inext} = 1 - \frac{g_{inic}}{g_{MV}} \quad (28)$$

Donde m_{ext} es la masa extraíble de la materia vegetal por unidad de masa, m_{inext} corresponde a la biomasa que no se puede extraer, g_{inic}/g_{MV} corresponden a la masa en gramos de extracto disponible por unidad de masa de materia vegetal antes de la extracción, y g_{eq}/g_{MV} corresponde a la masa en gramos de extracto disuelto en el solvente en el equilibrio.

7. Metodología

La metodología a aplicar para la realización del presente trabajo de memoria de título corresponde a la metodología de evaluación de proyectos, como la presentada por Nassir. Reinaldo y José Manuel Sapag en la sexta edición del libro Preparación y Evaluación de Proyectos. En este caso se realizará un estudio de prefactibilidad técnico – económica para la instalación de una planta de cultivo y elaboración de extractos de grado farmacológico en base a cannabinoides, esta evaluación consiste en la realización de un estudio de mercado, un estudio técnico y un estudio económico para determinar la rentabilidad de la inversión del proyecto (Sapag Chain, Sapag Chain, & Sapag Puelma, 2014).

El estudio de mercado tiene por objetivo ratificar la posibilidad real de insertar el producto a desarrollar en el mercado actual, así como determinar el segmento al que pertenece, la demanda que se puede esperar y las condiciones del potencial público objetivo. Para el caso de estudio se definirá la demanda esperada en función de los clientes actuales de la empresa, así como las estadísticas de consumo de cannabis a nivel nacional, incidencia en el país de las enfermedades que el producto final buscará tratar y la población que busca alternativas naturales a fármacos sintéticos, de la misma forma el precio del producto se estimará en base a la oferta y la demanda proyectada

y será contrastado con los precios de venta del laboratorio actual y las empresas que desarrollan productos similares en el ámbito nacional.

Una vez determinada la demanda y los productos, se debe definir cómo se van a elaborar estos productos, el estudio técnico del proyecto contempla todo lo que es diseño de las instalaciones y determinación de la capacidad de producción con el objetivo de generar la información necesaria para estimar las necesidades de capital, mano de obra, y recursos necesarios para puesta en marcha y operación del proyecto de esta manera se puede saber el costo de elaborar los productos definidos anteriormente. Para la planta a diseñar se comenzará por determinar la dimensión del cultivo que se debe instalar para cumplir con la demanda anteriormente determinada, así como la localización de las instalaciones, luego el diseño de la zona de cultivo, considerando las distintas tecnologías de eficiencia hídrica y energética para luego diseñar la planta de elaboración de extractos, mediante el escalamiento necesario de los equipos existentes actualmente en el laboratorio de la empresa para cumplir con la nueva capacidad de producción.

Una vez realizado el diseño técnico de la planta se determinará el procedimiento y las condiciones de operación para cumplir con los estándares GACP y GMP para la obtención de productos de grado farmacológico de origen vegetal, además del plan de manejo de residuos necesario para cumplir con lo estipulado en la ley 20.000 respecto al manejo de sustancias sicotrópicas. A partir del diseño de la planta se procede a calcular la inversión requerida y los costos de operación para determinar posteriormente en el estudio económico la aplicabilidad de las tecnologías estudiadas y la rentabilidad del proyecto.

Una vez estimados los costos asociados a la instalación y operación de la planta se procederá a realizar el estudio económico, el cual consiste la determinación de los antecedentes financieros y la elaboración del flujo de caja con el objetivo de analizar mediante indicadores financieros como el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y el tiempo de recuperación de la inversión (payback) para estimar la rentabilidad de la inversión; en este punto además se analizará el beneficio económico de la inclusión de las distintas tecnologías de eficiencia energética para discernir apropiadamente cual o cuales se incluirán efectivamente en el proyecto para obtener una

producción eficiente y responsable de extractos de grado farmacológico, asegurando un beneficio económico que permita continuar la operación de la planta en el horizonte contemplado.

8. Resultados

8.1. Estudio de Mercado

8.1.1. Necesidad

Durante las etapas anteriores de LABSUN, mediante el proyecto Club Aldea Secreta, ha podido mediante el acompañamiento a sus miembros, experiencias interactivas y constante retroalimentación modificar su oferta de productos esta encontrar el *product market fit*, es decir, el desarrollo de productos que se ajusten perfectamente a la necesidad de un segmento acotado, desarrollando así un modelo de negocios basado en formulaciones específicas para el bienestar de sus clientes.

Las experiencias realizadas permitieron determinar que los segmentos adecuados para el enfoque de desarrollo de productos de LABSUN corresponde a personas mayores a 25 años, preocupados por su bienestar físico y el cuidado del medioambiente y que responden a una o más de las siguientes necesidades:

- Usuarios recreativos de cannabis que buscan obtener un producto seguro, de calidad y de manera legal.
- Pacientes oncológicos que buscan complementar tratamientos convencionales y minimizar los efectos secundarios de estos.
- Personas que padecen alguna enfermedad neurodegenerativa y buscan disminuir su avance o combatir sus síntomas.
- Personas que buscan soluciones menos invasivas para cuidados paliativos.
- Personas que sufren de dolor crónico y buscan opciones alternativas a medicamentos en base a opiáceos.

8.1.2. **Producto**

LABSUN busca ofrecer una serie de alternativas seguras y naturales para que los clientes puedan hacer un match perfecto que se adapte a sus hábitos y tratamientos, mediante la producción de inflorescencias de cannabis medicinal de grado farmacológico, extracto supercrítico y extracto RSO se logró desarrollar productos gran calidad para obtener efectos controlados, estos productos corresponden a flores o extractos vaporizables (obtenido del proceso de extracción supercrítica), aceites sublinguales (elaborados con RSO) y productos edibles (como trufas, gomitas o galletas en base a RSO).

- Flores secas: Corresponde en su totalidad a inflorescencias de cannabis medicinal para su consumo mediante combustión o vaporización, son de carácter full spectrum, es decir, contiene todos los compuestos activos extraíbles de interés terapéutico como cannabinoides y terpenos, sin embargo, debido a que pasa por ningún proceso de purificación contiene además material vegetal indeseado como clorofila y celulosa. Su uso responde a la necesidad de aquellos usuarios recreativos que buscan mantener la experiencia que han obtenido anteriormente, pero de forma segura y legal
- Extractos vaporizables: Se obtiene del proceso extracción supercrítica y tiene una consistencia de oleoresina, es de carácter full spectrum, además de los compuestos activos contiene ceras y aceites presentes en la prima, su composición depende de la variedad de cannabis utilizada y de las condiciones de operación del proceso de extracción (caracterización para extractos obtenidos de distintas variedades presentado en Anexo C) y responde al igual que las flores a la necesidad de aquellos usuarios recreativos que buscan mantener la experiencia que han obtenido anteriormente, pero de forma segura y legal y, también puede responder a aquellos que buscan un alivio inmediato de sus dolencias como en el caso del dolor crónico, debido a su efecto rápido, aunque de menor duración.
- Aceites sublinguales: Se elabora en base a algún aceite de grado alimenticio (aceite caprylic) y extracto RSO, es de carácter full spectrum y contiene pequeñas cantidades de materia como clorofila y en menor cantidad celulosa, la presencia de estos se puede controlar a través de la duración del proceso de extracción. Los aceites sublinguales responden de manera adecuada a

aquellas personas que presenten contraindicaciones al consumo por vaporización o al consumo de productos edibles, además su uso es recomendado para pacientes con tratamientos prolongados como son los pacientes oncológicos y los que buscan cuidados paliativos.

- **Productos edibles:** Entre la variedad de productos comestibles se tienen trufas, gomitas y galletas elaboradas a partir de extracto RSO, se destacan por tener un efecto más retardado, pero de mayor duración en comparación a los otros productos. Los productos edibles responden a aquellos pacientes que buscan una vía más fácil de ingesta como puede ser pacientes con enfermedades neurodegenerativas y así como pacientes que busquen una menor cantidad de dosis diarias debido a la larga duración de su efecto.

Tabla 1: Presentación de productos.

Producto	Formato	Contenido de cannabinoides	Almacenamiento	Precauciones de uso
Flores secas	Dispensación por gramo	Depende de la especie cultivada, puede ser alta en THC, alta en CBD o equilibrada	Almacenar en contenedor de vidrio, evitar exposición al sol y altas temperaturas, tienen una duración de aproximadamente 6 meses.	• Mantener siempre fuera del alcance de niños. • El uso de estos productos está contraindicado para mujeres embarazadas y en periodo de lactancia.
Extracto vaporizable	Contenedor de extractos de 1 g	• Alto en THC (67% THC, 1,5% CBD). • Alto en CBD (67% CBD, 0% THC). • Equilibrado (25% THC, 35% CBD)	Debe ser almacenado en contenedores herméticos y oscuros (como vidrio ámbar o acero inoxidable), tiene una duración de hasta 1 año.	
Aceite sublingual	Frasco con gotario, 30 ml	600 mg	Se deben usar recipientes oscuros como vidrio ámbar y evitar exposición a altas temperaturas,	

			tienen una duración de aproximadamente 6 meses (se puede extender a un año si se mantiene refrigerado)	
Productos edibles	Trufas, gomitas o galletas en presentación de 10 g	85 mg	Bolsas metalizadas, plásticas o para uso alimenticio, evitar exponer a altas temperaturas, son elaborados para su consumo inmediato, tienen una duración de 3 semanas,	

Los productos elaborados responden a las necesidades identificadas en los clientes, donde las flores secas y los productos edibles destacan como los productos de mayor interés para el mercado recreativo, mientras que el aceite sublingual es el producto más comúnmente prescrito para uso terapéutico (gracias a su facilidad de ingesta y precisa dosificación), sin embargo, el producto de mayor valor agregado es el extracto supercrítico (vaporizable), debido sus características como su pureza, su capacidad de estandarizar la producción obteniendo productos con efectos controlados, y su compatibilidad con certificaciones de calidad (GMP). LABSUN busca posicionarse como uno de los líderes del mercado nacional de cannabis al ser pioneros en la elaboración de productos mediante el proceso de extracción con dióxido de carbono supercrítico.

8.1.3. Demanda

Para poder estimar la demanda del producto es necesario conocer la incidencia de las principales enfermedades a tratar mediante los productos ofrecidos, así como el número de usuarios de consumo recreativo, de esta forma se puede obtener un universo total de posibles clientes a partir del cual se puede definir el alcance para cada mercado con la propuesta que se ajuste de mejor manera a sus necesidades.

- El estudio realizado por Fundación Utopía, en 2020, Percepción Sobre una Nueva Regulación para el Cannabis en Chile, permitió concluir que, de un universo de 13.500.000 personas, un 17% reconoce su uso recreacional de cannabis lo que corresponde un total de 2.295.000 personas, lo que junto a la alta probabilidad de aceptación del producto para este segmento lo hace el más atractivo por lo que se considera para este segmento un mercado de 630 personas.
- En el año 2022 se reportan 60.000 personas diagnosticadas con cáncer (Parra-Soto, López, Rodríguez-Osiac, & Celis-Morales, 2023), los que si bien, no pueden reemplazar totalmente los tratamientos de quimioterapia o radioterapia puedan usar cannabis medicinal como tratamiento coadyuvante, o para combatir los efectos secundarios, para este segmento se consideran 330 usuarios.
- En Chile se estima que 300.000 personas tienen epilepsia, de las cuales aproximadamente el 30% (90.000 personas) corresponde a personas diagnosticadas con epilepsia refractaria (Liga Chilena Contra la Epilepsia, 2024), tomando esto como referencia para pacientes de enfermedades neurodegenerativas, para este segmento se consideran 110 clientes.
- Se estima que un cuarto de la población nacional sufre de dolores crónicos, aproximadamente 5 millones de personas, sobre los cuales se reportan alrededor de 15.000 muertes al año (Comunicaciones UC-ACHS, 2023) directamente relacionadas con el uso de opioides, haciendo que también se pueda considerar como uno de los principales mercados, por lo que se consideran 800 usuarios.
- Otro de los mercados identificados es de las personas que requieren de cuidados paliativos, se estima que, en 2019, 43.970 accedieron a este tipo de cuidados (Cuidados Paliativos UC, 2021), lo que corresponde a un segmento dentro de los mercados identificados por lo que se considera para el análisis un número de 130 usuarios.

De esta forma y considerando las dosis recomendadas de cada tratamiento, es decir, 2 gramos al día para el caso de las flores secas, 0,1 gramos al día de extractos vaporizables, 3 a 5 gotitas al día para los aceites sublinguales y media unidad al día para los productos edibles se tiene, para una estimación de 2.000 clientes, la siguiente demanda aproximada de los extractos y flores requeridas para la elaboración de los productos:

Tabla 2: Demanda estimada de productos.

Producto	Demanda estimada
Flores secas	441 kg/año
Extracto vaporizable	11.640 g/mes
Aceite sublingual	332 unidades/año
Productos edibles	19.918 unidades/año

Esta demanda estimada corresponde a la capacidad óptima de producción de la planta a partir de una producción de aproximadamente 735 kilogramos de flores secas al año y espera ser alcanzada a más tardar al quinto año de operación, comenzando la operación con la mitad de la capacidad de producción mientras se avanza la captación de los mercados existentes. El aumento de los clientes en el tiempo se explica principalmente por la promulgación del derecho social a la adquisición de productos terapéuticos de cannabis, lo que permite avanzar en la aceptación, tanto del público, como en centros de salud para este tipo de productos.

A continuación, se presenta la evolución de la demanda en el tiempo a través de la cantidad de clientes:

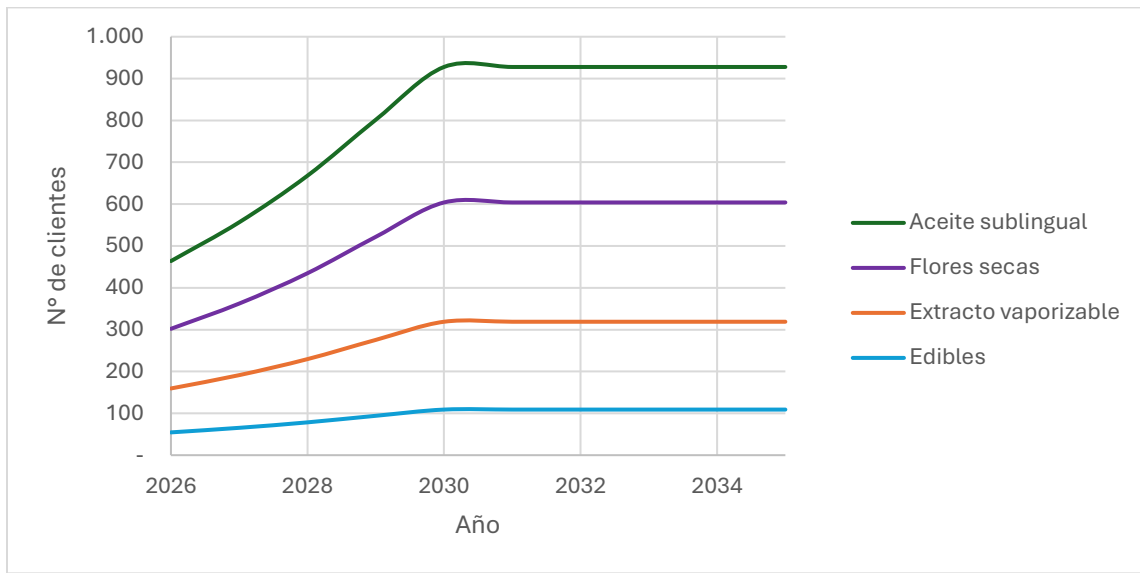


Gráfico 1: Evolución de clientes en el tiempo.

Una de las virtudes del proyecto es la flexibilidad que la producción presenta frente a la demanda, al ser todos los productos provenientes de la misma materia, se puede privilegiar la elaboración de productos cuya demanda aumenta respecto a los otros durante el desarrollo del proyecto.

- Tamaño del mercado

Muchos negocios fallan debido a errores en la formulación de hipótesis de negocio y oportunidades de mercado, por lo que una correcta determinación del mercado existente será clave para mejorar el proceso de toma de decisiones, aclarando así las posibilidades futuras del proyecto.

Una estrategia para realizar una estimación inicial de un mercado específico es la técnica Tam Sam Som, la cual permite describir tres enfoques distintos que ayudan a valorar el mercado (Santander Universidades, 2021).

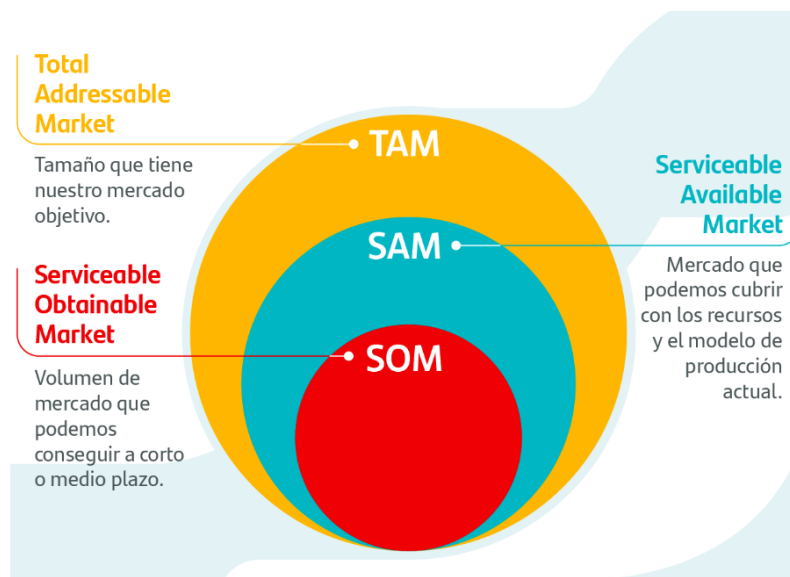


Figura 9: Técnica TAM SAM SOM para estimación de mercado (Santander Universidades, 2021).

TAM: Corresponde al mercado total o el tamaño del mercado objetivo, en el caso del proyecto corresponde al mercado mundial de cannabis, el cual llega a alcanzar los **496.000 MUSD** en el año 2025 (New Frontier Data, 2021).

SAM: Hace referencia al mercado al que se puede servir, es decir, el volumen máximo de ingresos al que se puede optar, para el proyecto se considera el mercado nacional de cannabis, el cual se proyectó que alcanzaría los **1000 MUSD** el año 2025 (Médicos Sin Marca, 2019)

SOM: Se establece como el mercado que se puede conseguir, o el volumen de ingresos obtenible durante un tiempo determinado, corresponde al volumen de ingresos determinado por el proyecto, es decir, **2,6 MUSD** durante el primer año (llegando a alcanzar los 6,2 MUSD al año 5), lo que corresponde al 0,26% del mercado nacional (o 0,62% considerando la capacidad óptima). Si se establece una meta de alcanzar el 2% del mercado una de las opciones es dedicar la totalidad de la superficie del invernadero para la producción de materia prima destinada a elaboración de extractos, aceites y productos edibles (obteniendo ingresos de aproximadamente 7 MUSD) e instalar un invernadero de baja tecnología o una zona de cultivo exterior con una capacidad de

producción de 1,5 toneladas anuales de flores secas, permitiendo así alcanzar ingresos anuales de 20 *MUSD*.

Es preciso aclarar que la estimación realizada para el mercado nacional de cannabis se basa en las cifras de consumo actual, no en ventas registradas, por ende, considera tanto medios de adquisiciones formales, como ventas ilícitas. Si se analizan las cifras del mercado de cannabis medicinal y productos farmacológicos, este mercado tiene una estimación de 17,8 *MUSD* para el año 2025 (Statista, 2025), por lo que el proyecto alcanzaría un 14,2% del mercado considerando los ingresos del primer año.

8.1.4. **Oferta**

Para poder conocer correctamente el mercado es necesario saber cómo actualmente los clientes suplen las necesidades que el proyecto busca abordar.

En el caso de los clientes recreacionales de cannabis, el proyecto busca alejarlos de narcotráfico o el mercado negro a través de un producto, legal y de calidad, los precios en este tipo de mercados pueden depender de la procedencia del producto o la zona geográfica, sin embargo, se estima que sus precios rondan entre los \$5.000 y los \$8.000 por gramo (Collado, 2025).

Para el tratamiento de dolor crónico moderado a severo uno de los medicamentos más utilizados es el tramadol, un opiáceo débil normalmente recetado en dosis de entre 50 y 100 miligramos de cada 6 a 8 horas (Etchegoyen & Carolina, s.f.), lo para un tratamiento de 100 mg cada 8 horas podría traducirse en un gasto mensual de \$130.000 (Salcobrand, 2025).

En el caso de los pacientes oncológicos, el precio del tratamiento mediante quimioterapia depende de muchos factores, como el tipo de cáncer y el avance de la enfermedad, el establecimiento de salud donde se realiza y la cobertura médica del paciente, los rangos de precios presentados por el hospital clínico de la Universidad de Chile varían desde los \$78.000 hasta los \$140.000 (Hospital Clínico Universidad de Chile, 2024), a esto se deben sumar gastos para el manejo de los efectos secundarios, como dolor, náuseas, ansiedad y problemas de apetito. Uno de los medicamentos más utilizados para combatir las náuseas provocadas por la quimioterapia es el Ondansetrón cuya dosis

consiste en 8 miligramos antes y después de cada sesión (ISP, 2020), la frecuencia de estas terapias depende del tipo y el avance de la enfermedad pero se puede considerar un ciclo de quimioterapia como una semana de sesiones diarias seguido de tres semanas de recuperación (National Cancer Institute, 2015), por lo que para un ciclo se pueden alcanzar gastos de \$28.000 mensuales (Cruz Verde, 2025) , por otro lado uno de los medicamentos más utilizados para combatir la ansiedad y los problemas de sueño son las benzodíacepinas como el diazepam, el cual considerando una dosis de 2 miligramos 2 veces al día (Maté, Hollestein Prat, & Gil, 2004) ,puede alcanzar un costo menor de aproximadamente \$4.500 (Cruz Verde, 2025).

En el caso de las enfermedades neurodegenerativas, tomando como ejemplo la epilepsia refractaria, existen diversos tratamientos, sin embargo, el más utilizado es el ácido valproico, normalmente la dosis de 500 miligramos diarios (Subsecretaría de Salud Pública, 2014), el precio de venta de este medicamento ronda los \$10.000 para la caja de 30 comprimidos recubiertos (Doctor Simi, 2025).

Para los cuidados paliativos es difícil establecer un costo ya que puede ser debido a distintos orígenes y depende del tipo de atención del paciente, para el caso de cuidados paliativos en cáncer avanzando, la Pontifica Universidad Católica reporta un copago de \$102.800 pesos en el sistema GES (Medeiros, 2024), cuyo pago efectivo dependerá de la cobertura de salud del paciente.

Dentro del mundo de la fitoterapia en base a cannabinoides uno de los principales desafíos es el difícil acceso de estos productos a la venta en farmacias debido al proceso de obtención del registro sanitario para productos terapéuticos por parte del ISP, sin embargo este puede autorizar la importación de este tipo de medicamentos sin ser inscritos en el registro sanitario, actualmente existen dos medicamentos de producción extranjera; Sativex, elaborado por la empresa británica GW Pharmaceuticals, ingresó al país por primera vez el año 2014 y en 2016 se convirtió en el primer fármaco elaborado en base a cannabinoides en obtener el registro sanitario (ISP, 2016) , es utilizado para combatir los síntomas de esclerosis múltiple y el dolor neuropático severo en pacientes con cáncer, su precio de venta ronda los \$500.000; por otro lado se tiene el medicamento Convudipiol, fabricado por el laboratorio argentino Alef Medical, cuya distribución en Chile por parte de la empresa Pharmacosante fue aprobada en septiembre de 2021 y su ingreso al registro sanitario del ISP fue aprobado once meses después en 2022 (Mediabanco, 2022), este medicamento

se utiliza para como tratamiento para la epilepsia refractaria, principalmente en niños y su precio de venta alcanza los \$535.000. En la industria nacional cabe destacar el caso del medicamento Canabiol, elaborado por Laboratorios Knop, presentado como tratamiento coadyuvante para el dolor crónico, que contó con la autorización del ISP para dos partidas de producción en 2017 y 2018, sin embargo la tercera partida fue rechazada (Fundación Daya, 2020) y más un, en 2021 obtuvieron el registro sanitario para su comercialización en Perú, sin embargo esta no fue llevada a cabo debido a que en mayo del 2022 el ISP rechazo su solicitud de registro sanitario (Cárdenas, 2024).

8.1.5. Precio

- Flores secas: El objetivo de las flores de cannabis de uso recreativo es alejar a los usuarios del mercado negro, sin embargo, estos usuarios pueden ser desincentivados por un precio muy alto, por lo que el precio propuesto corresponde al rango superior indicado anteriormente, es decir un precio de \$8.000 por gramo.
- Extracto vaporizable: De acuerdo con los costos informados para el alivio de dolor crónico, una dosis tendría un valor de aproximadamente \$1.500, sin embargo, este precio corresponde a un medicamento de gama baja para combatir dolores crónicos, por lo que tomando en cuenta este valor, más el precio que el cliente estaría dispuesto a pagar por un producto natural y con menos efectos secundarios se propone un costo unitario de \$5.000 lo que correspondería a un precio de \$100.000 el gramo.
- Aceites sublinguales: Los aceites sublinguales, para el caso de pacientes oncológicos, tienen como objetivo aumentar la eficiencia del tratamiento y atenuar los efectos secundarios, sin embargo, no reemplazan totalmente este tratamiento, por lo que considerando un costo “unitario” de aproximadamente \$2.000 para la mezcla de medicamentos para el combate de los efectos secundarios, se establece un costo unitario de \$2.300 para una dosis de aceite, lo que se traduce en un precio de \$80.000
- Productos edibles: Se consideran los casos de enfermedades neurodegenerativas, las que normalmente suelen presentar dolencias similares a los efectos secundarios, lo que, sumado a los medicamentos específicos para la enfermedad, por ejemplo, considerando el caso

mencionado de epilepsia refractaria, puede tener costos “unitarios de tratamiento” de aproximadamente \$2.500, por lo que el precio propuesto por dosis es de \$3.000, lo que se traduce en precio de \$6.000 cada unidad.

Tabla 3: Precios establecidos.

Producto	Flores secas	Extracto vaporizable	Aceite sublingual	Productos edibles
Precio	\$8.000/g	\$100.000/unidad	\$80.000/unidad	\$6.000/unidad

8.1.6. Análisis del negocio

El análisis del negocio busca conocer la situación actual de la empresa, así como del entorno de esta, también se busca caracterizar el mercado en el cual el negocio se va a insertar; esto se lleva a cabo mediante un análisis de fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas (FODA) y el análisis de fuerzas de Porter.

Fortalezas: Las principales fortalezas a destacar del proyecto es la posición de LABSUN como pioneros en la utilización del proceso de extracción supercrítica, promoviendo la calidad y la estandarización de sus productos, el enfoque en la investigación que permite la validación científica de los productos conduciendo a la profesionalización de la distribución, finalmente se destaca la variedad de productos obtenidos de la misma materia prima, permitiendo flexibilidad hacia la demanda.

Oportunidades: Las principales oportunidades del proyecto son las posibles expansiones de los mercados, gracias a la creciente aceptación de terapias basadas en cannabis (tanto en el público general como en el sector de salud pública), la posibilidad de prestación de servicios para otras organizaciones y la internacionalización o venta en farmacias al obtener la validación científica de los productos.

Debilidades: Las principales debilidades del proyecto radican en el alto nivel técnico (o de capacitación) que requieren los colaboradores, lo que se traduce en altos gastos en salarios, además del tiempo y la confianza que se requiere para formar un equipo de trabajo estable, además del alto costo asociado al cumplimiento documental y normativo (por ejemplo, costo asociado a análisis químico de los productos o procesos de validación por parte de entidades fiscalizadoras).

Amenazas: Las principales amenazas del proyecto consideran la competencia frente a un mercado informal, la estigmatización de este tipo de productos, y la posibilidad de retrocesos legislativos ante gobiernos conservadores (aunque el mercado de cannabis ha demostrado que es capaz de superar estos obstáculos, como son los casos de Estados Unidos o Brasil).

Del análisis presentado se puede concluir que el manejo tecnológico y su estrecha relación con el desarrollo científico de la empresa son factores que hacen atractivo al proyecto, mientras que las principales limitaciones al desarrollo de este provienen de un ámbito legislativo y social donde debido a la estigmatización de la industria cannábica se dificulta el ingreso a nuevos mercados y el riguroso proceso de validación para productos farmacológicos ralentiza o dificulta el desarrollo de productos que puedan competir directamente con los fármacos sintéticos (lo que crea la necesidad de elaborar productos con altos estándares de calidad). Por otro lado, se debe considerar el beneficio social del proyecto al contribuir al combate del narcotráfico y al ser un ejemplo de un modelo de negocios basado en economía ecológica.

Del análisis de fuerzas de Porter, el ámbito más destacable es el poder de negociación de los proveedores, desde el punto de vista de los bancos de semillas, ya que el acceso a fuentes certificadas de semillas es clave para el avance del proyecto, más aún, una falla en esta cadena de suministros podría limitar seriamente la producción. LABSUN busca mantener alianzas con bancos de semillas, tanto nacionales como internacionales, entre estos se encuentran el banco de semillas nacional Pronoia Seeds, el banco de semillas español Medical Seeds y el banco de semillas fundado en Holanda, Dutch Passion.

8.1.7. **Canales**

Actualmente en Chile existen tres formas de acceder a tratamientos de cannabis medicinal una vez obtenida la receta debidamente emitida por un médico cirujano, odontólogo o veterinario; una forma de acceder es mediante el autocultivo, que mediante la receta médica otorga el derecho a los usuarios de cultivar y utilizar cannabis de acuerdo al tratamiento médico indicado, sin embargo existe la posibilidad de que los usuarios no posean los medios o los conocimientos para llevar a cabo el cultivo o elaborar sus propios productos terapéuticos, en este caso aparece la figura de las asociaciones comunitarias, conocidas normalmente como clubes o dispensarios, formados en conformidad con la ley N°20.500 (de Asociación y Participación Ciudadana) corresponde a sociedades sin fines de lucro, de carácter restringido a los cuales los pacientes entregan sus derechos de autocultivo para que la asociación lleve a cabo el cultivo y la elaboración de productos para de esta forma poder acceder de manera segura a productos terapéuticos, el cultivo es financiado mediante membresías o aportes de los miembros, de esta forma se evita la venta directa de cannabis o productos derivados (prohibida según la ley N°20.000) ya que se está pagando por el servicio de cultivo y procesamiento para poder acceder al tratamiento indicado.

