



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

**“Diseño de una línea de proceso para la obtención Sulfato de
Calcio (Anhidrita) a partir de la fabricación de sal en una
empresa salinera”**

TESIS DE POSTGRADO

Previo a la obtención del Título de:

**MAGÍSTER EN GESTIÓN DE PROCESO Y SEGURIDAD
ALIMENTARIA**

Presentado por:

Vicente Jesús Reyes Villamar

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2023

AGRADECIMIENTO

Le doy gracias a Dios por brindarme sabiduría y fuerzas necesarias para poder continuar y culminar con mi tesis.

A mi empresa, ECUASAL por brindarme su apoyo y motivación para poder alcanzar un logro más en mi vida como profesional.

A mi tutora, Msc. Cindy Espinales por guiarme, encaminarme y motivarme a culminar este proyecto.

DEDICATORIA

A Dios, porque sin su amor y apoyo, este logro no habría sido posible.

A mis padres, gracias por creer siempre en mí y alentarme a seguir adelante.

A mi esposa e hija, ustedes son mi fuente constante de inspiración y motivación.

Cada día, su amor y apoyo me impulsaron a superar los desafíos que se presentaron en este viaje académico. Gracias por entender mis largas horas de estudio y por ser mi roca inquebrantable.

En este momento de logro nuevamente lo quiero dedicar a Dios, mis padres Jesús y Mariana, mi esposa Liliana y a mi bendición, mi ser, mi hija Francesca. Muchas gracias y espero seguir compartiendo más éxitos juntos en el futuro.

Con mucho amor, Vicente

TRIBUNAL DE TITULACIÓN

**Cindy Espinales M., MSc.
DIRECTORA DE PROYECTO**

**Patricio Cáceres C., PhD.
VOCAL**

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este proyecto de titulación, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual del mismo a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

Vicente Jesús Reyes Villamar

RESUMEN

El presente estudio propuso el diseño de una línea de proceso que permita aprovechar de manera eficiente el sulfato de calcio residual, conocido como anhidrita. Este subproducto surge durante el proceso de concentración del cloruro de sodio, también conocido como sal. Para alcanzar este objetivo inicialmente se obtuvo el producto a nivel laboratorio y se realizaron los análisis fisicoquímicos y de pureza a través de un método estequiométrico para determinar las concentraciones de sulfato y calcio. En base a estos resultados se realizó un levantamiento de información para la caracterización del proceso, haciendo uso de la metodología Systematic Layout Planning (SLP). Luego, se estableció el diseño del layout acorde a las respectivas fases del proceso de producción, respetando las normativas de distribución, espacios, tamaño de equipos y movilización de los operarios obteniendo un flujo continuo de forma de "U" y con un área de 190 m².

El sulfato de calcio obtenido a nivel laboratorio de las instalaciones presentó una pureza del 74.15%. Sin embargo, para aumentar su competitividad, se sugiere trabajar en el incremento de este porcentaje. Esto indica la necesidad de implementar procesos y controles más precisos en la formación de la anhidrita, como la supervisión de densidades y tiempos de formación. Finalmente, se realizó un análisis de costos para evaluar su viabilidad financiera, cuyo resultado fue positivo debido a que la tasa de retorno fue del 26%, el valor neto de \$ 374.294 con un periodo de recuperación mayor a 3 años. El sulfato de calcio obtenido cumple con todas las características químicas y físicas requeridas, dado que se extrae y refina en las instalaciones propias de la industria salinera, permitiendo que los costos asociados sean más bajos en comparación con los de la competencia. Esta ventaja desde una perspectiva financiera confiere al proyecto un atractivo innegable para la empresa.

Palabras claves: Subproducto, salinera, Layout, SLP.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	1
ÍNDICE GENERAL	2
ABREVIATURAS	4
SIMBOLOGÍA	5
ÍNDICE DE FIGURAS.....	6
ÍNDICE DE TABLAS.....	7
INTRODUCCIÓN.....	8
CAPÍTULO 1.....	2
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.1 Área de estudio.....	2
1.2 Justificación	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
CAPÍTULO 2.....	4
2. MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 Proceso de fabricación de sal	4
2.1.1 Métodos de obtención de sal	4
2.1.2 Etapas del proceso de fabricación de sal cosechada.....	4
2.1.3 Características y propiedades de la sal cosechada	5
2.2 Subproductos generados en la fabricación de sal	7
2.2.1 Impacto económico y aprovechamiento de los subproductos generados..	8
2.3 Sulfato de Calcio (Anhidrita).....	8
2.3.1 Definición, propiedades y características.....	8
2.3.2. Aplicaciones	9
2.3.3 Métodos de obtención	9
2.4 Diseño de una línea de proceso.....	10
2.4.1 Etapas del proceso para la producción de Sulfato de calcio	10
2.4.2 Equipos y maquinaria	11
2.4.3 Proyección de las Instalaciones.....	12
2.5 Estudios de viabilidad técnica y económica.....	12
2.5.1 Evaluación del diseño propuesto	12
CAPÍTULO 3.....	13
3. METODOLOGÍA	13
3.1. Obtención de Sulfato de Calcio	13
3.2 Diagramas del proceso	13
3.3 Análisis Fisicoquímico del sulfato de calcio	13