A diferencia de las asociaciones de cultivo comunitario, las farmacias pueden contar con la autorización del expendio de preparaciones magistrales en base a cannabinoides o la venta de fármacos que cuenten con registro sanitario en base a cannabinoides, de acuerdo a las modificaciones del artículo 23 de los decretos supremos N°404 y 405 correspondientes a los reglamentos de estupefacientes y psicotrópicos, estas modificaciones indican que "las especialidades farmacéuticas que contengan cannabis, resina de cannabis, extractos y tinturas de cannabis podrán expendirse al público en farmacias o laboratorios mediante receta médica retenida con control de existencia" (BCN, 2015)

- **Canales actuales:**

LABSUN opera actualmente como un dispensario, o corporación sin fines de lucro donde los miembros pueden acceder a productos terapéuticos, los cuales pueden ser retirados en el laboratorio o enviados directamente al domicilio del miembro mediante los canales de comunicación del club

como WhatsApp, Instagram y correo electrónico el avance del proyecto considera transformar el laboratorio actual en una tienda física una vez instalada la planta de cultivo y extracción. La operación del dispensario ayuda a financiar las investigaciones científicas necesarias para llevar a obtener la autorización del ISP para en una etapa futura entrar a un nuevo mercado mediante el ingreso a farmacias.

Entre los canales de difusión digital actuales, Whatsapp se presenta como un canal de difusión y posicionamiento de la marca, su función es mostrar el propósito de la empresa, educar acerca de los productos, presentar testimonios, novedades y contenido sobre el uso responsable de cannabis,

Whatsapp se presenta como un canal de atención personalizada, que permite la comunicación directa con clientes, seguimiento postventa, y coordinación de entregas o asesorías.

El correo electrónico de la empresa corresponde a un canal formal y segmentado que permite el envío de boletines informativos, promocionar lanzamiento de productos o el seguimiento a clientes o contactos clave (como pueden ser médicos u otras agrupaciones).

Cuando se establezca el laboratorio actual como tienda física esta se va a presentar como un espacio físico para la dispensación de productos, o la asesoría directa, además cumple con un rol estratégico como un punto de contacto entre pacientes, profesionales de la salud, y consumidores, donde se pueden realizar instancias educativas como charlas.

- Estrategia de marketing:

Una de los aspectos clave del proyecto es la captación de clientes, ya sea para informar a posibles usuarios expandiendo el mercado, o para formar una comunidad de usuarios de los productos ofrecidos, sin embargo se presentan limitaciones para la publicidad de este tipo de productos ya que el código sanitario establece que no se pueden publicitar en medios masivos de comunicación, ni fomentar su consumo, además la información presentada debe tener algún respaldo científico, de lo contrario puede ser considerada engañosa (BCN, 2024). Es por esto que, una vez determinados los segmentos y el análisis del negocio, se propone una estrategia de marketing basada en dos etapas; una etapa inicial, llevada a cabo principalmente a través de redes sociales, y

una segunda etapa, luego de haber desarrollado el respaldo científico de los productos o una vez que la ley acepte la publicidad de estos en medios masivos.

Primera etapa: Esta etapa se realiza principalmente a través de las redes sociales de la empresa, su objetivo es educar, generar confianza para construir una base de seguidores orientada a pacientes (o consumidores) informados y profesionales de la salud mediante contenido educativo o experiencial. Entre las acciones claves de esta estrategia se tiene la educación científica mediante la creación de contenido en redes sociales (se recomienda establecer una frecuencia para estas publicaciones); la formación de testimonios invitando a pacientes reales a compartir sus experiencias terapéuticas para reforzar la legitimidad y la eficacia de los productos sin incurrir en publicidad directa; la utilización del sitio web de la empresa como medio informativo acerca de salud y bienestar, publicaciones científicas, respuesta a mitos o dudas frecuentes y las publicación de avances de proyectos o de cumplimiento regulatorio; alianzas estratégicas mediante la formación de redes con profesionales de la salud, asociaciones de pacientes e instituciones científicas, además de la participación en seminarios, ferias o eventos educativos. Los principales indicadores mediante los cuales se puede evaluar el avance de esta etapa son el crecimiento mensual de seguidores, la tasa de apertura de correos, la cantidad de testimonios recolectados y la participación en eventos.

Segunda etapa: Esta etapa está sujeta a la autorización de la publicidad de los productos por parte del ISP o al avance legislativo que permita la publicidad de estos, actualmente los productos farmacológicos que requieran de una receta médica solo pueden ser publicitados a profesionales de la salud. Esta etapa tiene como objetivo aumentar el reconocimiento de la marca y sus productos mediante campañas basadas en evidencia, respaldo clínico y testimonios reales, las acciones clave que contempla esta etapa son campañas publicitarias limitadas al contenido informativo validado (resultados clínicos, testimonios verificados, beneficios específicos de productos aprobados, etc.); la activación de la tienda física como centro de experiencia mediante instancias de atención personalizada, talleres, sesiones informativas o entrega de material educativo, también contempla la presencia visual del respaldo científico del proyecto (como publicaciones o fichas técnicas); las alianzas con farmacias o agrupaciones médicas para integrar canales de difusión autorizados, realizar charlas conjuntas, generar descuentos o convenios; marketing de contenidos con evidencia

científica en medios especializados (como revistas médicas o científicas); participación en congresos de medicina y terapias complementarias; desarrollo de herramientas de recomendación de productos según condiciones específicas o un canal de consulta con expertos en el sitio web. Los indicadores que permiten apreciar el avance de esta etapa son principalmente el tráfico web, la tasa de permanencia, el número de instituciones aliadas y el reconocimiento de la marca (mediante encuestas o menciones).

8.1.8. Análisis de la ubicación

La ubicación del proyecto se debe decidir desde distintos puntos de vista, desde el punto de vista de mercado se debe decidir si es que la ubicación se define en función del mercado o en función de las materias primas, para el caso del proyecto la ubicación se define desde el punto de la materia prima ya que los clientes se pueden distribuir a lo largo de todo el país, mientras que el proyecto integrado considera que la planta de la elaboración se debe junto al invernadero de cultivo para minimizar los riesgos de higiene o seguridad, por otro lado también se propone la instalación del proyecto en, o en las cercanías de ciudades o zonas urbanas, ya que la cercanía a carabineros y la concentración de tráfico en las cercanías permite disminuir de seguridad en comparación a la ubicación del proyecto en zonas rurales. En el estudio económico se comparan las características ambientales para hacer un análisis de la ubicación en función del consumo energético y la capacidad de generación.

8.2. Estudio Técnico

8.2.1. Determinación de la ubicación

Anteriormente se analizó la ubicación del proyecto desde el punto de vista de mercado, sin embargo también es necesario hacerlo desde el punto de técnico, partiendo desde la base de que la zona central de Chile presenta condiciones ideales para el cultivo, si bien las condiciones del cultivo serán totalmente controladas al interior del invernadero, si las condiciones exteriores son propicias (o similares a las del invernadero), la demanda energética del invernadero será menor; la zona central de Chile se destaca para el cultivo de cannabis (Shuldiner, 2022) por su clima mediterráneo (inviernos suave y veranos cálidos y secos, con marcada estacionalidad lo que favorece los ciclo

de crecimiento de la planta), por presentar abundantes horas de sol, temperaturas óptimas (entre 20°-30°C en primavera y verano con mínimas nocturnas moderadas), por presentar suelos franco-arenosos a franco-arcillosos con alta capacidad de retención de nutrientes, además en la zona central se tienen humedades relativas promedio entre 40%-60% en la época de cultivo; estas características son similares las regiones líderes en cultivo de cannabis como California o Marruecos.

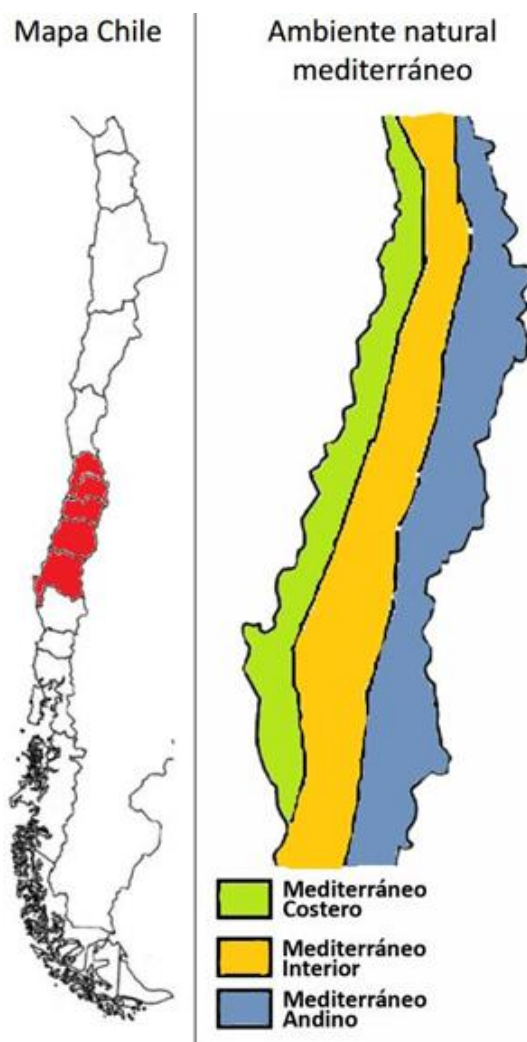


Figura 10: Distribución clima mediterráneo en Chile (Mineduc, 2017).

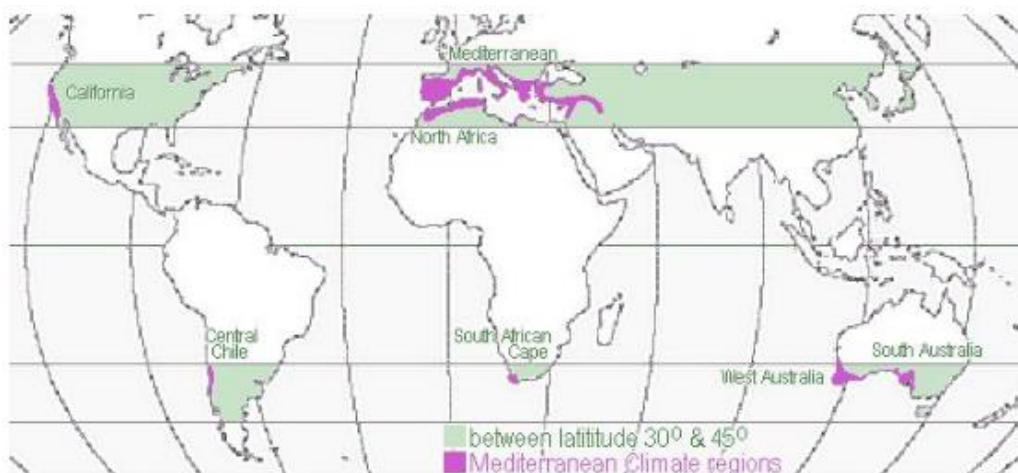


Figura 11: Distribución clima mediterráneo en el mundo (The Mediterranean Garden Society, 2009)

Se consideran las diferencias en términos de demanda energética del invernadero, y capacidad de generación solar; comparando un clima costero (con menor variación de condiciones ambientales a lo largo del día y del año) con un clima interior (mayor variación de condiciones ambientales, pero mayor capacidad de generación), a continuación se presenta la comparación entre consumo diario promedio y la generación promedio para ambas zonas (las condiciones ambientales, los consumos eléctrico y la capacidad de generación se presentan en el Anexo D).:

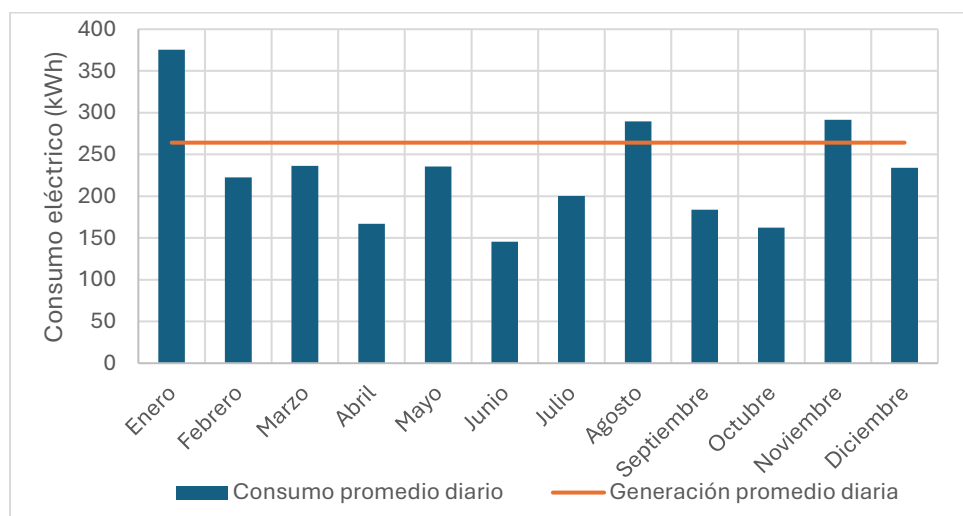


Gráfico 2: Consumo versus generación eléctrica clima costero.

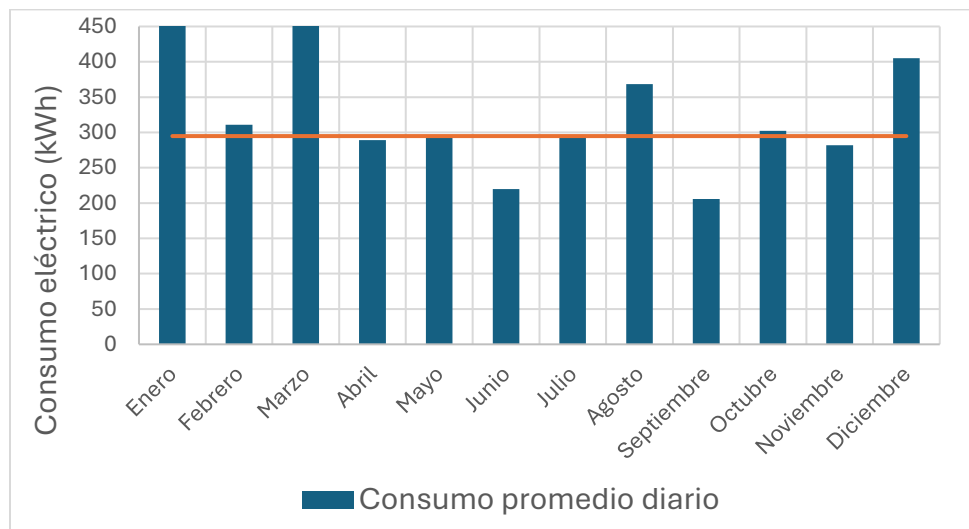


Gráfico 3: Consumo versus generación eléctrica clima interior.

El cálculo energético para ambas zonas permitió concluir que la zona más apropiada para la instalación del proyecto es la zona de clima costero, por lo que los valores presentados a continuación corresponden a la instalación del proyecto en esta zona.

8.2.2. Balance de materia y energía

8.2.2.1. Balance de materia

El balance de materia se realiza para conocer las cantidades de extractos necesarios para la elaboración de los productos a partir de la cantidad de material vegetal necesario, también se realiza el balance de materia de los servicios de la bomba de calor

Para la producción de la materia prima requerida para la elaboración de los productos se considera una base de cálculo de 2.000 *usuarios*, los cuales se dividen entre un 40% de usuarios de extractos y un 60% de usuarios de flores secas, lo que se traduce en una capacidad de producción requerida de 245 *kg/cosecha* de materia prima o una producción anual de 735 *kg/año*.

El balance de materia para los procesos de extracción, de acuerdo con el modelo realizado por LABSUN para la creación de su laboratorio, se realiza en función de las capacidades de producción

de sus equipos, como el proyecto considera la ampliación de la capacidad de producción actual, el nuevo balance se presenta a continuación (desarrollo presentado en Anexo E):

- Invernadero y planta de extracción

Tabla 4: Resultados balance de materia.

Producto	Producción (kg/año)
Flores secas	735
Extracto supercrítico	11,6
Extracto RSO	14,7

Este resultado corresponde a la demanda óptima del proyecto, la cual se alcanza a la mitad de este (al quinto año de operación) a continuación se presenta la evolución de la producción en función del tiempo:

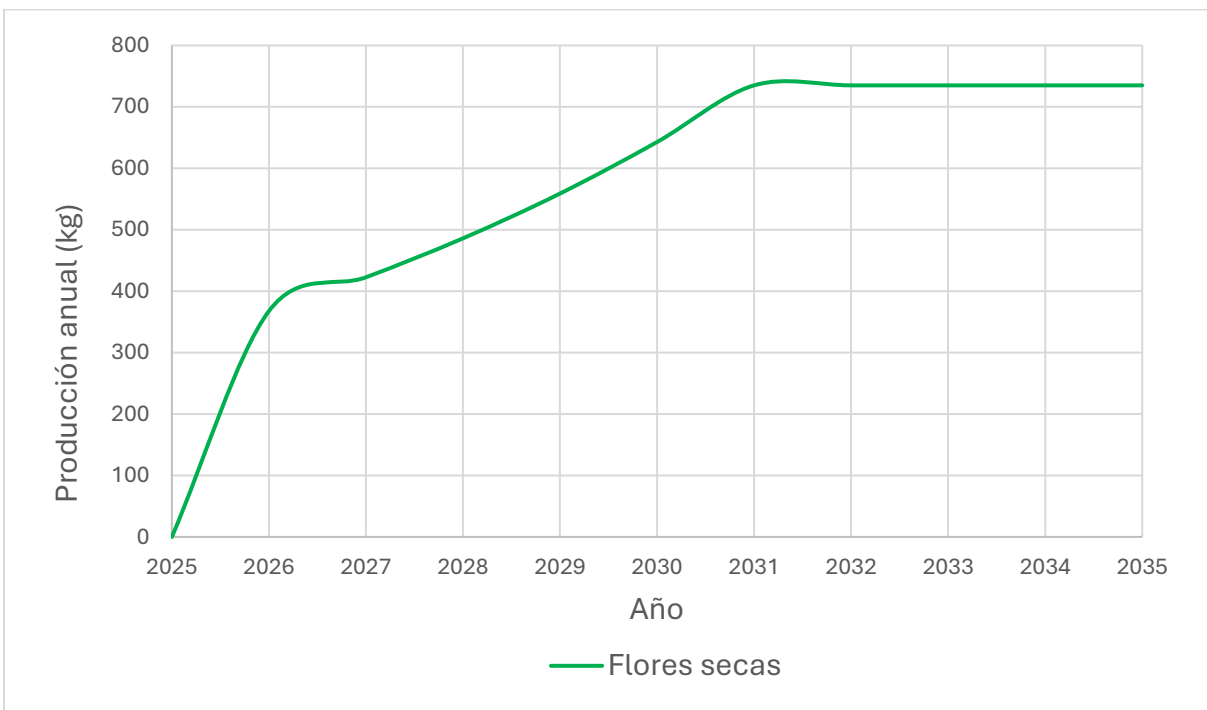


Gráfico 4: Evolución de la producción de flores secas en el tiempo.

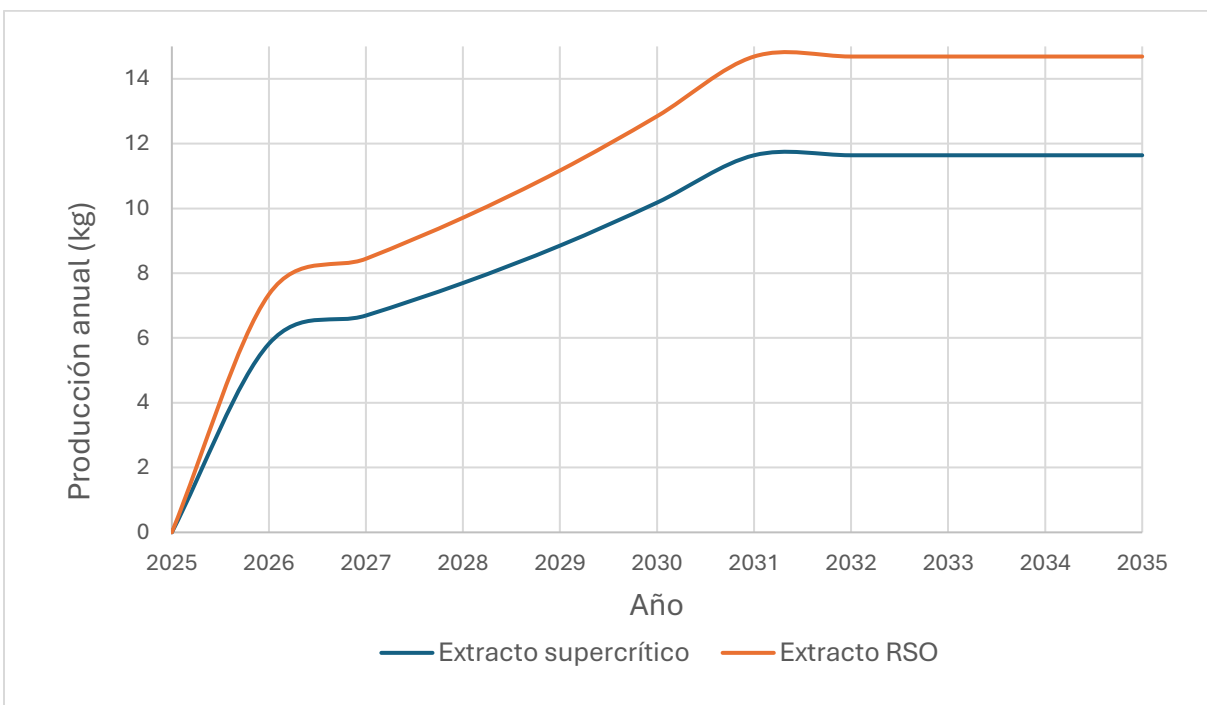


Gráfico 5: Evolución de la producción extractos en el tiempo.

- Balance de materia de servicios bomba de calor

Conociendo los puntos de operación de la bomba es posible conocer el flujo de refrigerante requerido para la bomba, en función de la potencia requerida del evaporador (calor requerido por el invernadero) y el calor que requiere para el ciclo de refrigeración de acuerdo con la ecuación 9, de esta forma y con el calor del evaporador calculado en apartado de balance de energía se tiene:

Tabla 5: Flujo de refrigerante de la bomba de calor.

Flujo refrigerante (kg/s)
0,44

Luego mediante el proceso mencionado en el marco teórico, se pueden estimar las temperaturas de inyección de aire para los distintos modos:

Tabla 6: Temperatura de inyección de aire al invernadero.

Modalidad	Temperatura mínima de inyección (°C)	Temperatura máxima de inyección (°C)
Calefacción	20	28
Refrigeración	9	17

Luego mediante la ecuación 10 se pueden conocer los rangos del flujo de inyección de aire:

Tabla 7: Flujo de aire del invernadero.

Flujo de aire mínimo (kg/s)	Flujo de aire máximo (kg/s)
3,9	5,4

8.2.2.2. Balance de energía

- Demanda energética del invernadero

Una vez conocida la cantidad de plantas a cultivar se puede conocer el tamaño del invernadero necesario, a partir de eso se puede comenzar los cálculos requeridos para el diseño de la bomba de calor a utilizar, principalmente se debe conocer la demanda energética del invernadero, la cual va a estar dada por la interacción entre las condiciones climáticas exteriores y las necesidades ambientales del cultivo dentro del invernadero. El control de las condiciones climáticas permite optimizar la producción y además disminuir la variabilidad en el perfil químico del producto final, ya que se evita someter al estrés al que las plantas estarían en condiciones de exterior, a continuación, se presenta la comparación de la demanda térmica total diurna y nocturna del proyecto (resultados del balance de energía presentado en Anexo F):

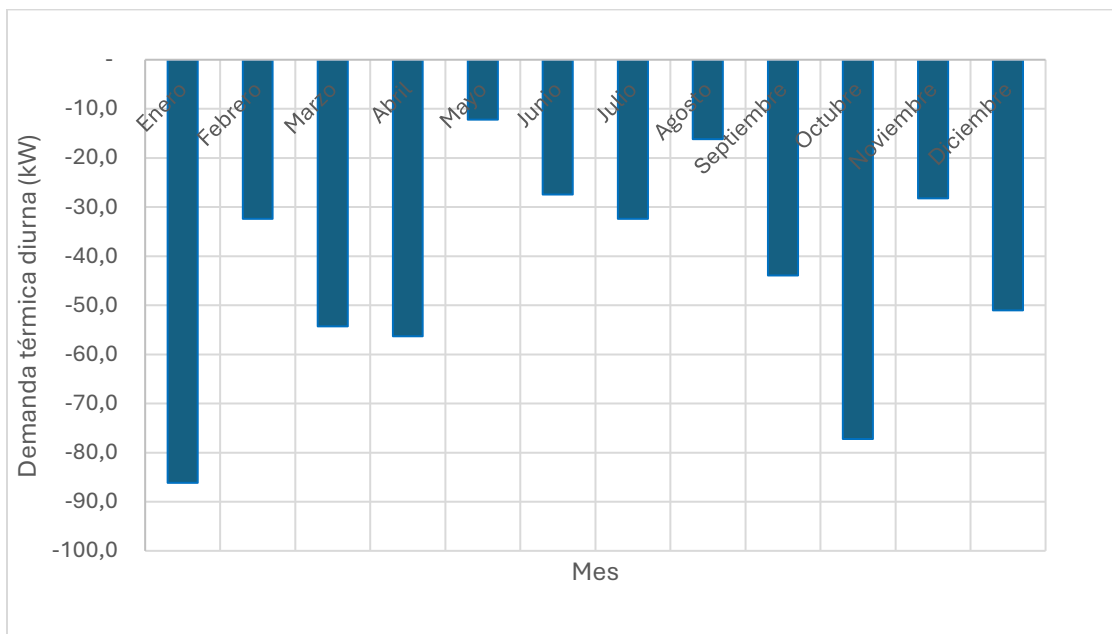


Gráfico 6: Demanda térmica diaria del invernadero.

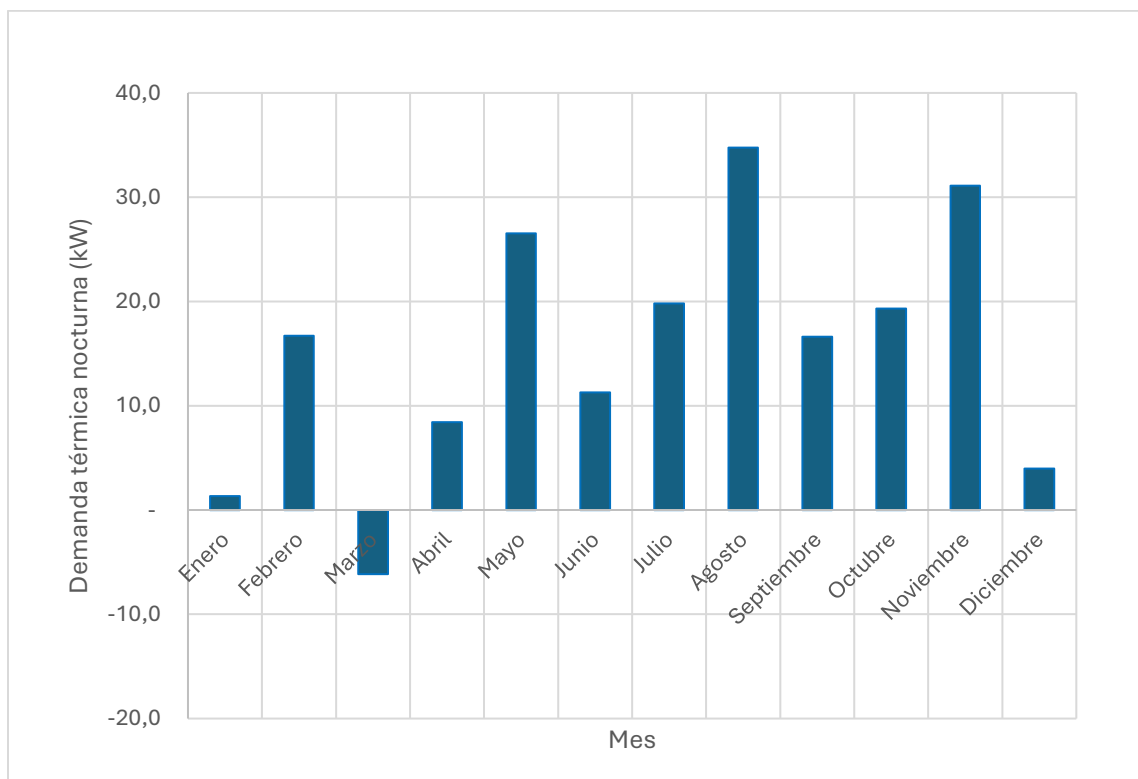


Gráfico 7: Demanda térmica nocturna del invernadero.

- Balance de energía bomba de calor

El principal factor para estimar la demanda energética de la bomba es el coeficiente de desempeño (COP), el cual representa el calor que el equipo puede entregar o extraer en función del trabajo realizado, para conocer este valor, es necesario estimar primero los parámetros de operación de la bomba, mediante el balance de energía del ciclo de refrigeración/calefacción del sistema, este balance permite estimar además otros factores de operación como la masa de fluido refrigerante y de aire, además de sus temperaturas; a continuación se presentan los resultados del balance de energía de la bomba de calor (resultados del ciclo ideal se presentan en Anexo G)

Tabla 8: Ciclo real bomba de calor.

Punto	2 (salida evaporador)	3 (salida compresor)	4 (salida condensador)	1 (salida válvula expansión)
T [°C]	8,69	74,10	42,25	3,62
P [bar]	8,96	28,82	28,82	8,96
Entalpía [kJ/kg]	428,12	465,56	270,08	270,08
Entropía [kJ/kgK]	1,82	1,84	1,23	1,29

Tabla 9: Capacidad real bomba de calor.

Equipo	Calor/trabajo	Unidad
Condensador	195,48	kJ/kg

Evaporador	158,05	kJ/kg
Compresor	37,43	kJ/kg

Tabla 10: Coeficiente de desempeño real bomba de calor.

COP Refrigeración	COP Calefacción
4,22	5,22

8.2.3. Proceso productivo

El proceso productivo del proyecto a realizar consiste en la elaboración de extractos de cannabis para uso terapéutico, este proceso se puede dividir en tres partes; el proceso de cultivo de cannabis para obtención de la materia prima para la elaboración de extractos, el cual es realizado en un invernadero cerrado, el cual utiliza un sistema de climatización (calefacción y aire acondicionado) que funciona mediante una bomba de calor geotérmica reversible; el proceso de elaboración de extractos el cual a su vez puede ser dividido según los tipo de extractos que se producen, estos son, extracción por fluido supercrítico, extracción etanólica,; finalmente el último proceso de la planta corresponde al manejo de residuos, el principal residuo asociado al proyecto es la biomasa resultante del cultivo, la cual se va buscar revalorizar mediante un proceso de peletización para obtener pellets de cáñamo capaces de ser usados en sistemas de calefacción domiciliaria, esta parte del proceso está sujeta al análisis económico para determinar si es posible incluir esta parte del proceso en la planta o si la mejor es entregar los residuos a una planta peletizadora externa.