3.3.1 Determinación de pureza.....	13
3.3.2. Determinación de pH.....	14
3.3.3. Determinación de Humedad.....	15
3.3.4 Determinación de granulometría.....	15
3.4. Análisis de distribución.....	16
3.5. Diseño de la línea de proceso.....	16
3.6. Rendimiento del proceso.....	16
3.7. Análisis de costos.....	16
 CAPÍTULO 4.....	 17
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	17
4.1 Procesamiento de Sulfato de Calcio.....	17
4.2 Diagramas.....	17
4.2.1 Diagrama de proceso.....	17
4.2.2 Diagrama de flujo.....	19
4.2.3 Diagrama de Gantt.....	20
4.3 Análisis Físicoquímico del sulfato de calcio.....	20
4.3.1 Determinación de pureza de sulfato de calcio.....	21
4.3.2 Determinación de pH.....	21
4.3.3 Determinación de Humedad.....	21
4.3.4 Determinación de granulometría.....	21
4.4 Diseño y costo de planta.....	22
4.4.1 Localización y terrenos.....	22
4.4.2 Capacidad de producción.....	22
4.4.3 Capacidad por equipo.....	23
4.4.4 Layout de la línea procesadora.....	24
4.4.5 Costo de inversión.....	26
4.4.6 Análisis financiero.....	28
 CAPÍTULO 5.....	 29
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	29
5.1 Conclusiones.....	29
5.2 Recomendaciones.....	30

APÉNDICES
BIBLIOGRAFÍA

ABREVIATURAS

KPS	Solubilidad de un compuesto
NTE	Norma Técnica Ecuatoriana
INEN	Servicio Ecuatoriano de Normalización
F.C.C	Cara cúbica centrada
ARCSA	Agencia Nacional de Regulación, Control y Vigilancia Sanitaria
GR	Grado Reactivo
AOAC	Asociación Oficial de Químicos Analíticos
Ph	Potencial de Hidrogeno
ISE	Electrodo Selectivo de Iones
PC	Punto Control
TIR	Tasa Interna de Retorno
VAN	Valor Actual Neto
CORELAP	Computerized Relationship Layout Planning

SIMBOLOGÍA

°C	Grados centígrados
°Be	Grados Baumé
°K	Grados Kelvin
h	Horas
%	Porcentaje
g	Gramos
Kg	kilogramos
ml	Mililitros
m	Metros
cm	centímetros
min	Minutos
mm	Milímetros
L	Litro
N	Normalidad
mJ	Mili Joules
min	Minutos
µL	Microlitros
mg	Miligramos
rpm	Revoluciones por minutos
M	Moles
(v/v)	Volumen por volumen
±	Más menos
Mohs	La dureza
Tn	Tonelada
STD	Gastos
KWH	Kilowatts por hora
GL	Galones
H/H	Horas/Hombre

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1 Diagrama de proceso de elaboración de sal cosechada	5
Figura 2.2 Reducción de volumen frente a la densidad de las salmueras	8
Figura 2.3 Línea de proceso de sulfato de calcio	11
Figura 4.1 Diagrama de proceso de obtención de sulfato de calcio	18
Figura 4.2 Diagrama de flujo de proceso de sulfato de calcio	19
Figura 4.3 Layout del proceso de sulfato de calcio	25
Figura 4.4 Implantación del sulfato de calcio	26

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Propiedades físicas y químicas del cloruro de sodio	6
Tabla 2 Requisitos de control de la sal de mesa	6
Tabla 3 Límites permitido de la contaminante de la sal cosechada y de mes	7
Tabla 4 Compuestos químicos formados durante la concentración del agua de mar	7
Tabla 5 Características del sulfato de calcio	8
Tabla 6 Propiedades físicas y químicas del sulfato de calcio	9
Tabla 7 Equipos para procesamiento de sulfato de calcio	11
Tabla 8 Equipos para procesamiento de sulfato de calcio	20
Tabla 9 Resultados de las propiedades fisicoquímicas del sulfato de Calcio	20
Tabla 10 Resultados de análisis de pureza del sulfato de calcio.....	21
Tabla 11 Tabla de granulometría del sulfato de calcio	22
Tabla 12 Resultados de la capacidad de producción	23
Tabla 13 Capacidades y utilización por equipo	23
Tabla 14 Dimensiones por sección del proceso	24
Tabla 15 Tabla de costo de producción de Materia Prima (Yeso)	26
Tabla 16 Tabla de gastos indirectos	27
Tabla 17 Tabla de inversión inicial o activos fijos.....	27

INTRODUCCIÓN

En el año 2022, los principales productores de sal fueron China, India, Estados Unidos y México siendo este último el primer productor de sal en Latinoamérica (*Sal*, 2022). Por otra parte, la producción en Ecuador la lidera una empresa salinera que se encuentra en el Sector Pacoa, Península de Santa Elena. Donde el proceso de elaboración de sal se fundamenta en los procesos de evaporación, decantación y cristalización; luego es transportada hacia refinería para entrar al proceso de lavado, secado, tamizado y envasado (Quinapallo García & Ochoa Armijos, 2019). La empresa salinera se ha dedicado al procesamiento de sales para la obtención de sal de grano, sal refinada de mesa, sal para uso industrial y sal con especias (*Ecuasal*, 2016)