8.2.3.1. Proceso de cultivo en invernaderos.

Como se mencionó anteriormente el cultivo de cannabis para fines medicinales requiere de un control cuidadoso de las condiciones ambientales dentro del invernadero, por lo que el

funcionamiento de la bomba de calor es crucial para la calidad del producto final. El proceso de cultivo comienza con la fase de germinación de las semillas para obtener las primeras plantas “madre”, o bien se seleccionan plantas adecuadas para clonar mediante la técnica de esquejes, la cual se lleva a cabo en una zona separada al invernadero ya que se requiere un espacio menor con condiciones ambientales distintas, luego las fases de crecimiento y floración son llevadas a cabo en el invernadero, donde las plantas van a estar sujetas a un control de la temperatura y la humedad, mediante la bomba de calor, a un control de la luz mediante la luz solar que ingresa al invernadero, así como iluminación suplementaria de acuerdo a los requerimientos de cada especie suministrada mediante focos LED, también el cultivo está sujeto a un control de los nutrientes suministrados al medio de crecimiento mediante un sistema de riego por goteo, el cual permite suministrar agua directamente a las raíces minimizando las pérdidas por evaporación, el sistema de riego también considera la utilización de una etapa de filtración (puede ser mediante una membrana de ósmosis inversa o purificación con ozono), y del aprovechamiento del agua que se obtiene en el condensador de la bomba de calor cuando actúa en modo de refrigeración.

El proceso de cultivo también incluye la cosecha, la cual es realizada a mano por el personal de la empresa, y en el caso de la materia prima destinada a la venta en forma de flores secas se considera una etapa de curado, la cual consiste en llevar a cabo en una sala privada de luz solar y con condiciones de temperatura y humedad controladas, a continuación se presenta un diagrama de flujo para el proceso de cultivo, indicando en los bloques verdes el proceso principal y en los bloques naranjos los procesos auxiliares:

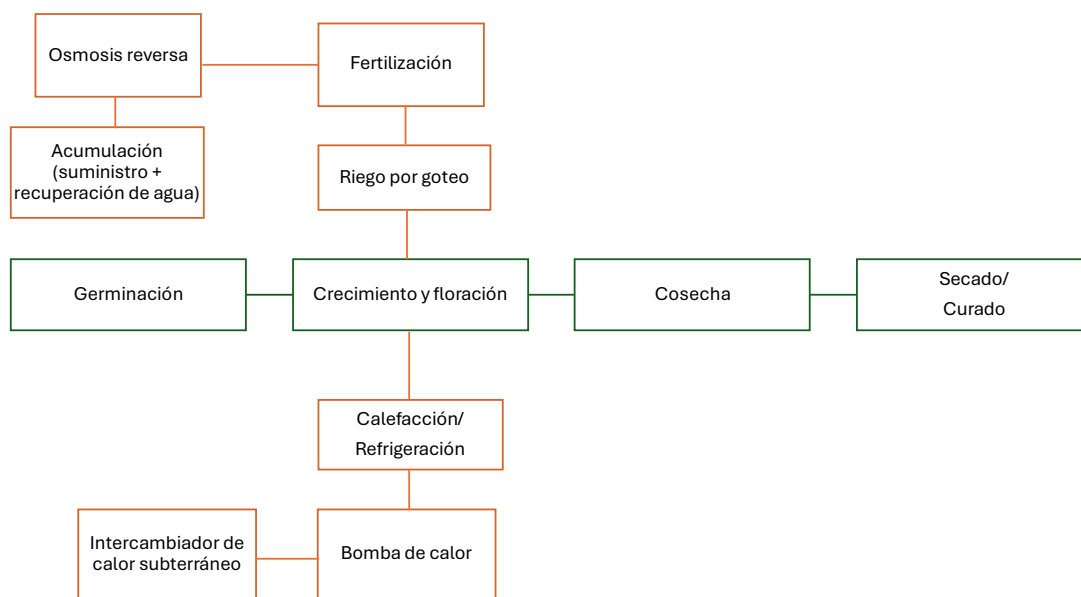


Figura 12: Diagrama de flujo proceso de cultivo.

El proceso de climatización mediante el uso de bombas de calor permite cumplir con los requerimientos caloríficos del cultivo, tanto que cuando se necesita suministrar calor al sistema como cuando se necesita extraer calor de este, mediante el uso de una válvula de cuatro vías la cual invierte el sentido del fluido refrigerante permitiendo que el condensador de la bomba pase a actuar como un evaporador, la bomba de calor entra en uso cuando la temperatura al interior del invernadero sea menor a 18°C y cuando la temperatura supera los 30°C , a continuación se presenta el diagrama para la bomba de calor:

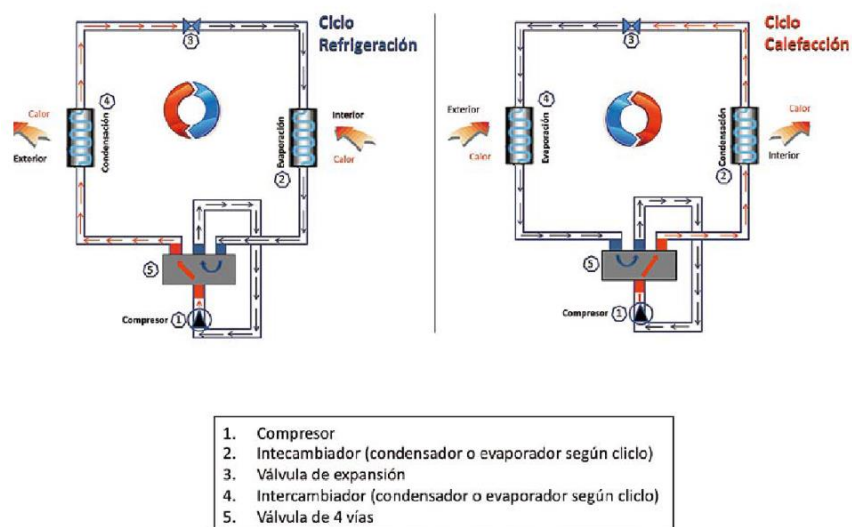


Figura 13: PFD para una bomba de calor reversible (Davofrío Ingeniería y Climatización, 2022).

8.2.1.2. Proceso de elaboración de extractos.

Los procesos de extracción para la elaboración de productos terapéuticos comienzan siempre luego de la etapa de secado en el proceso de cosecha, una vez que la materia vegetal alcanza una humedad cercana al 15%, esta pasa a la etapa de descarboxilación, donde los compuestos de interés presentes en la materia prima pasan de su forma ácida a su forma de fitocannabinoides de interés a una temperatura de 120°C , luego pasa a una etapa de molienda donde se busca que la materia vegetal alcance un tamaño de partículas de alrededor de 3 mm , una vez descarboxilado y molido el material este puede pasar a las siguientes etapas del proceso productivo según el tipo de extracción.

Para el proceso de extracción se escogió el extractor M-2.5 de la marca extraktLAB, el cual tiene capacidad de procesamiento máxima de $1,5\text{ kg}$ de biomasa (flores secas, molidas y descarboxiladas), el ciclo de extracción tiene una duración de aproximadamente 1 hora (extraktLAB, 2025), las condiciones de operación van a variar dependiendo de la composición del extracto que se requiera, normalmente estas condiciones corresponden a una temperatura entre $60^{\circ}\text{C} - 65^{\circ}\text{C}$ y una presión entre $200\text{ bar} - 250\text{ bar}$, el extracto obtenido es purgado en un baño termostático a 90°C para luego ser analizado mediante la técnica de cromatografía líquida de alta resolución (HPLC-UV). El rango óptimo de carga para el reactor se encuentra entre $0,5\text{ kg}$ a $0,75\text{ kg}$, por lo que

manteniéndose en este rango se puede controlar la producción mediante el número de ciclos semanales o diarios; para alcanzar la producción deseada se requieren 2 ciclos a la semana al inicio del proyecto, y 4 ciclos a la semana una vez alcanzada la capacidad de producción óptima; esto permite, al presentar ciclos más cortos que otros extractores de menor escala, aumentar la producción según se requiera permitiendo alcanzar producciones de hasta 40 ciclos por semana (considerando una jornada de 8 horas, y 5 días a la semana).

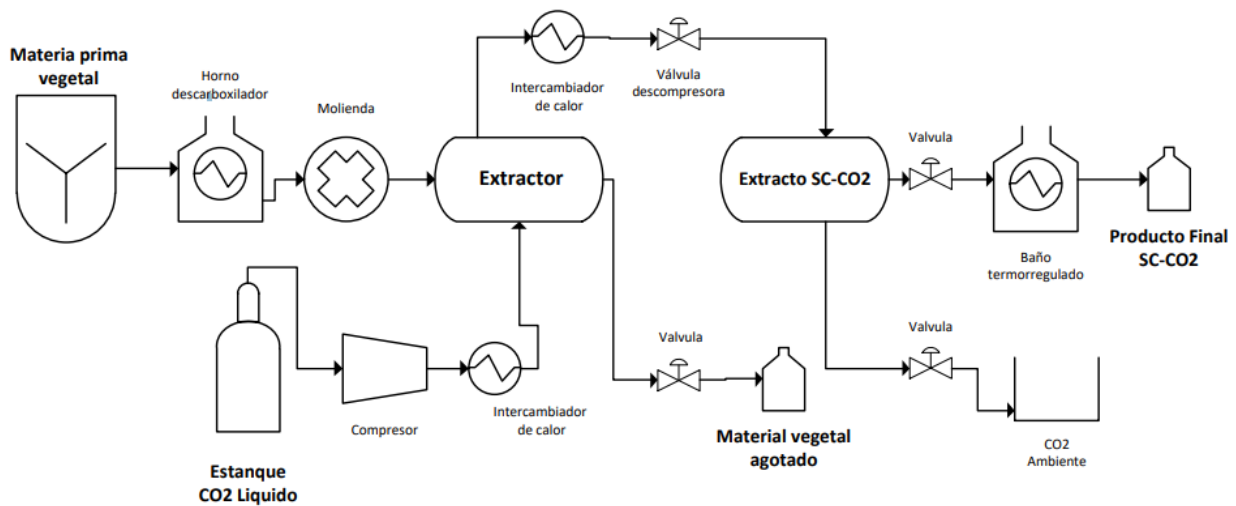


Figura 14: PFD proceso de extracción por CO2 supercrítico (LABSUN, 2023).

El proceso de extracción etanólica busca separar los tricomas del resto de la materia vegetal, esta separación es controlada por el tiempo de residencia entre la materia prima vegetal y el etanol potable de 96°, para comenzar el proceso, el material ya descarboxilado se mezcla con etanol potable de 96° a temperaturas menores a 10°C durante 3 minutos, luego de esta etapa la mezcla obtenida pasa por un sistema de filtrado al vacío, para luego acumular el material vegetal agotado para su reprocesamiento mientras que la solución etanólica es llevada al rotavapor, el cual trabaja a presiones reducidas para retirar todo el solvente utilizado (el tiempo de esta etapa depende del volumen ingresado inicialmente), finalmente al igual que el proceso anterior el solvente recuperado puede ser utilizado nuevamente y el producto obtenido es analizado y utilizado para la elaboración de productos terapéuticos. El equipo escogido para este proceso corresponde al modelo AE-RE10 de la marca A&E Lab, el cual tiene una capacidad de 600 gramos de materia vegetal por ciclo, se

proponen 3 ciclos a la semana en la etapa inicial y 6 ciclos a la semana para alcanzar la capacidad óptima, alternativamente, debido a que este equipo presenta una vida útil de aproximadamente 5 años, comenzar los primeros años con la versión de 5 litros para, luego de que este cumpla su vida útil adquirir el equipo de 10 litros de capacidad.

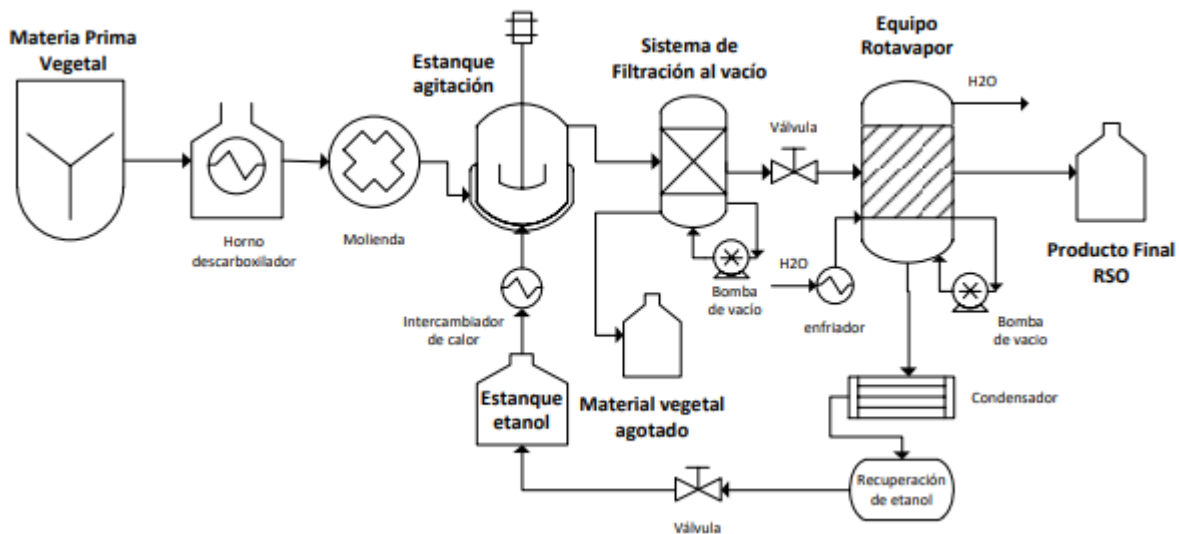


Figura 15: PFD proceso de extracción etanólica (LABSUN, 2023).

Además de los procesos mencionados existen otros métodos de extracción utilizados solo con fines de investigación o para el desarrollo futuro de productos, estos son los procesos de extracción mediante destilación fraccionada y separación física con agua y hielo son utilizados en menor manera dentro de la planta y principalmente con fines de investigación.

El proceso de destilación fraccionada se utiliza para separar compuestos con puntos de ebullición distintos pero cercanos, en la planta se utiliza para purificar los extractos obteniendo productos enriquecidos en THC o CBD de una pureza superior al 95%, los cuales pueden utilizarse para la elaboración de productos terapéuticos de formulación específica (canabinoides y terpenos cuidadosamente seleccionados). El proceso de separación física por otra parte destaca por su simpleza, requiriendo solamente un estanque agitado y bolsas filtro para su operación, en este proceso la materia vegetal se puede utilizar seca como en los otros procesos o se puede congelar previamente, luego se debe poner en contacto con el agua fría para que los tricomas se puedan

desprender de la materia vegetal y pasar a través de los filtros, a continuación, se presenta el PFD del proceso de destilación fraccionada:

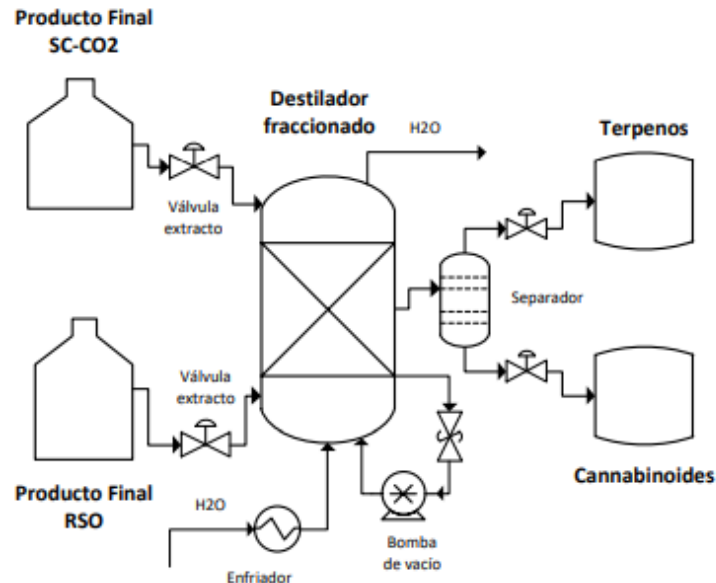


Figura 16: PFD proceso de destilación fraccionada (LABSUN, 2023).

Los procesos de extracción a utilizar permiten obtener extractos de uso terapéutico de carácter *full spectrum* lo que significa que en su composición se encuentran todos los principios activos de la materia vegetal (cannabinoides y terpenos) lo que favorece el anteriormente mencionado efecto *entourage*, sin embargo para sacar mayor provecho de este en la formulación específica de los productos se considera integrar en el futuro la obtención de terpenos mediante destilación por arrastre de vapor para poder tener mayor control sobre los efectos deseados.

8.2.1.3. Proceso de peletización de biomasa residual.

Uno de los puntos más importantes para obtener la autorización del SAG para cultivar cannabis con fines medicinales es el plan de manejo de residuos, los cuales deben ser tratados adecuadamente o incinerados en presencia de carabineros de Chile, como la empresa LABSUN busca integrar aspectos de economía circular a sus operaciones se busca revalorizar los residuos producidos a lo largo de la cadena de valor; el principal residuo generado en la planta es la biomasa

obtenida del proceso de cosecha, principalmente tallos y hojas, las cuales poseen trazas insignificantes de los compuestos de interés por lo que no son valiosas para los procesos de extracción y tampoco se pueden categorizar como sustancias psicoactivas según el listado propuesto en la Ley 20.000. Se estima que por cada kilogramo de inflorescencias de cannabis cosechadas se desechan entre 1,5 – 4,5 *kg* de biomasa (Peterson, 2019), por lo que para una capacidad de producción de aproximadamente 735 *kg/año* se podrían llegar a producir entre 1103 – 3308 *kg/año* de biomasa aprovechable. Los desechos vegetales sólidos pueden ser aprovechados de dos formas; con fines de investigación científica, a través del proyecto Lygnum de LABSUN, que investiga la obtención de biomateriales a partir de residuos vegetales como alternativa al plástico; la otra opción para el manejo de residuos es la creación de productos de valor agregado, específicamente la elaboración de pellets, para utilización como fuente de calefacción domiciliaria, principalmente en zonas donde la contaminación atmosférica obliga a reemplazar los métodos convencionales de calefacción como estufas a leña.

El proceso de peletización es relativamente simple, primero se debe secar el material hasta que tenga una humedad cercana al 11% (el proceso de secado se puede llevar a cabo al aire libre siempre y cuando la biomasa a secar no genere problemas de olores desagradables en las cercanías de la planta), luego se debe triturar hasta obtener un tamaño de partícula menor a 7 *mm* y finalmente el material triturado debe ser comprimido y extruido para la formación de pellets. Se ha estudiado la capacidad calorífica de pellets hecho en base a cannabis, obteniéndose por ejemplo valores de rendimiento calorífico de 18,9 *MJ/kg* (Stulpinaite et al., 2023) y 18,67 *MJ/kg* (Morselli et al., 2021), cabe destacar que en los estudios realizados la biomasa de cannabis se mezcla con aserrín de otros tipos de madera como abeto o roble para aumentar la integridad estructural del pellet y para disminuir su concentración de cloro y azufre, es por esta razón que se recomienda usar una empresa externa que se dedique a la fabricación de pellets que tenga las materias primas convencionales para poder actuar como proveedor de materia prima.

8.2.1.4. Sistema de control.

El sistema de control y automatización se presenta como parte auxiliar de los principales procesos productivos, sin embargo, cumple un papel crucial a la hora de mantener las condiciones óptimas

dentro del invernadero, además permite un monitoreo en tiempo real del estado del cultivo (factor clave a la hora de obtener certificaciones internacionales), y disminuye el trabajo realizado por personas al interior del invernadero.

La filosofía de control de un proceso representa la relación entre sensores, controladores y actuadores que mantienen dentro de un rango aceptable las variables de control, para el caso de estudio se han estudiado distintos tipos de sistemas de control, destacándose sistemas robustos para un control preciso mediante el sistema SCADA y el uso de redes locales (Menoni et al., 2023), sistemas diseñados para ser de bajo costo inspirados en el *IoT (Internet of Things)* (Ordoñez-Quintero et al., 2022), y sistemas orientados a la facilidad en su instalación mediante el uso de microcontroladores (Osorio, 2022).

El sistema de control escogido dependerá de la inversión que decida dedicar a este y al personal encargado de su operación y mantención, sin embargo, se puede describir su funcionamiento en rasgos generales. Las variables de control que se tienen en el sistema corresponden a la concentración de dióxido de carbono al interior del invernadero, la temperatura ambiente, la humedad relativa del aire, la humedad y temperatura del suelo, y el PH o conductividad del sustrato, adicionalmente se puede controlar la intensidad lumínica dentro del invernadero, estas variables son medidas mediante sensores digitales, los cuales envían la información (ya sea de manera analógica mediante cables, o inalámbrica mediante redes locales o wifi), al controlador central, el cual puede ser un microcontrolador (por ejemplo de tipo Arduino) o un pequeño PLC, los cuales comparan las mediciones de los sensores con las consignas establecidas por el operador (valores esperados para las variables, en función de la fase de desarrollo del cultivo) para luego generar un estímulo respuesta (el cual puede ser on/off, es decir, que actúe o no el actuador como podría ser el caso de encender o apagar la bomba de calor, o puede ser una respuesta de tipo PID, es decir, una respuesta proporcional a la diferencia entre la variable medida y el objetivo, como puede ser el nivel de apertura de una válvula) que se lleva a cabo mediante un actuador, que en esta caso corresponde a válvulas con accionamiento por solenoide para los sistemas de riego e inyección de dióxido de carbono, la propia bomba de calor también cumple las funciones de actuador, en función de las mediciones de temperatura y humedad, además se pueden utilizar actuadores tipo relé para el control de la intensidad de las luces; finalmente todos estos parámetros así como el estado del

sistema deben ser presentados en una sala de control mediante un interfaz para el usuario, la cual puede ser mediante una aplicación móvil o un panel de control.

Los aspectos ambientales del invernadero (las condiciones que son controladas por la bomba de calor), no suponen una dificultad mayor para su control, ya que la bomba cuenta con sensores, por lo tanto se pueden establecer los rangos de operación y la bomba puede funcionar como su propio sistema de control, de la misma forma la iluminación funciona con periodos fijos dependiendo de la etapa de crecimiento, no requiere una retroalimentación constante (puede ser controlada fácilmente por los trabajadores), por lo que el sistema que requiere mayor cuidado y control es el sistema de fertirriego tecnificado, el cual necesita mantener las condiciones del sustrato para asegurar el desarrollo óptimo del cultivo, a continuación se presenta el lazo de control para un sistema de riego tecnificado propuesto para un cultivo de zanahorias en invernaderos, el cual puede ser homologable al cultivo propuesto:

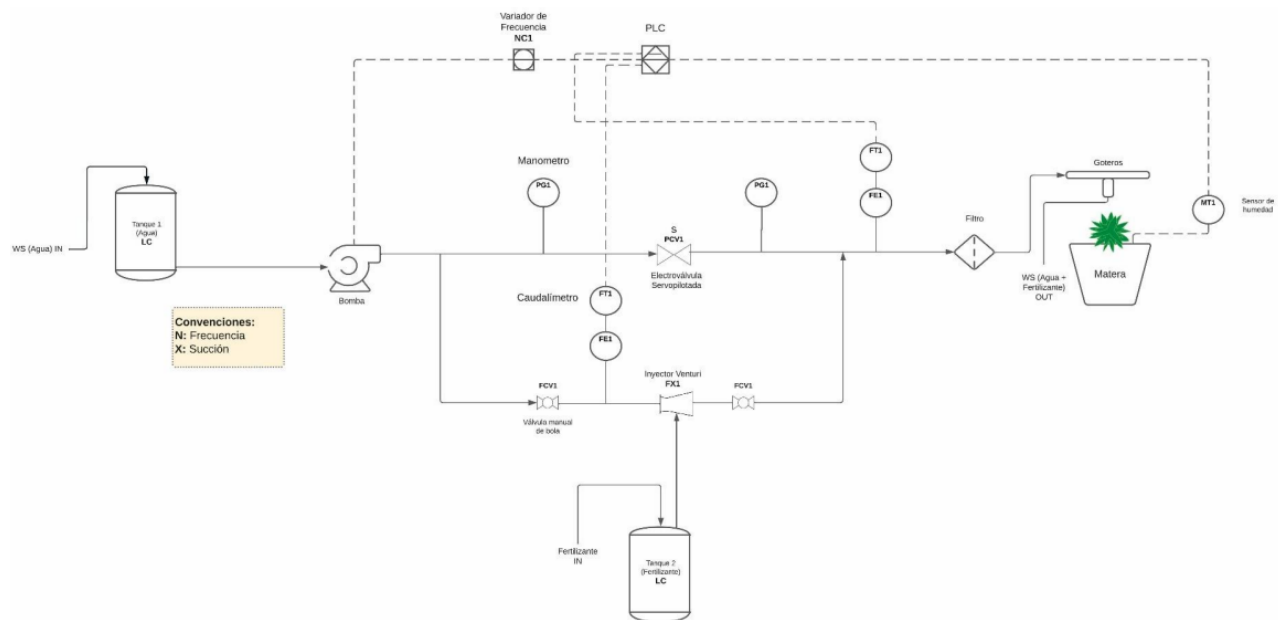


Figura 17: Lazo de control para riego tecnificado (Vásquez, Cruz, & Peñarete, 2023).

8.2.1.5. Diseño experimental para análisis de extractos mediante HPLC-UV.

Uno de los aspectos cruciales en la obtención de productos de grado farmacológico es el análisis químico de estos para asegurar la composición de los compuestos de interés, una de las técnicas utilizadas es la cromatografía líquida de alta resolución con detección ultravioleta, a continuación, se describe el diseño experimental descrito por la empresa Agilent (Murillo & Ojeda, 2021):

Tabla 11: Condiciones cromatográficas.

Columna	C18, 50 x 3,0 mm, 2,7 μ m
Longitud de onda	230 nm
Fase móvil	Solución A: 0,1 %v/v ácido fórmico en fase acuosa. Solución B: 0,1 %v/v ácido fórmico en fase orgánica.
Flujo	1,0 ml/min
Temperatura	50 °C
Volumen de inyección	5,0 μ l
Diluyentes de las muestras y estándar	Etanol y Metanol
Tiempo de corrida	9,5 minutos

Tabla 12: Gradiente de la fase móvil.

Tiempo (min)	A (%)	B (%)
0,0	40	60
1,0	40	60
7,0	23	77
8,2	5	95
9,5	40	60

- Preparación de la fase móvil: Para la solución A se debe tomar una alícuota de 1 *mL* de ácido fórmico y transferir a un matraz aforado de 1000 *mL*, luego llevar a volumen con agua tipo HPLC, filtrar mediante una membrana de 0,45 μm y desgacificar.
Para la solución B se debe tomar una alícuota de 1 *mL* de ácido fórmico y transferir a un matraz aforado de 1000 *mL*, llevar a volumen con metanol de grado reactivo, filtrar a través de una membrana de 0,45 μm y desgacificar.
- Preparación del estándar: Se realiza una curva de calibración de 5 puntos (50, 10, 5, 1 y 0,5 ppm), para la solución se debe pesar 5 *mg* de estándar de cannabinoides, transferir a un matraz aforado de 10 *mL*, disolver y llevar a volumen con el diluyente, obteniendo una concentración de 500 ppm. A partir de esta solución se realizarán las siguientes diluciones que se llevarán a volumen con el diluyente descrito:

$$50 \text{ ppm} = 1 \text{ mL}/10\text{mL}$$

$$10 \text{ ppm} = 1\text{mL}/50\text{mL}$$

$$5 \text{ ppm} = 1\text{mL}/100\text{mL}$$

$$1 \text{ ppm} = 1\text{mL}/500 \text{ mL}$$

$$0,5 \text{ ppm} = 1\text{mL}/1000\text{mL}$$

- Preparación de la muestra: Se preparan 3 muestras para cada método de extracción, para muestras líquidas como el RSO, se debe pesar una alícuota de $100 \mu\text{L}$ y transferir a un matraz aforado de 10 mL , agregar 8 mL de etanol, disolver y llevar a volumen con etanol, luego se debe filtrar la solución en un recipiente de vidrio; posteriormente se debe tomar una alícuota de $100 \mu\text{L}$ de la solución filtrada y transferirla a un frasco vial de vidrio ámbar, adicionar $900 \mu\text{L}$ de metanol de grado HPLC y agitar. Cuando la muestra se encuentra en estado sólido o semisólido como puede ser el caso del extracto supercrítico, se debe pesar 200 mg de la muestra y transferir a un matraz aforado de 20 mL , disolver y llevar a volumen con etanol, filtrar la solución en un recipiente de vidrio; posteriormente se debe tomar una alícuota de $100 \mu\text{L}$ de la solución filtrada y transferir a un frasco vial de vidrio ámbar, luego adicionar $900 \mu\text{L}$ de metanol de grado HPLC y agitar.
- Obtención de resultados: Para analizar se deben realizar las curvas de calibración para cada cannabinoide a analizar, y realizar una regresión lineal con un coeficiente de correlación lineal aceptable, de esta forma se pueden interpolar los datos para calcular las concentraciones de cannabinoides de las muestras, representados por la pendiente de la recta.

8.2.4. Programa de producción y forma de producción

Debido a las características de los equipos y los ciclos de la materia prima, se determina que el proceso de producción es un proceso de tipo batch, ya que se utilizan distintos tipos de materia según los extractos que se busca obtener, además se debe controlar cuidadosamente la cantidad de materia prima y de solventes utilizados para asegurar la composición final, de la misma manera, al ser la materia prima de origen vegetal, la disponibilidad de esta está asociada a los ciclos de cosecha que puedan realizar durante el año. Para especies autoflorecientes de cannabis se tienen distintos ciclos de crecimiento según la variedad, sin embargo, a modo general, se propone la realización de tres ciclos de cultivo al año, considerando un tiempo de crecimiento de tres meses y un mes de tratamiento posterior como cosecha, secado y curado; dependiendo del tiempo de curado que se quiera dar a las plantas, la utilización de equipos para el secado del material vegetal y la duración de los periodos de germinación, estos periodos pueden ser ajustados. Para un ciclo de cultivo de cuatro meses se estima una producción de aproximadamente 245 kg/ciclo de materia prima vegetal, lo que se traduce en 147 kg/ciclo de flores secas destinadas a la venta y 98 kg/ciclo de extractos terapéuticos.

El proyecto considera comenzar su operación a un 50% de la capacidad óptima, la cual aumentará hasta alcanzar el 100% en año 5, se recomienda realizar la inversión en su totalidad desde el primer momento (es decir, por ejemplo, instalar la bomba de calor el primer año, en vez de un equipo de menor capacidad y aumentar esta en el futuro), ya que tanto la bomba de calor, como los sistemas de generación de energía y el equipo de extracción supercrítica pueden ser ajustables según el nivel de producción (es decir, pueden operar sin problemas a una menor capacidad) y su vida útil permite mantenerlos durante todo el proyecto, de esta manera se evita especular en las reinversiones necesarias para aumentar la producción en el futuro.

8.2.5. Insumos, productos y subproductos

Los insumos, productos y subproductos del proceso productivo están separados de acuerdo con los procesos que lo componen, para esto se consideran los procesos de climatización del invernadero, extracción supercrítica y extracción etanólica.

8.2.5.1. Climatización del invernadero

Insumos y servicios	Productos	Subproductos
• Fluido refrigerante bomba de calor (R410a). • Fluido del intercambiador de calor geotérmico (agua + glicol). • Energía eléctrica. • Dióxido de carbono (proveniente del proceso de extracción supercrítica).	• Aire (a la temperatura y humedad que requiera el cultivo).	• Agua (proveniente del condensador, puede ser utilizada para el riego del cultivo).

8.2.5.2. Extracción supercrítica

Insumos y servicios	Productos	Subproductos
• Dióxido de carbono. • Energía eléctrica.	• Extracto de cannabis SC.	• Dióxido de carbono. • Material vegetal agotado.

8.2.5.3. Extracción etanólica

Insumos y servicios	Productos	Subproductos
• Etanol potable 96°. • Energía eléctrica. • Agua.	• Extracto RSO.	• Etanol potable 96°. • Material vegetal agotado.

8.2.6. Especificación de equipos

La finalidad del estudio técnico, junto con determinar los parámetros de operación y la capacidad de producción, permite reunir la información necesaria para determinar el costo de los equipos y su funcionamiento, permitiendo de esta forma conocer la inversión necesaria para instalar el proyecto y los costos asociados a su funcionamiento. La especificación de equipos para el cálculo de la inversión se requiere principalmente para el sistema de generación de energía y el funcionamiento del invernadero (ya que se conocen los precios de los equipos de extracción, por lo que no requieren mayor especificación).

- Especificación de la bomba de calor

La bomba de calor es el equipo que se encarga de entregar o extraer calor del invernadero, una vez determinada la carga térmica del invernadero se puede utilizar el método presentado en el índice de precios de bombas de calor del proyecto NAMA (GIZ, 2020), el cual plantea que, conociendo la capacidad térmica requerida, el precio del equipo se puede descomponer en venta, instalación y emisores (también está el ítem de mantenimiento, el cual no será considerado para el análisis de los

costos de operación y que este se estima en base al costo de producción de los productos), entregando distintos indicadores para cada ítem en función de la potencia; para el sistema diseñado es decir, una bomba de calor de 80 *kWt* de capacidad, que distribuye aire hacia el invernadero mediante 4 fancoils con una potencia de 20 *kWt* se obtienen los siguientes factores (el costo total de la inversión se presenta en el apartado correspondiente):

Tabla 13: Indicadores de estimación de precios bomba de calor.

Ítem	Indicador	Costo (CLP/ <i>kWt</i>) (%)
Venta	G1	\$ 314.947
Instalación	G6	33%
Emisores	E10	\$ 106.944

- Especificación del intercambiador de calor geotérmico

Para estimar la inversión requerida por el intercambiador es necesario conocer el largo requerido por el sistema, a continuación, se presentan los resultados para las distintas configuraciones evaluadas:

Tabla 14: Especificación sistema geotérmico, sistema en serie modo calefacción.

Clima	Flujo agua (kg/s)	Diámetro mínimo (mm)	Diámetro máximo (mm)	Diámetro escogido (mm)	Qsub (kW)	Largo tubería (m)
Clima costero	6,7	33,5	1963,4	75,0	69	4.128

Tabla 15: Especificación sistema geotérmico, sistema en serie modo refrigeración.

Clima	Flujo agua (kg/s)	Diámetro mínimo (mm)	Diámetro máximo (mm)	Diámetro escogido (mm)	Qsub (kW)	Largo tubería (m)
Clima costero	6,7	29,2	1489,2	75	52,6	1.228

Tabla 16: Especificación sistema geotérmico, sistema en paralelo modo calefacción.

Clima	Flujo agua (kg/s)	Diámetro escogido (mm)	Qsub (kW)	Largo tubería (m)
Clima costero	3,4	50	69	4.464

Tabla 17: Especificación sistema geotérmico, sistema en paralelo modo refrigeración.

Clima	Flujo agua (kg/s)	Diámetro escogido (mm)	Qsub (kW)	Largo tubería (m)
Clima costero	3,4	50	52,6	1.777

Como se puede apreciar el largo requerido aumenta considerablemente en el modo calefacción, la solución propuesta a este problema es que el sistema funcione en serie, pero con dos pasos, es decir, que la tubería esté separada en dos niveles, uno sobre el otro, de tal forma que en el modo refrigeración se utilice sólo una parte del sistema y en el modo calefacción se pueda utilizar el largo total instalado.

Una vez conocido el largo requerido del intercambiador de calor se puede conocer el área requerida por el sistema, tomando en consideración una excavación que utiliza todo el espacio del invernadero, más un metro hacia cada lado, se obtiene un área de 672 m^2 , lo que permite una instalación de 1066 m de tubería aproximadamente, lo que permite cubrir un 83% de la longitud requerida, por lo que la eficiencia del sistema dependerá de la configuración que se le da a las tuberías y el área total con la que se cuenta para la instalación de estas; para el área mencionada de igual forma que la estimación de la bomba de calor se tiene lo siguiente:

Tabla 18: Indicadores de estimación de precio del sistema de intercambio de calor geotérmico.

Ítem	Indicador	Costo (CLP/m ²)
Cañería enterrada circuito cerrado horizontal	G8	\$24.543

El costo del sistema se presenta en el apartado de inversión, cabe destacar que este método considera la mano de obra, las cañerías y el costo de remoción y compactación del suelo.

- Especificación del sistema de generación de energía

Uno de los objetivos del proyecto es la inclusión de energía limpia para el desarrollo del proceso, para esto se propone un sistema de generación solar fotovoltaica con paneles solares ubicados en la cubierta sur del techo del invernadero (también se plantea utilizar el techo de otras zonas del proyecto como la planta de extracción), en conjunto con un generador que funciona con gas natural para suplir la demanda en aquellos momentos del día donde la generación fotovoltaica no es suficiente, así como enriquecer la atmosfera del invernadero con dióxido de carbono para favorecer el desarrollo del cultivo, a continuación se presenta el consumo eléctrico (consumo eléctrico de la bomba de calor presentada en Anexo H):

Tabla 19: Consumo eléctrico total del proyecto.

Mes	Consumo eléctrico clima costero (kWh)
Enero	7505,9
Febrero	4451,8
Marzo	4723,9
Abril	3340,5
Mayo	4713,3
Junio	2911,4
Julio	4004,7
Agosto	5795,0

Septiembre	3678,9
Octubre	3244,9
Noviembre	5830,6
Diciembre	4682,9
Total Anual	54884

Luego de haber calculado el consumo eléctrico del proyecto se utiliza la herramienta de simulación fotovoltaica incluida en el explorador solar del Ministerio de Energía para conocer capacidad de generación que se puede obtener, si bien la cubierta del invernadero donde se propone inicialmente la instalación de los paneles solares tiene una superficie de aproximadamente 184 m^2 , se puede aumentar esta área útil en otras instalaciones del proyecto como la planta de extracción por lo que la estimación del sistema fotovoltaico se realiza para un área de 360 m^2 (como se referencia esta superficie es igual a la superficie de la cubierta norte del techo del invernadero), lo que permite una capacidad de generación de 72 kW , a continuación se presentan los resultados de las simulaciones:

Tabla 20: Simulación sistemas de generación solar fotovoltaica (Explorador Solar).

Ciudad	Generación total anual (kWh)	Generación promedio diario (kWh)	Factor de planta
Clima costero	96422	264,2	15%

A primera instancia se podría concluir que sistema de generación fotovoltaica es capaz de suplir la demanda energética, sin embargo, hay que tomar en cuenta la variación estacional y horaria de los sistemas de generación fotovoltaica, para esto se compara el consumo promedio diario del proyecto con la generación promedio diaria:

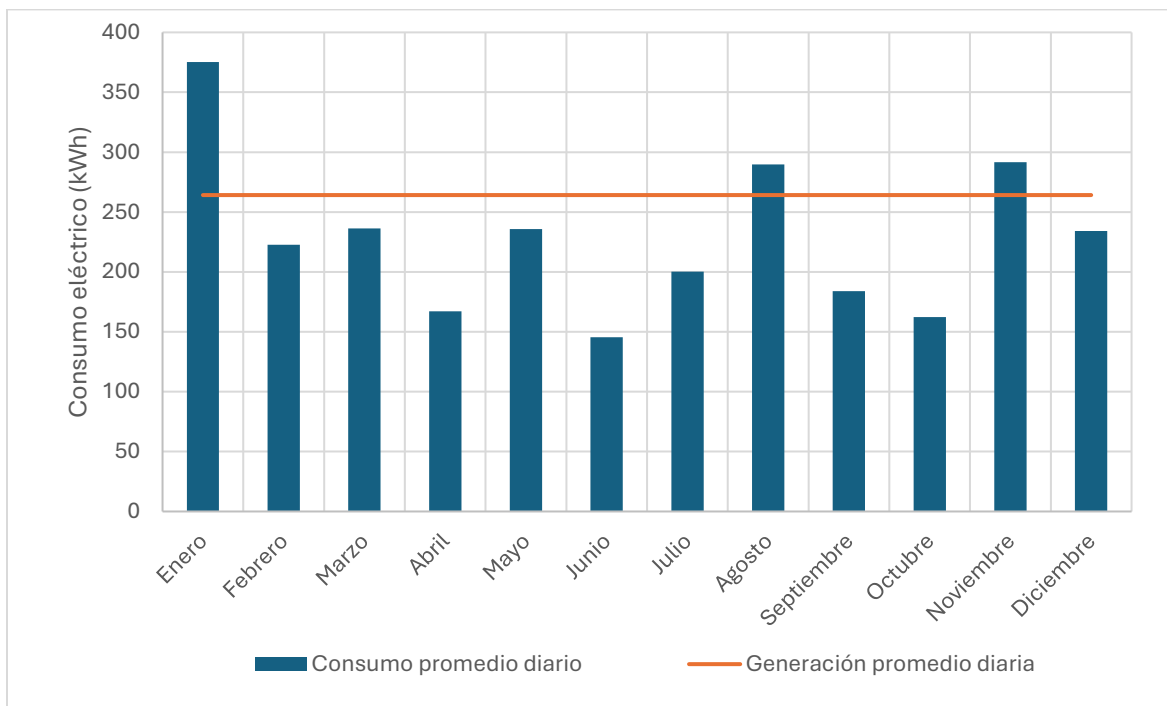


Gráfico 8: Consumo versus generación eléctrica.

Este gráfico permite ratificar la decisión de seleccionar la zona de clima costero para la ubicación del proyecto, ya que es la zona donde la diferencia entre el consumo eléctrico y la generación fotovoltaica es menor, sin embargo, existen momentos en que el sistema fotovoltaico no es suficiente, particularmente durante noche, para esto el sistema esta diseñado con una capacidad de almacenamiento de entre 6 y 8 horas, además se propone la inclusión de un generador a gas con una capacidad de 10 kW, lo que puede asistir a las baterías además de ser capaz de generar aproximadamente 5 kg/h de dióxido de carbono el cual puede ser almacenado para ser suministrado al invernadero para mantener la concentración óptima.

8.2.7. Razones técnicas

Las razones técnicas corresponden a indicadores de producción, los cuales ayudan a representar la capacidad de producción de la planta, en función de sus servicios requeridos, para el caso de estudio es pertinente analizar el consumo energético e hídrico necesario para la producción de los extractos

terapéuticos, además del dióxido de carbono que se está utilizando (o visto de otra manera, el dióxido de carbono que se está evitando emitir a la atmosfera) para la producción.

Habiendo estimado ya el consumo eléctrico de la planta, a continuación, se presenta el consumo eléctrico necesario para la obtención de los productos principales calculados para el proyecto:

Tabla 21: Indicadores de consumo eléctrico del proyecto.

Producto	Indicador	Unidad
Flores secas (materia prima)	62	kWh/kg
Extracto supercrítico	4,4	kWh/g
Extracto RSO	3,2	kWh/g

El correcto manejo de los recursos hídricos es crucial para el éxito del proyecto, especialmente en las zonas escogidas, las cuales presentan normalmente periodos de estrés hídrico. La consultora Catalyst BC reporta un consumo de agua para cultivos de cannabis de 0,35 *gal/sqft* (Olsen, 2025) o 14,3 *L/m²* al día lo que se traduciría en un consumo anual de 2.519.366 *L*, el intensivo uso de este recurso hace necesaria la inclusión de estrategias para disminuir el consumo, el proyecto considera la recuperación de drenajes (aprovechando el agua no absorbida por las plantas durante el riego) y la recuperación del agua condensada en la bomba de calor, lo que permitiría reducir el consumo de agua fresca hasta casi un 95% (Cerescann, 2023), sin embargo como una aproximación conservadora se considera un ahorro del 80% a continuación, se presenta el consumo de agua necesario para producir 1 *kg* de inflorescencias o 1 *g* de extractos terapéuticos (este cálculo no incluye agua utilizada en procesos de post cosecha):

Tabla 22: Indicadores de consumo hídrico del proyecto.

Producto	Indicador	Unidad
Flores secas (materia prima)	602	L/kg
Extracto supercrítico	38	L/g
Extracto RSO	30	L/g

El proyecto busca asegurar la utilización de procesos “limpios” en su operación, una forma de tener una representación tangible de esto es mediante el consumo de dióxido para la obtención de los productos, se considera que para mantener una concentración de 700 *ppm* de dióxido de carbono se requieren 3,22 *kg* de CO₂, al interior del invernadero, pero este valor no considera el gasto considerando la absorción de las plantas y la renovación del aire del invernadero, además se debe tener en cuenta que la tasa de absorción de dióxido de carbono varía según la hora del día y la fase de crecimiento, considerando esto se tiene una aproximación inicial de consumo diario de 1,9 *kg* de dióxido de carbono, lo que se traduce en un consumo anual de aproximadamente 694 *kg*, a esto se le debe sumar el dióxido de carbono utilizado para el proceso de extracción supercrítica, que corresponde a aproximadamente 3,6 *kg* por equipos considerando un ciclo de 1 hora, sin embargo este equipo presenta una alta tasa de recuperación por lo que el dióxido de carbono puede ser reutilizado en ciclos posteriores, a continuación se presenta el consumo de dióxido de carbono anual para la obtención de materia prima, y el consumo de dióxido de carbono necesario para producir un gramo de extracto supercrítico:

Tabla 23: Indicadores de consumo de dióxido de carbono del proyecto.

Producto	Indicador	Unidad
Flores secas (materia prima)	1,2	kg_{CO_2}/kg_{mp}
Extracto supercrítico	1,4	kg_{CO_2}/g_{ext}

8.2.8. Layout de la planta.

Conocer la disposición espacial de las instalaciones del proyecto permite operar con una mayor eficiencia, aprovechando el espacio disponible se pueden minimizar los tiempos perdidos en instancias como traslado de personal, insumos, materias primas o productos terminados. El diseño del layout de la planta se basa en el modelo presentado en “Diseño de una planta para la fabricación de derivados de cannabis en el mercado emergente colombiano y evaluación de eficiencia del layout propuesto” (Pastrana & Buitrago, 2020), en cual se comparan, mediante el sistema de Análisis Envolvente de Datos (DEA), distintas distribuciones para una planta de procesamiento de cannabis mediante dióxido de carbono supercrítico. La propuesta de layout mencionada se expande para incluir el invernadero, además se comprueba que esta disposición cumple con lo estipulado en las certificaciones GACP/GMP, a continuación, se presenta el layout propuesto para el proyecto (el detalle del invernadero y la planta de extracción se presenta en el Anexo I):

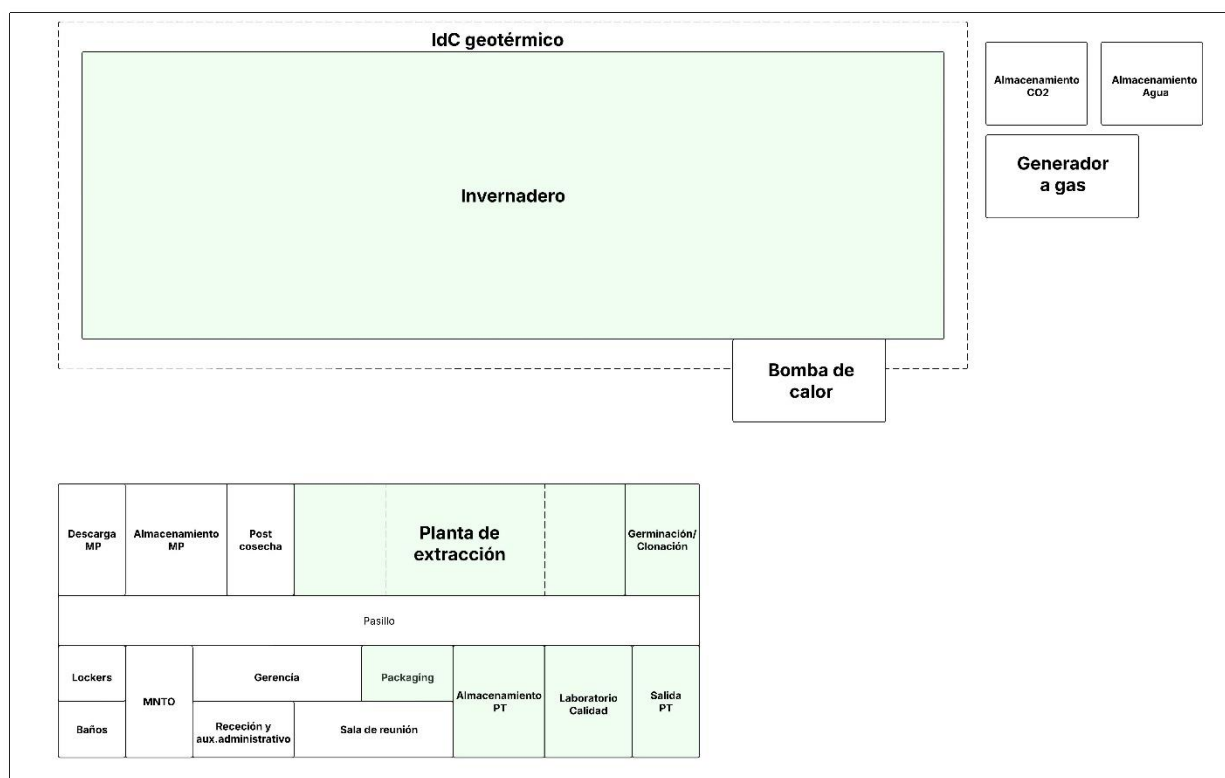


Figura 18: Propuesta de layout del proyecto.

Entre los aspectos destacables a la hora de diseñar la distribución de la planta, se tiene una clara separación entre espacios de cultivo, pre-procesamiento (o post-cosecha), extracción, packaging y almacenamiento, además se considera un flujo unidireccional para los procesos de producción (materia prima → procesamiento → producto terminado) y se indican en color verde las zonas denominadas “zonas limpias”, donde se puede notar que el flujo de materias, productos y personas siempre va desde zonas sucias a zonas limpias, nunca en dirección contraria.

8.2.9. Análisis ambiental

Uno de los aspectos importantes del proyecto es la minimización del impacto ambiental que la instalación de este genere sobre los ecosistemas locales, el órgano gubernamental que se encarga de la fiscalización en esta materia es el Ministerio del Medio Ambiente (MMA), mediante el Servicio de Evaluación Ambiental (SEIA), el cual, de acuerdo con lo estipulado en la ley N°19.300 establece los parámetros e instrumentos que garanticen el derecho de vivir en un medio ambiente

libre de contaminación. El artículo 9 de la ley mencionada establece que el titular de un proyecto deberá someterse al servicio de evaluación ambiental (ya sea mediante una declaración de impacto ambiental o un estudio de evaluación ambiental) de manera obligatoria si es que se encuentra dentro de las actividades presentadas en el artículo 10, esto corresponde a proyectos como embalses, líneas de transmisión eléctrica, proyectos de desarrollo minero, forestales, proyectos ejecutados en zonas latentes o saturadas, entre otros; de acuerdo a este artículo, el proyecto no está obligado a entrar al sistema de evaluación ambiental, sin embargo, se recomienda de todas formas ingresar al SEIA, mediante una declaración de impacto ambiental, o un estudio de impacto ambiental, según corresponde de acuerdo a los posibles efectos declarados en el artículo 11 de la ley (Congreso Nacional de Chile, 2010). El artículo 11 de la ley N°19.300 presenta los posibles riesgos o efectos que hacen que un proyecto requiera someterse a un estudio de impacto ambiental, a continuación, se analizará la pertinencia para cada uno de estos impactos:

- “Riesgo para la salud de la población, debido a la cantidad y calidad de efluentes, emisiones o residuos”.

El riesgo para la salud de la población es considerado bajo si es que se implementan medidas de manejo adecuada. La generación de efluentes líquidos se asocia principalmente a aguas de riego (lo que no se pueda recuperar) y aguas residuales del proceso de limpieza de los equipos de los procesos de extracción, por lo que inicialmente el agua utilizada para riego deberá cumplir con los estándares de calidad establecidos en la norma chilena NCh1333, mientras que los efluentes, debido a su composición, pueden ser descargados en las redes públicas de alcantarillado de acuerdo con el DS N°609/98 del Ministerio de Obras Públicas.

Respecto a las emisiones atmosféricas estas deben cumplir con el DS N°59/98 del Ministerio del Medio Ambiente, cabe destacar que se generarán emisiones atmosféricas sólo en el caso de que el dióxido de carbono liberado por el generador a gas natural sea mayor a aquel requerido en el invernadero para mantener la concentración en niveles óptimos, y lo requerido por el proceso de extracción supercrítica.

Los residuos sólidos, como la basura generada durante la operación de la planta deben ser gestionados mediante un plan de manejo de residuos consistente con lo estipulado en la ley

N°20.920 (Ley de responsabilidad extendida del productor), sin embargo el plan de manejo de residuos para la biomasa residual proveniente del cultivo debe ser tratada con mayor cuidado debido a su posible contenido de trazas de compuestos psicoactivos, el plan de manejo de residuos debe ser aceptado por el SAG de acuerdo a lo establecido en la ley N°20.000, por lo que proponen en primera instancia, dos opciones de manejo de estos residuos; la peletización de la biomasa por parte de otra empresa, o el compostaje de estos residuos dentro de la misma planta, si es que estos planes no son aceptados, la biomasa residual debe ser destruida en presencia de carabineros de Chile.

- “Efectos adversos significativos sobre la cantidad y calidad de los recursos naturales renovables, incluido el suelo, agua y aire”.

Respecto a este punto el riesgo es bajo, ya que el suelo será acotado al emplazamiento de la infraestructura proyectada, por lo que no se prevén impactos significativos, el uso de agua se minimiza mediante sistemas de riego cerrado y recuperación de agua condensada, el proyecto no considera la adquisición de derechos de extracción de acuerdo con el Código de Aguas, en términos de la calidad de aire, como se menciona anteriormente, se minimizan las emisiones de dióxido de carbono mediante su aprovechamiento en el invernadero.

- “Reasentamiento de comunidades humanas o alteración significativa de los sistemas de vida y costumbres de grupos humanos”.

El proyecto no contempla reasentamiento de comunidades cercanas dado que se emplazará en un sitio previamente habilitado para actividades industriales o agrícolas, tampoco se anticipan alteraciones significativas en los sistemas de vida o costumbre de grupos humanos, el proyecto considera además ser una fuente de empleo para las comunidades cercanas. Las principales fuentes de conflicto entre proyectos de este tipo y las comunidades aledañas provienen de la contaminación lumínica y olores molestos, el diseño del invernadero considera solo un lado de material translucido, el cual se propone cubrir durante la noche para cubrir las fuentes de luz, además, como el diseño corresponde a un invernadero cerrado, el aire es tratado al interior del invernadero, sin ventilaciones que liberen olores al exterior.

- “Localización en o próxima a poblaciones, recursos y áreas protegidas, sitios prioritarios para la conservación, humedales protegidos, glaciares y áreas con valor para la observación astronómica con fines de investigación científica, susceptibles de ser afectados, así como el valor ambiental del territorio en que se pretende emplazar”.

El emplazamiento del proyecto debe evitar áreas protegidas por el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNAPE), sitios prioritarios para la conservación definidos por el Ministerio del Medio Ambiente, y particularmente debido a la región donde se propone el proyecto, humedales protegidos bajo la ley N°21.202, esto corresponde a un riesgo bajo ya que se busca situar el proyecto en, o en las cercanías, de zonas urbanas.

- “Alteración significativa, en términos de magnitud o duración, del valor paisajístico o turístico de una zona”.

El valor paisajístico o turístico del área podría verse levemente alterado debido a la presencia de estructuras productivas, sin embargo, para cumplir con lo establecido por el SAG para la autorización del cultivo, por temas de seguridad, las instalaciones deben contar con un cierre perimetral que limite la visibilidad hacia el interior, por lo que el efecto sobre el valor paisajístico dependerá de cómo se realice el cierre perimetral.

8.2.10. Factores de riesgo

Al realizar un proyecto se deben considerar los posibles escenarios de fallas, para poder tener un plan de acción ante estos, se debe realizar un análisis para determinar cuáles son las posibles fallas o factores de riesgo que tendría el mayor impacto sobre la rentabilidad del proyecto. Para el caso desarrollado los mayores factores de riesgo provienen del área de cultivo en invernadero, ya que las condiciones de operación se pueden controlar fácilmente, además mediante planes de mantención adecuados sumado al correcto manejo de los equipos se pueden prevenir las posibles fallas y desarrollar planes de acción; para el caso del invernadero, al estar trabajando con especies biológicas, a pesar de que se mantenga la mayor cantidad de variables controladas, existe cierta variabilidad propia de las especies vegetales, como por ejemplo el caso de que las flores secas presenten un menor contenido de cannabinoides del esperado, esto se puede traducir en mayores gastos de producción al necesitar más cantidad de extractos para alcanzar las composiciones

deseadas de los productos, sin embargo como se aborda más adelante en el análisis de sensibilidad, un cambio en los costos de producción debe ser muy significativo como para poner en riesgo la rentabilidad del proyecto; en el caso hipotético de que el cultivo de vea afectado por una plaga, o se vea expuesto a contaminación cruzada y ya no sea apto para el uso farmacológico se debe tomar la decisión de adquirir la materia prima mediante un proveedor como puede ser otro dispensario a corporación, por otro lado, para minimizar las pérdidas se puede evaluar si es que las flores son seguras para su consumo recreativo.

8.2.11. **Estimación de costos de CAPEX y OPEX**

La base para poder determinar la rentabilidad de un proyecto es conocer cuánto cuesta realmente su puesta en marcha, para esto es necesario determinar los costos de inversión (CAPEX) y los costos de operación (OPEX). Los costos de inversión son aquellos en los que se debe incurrir para poder comenzar la operación del proyecto, entre estos se encuentran principalmente la compra e instalación de equipos y la construcción de toda la infraestructura asociada al proceso, los costos de operación en cambio son aquellos que se deben considerar durante la operación del proyecto, estos pueden ser directos (si es que dependen del nivel de producción) como la compra de insumos, servicios, materias primas y la mantención de equipos, o indirectos (gastos fijos que no dependen del nivel de producción) como salarios y seguros. La estimación de los costos del proyecto se realiza a través del método descrito “Diseño de Plantas y Su Evaluación Económica Para Ingenieros Químicos” (Peters, Timmerhouse, & West, 2002), el cual en base a ejemplos de plantas de procesos existentes propone tablas para estimar los costos con una precisión del 30%.

El costo de inversión se distribuye en distintos componentes, cada uno con su correspondiente aporte al costo de inversión total, de esta manera se puede conocer el CAPEX a partir de uno de los componentes de este, generalmente el costo de los equipos. El costo de los equipos principales considera la bomba de calor, el intercambiador de calor geotérmico, el sistema de irrigación e iluminación, los sistemas de generación fotovoltaica y a gas para la parte del cultivo; mientras que la planta de extracción considera los equipos de triturado, secado, los equipos para los distintos tipos de extracción y además se incluye en este apartado las certificaciones iniciales para la producción de especies de uso farmacológico. El precio de la bomba de calor fue estimado de

acuerdo a lo estipulado en el índice de precios de bombas de calor formulado por el ministerio de energía en el proyecto NAMA (GIZ, 2020), los precios de los sistemas de generación de energía fueron obtenidos a partir de la información presentada en el informe técnico de determinación de costos de inversión y costos fijos de operación de la unidad de punta del SEN y de los SSMM (Comisión Nacional de Energía, 2021), los precios de equipos necesarios para el cultivo en invernaderos fueron estimados de acuerdo al modelo de costos de cannabis medicinal presentado por la oficina de control de drogas del departamento de salud de Australia (Deloitte Access Economics, 2016).

El costo de producción, de la misma manera, se descompone en distintos ítems los cuales pueden ser estimados a partir del costo de producción de los productos, los cuales fueron estimados de acuerdo con la estimación de costo de producción realizado por LABSUN, para el caso de los productos de la planta de extracción, y según el modelo de costos de cannabis medicinal para la producción de la materia prima. El principal objetivo de determinar la inversión y los costos de operación es justificar la selección de las tecnologías escogidas, por lo que a continuación, se presentan los costos estimados para un invernadero común, el invernadero de alta tecnología propuesto y el laboratorio de extracción (índices utilizados para el cálculo presentados en Anexo J):

Tabla 24: Estimación de costo de equipos invernadero.