Los depósitos evaporíticos donde se concentra gran cantidad de salmuera se encuentra yacimientos de arcilla, carbonatos, dolomita, sílex y otros minerales evaporíticos tales como halita, sulfatos sódicos y, en especial, la forma no hidratada del sulfato cálcico, la anhidrita (M. Regueiro y González Barros, 1997). El sulfato de calcio hidratado (yeso) pierde agua de cristalización entre 60 a 70°C., de ahí en adelante tiene las siguientes transformaciones al aumentar la temperatura tales como anhidrita I, Anhidrita II, Anhidrita III (Dr. Ing. Leónidas Tcheichvil, 1968). El sulfato de calcio (anhidrita) es un mineral que se lo emplea en la fabricación de ciertos fertilizantes utilizados en el suelo puesto que aportan calcio en grandes cantidades, pero su uso exclusivo es en las industrias del portland (Moreno Ramón, Héctor & Gisbert Blanquer, Juan Manuel, 2011)

Según el Observatorio de Complejidad Económica (*OEC*, 2021) en el 2021 los mayores exportadores de sulfato de calcio fueron Alemania, Turquía, Francia, Tailandia y Estado Unidos. Por otra parte, los mayores productores y exportadores de este producto en Latinoamérica es Brasil y Argentina (Begliardo, 2013).

Hoy en día las industrias salineras se enfrentan a distintos desafíos económicos por la degradación medioambiental, la competencia de la sal importada y los cambios en las preferencias de los consumidores (Joy et al., 2023). Es así como muchas de estas industrias ecuatorianas buscan explorar en el ámbito de sostenibilidad e innovación en relación con sus productos o procesos, como en generar valor a subproductos que se producen a partir de la fabricación de sal. Ante esta problemática, se plantea proponer el diseño de una línea de proceso que ayude a la obtención de sulfato de calcio en una empresa salinera ecuatoriana que cumpla con las normativas de calidad. Se pretende aplicar metodologías de caracterización de procesos y planificación de distribución sistemática para proponer la línea de proceso en la extracción y producción de sulfato de calcio. Además, se busca evaluar la viabilidad económica y financiera de este proceso de aprovechamiento en comparación con las prácticas convencionales de desecho.

CAPÍTULO 1

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Área de estudio

El presente proyecto de titulación tiene contemplado su desarrollo en la Planta Pacoa, carretero San Pablo-Monte Verde Km. 8. Península de Santa Elena – Ecuador. La selección del sitio se debe a la facilidad en la obtención de la materia prima y el área disponible de construcción para colocar una nueva línea de proceso.

1.2 Justificación

La obtención de sal marina a partir del agua de mar se ha mantenido por muchos años como un proceso tradicional (López & Alarcón, 2011). Sin embargo, el aprovechamiento completo de los subproductos generados durante este proceso representa un desafío para las industrias salineras. Durante el proceso que llevan a cabo para obtener sal, el agua de mar se somete a calentamiento o evaporación debido a las condiciones ambientales, se produce la precipitación de carbonato cálcico (CaCO_3) como el principal componente, junto con una parte de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (Alonso Villalobos, 2007). Esto conduce a la obtención de sal marina con una alta concentración de cloruro sódico, alcanzando hasta un 95% de pureza (Alonso Villalobos, 2007), mientras existe un 5% de minerales que no se está aprovechando. En efecto, al no presentarse como un modelo económico para la empresa el aprovechamiento de estos residuos, no se ha llevado a cabo un estudio de las fases cristalinas que permita determinar los parámetros de proceso necesarios. Estos parámetros son esenciales para obtener un producto que cumpla con las normativas de calidad y, en consecuencia, aumente su valor en el mercado.

Al realizar un estudio del proceso para la obtención y comercialización del sulfato de calcio, se podría potenciar como materia prima debido a su gran aplicación en los campos de la construcción, clínica y agrícola (Alarcón, 2011). Además, de la posibilidad de tener menores costos de producción por el aprovechamiento de este subproducto que podría comercializarse tanto a nivel nacional como internacional (Carlos Felipe Ostertag, 2002). Dada estas razones, el proyecto busca estandarizar ciertas etapas del proceso para brindar un valor agregado a la producción de sal.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Diseñar una línea de proceso para el aprovechamiento de sulfato de calcio (Anhidrita) obtenido del proceso de evaporación para la producción de sal, mediante análisis químicos y caracterización del proceso de producción.

1.3.2 Objetivos específicos

- Analizar el nivel de calidad y pureza del sulfato de calcio (Anhidrita) obtenido del proceso de evaporación de la sal, a través de análisis químicos.

- Analizar el proceso productivo de la obtención de sulfato de calcio (Anhidrita) para el establecimiento de los parámetros de producción.

- Evaluar la propuesta de diseño de la línea de producción para la obtención de sulfato de calcio a través de un análisis de costos y de rendimientos del proceso.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Proceso de fabricación de sal

2.1.1 Métodos de obtención de sal

Método por evaporación solar:

Este es el método más antiguo de producción de sal. Por lo general, este método se lo utiliza en zonas de clima cálidos donde la tasa de evaporación excede la tasa de precipitación, ya sea anualmente o durante periodos prolongados donde existen vientos predominantes y constantes. La obtención de sal, bajo este método, se logra mediante la entrada de agua de mar en piscinas poco profundas, donde las condiciones ambientales, como la brisa y el sol, facilitan la evaporación del agua y, como resultado, se obtienen los cristales de sal (*Salt Production and Processing, 2021*).

Método por evaporación al vacío:

Este proceso, también conocido como minería por disolución, implica aumentar la concentración de salmuera en pozos subterráneos. De esta manera, se elimina cualquier insolubilidad presente en la salmuera, lo que resulta en una mayor pureza de la sal obtenida (*Sal de roca, 2021*). Una vez concentrado la salmuera se bombea hacia los evaporadores de bandejas de vacío que mediante el uso de vapor de agua se va eliminando la cantidad de agua y cristalizando la sal (*Salt Production and Processing, 2021*).

Método por minería de rocas:

Se caracteriza por la extracción de los yacimientos de sal que se formaron a través del tiempo por las aguas marinas subterráneas. Su extracción se realiza de la misma manera que cualquier otra minería subterránea (*Salt Production and Processing, 2021*).

2.1.2 Etapas del proceso de fabricación de sal cosechada

Evaporación

La producción de sal marina es un proceso totalmente natural que se basa en la evaporación del agua del mar en las piscinas de gran extensión y poca profundidad. Para este proceso se debe considerar dos factores importantes como son los rayos solares que actúan como calentador de agua y, por el otro lado, el viento que retira el vapor de agua que se eleva sobre las piscinas (Salimar, 2020). El proceso de evaporación se basa en el transporte del agua de mar hacia una serie de piscinas interconectadas mediante compuertas. Este sistema permite concentrar la salmuera gradualmente, con el objetivo de aumentar su concentración de sal (Alonso Villalobos, 2007).

Decantación

Una vez concentrado la salmuera pasa a la piscina decantadora con la finalidad de eliminar toda impureza que se presente en la disolución de la salmuera, aquí también se continua paulatinamente con la concentración de la sal (Salimar, 2020).

Cristalización

Los cristalizadores son, por tanto, las únicas piscinas donde propiamente se forma la sal marina una vez obtenida su concentración, se cristaliza en la superficie y se va depositando en el fondo, donde forma una dura capa que será posteriormente recolectada durante la cosecha de la sal (Salimar, 2020).

A continuación, en la Figura 2.1 se detalla el esquema del proceso de elaboración de la sal cosechada.

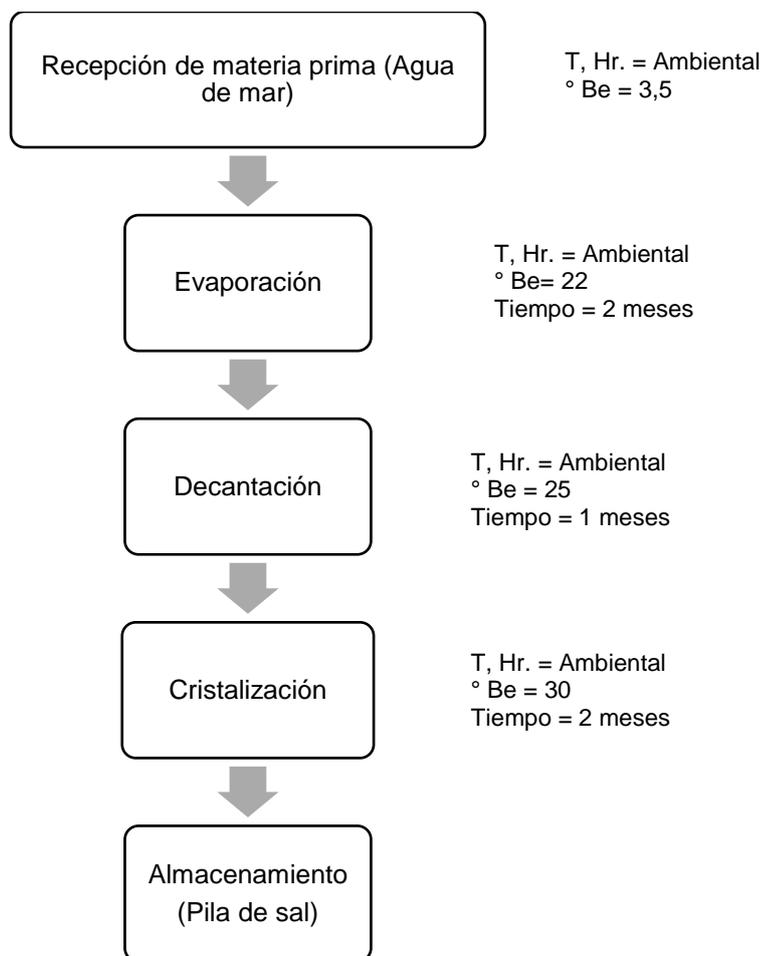


Figura 2.1 Diagrama de proceso de elaboración de sal cosechada

Elaborado por Vicente Reyes Villamar

2.1.3 Características y propiedades de la sal cosechada

El cloruro de sodio es también conocido como sal de mesa, sal común o halita. Su fórmula es NaCl y posee un estado de agregación en fase sólida, se caracteriza por ser de color blanco en su estado cristal fino, además es soluble en agua (Feldman, 2005). En la tabla 1 se detalla sus propiedades.

Tabla 1 Propiedades físicas y químicas del cloruro de sodio

Propiedades físicas	
Estado de agregación	Sólido
Apariencia	Incoloro; aunque parece blanco si son cristales finos o pulverizados.
Densidad	2200 kg/m ³ ; 2,2 g/cm ³
Punto de fusión	1.074 °K (801 °C)
Punto de ebullición	1.738 °K (1.465 °C)
Estructura cristalina	Cara cúbica centrada (f.c.c)
Propiedades químicas	
Solubilidad en agua	35,9 g por 100mL de agua
KPS	37,79 <u>mol</u> ²

Fuente:(Cognetti et al., 2001)

Según la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 57 existe requisitos que se deben de cumplir para la refinación de la sal (Tabla 2). Además, en la normativa se indican los límites permitidos de trazas por contaminantes que se presentan en la sal común, tal como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 2 Requisitos de control de la sal de mesa