Invernadero baja tecnología		Invernadero alta tecnología	
Detalle	Monto (CLP)	Detalle	Monto (CLP)
Irigación	\$40.166.602	Irigación	\$57.219.203
Iluminación	\$9.052.800	Iluminación	\$9.052.800
Control temperatura	\$1.414.500	Bomba de calor	\$58.558.777
Ventilación	\$4.715.000	Materiales	\$11.368.401
Materiales	\$11.368.401	Generación Electrica	\$109.742.568
CAPEX Total (CLP)	\$66.717.303	CAPEX Total (CLP)	\$245.941.749
CAPEX Total (USD)	\$70.750	CAPEX Total (USD)	\$260.808

Tabla 25: CAPEX invernadero baja tecnología.

Detalle	% Inversion	Monto (CLP)
Costos directos		
Valor equipos	100%	\$66.717.303
Instalación equipos	25%	\$13.800.000
Instrumentación	5%	\$2.800.000
Tubería	10%	\$5.500.000
Electricidad	10%	\$5.500.000
Mejoras en el terreno	12%	\$25.000.000
Servicios instalados	40%	\$77.100.000
Costos indirectos		
Ingeniería y supervisión	33%	\$18.300.000
Gastos de construcción	39%	\$21.600.000
Directos e Indirectos		
Tasas contratista	17%	\$9.400.000
Contingencia	34%	\$18.800.000
Capital circulante	68%	\$37.600.000
CAPEX Total (CLP)		\$225.517.303
CAPEX Total (USD)		\$239.149

Tabla 26: CAPEX invernadero alta tecnología.

Detalle	% Inversion	Monto (CLP)
Costos directos		
Valor equipos	100%	\$245.941.749
Instalación equipos	30%	\$16.600.000
Instrumentación	9%	\$5.000.000
Tubería	13%	\$7.200.000
Electricidad	10%	\$5.500.000
Edificios	5%	\$3.300.000
Mejoras en el terreno	15%	\$8.300.000
Servicios instalados	20%	\$11.100.000
Costos indirectos		
Ingeniería y supervisión	33%	\$18.200.000
Gastos de construcción	39%	\$21.600.000

Directos e Indirectos		
Tasas contratista	17%	\$9.400.000
Contingencia	34%	\$18.800.000
Capital circulante	68%	\$37.600.000
CAPEX Total (CLP)		\$408.541.749
CAPEX Total (USD)		\$433.236

Se puede notar que la inversión requerida para un invernadero de alta tecnología es considerablemente mayor (la inversión del invernadero de baja tecnología corresponde al 55% de la inversión requerida para un invernadero de alta tecnología), sin embargo la elección de este se justifica por la independencia energética que ofrece la generación solar fotovoltaica, y la reducción en los costos de operación que esto conlleva, junto con la disminución de gastos energéticos asociados a la climatización del invernadero (los métodos de climatización convencionales pueden suponer un gasto energético de aproximadamente cuatro veces el gasto de la bomba de calor), y los gastos asociados al consumo de agua (la bomba de calor permite recuperar el agua condensada) a continuación se presentan los costos de producción de cada invernadero y los costos de operación estimados a partir de estos:

Tabla 27: Costos de producción invernadero.

Invernadero baja tecnología		Invernadero alta tecnología	
Detalle	Monto (CLP)	Detalle	Monto (CLP)
Agua	\$3.655.314	Agua	\$731.063
Materiales	\$284.699.810	Materiales	\$284.699.810
Electricidad	\$52.197.000	Electricidad	\$10.974.257
OPEX Total (CLP)	\$340.552.124	OPEX Total (CLP)	\$296.405.129
OPEX Total (USD)	\$332.720	OPEX Total (USD)	\$314.321

Para el cálculo de costo de producción se considera un precio para el agua de $\$1.651 \text{ CLP}/m^3$ (Esval, 2025), mientras que para el costo energético se considera un precio aproximado de $\$400 \text{ clp}/kWh$ (CGE, 2025), mientras que en el caso del invernadero de alta tecnología el gasto

en electricidad se considera como el costo de operación del sistema de generación (para este considera un 10% de la inversión).

Tabla 28: OPEX invernadero baja tecnología.

Detalle	% Inversion	Monto (CLP)
Costo directo de producción		
Materia prima	1% costo producto	\$3.400.000
Mano de obra	20% costo producto	\$68.100.000
Mano de obra sup. y of.	5% mano de obra	\$3.400.000
Mantenimiento y reparacion	2% capital inmov.	\$3.750.000
Abastecimiento	20% mantenimiento	\$750.000
Patentes y royalties	0,5% costo producto	\$1.700.000
Cargas fijas		
Impuestos locales	4% capital inmov.	\$7.200.000
Seguros	1% capital inmov.	\$1.800.000
Alquileres		\$1.000.000
Costo general de planta		
Salarios, seguridad, alimentación, etc	80% MdO+sup+mant	\$60.200.000
Gastos generales		
Administración	5% MdO+sup+mant.	\$3.700.000
I & D	5% costo producto	\$17.000.000
Opex Total anual (CLP)		\$172.400.000
Opex Total anual (USD)		\$182.821

Tabla 29: OPEX invernadero alta tecnología.

Detalle	% Inversion	Monto (CLP)
Costo directo de producción		
Materia prima	1% costo producto	\$2.900.000
Mano de obra	10% costo producto	\$29.000.000
Mano de obra sup. y of.	5% mano de obra	\$1.500.000
Mantenimiento y reparación	5% capital inmov.	\$18.500.000

Abastecimiento	20% mantenimiento	\$3.700.000
Patentes y royalties	1% costo producto	\$2.900.000
Cargas fijas		
Impuestos locales	4% capital inmov.	\$14.900.000
Seguros	1% capital inmov.	\$3.700.000
Alquileres		\$1.000.000
Costo general de planta		
Salarios, seguridad, alimentación, etc	120% MdO+sup+mant	\$58.900.000
Gastos generales		
Administración	5% MdO+sup+mant.	\$2.500.000
I & D	10% costo producto	\$29.000.000
Certificación		\$3.000.000
Opex Total anual (CLP)		\$171.500.000
Opex Total anual (USD)		\$181.866

Se puede notar que los costos de operación finales son similares en ambos casos, lo que reafirma que la opción del invernadero de alta tecnología es viable y, más aún, estos costos se podrían ver reducidos mediante subsidios a la investigación (ya que este tipo de tecnologías pueden ser aplicadas más allá de la industria del cannabis), además es una opción menos susceptible ante variaciones como los precios de la electricidad, además el invernadero de alta tecnología permite obtener materias primas de alta calidad, mientras que en el caso del invernadero de baja tecnología se va a tener mayor variabilidad en los productos lo que puede suponer dificultades en la obtención de certificaciones, variabilidad en los costos de producción de los productos terapéuticos o un menor precio de venta.

Una vez analizados los costos del invernadero se analizan los costos de inversión y operación para la planta de extracción:

Tabla 30: Estimación de costo de equipos planta de extracción.

Detalle	Monto (CLP)
Triturador	\$858.000
Horno decarboxilador	\$705.900
Extracción SC	\$78.269.000

Extracción ET	\$6.601.000
Cert. inicial y costos legales	\$47.150.000
Otros	\$100.000
CAPEX Total (CLP)	\$133.683.900
CAPEX Total (USD)	\$142.368

Tabla 31: CAPEX planta de extracción.

Detalle	% Inversion	Monto (CLP)
Costos directos		
Valor equipos	100%	\$133.683.900
Instalación equipos	45%	\$30.000.000
Instrumentación	9%	\$6.000.000
Tubería	16%	\$10.600.000
Electricidad	10%	\$6.700.000
Edificios	25%	\$16.700.000
Mejoras en el terreno	13%	\$8.600.000
Servicios instalados	40%	\$26.700.000
Costos indirectos		
Ingeniería y supervisión	33%	\$22.000.000
Gastos de construcción	39%	\$26.000.000
Directos e Indirectos		
Tasas contratista	17%	\$11.300.000
Contingencia	34%	\$22.600.000
Capital circulante	68%	\$45.300.000
CAPEX Total (CLP)		\$366.183.900
CAPEX Total (USD)		\$388.318

Tabla 32: Costos de producción.

Detalle	Monto (CLP)
Extracto CO2Sc	\$77.112.000
Extracto RSO	\$36.432.000
Productos edibles	\$9.264.000
Costo Total (CLP)	\$122.808.000

Costo Total (USD)	\$130.231
--------------------------	-----------

Tabla 33: OPEX planta de extracción.

Detalle	% Inversion	Monto (CLP)
Costo directo de producción		
Materia prima	5% costo producto	\$6.140.000
Mano de obra	20% costo producto	\$24.500.000
Mano de obra sup. y of.	25% mano de obra	\$6.125.000
Servicios	5% costo producto	\$6.100.000
Mantenimiento y reparacion	10% capital inmov.	\$47.300.000
Abastecimiento	20% mantenimiento	\$9.500.000
Gastos de laboratorio	20% mano de obra	\$4.900.000
Patentes y royalties	6% costo producto	\$7.300.000
Cargas fijas		
Impuestos locales	4% capital inmov.	\$12.800.000
Seguros	1% capital inmov.	\$3.200.000
Alquileres		\$1.000.000
Costo general de planta		
Salarios, seguridad, alimentación, etc	50% MdO+sup+mant	\$75.300.000
Gastos generales		
Administración	15% MdO+sup+mant.	\$9.400.000
Distribución y ventas	20% costo producto	\$24.500.000
Permisos SAG		\$9.200.000
Cert. GACP		\$28.300.000
I & D	5% costo producto	\$24.600.000
Análisis HPLC-UV		\$45.000.000
Opex Total anual (CLP)		\$326.765.000
Opex Total anual (USD)		\$346.516

Finalmente se obtiene una inversión total requerida de \$821.554 USD, además de costos de operación de \$528.383USD. Para hacer una comparación con otras empresas de esta industria se va a considerar el caso del invernadero de la empresa Má Botanics ubicado en Uruguay, el cual mediante una alianza con la empresa Netcann tuvo una inversión de 3 MUSD para una capacidad de producción de 3 toneladas al año de flores de cannabis (exclusivamente para la producción de CBD) (Gutiérrez, 2021), lo que se traduce en un costo aproximado de 1 MUSD por tonelada

producida, al comparar esto con la inversión del invernadero propuesto (aproximadamente 0,8 *MUSD*) se obtiene un costo de 1,1 *MUSD* por tonelada producida en función de la inversión, por lo que se considera una opción competitiva.

8.3. Estudio Económico

8.3.1. Antecedentes financieros

Como el objetivo del proyecto no es solo determinar si es factible técnicamente la instalación del invernadero y la planta de extracción, sino también determinar si se obtiene un beneficio económico que justifique la utilización de tecnologías de producción avanzadas, exigentes estándares de calidad internacional, y elementos de economía circular como el uso de energías limpias y el manejo responsable de residuos y recursos hídricos.

Se realiza el cálculo del flujo de caja, considerando un horizonte del proyecto de 10 años, evaluando así la estabilidad y la madurez del negocio tomando en consideración los equipos cuya vida útil supone una reinversión durante el proyecto (en equipos con menores vidas útiles como aquellos utilizados en el invernadero), sin llegar a caer en especulaciones relacionadas a posibles cambios legislativos o avances en la disponibilidad de nuevas tecnologías que podrían afectar el desarrollo futuro del proyecto. Para reflejar el uso de los equipos a lo largo del proyecto y su efecto sobre la carga fiscal se utilizan criterios de depreciación lineal para aquellos equipos con una vida útil prolongada (que exceda el horizonte del proyecto) o que su uso sea regular a lo largo de todo el proyecto, como la bomba de calor, el sistema geotérmico, los equipos de extracción supercrítica, los sistemas de generación fotovoltaica, de gas natural, y la infraestructura del proyecto; por otro lado, se considera el uso de depreciación acelerada en aquellos equipos que requieren reemplazos frecuentes o presenten más posibilidades de innovación técnica, entre estos se encuentran los sistemas de irrigación, iluminación y control del invernadero.

Para la realización del flujo de caja se considera, como se menciona anteriormente una inversión inicial de aproximadamente 0,82 *MUSD* y una producción de aproximadamente 735 *kg/año* de inflorescencias de cannabis medicinal, la cual se alcanza a la mitad del proyecto, una tasa de inflación del 4%, se considera además que para facilitar el acceso al público a terapias naturales el

precio de venta se reduzca anualmente un 5% a partir del año 5, y se considera que la planta comienza con una capacidad de producción del 50%, con un aumento de producción anual del 20% hasta el año 5 a partir del cual se comienza a producir a la capacidad óptima durante la segunda mitad del proyecto; otro aspecto a considerar para el flujo de caja es la tasa de descuento, la cual corresponde a la tasa de interés considerada para el cálculo del valor actual neto y en ella se ve reflejada el riesgo de los inversionistas al invertir en el proyecto por motivos como la incertidumbre en las legislaciones o en la innovación tecnológica, de este modo se considera una tasa de descuento del 20%, lo que representa un caso conservador para proyectos integrados en el mercado del cannabis medicinal.

La evaluación económica realizada busca evaluar la rentabilidad de la inversión requerida, esto se lleva a cabo mediante la realización del flujo de caja del proyecto para obtener los indicadores de rentabilidad (VAN, TIR y Payback), los cuales determinan el beneficio económico que se puede obtener mediante el proyecto, además de un análisis de sensibilidad para visibilizar el efecto del proyecto de factores económicos o de producción, como la inflación, el nivel de producción o el precio de venta, también se analizan los posibles riesgos que podrían afectar al proyecto y se evalúa el caso base sin la instalación del proyecto (en este caso se evalúa el proyecto en el caso de inversión máxima).

8.3.2. Flujo de caja

El flujo de caja es la herramienta clave para determinar, mediante una proyección de la situación económica a lo largo del tiempo, la rentabilidad del proyecto, en este se representan las entradas y salidas de dinero en el horizonte establecido, incluyendo los ingresos generados por ventas y los gastos e inversiones desembolsados durante su operación. El resultado del flujo de caja se obtiene de la resta entre los ingresos y egresos de dinero, representado una proyección económica que permite cuantificar el éxito/fracaso del proyecto.

Una vez realizados los flujos de caja, considerando los distintos parámetros necesarios para la evaluación como el precio del producto, la demanda potencial, ingresos, CAPEX, OPEX, mano de obra directa, mantenimiento, depreciaciones, royalties (como impuestos internos o certificaciones),

inversiones en terreno, la puesta en marcha de los equipos y la construcción de las instalaciones; se pueden calcular los indicadores económicos que permiten cuantificar la rentabilidad.

Inicialmente se debe contrastar la instalación del proyecto con la situación económica en el “caso base” o sin la instalación del proyecto. Como la estimación del CAPEX y el OPEX tienen una precisión del 30%, se considerará el caso base como la situación donde la inversión es máxima, es decir un 30% de la estimada, a continuación, se presenta el flujo de caja para el primer año del proyecto y se presentan los ingresos versus gastos (flujo de caja completo presentado en Anexo K):

Tabla 34: Flujo de caja primer año de operación.

Año	2025	2026
	0	1
Ingresos por Ventas		\$ 2.570.127
(-) Costos Fijos		\$ -406.257
(-) Costos variables		\$ -80.575
(=) Utilidades Operacionales		\$ 2.083.295
(-) Depreciación		\$ -67.419
(-) intereses credito		
(=) Utilidad Antes de Impuestos		\$ 2.015.877
(-) Impuestos (27%)		\$ -544.287
(=) Utilidad Después de Impuestos		\$ 1.471.590
(+) Depreciación		\$ 67.419
(-) Amortizacion credito		
(-) inversion	\$ -821.554	
(-) capital de trabajo		
flujo de caja neto	\$ -821.554	\$ 1.539.009
(+) credito largo plazo		
flujo de caja neto	\$ -821.554	\$ 1.539.009
Flujo de caja acumulado	\$-821.554	\$717.454

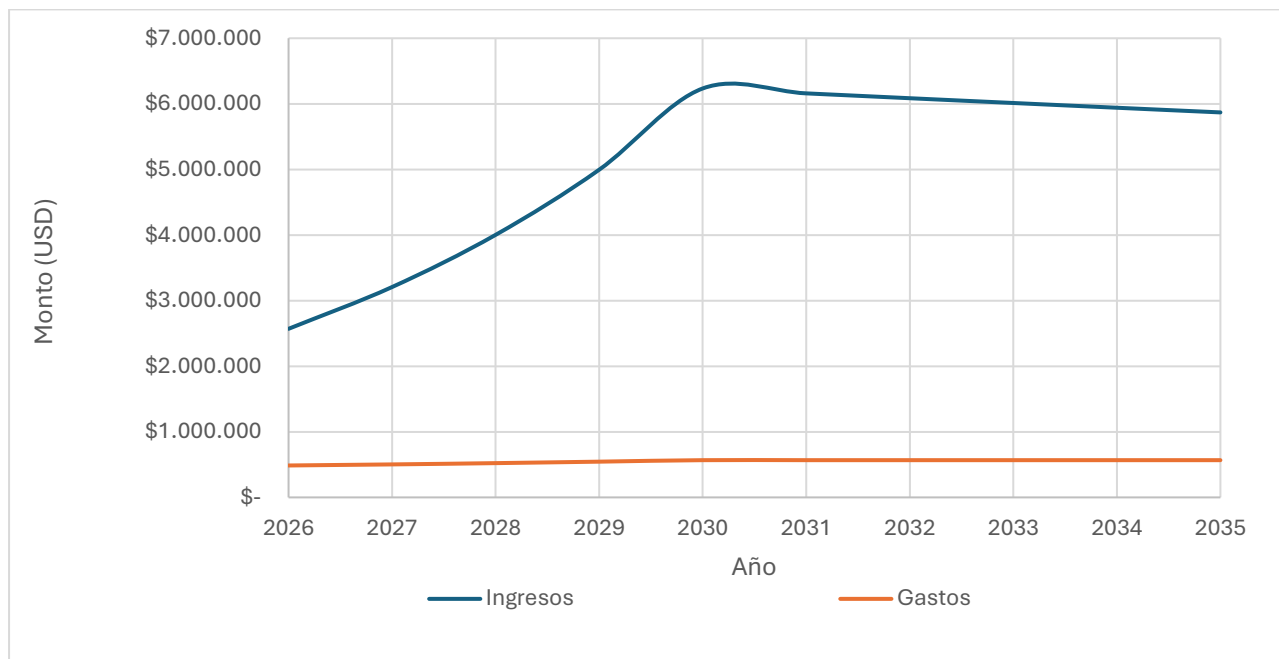


Gráfico 9: Ingresos versus gastos del proyecto.

9. Análisis de resultados

9.1. Indicadores de rentabilidad

Los indicadores de rentabilidad permiten determinar el beneficio económico del proyecto, facilitando la decisión de los inversionistas para aceptar o rechazar la puesta en marcha de un proyecto, para el presente análisis se considerarán los índices de valor actual neto (VAN), tasa interna de retorno y payback.

- **Valor actual neto (VAN):** Este valor corresponde a una representación monetaria de los ingresos y egresos de los flujos de dinero generados tanto en el presente como el futuro del proyecto, dando así una visión absoluta de la rentabilidad del proyecto en toda su realización; si el valor es positivo significa que existe un margen de ganancia para los inversionistas, y por lo tanto, el proyecto es rentable, si el valor es negativo significa que el proyecto no es capaz de recuperar las inversiones realizadas y por ende no es rentable.
- **Tasa interna de retorno (TIR):** Este indicador representa la tasa del descuento que debe tener el proyecto para que el valor actual neto sea igual a 0, es decir el punto en que los ingresos se equilibran con las inversiones; corresponde a una medida relativa que representa en

rendimiento del proyecto o su capacidad de recuperar la inversión; se considera rentable el proyecto cuando la tasa interna de retorno es mayor a la tasa de descuento del proyecto.

- Payback: El payback corresponde al primer año en el flujo de caja donde se obtiene un resultado positivo, es decir, cuanto se demora el proyecto en recuperar la inversión inicial y comienza a generar ganancias.

A continuación, se presentan los indicadores de rentabilidad obtenidos del flujo de caja del proyecto para el caso base presentado anteriormente, y para el caso propuesto:

Tabla 35: Indicadores de rentabilidad.

Indicador	Caso base	Proyecto
Tasa de descuento (%)	20%	20%
VAN (USD)	\$10.397.279	\$11.341.347
TIR (%)	159,09%	215,19%
Payback (año)	1	1

Como se puede apreciar, ambos casos presentan índices de rentabilidad favorables, indicando que el proyecto es factible técnicamente y rentable económicamente. Por otro lado, se puede notar que el proyecto en el caso base presenta una menor deseabilidad desde el punto de vista de los indicadores de rentabilidad y, si bien se puede apreciar que existe una sensibilidad en la rentabilidad del proyecto frente una variación en la inversión (y los costos de operación) al aumentar estos costos en un 30% se traduce en una disminución de aproximadamente un 9% en el VAN y aproximadamente un 26% en el TIR, por lo que aun cuando se presenta un caso menos favorable en la inversión, el proyecto sigue siendo atractivo desde el punto de vista de la rentabilidad de la inversión.

9.2. Análisis de sensibilidad

Uno de los aspectos importantes a considerar para la evaluación económica del proyecto es la susceptibilidad que este pueda presentar ante alteraciones del mercado o de la producción, debido a que la evaluación considera una proyección hacia el futuro, lo que implica una incertidumbre respecto a situaciones que puedan afectar la operación del proyecto, se debe estudiar el efecto que estos cambios puedan generar en los indicadores de rentabilidad; para esto se realiza un análisis de sensibilidad, donde se evalúan distintos casos del proyecto, particularmente se estudia el efecto del cambio de precio de los productos y el caso en que la capacidad de producción no aumenta, sino que se mantiene constante a lo largo de todo el proyecto. Una alta susceptibilidad a disminuciones en la rentabilidad producto de variaciones en el nivel de producción y variaciones en los precios de venta pueden poner el riesgo la realización del proyecto, o disminuir su horizonte, ya que no se puede asegurar que el proyecto pueda ser capaz de sobreponerse a cambios que puedan ocurrir en el futuro, a continuación, se presentan los indicadores económicos para los distintos casos evaluados:

Tabla 36: Análisis de sensibilidad del proyecto.

SITUACIONES		
VAN	TIR	PAYBACK
SITUACION NORMAL SEGÚN PROYECCION MERCADO		
\$11.341.347	215,2%	1
SIN CRECIMIENTO EN PRODUCCION NI AUMENTO DE PRECIO		
\$11.850.370	328,1%	1
SIN CRECIMIENTO EN PRODUCCION		
\$11.251.027	328,1%	1
SIN CRECIMIENTO EN PRECIO		
\$12.118.094	215,3%	1

Otro punto que se debe considerar es la sensibilidad que tiene el proyecto frente al cambio de precio de venta de los productos para saber cuál es el producto más determinante en la rentabilidad del proyecto, frente a esto se analiza el cambio en los índices de rentabilidad para distintos precios para

cada producto, a continuación, se presenta el análisis de sensibilidad para el producto que mostró mayores variaciones en los indicadores, este corresponde a las flores secas (gráficos para los demás productos se presenta en Anexo L):

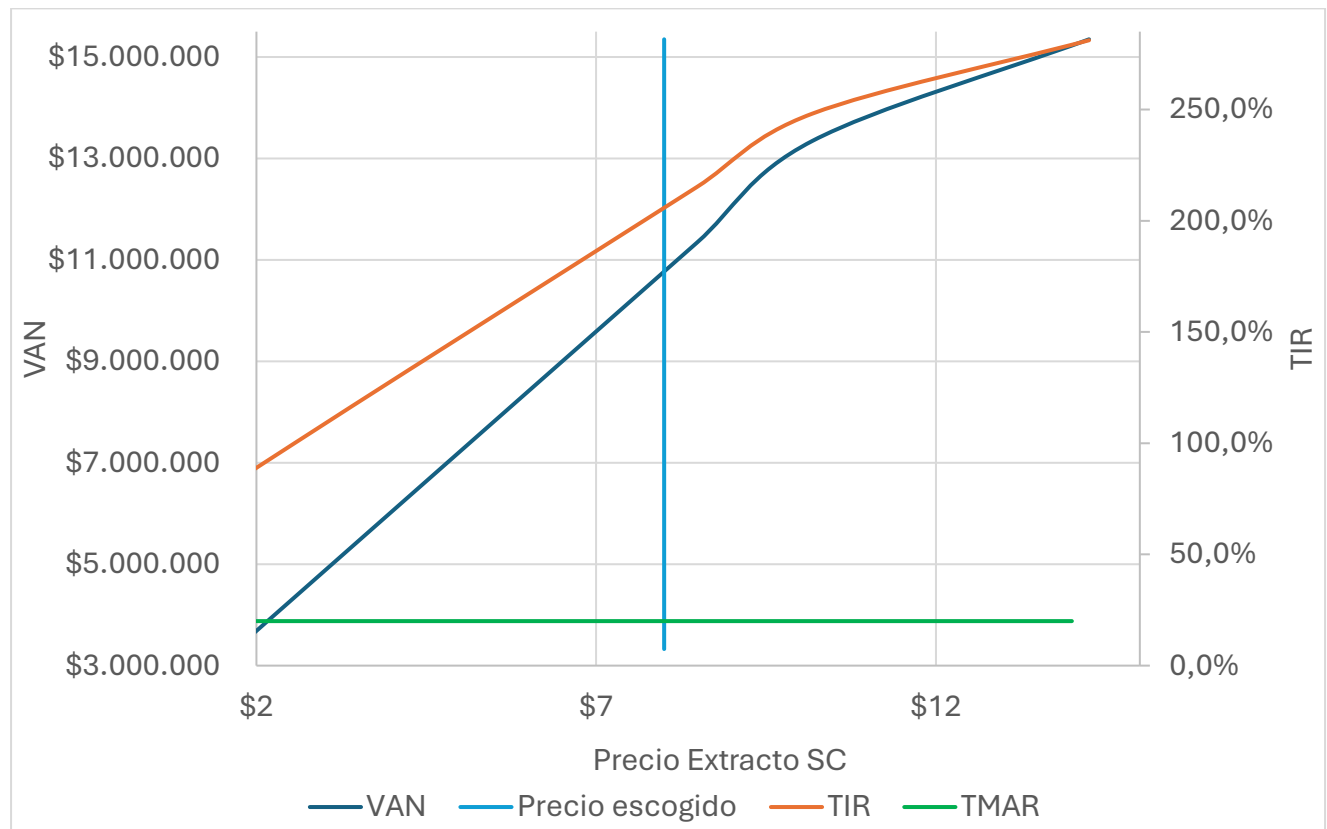


Gráfico 10: Cambio de precio del producto (flores secas), manteniendo crecimiento de producción y precio.

Una vez realizado el análisis de sensibilidad se puede apreciar que el proyecto es capaz de mantener su rentabilidad frente a cambios en los niveles de producción y cambios de precios, más aún, los indicadores de rentabilidad aumentan en los casos estudiados, esto se debe a que el proyecto considera un aumento gradual del nivel de producción, empezando la operación con una capacidad del 50% de la capacidad total, la cual aumenta gradualmente hasta alcanzar el nivel máximo al año 5, esta capacidad de producción se mantiene durante la segunda mitad del proyecto, mientras que en el caso sin variación del nivel de producción, la capacidad de producción se mantiene en un 80% de la capacidad durante toda la duración del proyecto, el proyecto no considera el aumento de

la capacidad máxima de producción ya que para esto se deberá incurrir nuevamente inversiones para la ampliación de los espacios físicos, lo que implica una inversión similar a la inversión inicial, la cual es difícil de estimar sin caer en especulaciones acerca de las innovaciones a futuro en los equipos utilizados. La modificación del precio de venta a un nivel de producción constante aumenta la rentabilidad del proyecto ya que en el caso propuesto el precio de venta se mantiene constante los primeros años y la segunda mitad del proyecto comienza a disminuir un 5% anualmente con el objetivo de incentivar al público al uso de terapias alternativas y así poder obtener más usuarios, lo que desde un punto social se va ver reflejado en un menor gasto social en sectores como el combate al narcotráfico y el apoyo en personas con adicciones.

Como se ha planteado anteriormente el proyecto busca privilegiar el diseño sustentable del proyecto por sobre el beneficio económico, sin embargo, se presenta la incógnita de hasta qué punto este diseño sigue siendo rentable, para responder a esto se estudia el efecto del precio de venta sobre los indicadores de rentabilidad presentado en el gráfico 10, de este análisis se puede concluir que el precio de venta de las flores secas es el que más afecta en la rentabilidad del producto, por otro lado se logró confirmar la rentabilidad de la inversión del proyecto ya que para todos los productos, se presenta una tasa interna de retorno mayor a la tasa de descuento para los precios escogidos.

10.Conclusiones

Luego de haber estudiado distintas tecnologías para la producción de extractos de cannabis, además de distintas formas de cultivo de especies vegetales para fines farmacológicos, se determinó que el proyecto se desarrolla mediante el cultivo de cannabis en un invernadero cerrado, parcialmente aislado cuyas condiciones ambientales son controladas mediante el uso de una bomba de calor reversible aire-agua, conectada a un intercambiador de calor geotérmico enterrado bajo el invernadero, utilizando mesas de cultivo, en lugar de plantar directamente en el suelo, de esta forma se puede tener un mayor control de todas las variables que afectan tanto el perfil químico de la planta, como la trazabilidad del proceso de cultivo, permitiendo obtener así materia prima apta para su uso medicinal (pero no exclusivamente para este fin). Posteriormente se definieron los procesos de extracción mediante dióxido de carbono supercrítico, y extracción por solvente mediante el uso

de etanol para la fabricación de extractos terapéuticos, la precisión de estos procesos y la pureza de los productos obtenidos hace de estos la mejor opción para el uso medicinal, permitiendo incluso la obtención de certificaciones internacionales que abren la puerta para la internacionalización del proyecto, por lo tanto el proyecto desarrollado sirve como una propuesta atractiva para para pasar a las siguientes de estudio de factibilidad para la ampliación de LABSUN.

Mas allá de la necesidad de cultivar cannabis para la producción de extractos terapéuticos, el proyecto busca determinar si estos se pueden obtener de forma sustentable, en armonía con los ecosistemas donde se instala y gestionando de manera eficiente los recursos disponibles, para esto se diseñó un sistema de generación eléctrica fotovoltaica, suplementada mediante la utilización de un generador que utiliza gas como combustible, de esta forma se puede generar energía para el proyecto sin depender exclusivamente del sistema interconectado, aprovechando además las emisiones de dióxido de carbono del generador para enriquecer el ambiente al interior del invernadero, favoreciendo la producción del cultivo y aprovechar además estas emisiones como fluido de servicio para el proceso de extracción supercrítica, el intercambiador de calor geotérmico permite disminuir el gasto energético de la bomba de calor mejorando así la eficiencia energética de la instalación, esta bomba además permite recuperar el agua obtenida del condensador, lo que sumando con la recuperación del drenaje de la irrigación del cultivo permite aprovechar de mejor manera los recursos hídricos. Por otro lado, se propone la peletización de la biomasa residual del proceso de cultivo para cumplir con la responsabilidad del manejo correcto de residuos (contando con el compostaje de estos como método alternativo), evitando así las emisiones contaminantes asociadas a la destrucción de la biomasa mediante combustión, método utilizado de acuerdo con las indicaciones del SAG, en caso de no contar con un adecuado plan de manejo de residuos.