Requisitos	Parámetros
Humedad, %	Máx. 0,5
Cloruro de sodio, %	Mín. 98,5
Residuo insoluble, %	Máx. 0,3
Yodo, mg/kg	20-40
Calcio, mg/kg	Máx. 1000
Magnesio, mg/kg	Máx. 1000
Sulfato, mg/kg	Máx. 6000

Fuente: NTE INEN 57

Tabla 3 Límites permitido de la contaminante de la sal cosechada y de mes

Contaminante	Límite máximo mg/kg
Arsénico	0,5
Cobre	2
Plomo	2
Cadmio	0,5
Mercurio	0,1

Fuente: NTE INEN 57

2.2 Subproductos generados en la fabricación de sal

Existe una gran variedad de subproductos químicos que se pueden encontrar durante el proceso de concentración del agua de mar. Entre 4 y 11°Be precipita el Carbonato de calcio (CaCO_3), a partir de 12°Be comienza a formarse el sulfato de calcio (CaSO_4) en forma de yeso, a los 30°Be se cristaliza el cloruro de sodio, el resto de composición (Tabla 4) se va formando gradualmente a medida que vaya tomando como referencia su densidad en grados Baumé (Alonso Villalobos, 2007).

Tabla 4 Compuestos químicos formados durante la concentración del agua de mar

Nombre del compuesto	Fórmula química
Carbonato de Calcio	CaCO_3
Sulfato de Calcio	CaSO_4
Sulfato de Magnesio	MgSO_4
Cloruro de Magnesio	MgCl_2
Cloruro de Sodio	NaCl
Cloruro de potasio	KCl
Bromuro de Sodio	NaBr

Fuente: (Alonso Villalobos, 2007)

Para lograr la precipitación de la sal marina se debe alcanzar el límite de saturación del cloruro de sodio (NaCl), lo cual exige una pérdida del agua por evaporación de aproximadamente el 90% de su volumen original. Es decir, si se parte de 1000 litros de agua de mar (3.5°Bé) hasta reducir su volumen a 100 litros (26°Bé), no se observará la formación de cristales de sal (Figura 2.2) (Alonso Villalobos, 2007).

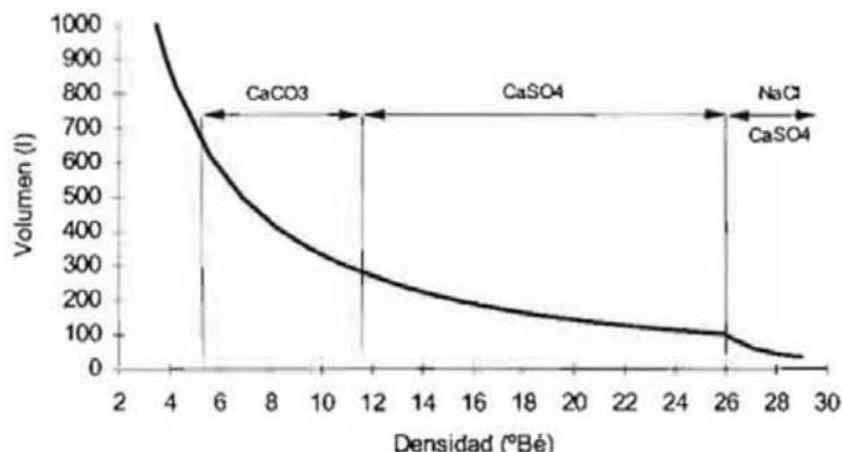


Figura 2.2 Reducción de volumen frente a la densidad de las salmueras

Fuente: (Alonso Villalobos, 2007)

2.2.1 Impacto económico y aprovechamiento de los subproductos generados

Los subproductos que se generan tales como el carbonato de calcio (CaCO_3) y sulfato de calcio (CaSO_4) son productos que se formaron durante el proceso de concentración de la sal. Ambos son cristales que se pueden recolectar y ensacar utilizando el mismo proceso de refinación de sal (Heilbraun, 1971).

2.3 Sulfato de Calcio (Anhidrita)

2.3.1 Definición, propiedades y características

La anhidrita es el sulfato de calcio anhidro (CaSO_4) que debe su nombre a la palabra griega “anhidros” que significa sin agua. Está formado en un 41% de Oxido de Calcio (CaO) y un 59% de Trióxido de azufre (SO_3), son comúnmente encontrados en los depósitos de sal, aunque resulta difícil de encontrarlos bien cristalizado, la anhidrita absorbe las moléculas de agua al contacto y pasan a ser yeso (Moreno Ramón, Héctor & Gisbert Blanquer, Juan Manuel, 2011). Las características del sulfato se detallan en la tabla 5, mientras que sus propiedades físicas y químicas se detallan en la tabla 5.