El proyecto busca aumentar la capacidad de producción con la que actualmente cuenta la empresa LABSUN, la cual elabora productos terapéuticos a nivel de laboratorio, para esto se propone instalar nuevos equipos, obteniendo así una capacidad de producción de 735 kilogramos al año de inflorescencias de cannabis, lo que se traduce en una producción de 11,6 kilogramos al año de extracto supercrítico, 14 kilogramos al año de extracto RSO, además de la obtención de 441 kilogramos al año de flores de secas de cannabis medicinal. El diseño de la planta considera un diseño modular, debido al amplio rango de capacidad de los equipos actuales se abre la posibilidad

de seguir aumentando la capacidad de producción, de la misma manera, la construcción del invernadero mediante el uso de paneles de acero aislados se realiza mediante un método de ensamble, lo que facilita una posible expansión de la zona de cultivo sin la necesidad de nuevas infraestructuras.

Finalmente se estudió la factibilidad técnica y económica del proyecto que busca integrar el cultivo de cannabis al proceso de fabricación de extractos terapéuticos además de la inclusión de tecnologías de eficiencia hídrica y energética, para evaluar si esta opción es competitiva frente a otras opciones como el cultivo en exterior, la producción de extractos con materias primas obtenidas de distintos proveedores, o la utilización de fuentes convencionales de energía para el proceso. Inicialmente se puede concluir que el proyecto se considera una mejor opción frente a formas convencionales de cultivo, ya que permite disminuir la variabilidad del perfil químico de los productos obtenidos y tener un mayor control de trazabilidad del proceso lo que, pasos cruciales para la obtención de certificaciones internacionales que otorgan mayor confianza por parte del público objetivo para el uso terapéutico de inflorescencias y extractos de cannabis; por otro lado, el análisis económico realizado permitió comprobar que el proceso, a pesar de considerar la inclusión de tecnologías más avanzadas de cultivo en comparación y un sistema propio de generación eléctrica, sigue siendo rentable, obteniéndose un valor actual neto de 11,3 *MUSD* y una tasa interna de retorno del 215% a partir de una inversión inicial de aproximadamente 0,8 *MUSD* la cual se recupera en su totalidad el primer año de operación del proyecto.

11.Recomendaciones

El proyecto corresponde a un estudio de prefactibilidad, por lo que representa un primer acercamiento hacia el proyecto que busca realizar LABSUN, como recomendaciones para las siguientes de estudio de factibilidad se propone realizar un análisis dinámico del comportamiento del invernadero y la bomba de calor mediante modelos computacionales, así como la obtención de datos sobre las condiciones del lugar donde se va a emplazar (como mediciones de conductividad y variación de temperatura del suelo), de la misma manera se recomienda un estudio dedicado de la huella hídrica del proyecto y una estrategia para su optimización. Finalmente se propone la evaluación de una zona de cultivo exterior o un invernadero de baja o media tecnología para el

cultivo de especies con fines recreativos, ya que estas no requieren la certificación de grado farmacológico, lo que permite reducir costos de operación y a su vez aumentar la capacidad de producción de los productos de uso medicinal.

Referencias

- Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración. (2012). *Guía técnica de diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado*. Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).
- Ayan, D., Enoch, H., Fuchs, M., & Ipori, Z. (1986). SUITABILITY OF GREENHOUSE BUILDING TYPES AND ROOF COVER MATERIALS FOR GROWTH OF EXPORT TOMATOES IN THE BESOR REGION OF ISRAEL : I. EFFECT ON CLIMATIC CONDITIONS. *Biotronics: Enviroment Control and Environmental Biology*, 61-70.
- BCN. (7 de Diciembre de 2015). *Decreto 84*. Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1085003>
- BCN. (4 de Septiembre de 2024). *SUSTITUYE LA LEY N° 19.366, QUE SANCIONA EL TRAFICO ILICITO DE ESTUPEFACIENTES Y SUSTANCIAS SICOTROPICAS*. Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=235507>
- BCN. (26 de Enero de 2024). *DECRETO 725 - CODIGO SANITARIO*. Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=5595>
- Biopharma. (8 de Octubre de 2020). *Medical cannabis: a reality in Germany, a future in Spain*. Obtenido de klinea: BioPharmaceutical Engineering: <https://klinea.eu/en/cannabis-medicinal-una-realidad-en-alemania-un-porvenir-en-espana/>
- Cámara de Diputadas y Diputados. (21 de Abril de 2025). *Regula el cultivo y uso personal adulto de cannabis*. Obtenido de Cámara de Diputadas y Diputados: <https://www.camara.cl/verDOC.aspx?prmID=83007&prmTipo=FICHAPARLAMENTARIA&prmFICHATIPO=DIP&prmLOCAL=0>
- Canna Research. (27 de Noviembre de 2014). *Calidad del agua y su efecto en los cultivo*. Obtenido de Canna: <https://www.canna.es/articles/calidad-del-agua-y-su-efecto-en-los-cultivos>

Cannava S.E. (2024). *Que hacemos?* Obtenido de Cannava S.E: <https://cannava.com.ar/hacemos>

Cárdenas, L. (11 de Julio de 2024). *El intento de Laboratorios Knop por destrabar exportación de medicamento de cannabis a Perú.* Obtenido de La Tercera: <https://www.latercera.com/pulso-pm/noticia/el-lobby-de-laboratorios-knop-para-vender-medicamento-de-cannabis-en-peru/2H4AMUJVYVFDJLVL7PXDFSN444/>

Cerescann. (2023). *Cannabis Brochure 2023*. Boulder: Ceres Greenhouses.

CGE. (1 de Enero de 2025). *Tarifas de Suministro Eléctrico*. Obtenido de CGE: <https://www.cge.cl/wp-content/uploads/2025/01/Tarifas-de-Suministro-Elctrico-vigentes-a-partir-del-1-de-enero-2025.pdf>

Collado, E. (2025). *¿Cuánto cuesta un gramo de marihuana en Chile?* Obtenido de GB The Green Brand: <https://www.growbaratochile.cl/blog/cuanto-cuesta-un-gramo-de-marihuana-en-chile/>

Comisión Nacional de Energía. (2021). *DETERMINACIÓN DE LOS COSTOS DE INVERSIÓN Y COSTOS FIJOS DE OPERACIÓN DE LA UNIDAD DE PUNTA DEL SEN Y DE LOS SSMM DETERMINACIÓN DE LOS COSTOS DE INVERSIÓN Y COSTOS FIJOS DE OPERACIÓN DE LA UNIDAD DE PUNTA DEL SEN Y DE LOS SSMM*. Santiago.

Comunicaciones UC-ACHS. (7 de Septiembre de 2023). *Estudio revela que una de cada 4 personas sufre de dolor crónico en Chile*. Obtenido de Pontifica Universidad Católica de Chile: <https://www.uc.cl/noticias/estudio-revela-que-una-de-cada-4-personas-sufre-de-dolor-cronico-en-chile/>

Cruz Verde. (2025). *Diazepam 10 mg 20 Comprimidos Genéricos*. Obtenido de Farmacia Cruz Verde: <https://www.cruzverde.cl/diazepam-10-mg-20-comprimidos-genericos/199471.html>

Cruz Verde. (2025). *Ondanvitae Ondansetrón 8 mg 10 comprimidos recubiertos*. Obtenido de Farmacia Cruz Verde: <https://www.cruzverde.cl/ondanvitae-ondansetrón-8-mg-10-comprimidos-recubiertos/276561.html>

Cuidados Paliativos UC. (2021). *Estimación de cobertura actual de Cuidados Paliativos en Chile*. Obtenido de Pontificia Universidad Católica de Chile: <https://cuidadospaliativos.uc.cl/observatorio-de-cuidados-paliativos/situacion-de-cuidados-paliativos-en-chile/estimacion-de-cobertura-actual-de-cuidados-paliativos-en-chile/>

Davofrío Ingeniería y Climatización. (14 de Octubre de 2022). *La bomba de calor: Funcionamiento, clasificaciones y tecnología según IDAE*. Obtenido de Davofrío Ingeniería y Climatización H.V.A.C: <https://www.davofrio.com/bomba-de-calor-segun-idae/>

Deloitte Access Economics. (2016). *Modelling the cost of Medicinal Cannabis*. Department of Health - Office of Drug Control.

Doctor Simi. (2025). *Ácido Valproico 500 mg - 30 Comprimidos*. Obtenido de Farmacias Doctor Simi: <https://www.drsimi.cl/acido-valproico-500-mg-30-comprimidos/p>

Donoso, J. (1 de Diciembre de 2022). *MÁ Botanics, la firma que busca encantar a los inversionistas chilenos con el poder del cáñamo*. Obtenido de Funds Society: <https://www.fundssociety.com/es/noticias/alternativos/ma-botanics-la-firma-que-busca-encantar-a-los-inversionistas-chilenos-con-el-poder-del-canamo/>

Dutch Passion. (18 de Febrero de 2022). *Guía visual para enfermedades y plagas en cannabis*. Obtenido de Dutch Passion Seed Company: <https://dutch-passion.com/es/blog/guia-visual-para-enfermedades-y-plagas-en-cannabis-n1073>

Engineering Toolbox. (2004). *The Engineering Toolbox*. Obtenido de https://www.engineeringtoolbox.com/water-dynamic-kinematic-viscosity-d_596.html

- EsvaL. (12 de Mayo de 2025). *Mis boletas y consumos*. Obtenido de EsvaL: <https://www.esval.cl/personas/necesito-ayuda/tus-boletas-y-cobros/tarifas/>
- Etchegoyen, & Carolina. (s.f.). *Dolor en el Paciente Oncológico II*. Obtenido de Escuela de Medicina UC: <https://medicina.uc.cl/publicacion/dolor-en-el-paciente-oncologico-ii/>
- extraktLAB. (2025). *M-2.5 ScCO2 Extractor*. Obtenido de extraktLAB: <https://extraktlab.com/m2-5-equipment/>
- Fundación Daya. (27 de Febrero de 2020). *Cientos de pacientes exigen al Instituto de Salud Pública (ISP) acceso a Cannabiol*. Obtenido de FUNDACIÓN DAYA: <https://fundaciondaya.org/cientos-de-pacientes-exigen-al-instituto-de-salud-publica-isp-acceso-a-cannabiol/>
- GIZ. (2020). *BOMBAS DE CALOR: Una Guía para el Usuario*. Santiago: Proyecto de Apoyo a la NAMA “Energías Renovables para Autoconsumo”.
- GIZ. (2020). *Índice de Precios Bombas de Calor Geotérmicas y Aerotérmicas en Chile*. Santiago: Ministerio de Energía.
- Goldner, S. (2019). *Estados Unidos Patente n° US010307447B2*.
- Gutiérrez, M. J. (28 de Agosto de 2021). *Los empresarios que pusieron fichas al negocio del cannabis en Chile (y los que miran con interés)*. Obtenido de Diario Financiero: <https://www.df.cl/df-mas/por-dentro/los-empresarios-que-pusieron-fichas-al-negocio-del-cannabis-en-chile-y>
- Harbick, K. (2025). Modeling Energy Consumption and Cost of Semiclosed Greenhouses with Chillers and Dehumidifiers. *HortTechnology*, 297-300.
- Hospital Clínico Universidad de Chile. (2024). *Valor Prestaciones Año 2024*. Santiago: Hospital Clínico Universidad de Chile.

- Hurtado, N. G. (2017). *EVALUACIÓN DEL USO DE BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICAS EN INVERNADEROS*. Santiago: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas - Universidad de Chile.
- INIA. (2024). *Agrometeorología*. Obtenido de Red Agrometeorología INIA: <https://agrometeorologia.cl/>
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2008). *Ahorro y eficiencia energética en invernaderos*. Madrid: Gobierno de España.
- ISP. (13 de Octubre de 2016). *medicamento fabricado en base a cannabis*. Obtenido de Instituto de Salud Pública: <https://www.ispch.gob.cl/noticia/isp-aprueba-primer-registro-sanitario-de-medicamento-fabricado-en-base-a-cannabis/>
- ISP. (Junio de 2020). *FOLLETO DE INFORMACIÓN AL PROFESIONAL SETOFILM 4 LÁMINAS BUCODISPERSABLES 4mg* . Obtenido de Instituto de Salud Pública: <https://www.ispch.cl/sites/default/files/monografias/junio2020/F-25459-20.pdf>
- Kalzip. (2009). *Solar Reflectance, Thermal Emittance and Solar Reflectance Index (SRI)* .
- LABSUN. (2023). *Propuesta de inversión*. LABSUN.
- Liga Chilena Contra la Epilepsia. (10 de Septiembre de 2024). *Pedimos al Presidente Boric incluir la epilepsia refractaria en el GES*. Obtenido de Epilepsia Liga Chilena: <https://www.ligaepilepsia.cl/pedimos-al-presidente-boric-incluir-la-epilepsia-refractaria-en-el-ges/>
- Maté, J., Hollestein Prat, M. F., & Gil, F. L. (2004). INSOMNIO, ANSIEDAD Y DEPRESIÓN EN EL PACIENTE ONCOLÓGICO. *Psicooncología: investigación y clínica biopsicosocial en oncología*, Vol. 1, 2-3.
- Medeiros, P. (2024). *¿Cómo acceder a Cuidados Paliativos?* . Santiago: Cuidados Paliativos UC.

- Mediabanco. (26 de Septiembre de 2022). *ISP autoriza venta en Chile de primer producto farmacéutico de Cannabidiol (CBD)*. Obtenido de Mediabanco: <https://www.mediabanco.com/isp-autoriza-venta-en-chile-de-primer-producto-farmaceutico-de-cannabidiol-cbd/>
- Médicos Sin Marca. (11 de Julio de 2019). *Negocios millonarios y conflictos de interés en la industria de “cannabis medicinal”*. Obtenido de CIPER: <https://www.ciperchile.cl/2019/07/11/negocios-millonarios-y-conflictos-de-interes-en-la-industria-de-cannabis-medicinal/>
- Mekpan. (2025). *Mekpan Panel*. Obtenido de Thermal Insulation in Sandwich Panels: <https://www.mekpanpanel.com/en/blog-thermal-insulation-in-sandwich-panel.html#>
- Mineduc. (2017). *Recursos Educativos y Documentos Curriculares*. Obtenido de Currículum Nacional: https://www.curriculumnacional.cl/portal/Educacion-General/Historia-geografia-y-ciencias-sociales/Historia-Geografia-y-Ciencias-Sociales-6-basico/29311:Ambiente-natural-Zona-Central#descargas_recurso
- Murillo, J., & Ojeda, L. (2021). *DETERMINACIÓN DEL MÉTODO DE EXTRACCIÓN MÁS EFECTIVO EN LA OBTENCIÓN DE EXTRACTOS RICOS EN CANNABINOIDES A PARTIR DE 3 PROCESOS DIFERENTES*. Bogotá: Corporación Tecnológica de Bogotá.
- Nagarkatti, P., & Nagarkatti, M. (2023). People produce endocannabinoids – similar to compounds found in marijuana – that are critical to many bodily functions. *The conversation*.
- National Cancer Institute. (29 de Abril de 2015). *Quimioterapia para tratar el cáncer*. Obtenido de Instituto Nacional del Cáncer: <https://www.cancer.gov/espanol/cancer/tratamiento/tipos/quimioterapia#:~:text=Usted%20puede%20recibir%20quimioterapia%20en,de%20producir%20nuevas%20c%C3%A9lulas%20sanas>

New Frontier Data. (2021). *The Global Cannabis Report: Growth & Trends Trough 2025*. Washington D.C: New Frontier Data.

New Zealand Embassy Berlin. (Abril de 2024). *Germany liberalises production of medical cannabis – April 2024*. Obtenido de New Zealand Foreign Affairs & Trade: <https://www.mfat.govt.nz/en/trade/mfat-market-reports/germany-liberalises-production-of-medical-cannabis-april-2024/#:~:text=The%20German%20cannabis%20market%2C%20the,and%20extracts%20for%20medical%20purposes.>

Olsen, L. (24 de Marzo de 2025). *Optimizing Water Use in Cannabis Grow Facility Design*. Obtenido de Catalyst BC: <https://catalyst-bc.com/optimizing-water-use-in-cannabis-grow-facility-design/#:~:text=How%20much%20water%20does%20a,HVACD%20systems%20and%20facility%20maintenance.>

Ortega, C., & Larotonda, D. (2017). Ensayo por Emisión Acústica de sistemas de refrigeración industrial. *XI Congreso Regional de Ensayos No Destructivos y Estructurales*. Neuquén: AAENDE.

Orús, A. (Enero de 2024). *Evolución anual del volumen de ingresos de la industria farmacéutica a nivel mundial de 2001 a 2023*. Obtenido de Statista: <https://es.statista.com/estadisticas/635153/ingresos-mundiales-del-sector-farmaceutico/>

Osorio, C. (2022). DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE AMBIENTE CONTROLADO PARA EL CULTIVO DE CANNABIS. *Universidad Santo Tomás*.

Parra-Soto, S., López, S., Rodríguez-Osiac, L., & Celis-Morales, C. (2023). El preocupante escenario del cáncer en Chile y sus proyecciones, ¿qué estamos haciendo? *Revista Médica de Chile*, 151: 1654-1656.

- Peters, M., Timmerhouse, K., & West, R. (2002). *Plant design and economics for chemical engineers*. McGraw-Hill Profesional.
- Peterson, E. (19 de Noviembre de 2019). Industry Report: The State of Hemp and Cannabis Waste. *Manufacturing Report*.
- Pino, S., Espinoza, L., Jara-Gutiérrez, C., Villena, J., Olea, A., & Díaz, K. (2023). Study of Cannabis Oils Obtained from Three Varieties of *C. sativa* and by Two Different Extraction Methods: Phytochemical Characterization and Biological Activities. *Plants*, 12(9), 1772.
- Prah, F. (2001). *Refrigerant R410a*. Illinois: Refrigeration Service Engineers Society.
- Salcobrand. (2025). *Tramak long*. Obtenido de Farmacia Salcobrand: https://salcobrand.cl/products/tramal-long-r-tramadol-100mg-10-comprimidos?current_store_id=1&default_sku=178088
- Sant Yerbasi. (3 de Noviembre de 2016). *Consejos para el primer cultivo de marihuana*. Obtenido de Sant Yerbasi: <https://www.santyerbasi.com/blog/consejos-para-el-primer-cultivo-de-marihuana/>
- Santander Universidades. (17 de Diciembre de 2021). *Tam Sam Som: cómo calcular el tamaño de mercado*. Obtenido de Santander Open Academy: <https://www.santanderopenacademy.com/es/blog/tam-sam-som.html>
- Sapag Chain, N., Sapag Chain, R., & Sapag Puelma, J. M. (2014). *Preparación y Evaluación de Proyectos*. México D.F: McGraw Hill Education.
- Shuja, A. (2017). *Estados Unidos Patente n° US009981203B2*.
- Shuldiner, H. (30 de Marzo de 2022). *Chile es terreno fértil para cultivos de marihuana*. Obtenido de InSight Crime: <https://insightcrime.org/es/noticias/chile-es-terreno-fertil-para-los-cultivos-de->

marihuana%EF%BF%BC/#::~text=Las%20plantaciones%20suelen%20estar%20ubicadas
para%20el%20cultivo%20de%20cannabis.

Solunion. (29 de Mayo de 2023). *Sector químico y farmacéutico en Chile*. Obtenido de Actualidad económica: <https://www.solunion.cl/blog/sector-quimico-y-farmaceutico-en-chile/>

Statista. (Junio de 2025). *Pharmaceutical Cannabis - Chile*. Obtenido de Statista: <https://www.statista.com/outlook/hmo/cannabis/pharmaceutical-cannabis/chile?currency=USD#revenue> 663868

Subsecretaría de Salud Pública. (2014). *GUÍA CLÍNICA AUGE EPILEPSIA ADULTOS*. Santiago: MINSAL.

Obtenido de Royal Queen Seeds: <https://www.royalqueenseeds.es/blog-plantas-de-marihuana-macho-hembra-y-hermafrodita-n513>

The Engineering Toolbox. (2003). *The Engineering Toolbox*. Obtenido de Thermal Conductivity of Common Materials - Solids, Liquids and Gases: https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html

The Engineering Toolbox. (2011). *The Engineering Toolbox*. Obtenido de Surface Radiation Absorptivity: https://www.engineeringtoolbox.com/radiation-surface-absorptivity-d_1805.html

The Mediterranean Garden Society. (2 de Mayo de 2009). *Clima Mediterráneo y Mediterraneidad: Bases Conceptuales y los Problemas Inherentes a su Definición*. Obtenido de Un Universo invisible bajo nuestros pies: Los suelos y la Vida: <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2009/05/02/117478>

Vásquez, S., Cruz, W., & Peñarete, D. (2023). Sistema de fertirriego inteligente, para optimizar la producción de vegetales cultivados en invernaderos. *Ontare*, Volumen 11.

- Vega Duarte, D. (2022). *Análisis de parámetros cinéticos y de equilibrio que gobiernan la extracción con etanol acuoso de residuos de destilación de Lippia origanoides*. Bucaramanga: Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas - Universidad Industrial de Santander .
- Weidenslaufer, C., & Cavada, J. P. (2022). *Uso medicinal del cannabis Derecho nacional y comparado* . Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.
- Zhang, X., Qiu, J., Li, X., Zhao, J., & Liu, L. (2020). *Refractive index database*. Obtenido de Optical constants of Polycarbonate: <https://refractiveindex.info/?shelf=organic&book=polycarbonate&page=Zhang>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., & W, a B. (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. *Irrigation and Drainage*. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.12.001>
- Atal, J. P. (2021). Breve 22: El acceso a medicamentos en Chile y el papel de las farmacias municipales. En *Breve 22: El acceso a medicamentos en Chile y el papel de las farmacias municipales*. <https://doi.org/10.18235/0003283>
- Congreso Nacional de Chile. (2010). Ley 19300. *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, I*.
- del Valle, J. M., de la Fuente, J. C., Uquiche, E., Zetzl, C., & Brunner, G. (2011). Mass Transfer and Equilibrium Parameters on High-Pressure CO₂ Extraction of Plant Essential Oils. En *Food Engineering Series*. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7475-4_17
- Duggan, P. J. (2021). The Chemistry of Cannabis and Cannabinoids. En *Australian Journal of Chemistry* (Vol. 74, Número 6). <https://doi.org/10.1071/CH21006>

- Jordán, J. (2003). Avances en el tratamiento de las enfermedades neurodegenerativas. *Offarm*, 22(3).
- Kandelshein, H., & Bloemer, J. (2022). Side effects of drugs used in the treatment of Alzheimer's disease. En *Side Effects of Drugs Annual* (Vol. 44). <https://doi.org/10.1016/bs.seda.2022.07.003>
- Karaliūnas, M., Jakštas, V., Nasser, K. E., Venckevičius, R., Urbanowicz, A., Kašalynas, I., & Valušis, G. (2016). Application of terahertz spectroscopy for characterization of biologically active organic molecules in natural environment. *Terahertz Emitters, Receivers, and Applications VII*, 9934. <https://doi.org/10.1117/12.2238242>
- López-Olmos, C., García-Valverde, M. T., Hidalgo, J., Ferrerio-Vera, C., & Sánchez de Medina, V. (2022). Comprehensive comparison of industrial cannabinoid extraction techniques: Evaluation of the most relevant patents and studies at pilot scale. *Frontiers in Natural Products*, 1. <https://doi.org/10.3389/fntpr.2022.1043147>
- Malík, M., Velechovský, J., & Tlustoš, P. (2021). The overview of existing knowledge on medical cannabis plants growing. *Plant, Soil and Environment*, 67(8), 425–442. <https://doi.org/10.17221/96/2021-PSE>
- Marcia Avello, L., & Isabel Cisternas, F. (2010). Fitoterapia, sus orígenes, características y situación en Chile. *Revista Medica de Chile*, 138(10). <https://doi.org/10.4067/s0034-98872010001100014>
- Menoni, C., Alonso, D., Saravia, F., Pérez, N., & Steinfeld, L. (2023). Sistema de monitoreo y control de cultivo indoor de cannabis. *Memoria Investigaciones en Ingeniería*, 24. <https://doi.org/10.36561/ing.24.12>
- Moreno-Ortiz, V. C., Martínez-Núñez, J. M., Kravzov-Jinich, J., Pérez-Hernández, L. A., Moreno-Bonett, C., & Altagracia-Martínez, M. (2013). Los medicamentos de receta de

origen sintético y su impacto en el medio ambiente. En *Revista Mexicana de Ciencias Farmaceuticas* (Vol. 44, Número 4).

Morselli, N., Puglia, M., Pedrazzi, S., Tartarini, P., & Allesina, G. (2021). Domestic heating: Can hemp-hurd derived pellet be an alternative? *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*, 16(1). <https://doi.org/10.18280/ijdne.160101>

Ordoñez-Quintero, C.-C., Ordóñez-Erazo, H.-A., & Ordoñez, A. (2022). Low-cost Prototype for Automating of Greenhouse Medicinal Cannabis Production Supported by IoT. *Revista Científica*, 45(3).

Pardo-Castaño, C., Velásquez, M., & Bolaños, G. (2015). Simple models for supercritical extraction of natural matter. *Journal of Supercritical Fluids*, 97. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2014.09.044>

Pastrana, J. V., & Buitrago, O. Y. (2020). Diseño de una planta para la fabricación de derivados de cannabis en el mercado emergente colombiano y evaluación de eficiencia del layout propuesto. *Orphanet Journal of Rare Diseases*, 21(1).

Rubio Escalona, J. (2021). Aspectos técnicos de la industria del cannabis (Aproximaciones a la planta). *Iuris Tantum*, 35(33). <https://doi.org/10.36105/iut.2021n33.12>

Self, S. J., Reddy, B. V., & Rosen, M. A. (2013). Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options. *Applied Energy*, 101. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.01.048>

Stulpinaite, U., Tilvikiene, V., & Zvicevicius, E. (2023). Co-pelletization of Hemp Residues and Agricultural Biomass: Effect on Pellet Quality and Stability. *Energies*, 16(16). <https://doi.org/10.3390/en16165900>

- Sugiyama, K., Ohishi, N., & Saito, T. (2014). Preliminary evaluation of greenhouses employing positive-pressure forced ventilation to prevent invasion by insect pests. *Applied Entomology and Zoology*, 49(4). <https://doi.org/10.1007/s13355-014-0285-8>
- Thevs, N., & Aliev, K. (2022). Water consumption of industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) from a site in northern Kazakhstan. *Central Asian Journal of Water Research*, 8(2). <https://doi.org/10.29258/cajwr/2022-r1.v8-2/19-30.eng>
- Veit, M. (2022). Quality Requirements for Medicinal Cannabis and Respective Products in the European Union - Status Quo. En *Planta Medica* (Vol. 89, Número 8). <https://doi.org/10.1055/a-1808-9708>
- Volkow, N. D., & McLellan, A. T. (2016). Opioid Abuse in Chronic Pain — Misconceptions and Mitigation Strategies. *New England Journal of Medicine*, 374(13). <https://doi.org/10.1056/nejmra1507771>
- Atal, J. P. (2021). Breve 22: El acceso a medicamentos en Chile y el papel de las farmacias municipales. En *Breve 22: El acceso a medicamentos en Chile y el papel de las farmacias municipales*. <https://doi.org/10.18235/0003283>
- Bilbeny, N. (2019). DOLOR CRÓNICO EN CHILE. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 30(6). <https://doi.org/10.1016/j.rmcl.2019.08.002>
- Congreso Nacional de Chile. (2010). Ley 19300. *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile*, 1.
- del Valle, J. M., de la Fuente, J. C., Uquiche, E., Zetzel, C., & Brunner, G. (2011). Mass Transfer and Equilibrium Parameters on High-Pressure CO₂ Extraction of Plant Essential Oils. En *Food Engineering Series*. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7475-4_17
- Duggan, P. J. (2021). The Chemistry of Cannabis and Cannabinoids. En *Australian Journal of Chemistry* (Vol. 74, Número 6). <https://doi.org/10.1071/CH21006>

- Jordán, J. (2003). Avances en el tratamiento de las enfermedades neurodegenerativas. *Offarm*, 22(3).
- Kandelshein, H., & Bloemer, J. (2022). Side effects of drugs used in the treatment of Alzheimer's disease. En *Side Effects of Drugs Annual* (Vol. 44). <https://doi.org/10.1016/bs.seda.2022.07.003>
- Karaliūnas, M., Jakštas, V., Nasser, K. E., Venckevičius, R., Urbanowicz, A., Kašalynas, I., & Valušis, G. (2016). Application of terahertz spectroscopy for characterization of biologically active organic molecules in natural environment. *Terahertz Emitters, Receivers, and Applications VII*, 9934. <https://doi.org/10.1117/12.2238242>
- Khalid, N., & Singh, A. (2022). Cannabis Versus Opioids For Pain. En *StatPearls*.
- López-Olmos, C., García-Valverde, M. T., Hidalgo, J., Ferrerio-Vera, C., & Sánchez de Medina, V. (2022). Comprehensive comparison of industrial cannabinoid extraction techniques: Evaluation of the most relevant patents and studies at pilot scale. *Frontiers in Natural Products*, 1. <https://doi.org/10.3389/fntpr.2022.1043147>
- Malík, M., Velechovský, J., & Tlustoš, P. (2021). The overview of existing knowledge on medical cannabis plants growing. *Plant, Soil and Environment*, 67(8), 425–442. <https://doi.org/10.17221/96/2021-PSE>
- Marcia Avello, L., & Isabel Cisternas, F. (2010). Fitoterapia, sus orígenes, características y situación en Chile. *Revista Medica de Chile*, 138(10). <https://doi.org/10.4067/s0034-98872010001100014>
- Menoni, C., Alonso, D., Saravia, F., Pérez, N., & Steinfeld, L. (2023). Sistema de monitoreo y control de cultivo indoor de cannabis. *Memoria Investigaciones en Ingeniería*, 24. <https://doi.org/10.36561/ing.24.12>

- Moreno-Ortiz, V. C., Martínez-Núñez, J. M., Kravzov-Jinich, J., Pérez-Hernández, L. A., Moreno-Bonett, C., & Altagracia-Martínez, M. (2013). Los medicamentos de receta de origen sintético y su impacto en el medio ambiente. En *Revista Mexicana de Ciencias Farmaceuticas* (Vol. 44, Número 4).
- Morselli, N., Puglia, M., Pedrazzi, S., Tartarini, P., & Allesina, G. (2021). Domestic heating: Can hemp-hurd derived pellet be an alternative? *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*, 16(1). <https://doi.org/10.18280/ijdne.160101>
- Ordoñez-Quintero, C.-C., Ordóñez-Erazo, H.-A., & Ordoñez, A. (2022). Low-cost Prototype for Automating of Greenhouse Medicinal Cannabis Production Supported by IoT. *Revista Científica*, 45(3).
- Pardo-Castaño, C., Velásquez, M., & Bolaños, G. (2015). Simple models for supercritical extraction of natural matter. *Journal of Supercritical Fluids*, 97. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2014.09.044>
- Pastrana, J. V., & Buitrago, O. Y. (2020). Diseño de una planta para la fabricación de derivados de cannabis en el mercado emergente colombiano y evaluación de eficiencia del layout propuesto. *Orphanet Journal of Rare Diseases*, 21(1).
- Rubio Escalona, J. (2021). Aspectos técnicos de la industria del cannabis (Aproximaciones a la planta). *Iuris Tantum*, 35(33). <https://doi.org/10.36105/iut.2021n33.12>
- Self, S. J., Reddy, B. V., & Rosen, M. A. (2013). Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options. *Applied Energy*, 101. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.01.048>
- Stulpinaite, U., Tilvikiene, V., & Zvicevicius, E. (2023). Co-pelletization of Hemp Residues and Agricultural Biomass: Effect on Pellet Quality and Stability. *Energies*, 16(16). <https://doi.org/10.3390/en16165900>

- Sugiyama, K., Ohishi, N., & Saito, T. (2014). Preliminary evaluation of greenhouses employing positive-pressure forced ventilation to prevent invasion by insect pests. *Applied Entomology and Zoology*, 49(4). <https://doi.org/10.1007/s13355-014-0285-8>
- Szalata, M., Dreger, M., Zielińska, A., Banach, J., Szalata, M., & Wielgus, K. (2022). Simple Extraction of Cannabinoids from Female Inflorescences of Hemp (*Cannabis sativa* L.). *Molecules*, 27(18). <https://doi.org/10.3390/molecules27185868>
- Thevs, N., & Aliev, K. (2022). Water consumption of industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) from a site in northern Kazakhstan. *Central Asian Journal of Water Research*, 8(2). <https://doi.org/10.29258/cajwr/2022-r1.v8-2/19-30.eng>
- Veit, M. (2022). Quality Requirements for Medicinal Cannabis and Respective Products in the European Union - Status Quo. En *Planta Medica* (Vol. 89, Número 8). <https://doi.org/10.1055/a-1808-9708>
- Volkow, N. D., & McLellan, A. T. (2016). Opioid Abuse in Chronic Pain — Misconceptions and Mitigation Strategies. *New England Journal of Medicine*, 374(13). <https://doi.org/10.1056/nejmra1507771>

Anexo A

- Cálculo radiación neta

Como se menciona anteriormente la radiación neta está compuesta la radiación solar y la radiación térmica, además debido a la construcción del invernadero se debe considerar la radiación reflejada al interior de este.

La radiación solar corresponde a la energía absorbida por las paredes del invernadero, el suelo y el cultivo proveniente de la radiación electromagnética proveniente del sol, se calcula de acuerdo a la ecuación:

$$\dot{R}_{sol} = S_s [G_g \cdot (\alpha_{sol} + \tau_{sol} \cdot \alpha_s)] \quad (A1)$$

S_s : Superficie del suelo del invernadero [m^2]

G_g : Irradiancia solar global [W/m^2]

α_{sol} , α_s : Coeficiente de absortividad de la cubierta del invernadero, y de las plantas y el suelo respectivamente

τ_{sol} : Coeficiente de transmisividad de la cubierta para la radiación solar

El coeficiente de absortividad de las plantas y el suelo se calcula de la siguiente manera:

$$\alpha_s = \alpha_{pla} \cdot f_p + (1 - \rho_{sue})(1 - f_{pla}) \quad (A2)$$

α_{pla} : Coeficiente de absortividad de la planta para la radiación solar

f_{pla} : Fracción del suelo cubierto por plantas

ρ_{sue} : Albedo del suelo para la radiación solar

A continuación, se presentan los datos meteorológicos utilizados, presentados por el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), las propiedades ópticas del policarbonato ((Zhang, Qiu, Li, Zhao, & Liu, 2020), de los paneles de acero (The Engineering Toolbox, 2011), del cultivo y del suelo (Karaliūnas et al., 2016):

Tabla 37: Parámetros para el cálculo de radiación solar.

Parámetro	α_{sol}	α_{pla}	f_{pla}	ρ_{sue}	$S_s (m^2)$	τ_{sol}
Valor	0,08	0,28	0,8	0,1	560	0,251

La radiación térmica, por otro lado, proviene de la radiación electromagnética del invernadero producto de que este tiene una temperatura mayor al cero absoluta, y se calcula mediante la ley de Stefan-Boltzmann:

$$\dot{R}_{ter} = S_c \cdot \sigma \cdot \tau_{ter} \cdot \varepsilon_{ter} (T_{ext}^4 - T_c^4) \quad (A3)$$

S_c : Superficie de la cubierta [m^2]

σ : Constante de Stefan-Boltzmann [$W/m^2 K^4$]

τ_{ter} : Coeficiente de transmisividad de la cubierta para la radiación térmica

ε_{ter} : Constante de emisividad de la cubierta para la radiación térmica

T_{ext}, T_c : Temperatura absoluta del exterior del invernadero y de la cubierta respectivamente [K]

A continuación, se presentan los parámetros utilizados:

Tabla 38: Parámetros para el cálculo de radiación térmica.

Parámetro	$S_c (m^2)$	σ	τ_{ter}, pc	$\tau_{ter}, acero$	ε_{ter}, pc	$\varepsilon_{ter}, acero$
Valor	992	$5,67 \cdot 10^{-8}$	0,77	0,251	0,93	0,88

Para calcular la energía reflejada por los paneles aislados al interior del invernadero según la ecuación 8, se utilizaron considera el área del invernadero cubierta por paneles aislados y el coeficiente de emisividad de estos (Kalzip, 2009):

Tabla 39: Parámetros para el cálculo de radiación reflejada.

Parámetro	$S_c (m^2)$	ρ
Valor	470	0,615

- Cálculo transferencia de calor por conducción-convección

Para calcular el calor transferido por conducción-convección es necesario primero conocer el coeficiente global de transferencia de calor, el cual está expresado como:

$$U_{cc} = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_{int}}\right) + \left(\frac{e_c}{\lambda_c}\right) + \left(\frac{1}{h_{ext}}\right)} \quad (A4)$$

h_{int} , h_{ext} : Coeficiente de convección del interior y exterior del invernadero, respectivamente
 $[W/(m^2 \cdot K)]$

e_c : Espesor de la cubierta [m]

λ_c : Conductividad térmica del material de la cubierta [$W/(m^2 \cdot K)$]

A su vez, el coeficiente de convección del interior del invernadero se puede obtener según la ecuación:

$$h_{int} = 1,95 \cdot (T_c - T_{int})^{0,3}, \text{ cuando } (T_c - T_{int}) \leq 11,1 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (A5)$$

$$h_{int} = 7,2, \text{ cuando } (T_c - T_{int}) > 11,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Mientras que el coeficiente de convección del exterior del invernadero se calcula en función de la velocidad del viento según:

$$h_{ext} = 7,2 + (3,84 \cdot v_{viento}) \quad (A6)$$

A partir de los datos de conductividad térmica del invernadero presentados en la guía de eficiencia energética en invernaderos (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2008), y la conductividad térmica reportada por proveedores de paneles de acero (Mekpan, 2025), considerando un espesor de 4 mm para la cubierta de policarbonato y un espesor de 80 mm para los paneles de acero, se tienen los parámetros considerados:

Tabla 40: Parámetros para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor.

Parámetro	e_c , pc (mm)	e_c , acero (mm)	λ_c , pc ($W/(m^2 \cdot K)$)	λ_c , acero ($W/(m^2 \cdot K)$)
Valor	4	80	0,19	0,022

- Calor sensible y latente por la renovación del aire interior

Para este cálculo se debe conocer anteriormente el calor latente de vaporización, y la humedad absoluta al interior y exterior del invernadero, las cuales se obtienen mediante las siguientes ecuaciones:

$$\lambda_0 = 2502535,259 - (2385,76424 \cdot T_{int}) \quad (A7)$$

$$x = 0,6219 \cdot HR \cdot \frac{e_s}{P_{amb} - HR \cdot e_s} \quad (A8)$$

HR : Humedad relativa

e_s : Presión de saturación de vapor [hPa]

P_{amb} : Presión ambiental [hPa]

Para cumplir con los aspectos de las certificaciones internacionales relacionados a control de plagas, una de las medidas a utilizar son los sistemas de presión positiva, para estos se debe considerar una presión 0,15 hPa mayor a la presión ambiental al exterior del invernadero (Sugiyama et al., 2014), por otro lado, la presión de saturación de vapor se calcula a partir de la temperatura (medida en $^{\circ}C$):

$$e_s = 6,1070 \cdot \exp\left(\frac{17,269 \cdot T}{T + 237,3}\right) \quad (A9)$$

Normalmente un invernadero ventilado naturalmente requiere una tasa de renovación de aire de entre 30 a 60 renovaciones por hora, este valor se ve reducido en el caso de un invernadero cerrado, por lo que para este caso se considera una tasa de renovación de 20 renovaciones por hora (Ayan, Enoch, Fuchs, & Ipori, 1986), las temperaturas interiores y exteriores, así como las humedades relativas se obtiene de los datos meteorológicos y los requerimientos del cultivo según la fase de desarrollo, los demás parámetros utilizados se presentan a continuación:

Tabla 41: Parámetros utilizados para cálculo de pérdidas de calor por renovación de aire.

Parámetro	$V_{inv} (m^3)$	$\rho_{aire} (kg/m^3)$
Valor	2510	1,153

- Conducción a través del suelo

Para conocer las pérdidas de calor a través del suelo del invernadero se necesita conocer la temperatura del subsuelo utilizado como depósito de calor, este cálculo también es necesario para la estimación del intercambiador de calor geotérmico por lo que el detalle del procedimiento se presenta a continuación en el Anexo B, por otro lado, el invernadero considera un suelo de cemento de 20 *cm* de espesor, de esta manera, conociendo los coeficientes de conductividad térmica del cemento (The Engineering Toolbox, 2003) y del suelo (Hurtado, 2017) se tienen los siguientes parámetros:

Tabla 42: Parámetros utilizados para el cálculo de pérdidas de calor a través del suelo.

Parámetro	z, cemento (m)	z, suelo (m)	λ_c , cemento (W/(m · K))	λ_c , suelo (W/(m · K))
Valor	0,2	1,2	0,87	0,674

- Calor latente consumido en la evapotranspiración.

Para estimar el gasto correspondiente a la evapotranspiración del cultivo es necesario conocer la tasa de evapotranspiración del cultivo de acuerdo a la ecuación:

$$ET_c = k_c \cdot ET_0 \quad (A10)$$

k_c ; Coeficiente de cultivo

ET_0 : Evapotranspiración potencial dentro del cultivo [mm/hr]

Por otro lado, la evapotranspiración potencial se puede calcular de forma diaria mediante la ecuación de Hargreaves:

$$Et_0 = 0,0023 \cdot (T_{med} + 17,78) \cdot R_0 \cdot (T_{dmáx} - T_{dmin})^{0,5} \quad (A11)$$

T_{med} ; Temperatura media diaria [$^{\circ}C$]

R_0 : Radiación solar extraterrestre [mm/dia]

$T_{dmáx}$, T_{dmin} : Temperaturas diaria máxima y mínima respectivamente [$^{\circ}C$]

Junto con las condiciones meteorológicas, los parámetros necesarios para esta estimación son los coeficientes de cultivo, los cuales varía según la fase de desarrollo (Thevs & Aliev, 2022) y la radiación solar extraterrestre, la cual depende de la latitud de la zona geográfica donde se realiza el estudio (Allen et al., 1998), a continuación, se presentan los parámetros utilizados:

Tabla 43: Coeficientes de cultivo utilizados para el cálculo de pérdidas de calor por evapotranspiración.

Parámetro	Kc, etapa vegetativa	Kc, etapa floración inicial	Kc, etapa floración tardía
Valor	0,3	0,7	0,55

Tabla 44: Radiación solar extraterrestre (mm/día) utilizada para el cálculo de pérdidas de calor por evapotranspiración.

Mes	Clima costero	Clima interior
Enero	17,7	17,7
Febrero	16,05	16
Marzo	13,65	13,5
Abril	10,5	10,3
Mayo	8,05	7,8
Junio	6,85	6,6
Julio	7,35	7,1
Agosto	9,3	9,1
Septiembre	12,25	12,1
Octubre	15,05	15
Noviembre	17,1	17,1

Anexo B

- Cálculo temperatura del subsuelo

El cálculo de la temperatura del subsuelo en función de la profundidad se realiza según el método presentado en la guía técnica de diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado presentado por el gobierno de España (Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración, 2012), el cual está basado en el algoritmo presentado por Kusuda & Achenbach en 1965, el cálculo se lleva a cabo de acuerdo a

$$T(z, t) = T_m - A_s \cdot \exp\left(-z \sqrt{\frac{\pi}{365 \cdot \alpha}}\right) \cdot \cos\left[\frac{2\pi}{365}\left(t - t_0 - \frac{z}{2} \sqrt{\frac{365}{\pi \cdot \alpha}}\right)\right] \quad (B1)$$

T : Temperatura subsuelo a la profundidad deseada [$^{\circ}\text{C}$]

z : Profundidad [m]

t : Día del año [$día$]

T_m : Temperatura media anual del suelo [$^{\circ}\text{C}$]

A_s : Oscilación de temperatura [$^{\circ}\text{C}$]

α : Difusividad térmica del suelo [$m^2/día$]

t_0 : Desfase [$día$]

En base a los datos meteorológicos presentados en las tablas 3,4 y 5, considerando una difusividad para el suelo de $0,227 \text{ mm}^2/s$ (Hurtado, 2017) (cabe mencionar que este valor fue obtenido de manera experimental en la ciudad de Coyhaique, por lo que se recomienda hacer las pruebas en el terreno escogido para obtener una mayor precisión en los cálculos), y una tiempo de desfase de 165 días (día que corresponde aproximadamente al más frío del año), obtuvieron los siguientes resultados, para una profundidad de $1,5 \text{ m}$:

Tabla 45: Estimación temperatura subterránea, clima costero.

Mes	T superficie ($^{\circ}\text{C}$)	T suelo ($^{\circ}\text{C}$)
Enero	20,4	18,2
Febrero	20,2	18,6
Marzo	18,0	18,0

Abril	19,2	16,5
Mayo	15,2	14,6
Junio	13,7	12,7
Julio	12,5	11,4
Agosto	13,7	11,0
Septiembre	13,5	11,5
Octubre	13,5	12,9
Noviembre	15,5	14,8
Diciembre	18,3	10,7

Tabla 46: Estimación temperatura subterránea, clima interior.

Mes	T superficie (°C)	T suelo (°C)
Enero	26,8	19,9
Febrero	27,2	20,9
Marzo	24,8	19,8

Abril	19,7	17,0
Mayo	13,2	14,6
Junio	10,8	13,0
Julio	9,7	11,7
Agosto	11,3	10,9
Septiembre	12,2	11,9
Octubre	14,3	12,6
Noviembre	16,7	14,8
Diciembre	23,6	17,7

- Cálculos intermedios para el largo total del intercambiador de calor geotérmico.

Inicialmente se debe calcular el número de Reynolds para asegurar un flujo turbulento a lo largo de la tubería y así, conocer el diámetro máximo, en la ecuación 22 se presenta la definición del número de Reynolds a nivel molecular, para el fluido a través de la tubería se tiene:

$$Re = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v \cdot d_{int}} > 4000 \quad (B2)$$

Q : Caudal [m^3/s]

v : Viscosidad cinemática [m^2/s]

d_{int} : Diámetro interno de la tubería [m].

Considerando una viscosidad de $1,002 \cdot 10^{-6} m^2/s$ (Engineering Toolbox, 2004), se obtiene lo siguiente:

Tabla 47: Diámetro máximo del intercambiador de calor geotérmico

Ciudad	$Q (m^3/s)$	$\phi_{int} \text{ máx (m)}$
Clima costero	0,0067	1,96
Clima interior	0,0029	0,85

Junto con conocer el diámetro máximo admisible, también se debe conocer el diámetro mínimo, este debe ser el diámetro que asegure que la velocidad del fluido dentro de la tubería sea menor a $7 m/s$, por lo que conociendo el caudal se puede ajustar el diámetro, minimizando la diferencia entre la velocidad establecida y la velocidad calculada según:

$$V = \frac{Q}{A} \quad (B3)$$

V : Velocidad del fluido [$m/2$]

A : Área transversal de la tubería [m^2]

Mediante este ajuste se obtiene:

Tabla 48: Diámetro mínimo del intercambiador de calor geotérmico.

Zona	Q (m ³ /s)	Ø _{int} mín (m)
Clima costero	0,0067	0,035
Clima interior	0,0029	0,023

Una vez obtenido los rangos permisibles para el diámetro de la tubería se procede a calcular al calor transferido al subsuelo, para ello se debe conocer la diferencia media logarítmica de la temperatura:

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{\Delta T_f - \Delta T_i}{\ln \left(\frac{\Delta T_f}{\Delta T_i} \right)} \quad (B4)$$

ΔT_f : Diferencia de temperatura final [K], donde $\Delta T_f = T_{sub} - T_{in,f}$

ΔT_i : Diferencia de temperatura inicial [K], donde $\Delta T_i = T_{sub} - T_{out,f}$

$T_{in,f}$: Temperatura de entrada a la bomba. [K]

$T_{out,f}$: Temperatura de salida de la bomba. [K]

También es necesario calcular el coeficiente global de transferencia de calor:

$$U = \left[\frac{1}{h_{flu}} + \frac{d_{int}}{2} \left(\frac{\ln \left(\frac{d_{ext}}{d_{int}} \right)}{\lambda_{tub}} + \frac{\ln \left(\frac{d_{sub}}{d_{ext}} \right)}{\lambda_{sub}} \right) \right]^{-1} \quad (B5)$$

h_{flu} : Coeficiente de convección del fluido dentro de la tubería [$W/(m^2 \cdot K)$]

d_{ext} : Diámetro exterior de la tubería [m]

$\lambda_{tub}, \lambda_{sub}$: Coeficientes de conductividad de la tubería y el subsuelo respectivamente [$W/(m \cdot K)$]

d_{sub} : Diámetro de referencia del subsuelo [m]

Por otro lado, el coeficiente de convección viene dado por el número de Nusselt (Nu), el cual se obtiene mediante la ecuación de Dittus-Boelter para un flujo turbulento en un tubo circular:

$$Nu = 0,024 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^n \quad (B6)$$

$$Nu = \frac{h_{flu} \cdot d_{int}}{\lambda_{flu}} \quad (B7)$$

Es necesario considerar que el parámetro n depende de la dirección de intercambio de calor, siendo $n = 0,3$ cuando el fluido se enfría y $n = 0,4$ cuando se calienta, el número de Prandtl (Pr) está dado por:

$$Pr = \frac{\alpha}{\nu} \quad (B8)$$

Mediante este cálculo se puede obtener el coeficiente de convección ajustando su valor al igualar las ecuaciones B6 y B7, de esta forma se tienen los datos necesarios para calcular el calor transferido al subsuelo mediante la ecuación 12, donde se puede ajustar el largo requerido por el sistema minimizando la diferencia entre este valor y el valor obtenido en la ecuación 11, para el cálculo se considerara que el agua entra al intercambiador a una temperatura 25 °C mayor a la temperatura del suelo en el modo refrigeración, y a una temperatura 8 °C menor a la temperatura del suelo en el modo calefacción, la temperatura de salida del fluido está dada por:

$$Q_{sub} = \dot{m}_{agua} \cdot c_{p,agua} \cdot (T_{out} - T_{in}) \quad (B9)$$

Finalmente, para los cálculos se utilizaron los siguientes parámetros:

Tabla 49: Parámetros físicos utilizados para el cálculo del largo del IdC geotérmico.

Parámetro	λ_{tub} ($W/(m \cdot K)$)	λ_{sub} ($W/(m \cdot K)$)	λ_{flu} ($W/(m \cdot K)$)	d_{ext} (m)	d_{ref} (m)	$C_{p,agua}$ ($\frac{J}{kg \cdot K}$)
Valor	0,41	0,67	0,55	0,096	1,2	4148

Anexo C

La concentración de cannabinoides y terpenos del extracto supercrítico depende tanto de la variedad de cannabis que se utiliza para elaborarlo como de las condiciones de operación debido a la alta selectividad del dióxido de carbono como solvente, a continuación, se presentan los resultados obtenidos por LABSUN mediante cromatografías HPLC-UV para extractos supercríticos de distintas variedades:

Tabla 50: Resultados cromatografía extractos SC-CO2.

Variedad	Tipo de extracto	Contenido de THC	Contenido de CBD	Otros componentes	Propiedades médicas
Crítical + (Dinafem)	Alto en THC (efecto estimulante)	67%	1,5%	31,5%	• Analgésico • Anti-epiléptico • Estimula el apetito • Anti-emético • Anti-proliferativo
Shiva Skunk	Alto en THC	55%	1,5%	43,6%	• Analgésico • Anti-epiléptico

(Sensiseeds)	(efecto estimulante)				• Estimula el apetito • Anti-emético • Anti-proliferativo
Shark Shock CBD (Dinafem)	Extracto equilibrado (efecto estimulante controlado)	25%	35%	40%	• Analgésico • Ansiolítico • Anti-espasmódico • Estimulante óseo • Anti-proliferativo
Black Domina (Sensiseeds)	Extracto equilibrado (efecto estimulante controlado)	12%	7%	81%	• Analgésico • Ansiolítico • Anti-espasmódico • Estimulante óseo • Anti-proliferativo
Dinamed CBD (Dinafem)	Alto en CBD (Nulo efecto estimulante)	0%	50%	50%	• Anti-proquinético • Ansiolítico • Anti-psicótico • Inmunosupresor • Neuroprotector
Gala CBD (R-Kiem Seeds)	Alto en CBD (Nulo efecto estimulante)	0%	67%	33%	• Anti-proquinético • Ansiolítico • Anti-psicótico • Inmunosupresor

					Neuroprotect or
--	--	--	--	--	---

Anexo D

Para seleccionar la mejor ubicación de proyecto se compara el consumo eléctrico del proyecto en ambas ubicaciones junto al potencial de generación de estos, obtenidos de la herramienta Explorador Solar del Ministerio de energía, el consumo energético se calcula conociendo la potencia y el tiempo de operación de los equipos, a continuación, se presentan las condiciones ambientales consideradas (INIA, 2024):, el consumo eléctrico y la generación:

Tabla 51: Resumen meteorológico clima mediterráneo costero (estación meteorológica Aeródromo Rodelillo, Viña del mar, año 2023).

Mes	T max °C	T min °C	Tmedia °C	viento promedio kh/h	Humedad relativa
Enero	22,6	12,2	17,4	13,1	73,4%
Febrero	22,3	13,0	17,6	12,3	74,9%
Marzo	23,0	12,9	18,0	11,1	73,9%
Abril	19,7	11,1	15,4	10,3	76,4%
Mayo	18,1	10,0	14,0	8,9	77,7%
Junio	17,4	9,5	13,4	8,7	77,4%

Julio	16,7	9,0	12,9	9,1	78,2%
Agosto	16,8	9,1	12,9	12,6	80,3%
Septiembre	16,7	8,6	12,6	12,3	78,7%
Octubre	17,5	8,5	13,0	12,1	76,7%
Noviembre	19,1	9,4	14,3	13,5	76,4%
Diciembre	21,3	10,7	16,0	12,7	74,8%

Tabla 52: Resumen meteorológico clima mediterráneo interior (estación meteorológica Aeródromo Rancagua, año 2023).

Mes	T max °C	T min °C	Tmedia °C	viento promedio kh/h	Humedad relativa
Enero	29,5	14,2	21,8	10,9	52,0%
Febrero	30,9	14,2	22,6	10,4	47,4%
Marzo	29,1	12,8	21,0	9,2	52,3%
Abril	22,7	9,0	15,9	7,2	63,7%
Mayo	17,8	6,2	12,0	6,1	80,3%

Junio	15,1	5,9	10,5	6,4	85,9%
Julio	14,9	5,3	10,1	5,8	85,2%
Agosto	15,8	5,2	10,5	7,3	83,1%
Septiembre	15,8	6,7	11,3	7,5	83,8%
Octubre	19,9	7,7	13,8	8,3	72,8%
Noviembre	22,1	8,9	15,5	9,4	73,0%
Diciembre	27,1	11,5	19,3	10,3	59,0%

Tabla 53: Consumo eléctrico total del proyecto.

Mes	Consumo eléctrico clima costero (kWh)	Consumo eléctrico clima interior (kWh)
Enero	7505,9	16272,6
Febrero	4451,8	6217,3
Marzo	4723,9	9835,9
Abril	3340,5	5778,2
Mayo	4713,3	5860,7
Junio	2911,4	4398,7
Julio	4004,7	5873,8
Agosto	5795,0	7364,9
Septiembre	3678,9	4117,1
Octubre	3244,9	6042,9
Noviembre	5830,6	5640,2
Diciembre	4682,9	8106,3
Total Anual	54.884	85509

Tabla 54: Simulación sistemas de generación solar fotovoltaica, capacidad 72 kW (Explorador Solar).

Ciudad	Generación total anual (kWh)	Generación promedio diario (kWh)	Factor de planta
Clima costero	96422	264,2	15%
Clima interior	107609	294,8	17%

Anexo E

- Extracción supercrítica

Capacidad máxima de carga:

$$cap_{max} = \left[1500 \left(\frac{g \text{ flores}}{\text{ciclo}} \right) \cdot 4 \left(\frac{\text{ciclo}}{\text{semana}} \right) \cdot 1 \text{ equipo} \right] = 24.000 \left(\frac{g \text{ flores}}{\text{mes}} \right) \quad (F1)$$

Capacidad de procesamiento óptima:

$$cap_{op} = \frac{1}{2} \cdot cap_{max} = 12.000 \left(\frac{g \text{ flores}}{\text{mes}} \right) \quad (F2)$$

Producción media de extracto SC-CO₂ ($\eta = 10\%$):

$$Prod_{SC-CO_2} = 75 \left(\frac{g \text{ extracto}}{\text{ciclo}} \right) \cdot 4 \left(\frac{\text{ciclo}}{\text{semana}} \right) \cdot 1 \text{ equipo} = 1.200 \left(\frac{g \text{ extracto}}{\text{mes}} \right) \quad (F3)$$

Notar que demanda mensual requerida es de 970 *g extracto/mes* por lo que se recomienda ajustar la cantidad de ciclos semanales o la cantidad de material ingresado al reactor, por ejemplo, realizar cuatro ciclos a la semana con una alimentación de 610 *g* de flores.

- Extracción etanólica

Capacidad máxima de carga:

$$cap_{max} = 6 \left(\frac{lt \text{ solución}}{ciclo} \right) \cdot 1 \text{ equipos} \rightarrow 600 \left(\frac{g \text{ flores}}{ciclo} \right) \cdot 20 \left(\frac{ciclos}{mes} \right) = 12.000 \left(\frac{g \text{ flores}}{mes} \right)$$

Capacidad de procesamiento óptima:

$$Cap_{op} = cap_{max} = 12.000 \left(\frac{g \text{ flores}}{mes} \right)$$

Producción media de extracto RSO ($\eta = 12\%$):

$$Prod_{RSO} = (masa_{vegetal} \cdot \%pérdida \text{ descarboxilación} \cdot \eta_{extracción}) \quad (F4)$$

$$Prod_{RSO} = \left[12.000 \left(\frac{g \text{ flores}}{mes} \right) \cdot 0,85 \left(\frac{masa \text{ descarbox}}{masa \text{ inicial}} \right) \cdot 0,12 \right] = 1224 \left(\frac{g \text{ RSO}}{mes} \right)$$

De igual manera que el caso del extractor supercrítico, este cálculo corresponde la demanda óptima mensual (alcanzada al año 5), por lo que para los años anteriores se puede suplir la demanda limitando la cantidad de ciclos semanales, o alternatively operar los primeros cinco años con un equipo de 5 litros de capacidad.

Anexo F

A continuación, se presentan los resultados del balance de energía, diurno y nocturno para ambas zonas propuestas:

Tabla 55: Balance de energía diurno del invernadero, clima costero.

Mes	Rn [kW]	Qren [kW]	Qcc [kW]	Qevap [kW]	Qsuelo [kW]	Qreq [KW]
Enero	323,1	0,8	11,1	54,2	4,3	-86,1
Febrero	352,5	0,3	7,1	109,1	3,3	-32,4
Marzo	323,0	-0,1	3,0	77,1	0,7	-54,3
Abril	265,4	1,0	15,2	27,6	10,7	-56,3

Mayo	195,5	0,6	14,0	45,9	6,9	-12,2
Junio	179,3	0,3	11,2	29,8	8,3	-27,4
Julio	181,5	1,2	20,4	16,9	10,0	-32,4
Agosto	216,1	0,7	16,5	49,9	12,5	-16,1
Septiembre	265,9	0,4	12,8	52,6	8,2	-43,9
Octubre	310,7	1,2	20,3	37,5	3,9	-77,2
Noviembre	340,2	0,6	13,3	107,6	1,5	-28,2
Diciembre	354,1	0,1	6,1	98,6	1,9	-51,0

Tabla 56: Balance de energía nocturno del invernadero, clima costero.

Mes	Rn [kW]	Qren [kW]	Qcc [kW]	Qevap [kW]	Qsuelo [kW]	Qreq [KW]
Enero	7,7	0,29	2,33	6,0	0,4	1,3
Febrero	7,3	0,08	11,50	12,1	0,4	16,7
Marzo	8,2	-0,45	-5,61	8,6	-0,5	-6,1
Abril	6,9	0,99	9,83	3,1	1,4	8,4
Mayo	6,3	0,66	24,89	5,1	2,2	26,5
Junio	5,2	0,35	11,30	3,3	1,6	11,3
Julio	5,5	1,20	19,03	1,9	3,2	19,8
Agosto	5,0	0,74	30,22	5,5	3,2	34,8
Septiembre	6,0	0,41	14,73	5,8	1,6	16,6
Octubre	7,5	1,21	19,23	4,2	2,2	19,3
Noviembre	8,3	0,65	25,08	12,0	1,5	31,1
Diciembre	8,9	0,13	1,92	11,0	-0,5	4,0

Tabla 57: Balance de energía diurno del invernadero, clima interior.