Tabla 5 Características del sulfato de calcio

Características	Detalle
Fórmula química	CaSO_4
Clase	Sulfatos
Sistemas cristalográficos	Rómbico
Hábito	Nódulos, cristales prismáticos y pseudotetraédricos

Fuente: (Moreno Ramón, Héctor & Gisbert Blanquer, Juan Manuel, 2011), (El Morro S.A, 2021)

Tabla 6 Propiedades físicas y químicas del sulfato de calcio

Propiedades	Detalle
Color	Blanco, azulado, rosado, rojizo, etc. (dependiendo de impurezas)
Dureza	3.0 - 3.5 Mohs
Ph	6.0 – 7.0
Humedad	Máximo 2.5%
Brillo	Vítreo a perlado
Granulometría	45% máximo (retenida malla 70)
Densidad	2.98 g/ cm ³
Otras	Exfoliación pseudotetraédricos perfecta
Pureza	Min. 92%

Fuente: (Moreno Ramón, Héctor & Gisbert Blanquer, Juan Manuel, 2011), (El Morro S.A, 2021)

2.3.2. Aplicaciones

La anhidrita se lo utiliza en los procesos de fabricación de:

- *Fertilizantes:* Utilizados en la agricultura por su alto contenido de calcio que aporta en el suelo, también se utiliza como retardante en la industria del portland (Moreno Ramón, Héctor & Gisbert Blanquer, Juan Manuel, 2011).
- *Clínicas:* El sulfato de calcio actúa como sustituto óseo en procedimientos regenerativos, es biocompatible, biodegradable y osteoconductor, además se caracteriza por ser angiogénico, hemostático, es decir que posee propiedades de barrea o membrana (Alarcón, 2011).
- *Construcción:* La anhidrita posee propiedades cementantes que la hacen adecuada para su uso en la industria de la construcción. Cuando se obtiene a través del proceso de neutralización en planta, puede emplearse en la fabricación de morteros. Por otro lado, la anhidrita extraída de depósitos de material intemperizado se utiliza en la producción de tabiques (Delma V. Almada & Francisco S. Yeomans, 2005).

2.3.3 Métodos de obtención

La anhidrita puede encontrarse en asociación con otros minerales como el yeso, la halita, los carbonatos (dolomita y calcita) y el cuarzo (Canadian Mineralogist, 1975). Además, puede formarse mediante la deshidratación del yeso en procesos diagenéticos o metamórficos de baja intensidad. (Moreno Ramón, Héctor & Gisbert Blanquer, Juan Manuel, 2011).

2.4 Diseño de una línea de proceso

El diseño de la línea de proceso, también conocido como el Layout, está orientado hacia la producción de productos que satisfagan las necesidades de los clientes, lo que implica que la ubicación de las instalaciones debe ser compacta y flexible (Blanco-Fernández et al., 2014). El Layout de una empresa consiste en la disposición física de los elementos industriales para establecer un sistema productivo capaz de alcanzar los objetivos establecidos de la manera más efectiva posible, y para lograrlo es necesario considerar los siguientes factores claves como lo menciona Blanco-Fernández et al., (2014):

- *Flexibilidad del Layout:* Es fundamental que el Layout sea lo suficientemente flexible como para adaptarse a cambios en el volumen de producción, la incorporación de nuevos productos, expansiones, modificaciones en el proceso, cambios en la maquinaria, entre otros aspectos. Estos ajustes deben realizarse en poco tiempo y con el menor costo posible.
- *Utilización del área productiva:* Se debe realizar una medición precisa del área utilizada para la producción en comparación con el área que no agrega valor al proceso. De esta manera, se busca optimizar el uso del espacio productivo y minimizar áreas que no contribuyen eficientemente a la producción.
- *Proximidad:* Para mejorar la eficiencia del proceso, se busca reducir al máximo los recorridos de materiales, personal y productos dentro de las instalaciones. Esto implica organizar la disposición de manera que los desplazamientos sean lo más cortos y directos posible.

El análisis y consideración de estos factores son fundamentales para diseñar un Layout que facilite la producción eficiente y satisfaga las necesidades de los clientes de manera óptima.

2.4.1 Etapas del proceso para la producción de Sulfato de calcio

De acuerdo con Vincenzina La Spina, (2014), indica que las etapas de procesamiento para la producción de sulfato de calcio a partir de salmueras, las cuales están especificadas en la Figura 2.3

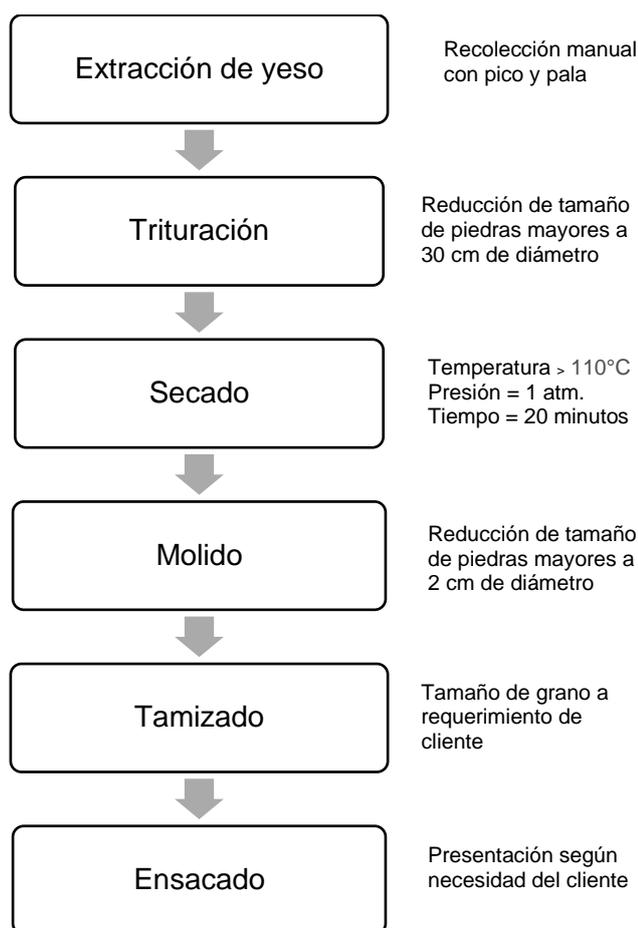


Figura 2.3 Línea de proceso de sulfato de calcio

Elaborado por Vicente Reyes Villamar

2.4.2 Equipos y maquinaria

En la Tabla 7 se detallan los equipos requeridos para el procesamiento de sulfato de calcio, junto a su función.

Tabla 7 Equipos para procesamiento de sulfato de calcio

Equipo	Funciones
Triturador	Permite la disminución del tamaño del grano para que su molienda sea eficiente (Parcerisa, 1997).
Secador tubular rotatorio	Su funcionalidad se da mediante el paso de gases calientes originados por quemadores que se mezclan con el producto con la finalidad de eliminar todo residuo de agua que se encuentre (Richard Cedillo, 2014).
Molino	El proceso se lo realiza mediante rodillos que se calibran acorde al tamaño de grano requerido por el cliente y así poder continuar con la siguiente etapa del proceso (Parcerisa, 1997).

Tamiz	El proceso de tamizado se lleva a cabo utilizando zarandas compuestas por tamices dispuestos en series y con diferentes tamaños de mallas. De esta manera, se logra realizar el tamizado necesario de manera eficiente y precisa (Richard Cedillo, 2014).
Envasadora	Una vez tamizado el producto es llevado a silos para su respectivo almacenamiento y pasa a ser ensacado acorde a la presentación requerida por el cliente (Richard Cedillo, 2014).

Elaborado por Vicente Reyes Villamar

2.4.3 Proyección de las Instalaciones

La proyección de las instalaciones es un proceso fundamental en la planificación de una planta desde el inicio de sus operaciones (Wiendahl et al., 2015). Este enfoque sistemático y orientado a tareas se lleva a cabo en distintas fases utilizando métodos y herramientas específicas (Wiendahl et al., 2015), como lo son:

La estrategia: Establece el concepto de producción a largo plazo basado en la visión y misión de la compañía, en donde se analiza la capacidad productiva actual y se considera la posibilidad de aumentarla dentro de las instalaciones existentes o buscar nuevas ubicaciones, evaluando la viabilidad, costos y tiempos de ejecución (Wiendahl et al., 2015).

El proceso de planificación de instalaciones: Toma en cuenta aspectos importantes como la producción, logística y las instalaciones existentes que son parte esencial de este proceso. Además de la planeación del personal que trabajará en estas instalaciones, definiendo la cantidad y nivel jerárquico requeridos, así como el proceso de producción para calcular la cantidad de personal necesaria (Wiendahl et al., 2015).

El flujo de material: es un factor crítico para lograr una producción con bajos niveles de inventario, tiempos de ciclo mínimos y respuestas rápidas. En esta fase, se define cómo se moverá el material dentro de las instalaciones y cómo será surtido desde el exterior (Wiendahl et al., 2015).

Distribución e Infraestructura: La asignación adecuada de espacio para maquinaria, personal y materiales es esencial y representa una referencia dimensional importante en la planificación. Además, se deben considerar aspectos como el equipo auxiliar e infraestructura (Wiendahl et al., 2015).

2.5 Estudios de viabilidad técnica y económica

2.5.1 Evaluación del diseño propuesto

La evaluación de diseño de una línea se refiere a la calidad del diseño de un producto que implica la forma como están ubicados los equipos, maquinarias y las personas, puesto que deben cumplir con su respectivo espacios y el orden requeridos para el flujo del proceso, esto con la finalidad de poder determinar las necesidades y las mejoras que se requiere la empresa (ARCSA, 2015).

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA

3.1. Obtención de Sulfato de Calcio

El proceso de obtención se realizó de acuerdo con la descripción de (Parcerisa, 1997) con algunas modificaciones. Inicialmente se recolectó manualmente el yeso de las piscinas evaporativas. Una vez recolectado, se apiló y transportó a la trituradora para reducir el tamaño de las rocas a un diámetro adecuado para el proceso. A continuación, el material se dirigió a los secadores, donde se eliminó la humedad presente en el yeso. Finalmente, se llevó a cabo la molienda, tamizado y envasado del sulfato de calcio.

3.2 Diagramas del proceso

Las representaciones gráficas utilizadas en este proyecto permitieron visualizar las variaciones y relaciones entre una serie de actividades que convergen hacia un objetivo común (Nelly M. Baena, 2014). En el desarrollo de este proyecto, se elaboraron los siguientes diagramas:

- *Diagrama de Proceso*

Este diagrama permitió tener una representación gráfica del funcionamiento de un sistema, utilizando figuras geométricas (cuadrado, círculo, flecha, rombo) que indicaron el inicio y fin de un proceso (Nelly M. Baena, 2014).

- *Diagrama de Gantt*

Permitió identificar la actividad en la que se utilizaría cada recurso y con ella se determinó la duración de su uso, evitando así períodos ociosos innecesarios. Esto brindó al administrador una visión completa de la utilización de los recursos que estaban bajo su supervisión (Hinojosa, 2003).

- *Diagrama de flujo*

El diagrama de flujo representó de manera abstracta el curso del proceso (Nelly M. Baena, 2014). En este diagrama, se exhibió el flujo continuo del proceso, junto con sus parámetros de control (temperatura, tiempo, granulometría, etc.) en cada etapa correspondiente.