Mes	Rn [kW]	Qren [kW]	Qcc [kW]	Qevap [kW]	Qsuelo [kW]	Qreq [KW]
Enero	399,7	0,7	4,6	74,0	1,6	-128,9
Febrero	397,5	0,2	0,5	166,8	1,0	-40,5
Marzo	365,8	0,0	0,0	106,2	0,7	-83,7
Abril	278,4	1,1	14,0	35,3	2,7	-89,7
Mayo	185,8	0,8	16,6	51,4	2,8	-21,6
Junio	157,8	0,5	15,2	29,2	2,8	-29,9
Julio	160,3	1,4	24,1	17,1	4,5	-32,1

Agosto	190,1	0,9	19,5	53,9	3,8	-16,0
Septiembre	254,0	0,5	14,2	53,4	2,9	-57,2
Octubre	303,7	1,2	18,4	44,8	3,5	-89,4
Noviembre	359,7	0,5	11,2	130,2	2,1	-42,4
Diciembre	384,9	0,0	2,0	131,3	0,8	-67,7

Tabla 58: Balance de energía nocturno del invernadero, clima interior.

Mes	Rn [kW]	Qren [kW]	Qcc [kW]	Qevap [kW]	Qsuelo [kW]	Qreq [KW]
Enero	19,8	0,72	-9,16	8,2	0,2	-19,6
Febrero	21,0	0,23	-3,86	18,5	0,2	-5,9
Marzo	16,3	-0,04	-11,92	11,8	-0,7	-17,1
Abril	8,2	1,10	3,66	3,9	1,2	1,7
Mayo	1,2	0,78	23,41	5,7	2,0	30,7
Junio	-2,0	0,53	12,62	3,2	1,4	19,8
Julio	-1,5	1,40	20,25	1,9	3,0	28,1
Agosto	-1,0	0,89	28,88	6,0	3,1	39,9
Septiembre	2,7	0,48	11,22	5,9	1,4	16,3
Octubre	9,6	1,19	10,33	5,0	2,1	9,0
Noviembre	11,6	0,53	13,18	14,5	1,3	18,6
Diciembre	17,9	0,02	-6,79	14,6	-0,6	-9,9

Anexo G

Para el cálculo de la bomba de calor es necesario definir primero el ciclo termodinámico, este se determina primeramente para el caso ideal, luego se ajusta la realidad considerando temperaturas de sobrecalentamiento y subenfriamiento, a continuación, se presentan los resultados del ciclo ideal:

Tabla 59: Ciclo ideal bomba de calor.

Punto	2 (salida evaporador)	3 (salida compresor)	4 (salida condensador)	I (salida válvula expansión)
--------------	------------------------------	-----------------------------	-------------------------------	-------------------------------------

T [°C]	3,69	65,72	47,25	3,62
P [bar]	8,96	28,82	28,82	8,96
Entalpía [kJ/kg]	422,46	454,14	280,30	280,30
Entropía [kJ/kgK]	1,80	1,80	1,26	1,29

Tabla 60: Capacidad ideal bomba de calor.

Equipo	Calor/trabajo	Unidad
Condensador	173,85	kJ/kg
Evaporador	142,16	kJ/kg
Compresor	31,68	kJ/kg

Tabla 61: Coeficiente de rendimiento ideal bomba de calor.

COP Refrigeración	COP Calefacción
4,49	5,49

Anexo H

Para conocer el consume eléctrico de la bomba de calor, primero es necesario calcular la diferencia entre el calor requerido por la bomba y el calor transferido al subsuelo, esta diferencia corresponde a la potencia eléctrica requerida por la bomba, conociendo este valor y las horas de marcha de la bomba (obtenidas de la misma forma que el calor requerido por el invernadero, pero con datos de condiciones climáticas horarias), a continuación se presenta el consumo eléctrico estimado para la bomba:

Tabla 62: Consumo eléctrico bomba de calor, clima costero.

Mes	Horas calefacción	Horas refrigeración	Consumo eléctrico (kWh)
Enero	219	186	3850,1
Febrero	225	164	1977,9
Marzo	217	147	2144,6
Abril	266	65	1296,6
Mayo	411	17	2138,2
Junio	430	16	1033,5
Julio	441	4	1703,8
Agosto	407	24	2801,3
Septiembre	401	22	1504,0
Octubre	33	61	1237,9
Noviembre	353	108	2823,1
Diciembre	308	156	2119,5
Total anual			24630,6

Tabla 63: Consumo eléctrico de la bomba de calor, clima interior.

Mes	Horas calefacción	Horas refrigeración	Consumo eléctrico (kWh)
Enero	24	297	9154,5
Febrero	17	310	2990,3
Marzo	65	252	5208,6
Abril	132	126	2721,1
Mayo	461	12	2771,7
Junio	490	2	1875,4
Julio	517	0	2779,7
Agosto	480	8	3693,8

Septiembre	436	25	1702,8
Octubre	358	107	2883,4
Noviembre	278	164	2636,5
Diciembre	126	244	4148,3
Total anual			42566,1

Anexo I

A continuación, se presenta el detalle del layout del invernadero y la planta de extracción por separado, notar que este diseño es representativo, no representa la escala real de la planta por lo que la superficie de las zonas representadas puede variar, en el layout del invernadero se presenta además la zona de este que considera para la instalación de paneles solares, mientras que en el layout de la planta de extracción se puede notar que la zona de extracción se encuentra subdividida para los distintos procesos.

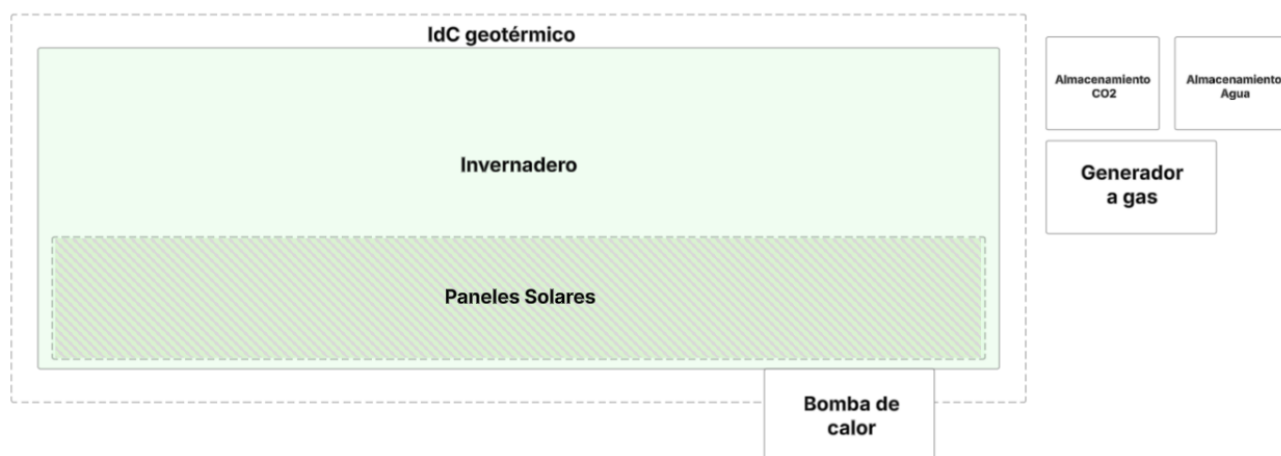


Figura 19: Layout del invernadero.

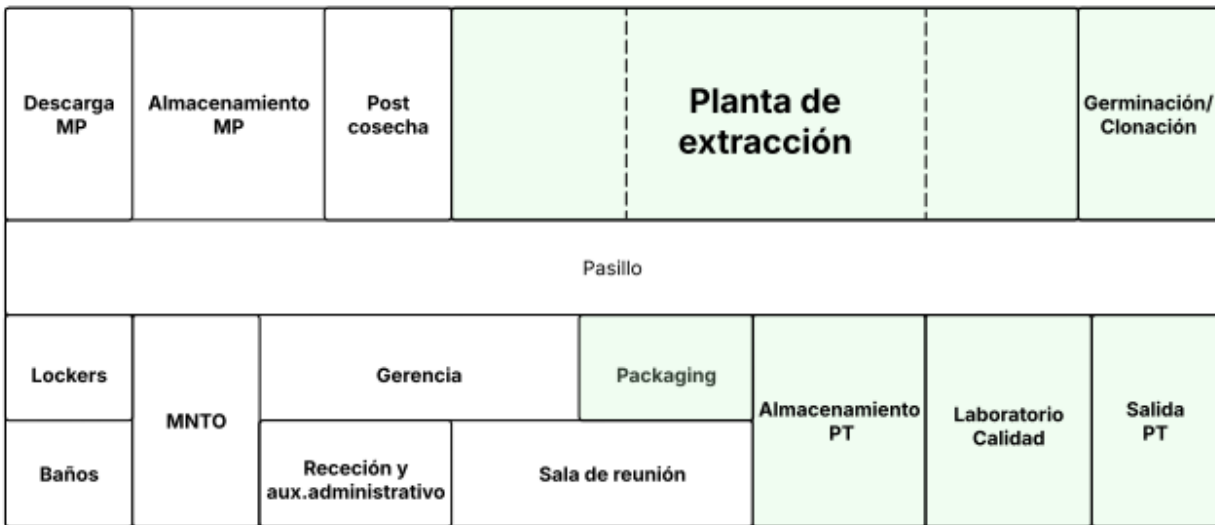


Figura 20: Layout de la planta de extracción.

Anexo J

A continuación, se presentan los índices de Peters y Timmerhouse para la estimación de CAPEX y OPEX de un proyecto:

COSTES DE CAPITAL			
Concepto	Tanto por ciento valor del equipo		
	Planta de sólidos	Planta de sólidos/fluidos	Planta de fluidos
COSTES DIRECTOS			
Valor del equipo DEL	100	100	100
Instalación del equipo	45	39	47
Instrumentación(instalada)	9	13	18
Tubería(instalada)	16	31	66
Electricidad(instalada)	10	10	11
Edificios(incluidos servicios)	25	29	18
Mejoras en el terreno	13	10	10
Servicios instalados	40	55	70
Terreno (si se requiere su compra)	6	6	6
TOTAL Costes Directos	264	293	346
COSTES INDIRECTOS			
Ingeniería y Supervisión	33	32	33
Gastos de Construcción	39	34	41
TOTAL gastos DIRECTOS E INDIRECTOS	336	359	420
Tasas del contratista (sobre un 5% de los costes directo e indirectos)	17	18	21
Contingencia (alrededor de un 10% de los coste directos e indirectos)	34	36	42
CAPITAL FIJO	387	413	483
CAPITAL CIRCULANTE alrededor de un 15% del capital total	68	74	86
CAPITAL TOTAL	455	487	569

Figura 21: Tabla de estimación de CAPEX (Peters, Timmerhouse, & West, 2002).

COSTES DE OPERACIÓN	
A. COSTES DE PRODUCCIÓN	
<i>1. COSTES DIRECTOS DE PRODUCCIÓN</i>	
1.1 Materia prima	10-50% del coste total del producto
1.2 Mano de obra	10-20% del coste total del producto
1.3 Mano de obra de supervisión y oficinas	10-25% de la mano de obra
1.4 Servicios	10-20% del coste total del producto
1.5 Mantenimiento y reparaciones	2-10% del capital inmovilizado
1.6 Operaciones de abastecimientos	10-20% del coste de mantenimiento o, 0,5-1% del capital inmovilizado
1.7 Gastos de laboratorio	10-20% de la mano de obra
1.8 Patentes y royalties	0-6% del coste total del producto
<i>2. CARGAS FIJAS</i>	
2.1 Amortizaciones	10% del capital inmovilizado
2.2 Impuestos locales	1-4% del capital inmovilizado
2.3 Seguros	0,4-1% del capital inmovilizado
2.4 Alquileres	8-12% del valor del alquiler de la tierra o edificios
<i>3. COSTES GENERALES DE PLANTA</i>	
Incluye salarios en general, servicios médicos, seguridad y protección, restaurantes y distracciones, laboratorios, etc.	50-70% del coste de mano de obra + el coste de supervisión + el coste de mantenimiento
B. GASTOS GENERALES	
1. Costes de Administración	15% del coste de mano de obra + el coste de supervisión + el coste de mantenimiento
2. Costes de Distribución y Ventas	2-20% del coste total del producto
3. Costes de Investigación y Desarrollo	5% del coste total del producto
4. Financiaciones (intereses)	0-10% del capital total

Figura 22: Tabla de estimación de OPEX (Peters, Timmerhouse, & West, 2002).

Anexo K

A continuación, se presenta el detalle de los flujos de caja para el proyecto desarrollado y para el caso base:

Tabla 64: FLujo de caja (USD), caso base.

Año	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos por Ventas		\$ 2.570.127	\$ 3.207.519	\$ 4.002.983	\$ 4.995.723	\$ 6.234.663	\$ 6.159.847	\$ 6.085.929	\$ 6.012.898	\$ 5.940.743	\$ 5.869.454
(-) Costos Fijos		\$ - 406.257	\$ - 406.257	\$ - 406.257	\$ - 406.257	\$ - 406.257	\$ - 406.257	\$ - 406.257	\$ - 406.257	\$ - 406.257	\$ - 406.257
(-) Costos variables		\$ - 80.575	\$ - 96.690	\$ - 116.028	\$ - 138.590	\$ - 161.151	\$ - 161.151	\$ - 161.151	\$ - 161.151	\$ - 161.151	\$ - 161.151
(=) Utilidades Operacionales		\$ 2.083.295	\$ 2.704.572	\$ 3.480.698	\$ 4.450.877	\$ 5.667.256	\$ 5.592.440	\$ 5.518.521	\$ 5.445.490	\$ 5.373.336	\$ 5.302.047
(-) Depreciación		\$ - 67.419	\$ - 40.926	\$ - 32.983	\$ - 27.368	\$ - 27.354	\$ - 27.002	\$ - 27.002	\$ - 27.002	\$ - 27.002	\$ - 27.002
(-) intereses crédito											
(=) Utilidad Antes de Impuestos		\$ 2.015.877	\$ 2.663.645	\$ 3.447.716	\$ 4.423.509	\$ 5.639.902	\$ 5.565.438	\$ 5.491.520	\$ 5.418.489	\$ 5.346.334	\$ 5.275.045
(-) Impuestos (27%)		\$ - 544.287	\$ - 719.184	\$ - 930.883	\$ - 1.194.347	\$ - 1.522.774	\$ - 1.502.668	\$ - 1.482.710	\$ - 1.462.992	\$ - 1.443.510	\$ - 1.424.262
(=) Utilidad Después de Impuestos		\$ 1.471.590	\$ 1.944.461	\$ 2.516.833	\$ 3.229.162	\$ 4.117.128	\$ 4.062.770	\$ 4.008.809	\$ 3.955.497	\$ 3.902.824	\$ 3.850.783
(+) Depreciación		\$ 67.419	\$ 40.926	\$ 32.983	\$ 27.368	\$ 27.354	\$ 27.002	\$ 27.002	\$ 27.002	\$ 27.002	\$ 27.002
(-) Amortización crédito											
(-) inversión	\$ - 821.554			\$ - 9.600		\$ 18.665		\$ - 9.600	\$ 18.638		
(-) capital de trabajo											
flujo de caja neto	\$ - 821.554	\$ 1.539.009	\$ 1.985.388	\$ 2.540.215	\$ 3.256.530	\$ 4.125.817	\$ 4.089.771	\$ 4.026.211	\$ 3.963.861	\$ 3.929.825	\$ 3.877.784
(+) crédito largo plazo											
flujo de caja neto	\$ - 821.554	\$ 1.539.009	\$ 1.985.388	\$ 2.540.215	\$ 3.256.530	\$ 4.125.817	\$ 4.089.771	\$ 4.026.211	\$ 3.963.861	\$ 3.929.825	\$ 3.877.784
Flujo de caja acumulado	\$ - 821.554	\$ 717.454	\$ 2.702.842	\$ 5.243.057	\$ 8.499.587	\$ 12.625.404	\$ 16.715.175	\$ 20.741.386	\$ 24.705.247	\$ 28.635.073	\$ 32.512.857

Tabla 65: Flujo de caja del proyecto (USD).

Año	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
		\$ 2.570.127	\$ 3.207.519	\$ 4.002.983	\$ 4.995.723	\$ 6.234.663	\$ 6.159.847	\$ 6.085.929	\$ 6.012.898	\$ 5.940.743	\$ 5.869.454
Ingresos por Ventas		\$ - 406.257	\$ - 406.257	\$ - 406.257	\$ - 406.257	\$ - 406.257	\$ - 406.257	\$ - 406.257	\$ - 406.257	\$ - 406.257	\$ - 406.257

(-) Costos Fijos	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
	80.575	96.690	116.028	-138.590	161.151	161.151	161.151	161.151	161.151	161.151	161.151
(-) Costos variables	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
	2.083.295	2.704.572	3.480.698	4.450.877	5.667.256	5.592.440	5.518.521	5.445.490	5.373.336	5.302.047	5.302.047
(=) Utilidades Operacionales	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
	67.419	40.926	32.983	-27.368	27.354	27.002	27.002	27.002	27.002	27.002	27.002
(-) Depreciación											
(-) intereses crédito	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
	2.015.877	2.663.645	3.447.716	4.423.509	5.639.902	5.565.438	5.491.520	5.418.489	5.346.334	5.275.045	5.275.045
(=) Utilidad Antes de Impuestos	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
	544.287	719.184	930.883	1.194.347	1.522.774	1.502.668	1.482.710	1.462.992	1.443.510	1.424.262	1.424.262
(-) Impuestos (27%)	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
	1.471.590	1.944.461	2.516.833	3.229.162	4.117.128	4.062.770	4.008.809	3.955.497	3.902.824	3.850.783	3.850.783
(=) Utilidad Después de Impuestos	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
	67.419	40.926	32.983	27.368	27.354	27.002	27.002	27.002	27.002	27.002	27.002
(+) Depreciación											
(-) Amortización crédito	\$ -		\$		\$ -		\$	\$ -			
	821.554		-9.600		18.665		-9.600	18.638			
(-) inversión											
(-) capital de trabajo	\$ -	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
	821.554	1.539.009	1.985.388	2.540.215	3.256.530	4.125.817	4.089.771	4.026.211	3.963.861	3.929.825	3.877.784
flujo de caja neto											
(+) crédito largo plazo	\$ -	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
	821.554	1.539.009	1.985.388	2.540.215	3.256.530	4.125.817	4.089.771	4.026.211	3.963.861	3.929.825	3.877.784
flujo de caja neto	\$ -	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
	821.554	717.454	2.702.842	5.243.057	8.499.587	12.625.404	16.715.175	20.741.386	24.705.247	28.635.073	32.512.857
Flujo de caja acumulado		\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
		2.570.127	3.207.519	4.002.983	4.995.723	6.234.663	6.159.847	6.085.929	6.012.898	5.940.743	5.869.454

Anexo L

A continuación, se presentan los gráficos de análisis de sensibilidad para el resto de los productos (extracto vaporizable, aceite sublingual y productos edibles), este gráfico permite conocer la evolución de los indicadores económicos con la variación del precio, permitiendo notar hasta que punto es rentable la inversión desplazando hacia la izquierda la recta del precio escogido hasta que su intersección con la curva del TIR se encuentre por debajo de la línea de la tasa de descuento.

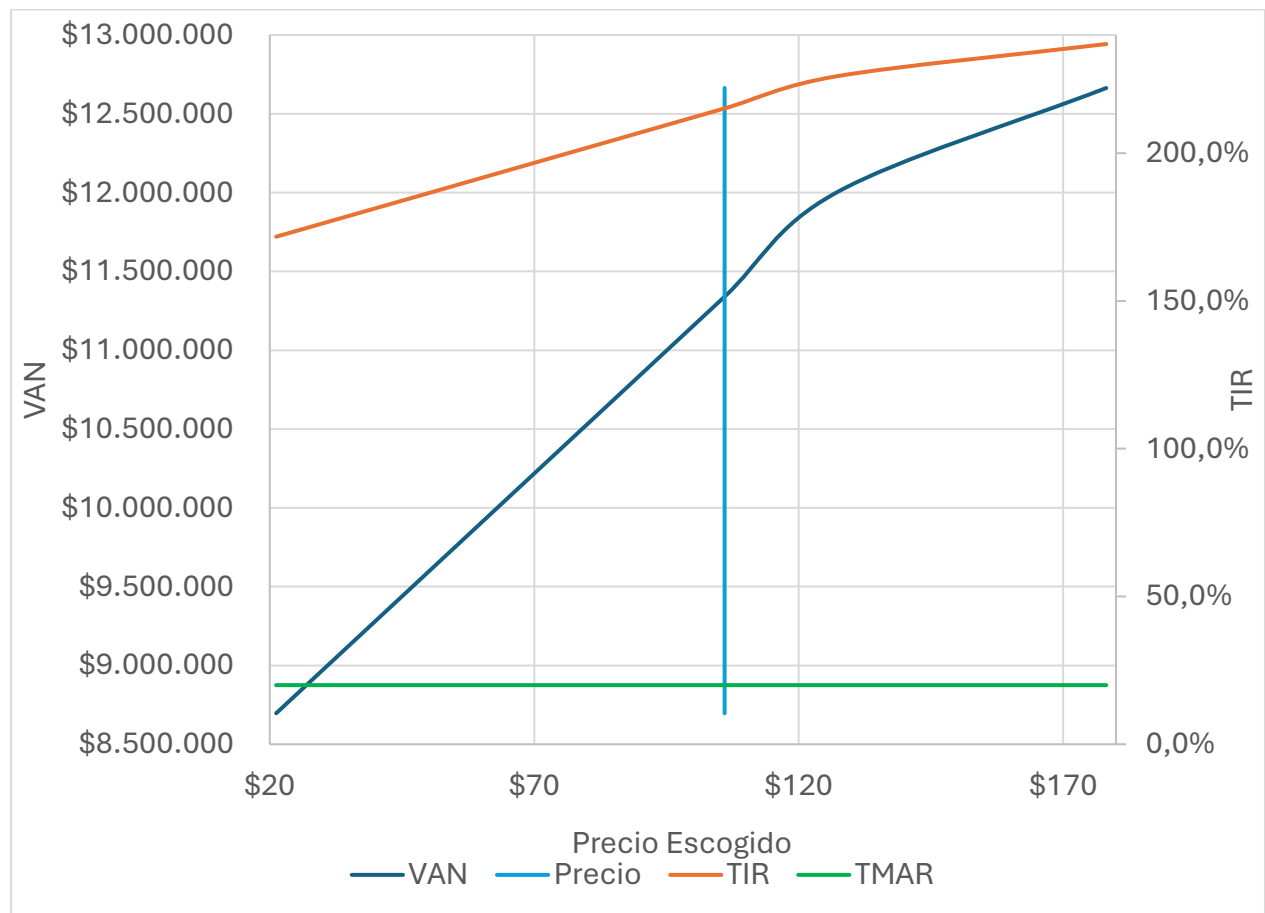


Gráfico 11: Análisis de sensibilidad, extractos vaporizables.

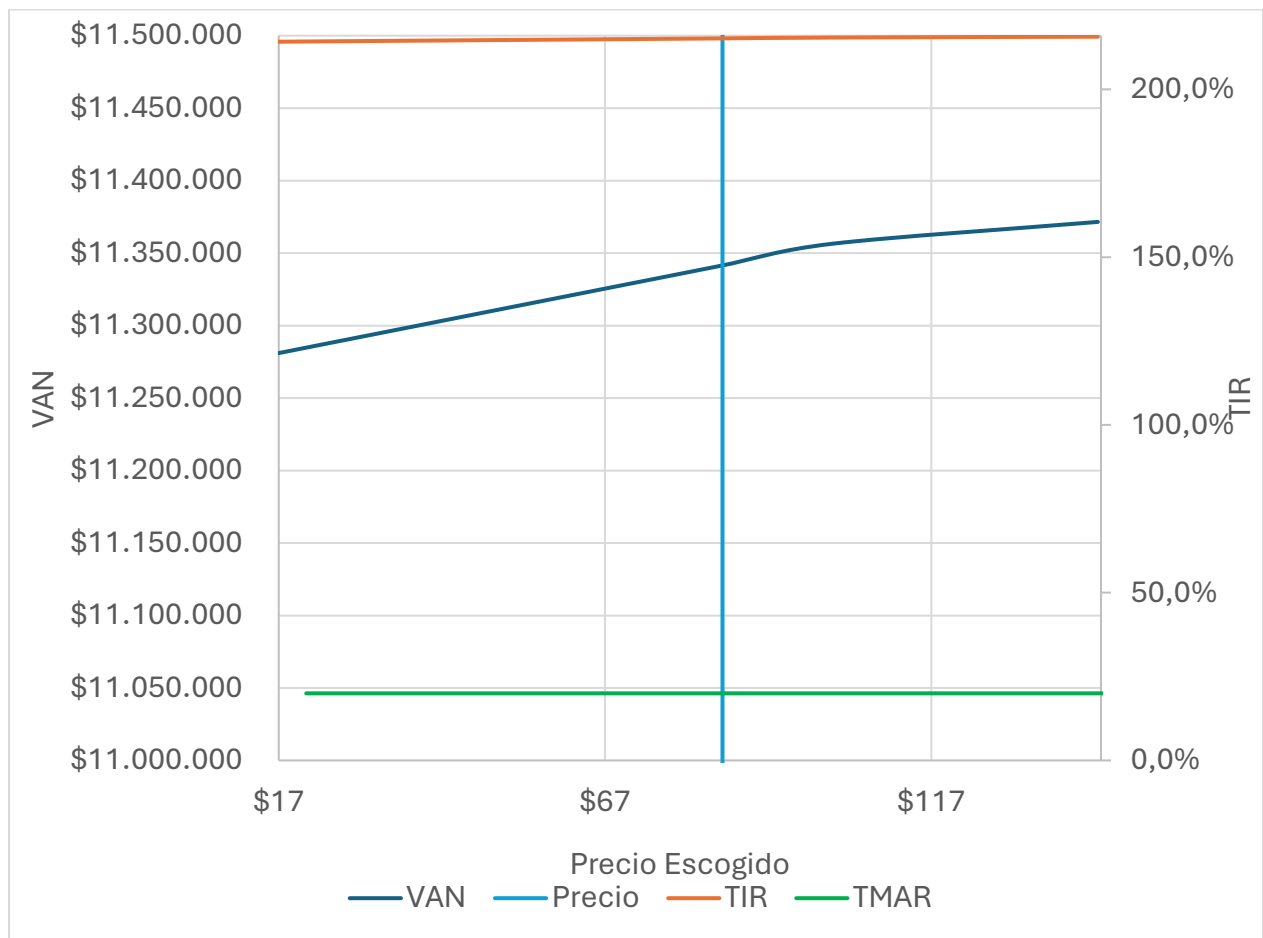


Gráfico 12: Análisis de sensibilidad, aceite sublingual.

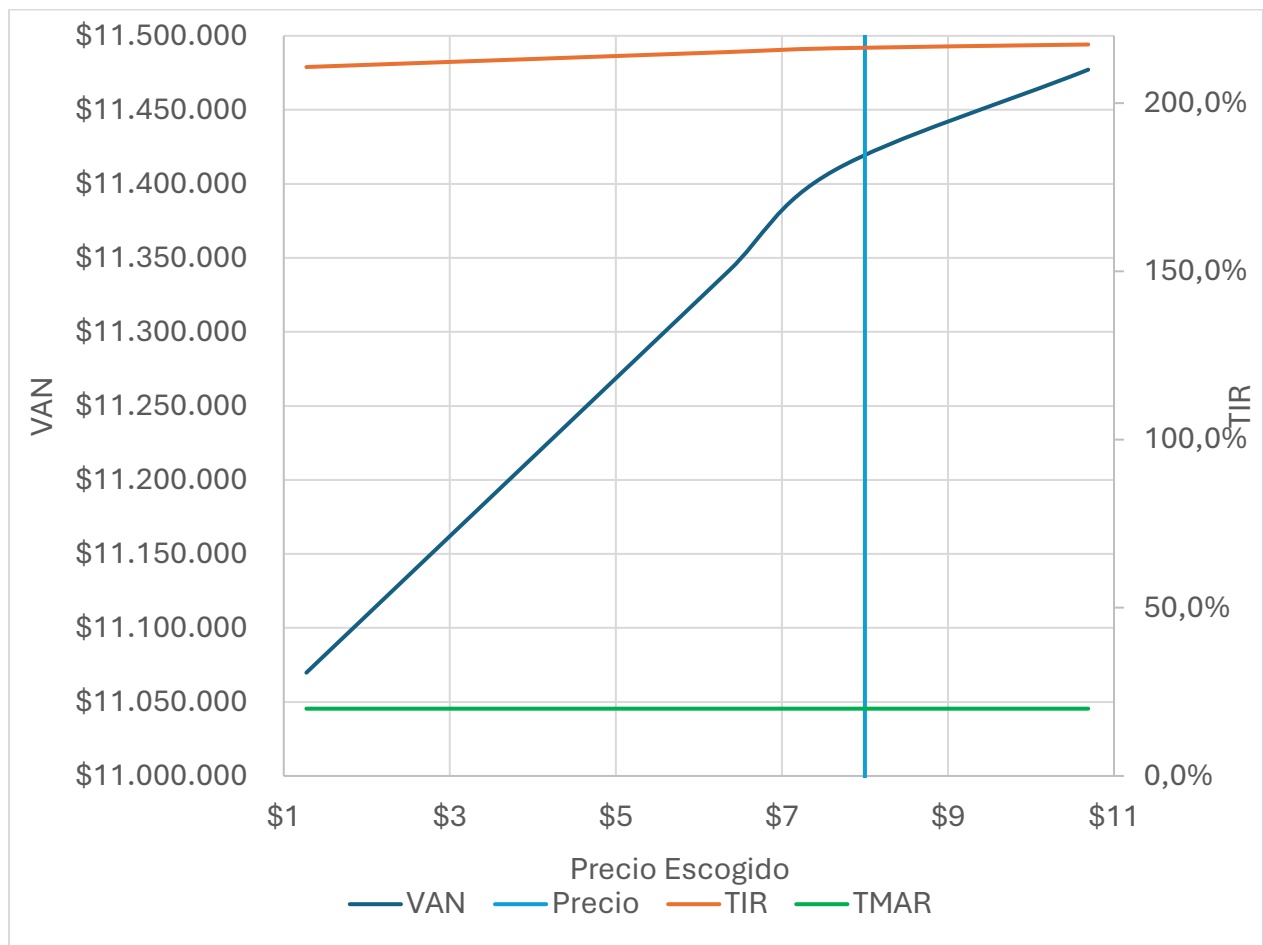


Gráfico 13: Análisis de sensibilidad, productos edibles.