3.3 Análisis Físicoquímico del sulfato de calcio

3.3.1 Determinación de pureza

Se obtuvo el porcentaje de pureza del material obtenido del proceso de refinación de sal mediante la determinación de contenido de sulfato y de calcio.

Materiales y reactivos

Los materiales y equipos utilizados para la realización de los ensayos fueron los siguientes: una balanza analítica de precisión (± 0.01), centrífuga, plancha de calentamiento, desecador, mufla, material de vidrio, y crisoles. En cuanto a los reactivos que se utilizaron fueron los siguientes: ácido clorhídrico (37%), ácido sulfúrico al 4%,

ácido nítrico (G.R), cloruro de bario (G.R), nitrato de plata (G.R), hidróxido de amonio (G.R), oxalato de amonio al 4.2%, rojo de metilo, permanganato de potasio a 0.05N y agua destilada.

Determinación de Sulfato

Para la determinación de sulfato puro, inicialmente se pesaron 2 g de muestra y se disolvió en agua destilada hasta llegar al volumen de 500 ml. Luego se transfirieron 50 ml de esta solución junto con 5 ml de la solución de ácido clorhídrico (37%) y como indicador se agrega 0,5 ml de nitrato de plata (G.R) más 50 ml de agua destilada. Posteriormente se procedió a ebulir la solución y se añadió 6 ml de solución de cloruro de bario (G.R). Después se mantuvo en un proceso de digestión por una hora en baño de maría, se dejó enfriar y se realiza lavados con agua a una temperatura de 70°C y se filtra en el crisol de Gooch. Se recoge el papel filtro con la muestra filtrada y se procede a colocarlo en un crisol para luego ser llevada al desecador con la finalidad de absorber la humedad del papel. Luego es llevado el crisol a la mufla que se encuentra a una temperatura de 800°C durante unos 20 minutos hasta obtener un residuo libre de carbón. Sacar el crisol y enfriar en el desecador, realizar este proceso de calcinación hasta obtener una masa constante. El método utilizado para este ensayo fue de acuerdo a lo descrito en la normativa Ecuatoriana (NTE INEN 237, 2013).

Determinación de Calcio

Para la determinación de calcio se pesó 1 g de muestra previamente homogenizada. Luego, se incorporaron 15 ml de ácido nítrico (G.R) y 5 ml de ácido clorhídrico al 37% a la muestra. La mezcla fue calentada por 30 min y posteriormente se dejó enfriar. Acto seguido, se llevó a cabo el proceso de filtración y la solución resultante fue transferida a un matraz de 50 ml. Una alícuota de 20 ml se tomó de esta solución y se le añadieron 5 gotas de rojo de metilo al 0.5%, disuelto en una solución de etanol junto con hidróxido de amonio (G.R.), lo que resultó en un cambio de coloración a amarillo. Después se adicionaron 100 ml de agua destilada y la solución fue colocada sobre una plancha de calentamiento. Lentamente, se agregó oxalato de amonio al 4.2% hasta que la solución alcanzó el punto de ebullición. Al día siguiente, se procedió con la filtración y se realizaron lavados utilizando 50 ml de hidróxido de amonio en una proporción de 1:5, seguidos por un lavado con agua destilada para recuperar la solución. En la siguiente etapa, se añadieron 100 ml de ácido sulfúrico al 4% y se sometió la solución a calentamiento hasta que alcanzara el punto de ebullición. Finalmente, la solución resultante se trasvasó a un matraz Erlenmeyer para llevar a cabo una titulación utilizando permanganato de potasio a 0.05 N. El método empleado en este proceso se basó en las directrices establecidas por la AOAC, la Asociación Oficial de Químicos Analíticos (AOAC INTERNATIONAL 945.03, 1945).

3.3.2. Determinación de pH

Se realizó un análisis para determinar la concentración de iones $(H_3O)^+$ en la mezcla de agua/muestra (Xavier Girones Guell, 2013), siguiendo la metodología descrita en la normativa nacional INEN (NTE INEN 10390, 2014). Para la realización de este ensayo se requirieron de los siguientes materiales y equipos: un potenciómetro con electrodo de vidrio (Orion Star™ A214 PH/ISE Benchtop Meter, 2023), una plancha magnética, un agitador magnético, agua destilada, y un vaso de precipitación de 250 ml.

Para la realización de este ensayo se pesaron 10 gramos de la muestra en el vaso de precipitación, al que se añadieron posteriormente 50 ml de agua destilada. Luego, el vaso se ubicó sobre la plancha magnética junto con su agitador correspondiente, y se procedió a agitar durante aproximadamente 3 minutos hasta lograr una mezcla homogénea. En este punto, se introdujo el electrodo en la mezcla y se registró la lectura

de la medición de pH. Una vez obtenida la medición, se retiró el electrodo y se enjuagó cuidadosamente con agua destilada.

3.3.3. Determinación de Humedad

Se determinó el contenido de agua presente en la muestra, considerando que todos los materiales tienden a absorber una determinada cantidad de agua libre, este hecho constituye al principio fundamental del ensayo, tal como propuesto por (Xavier Girones Guell, 2013). La realización de este ensayo demandó la disposición de los siguientes materiales y equipos. Los instrumentos utilizados abarcaron: una estufa termostática con una precisión de +/- 2°C, un desecador, y una balanza analítica con una sensibilidad de 0.1 mg. En cuanto a los materiales, se emplearon cápsulas de vidrio o recipientes finos con tapa, con un diámetro aproximado de 50 mm, así como pinzas y una espátula.

Para la realización de este ensayo se pesó la capsula vacía en gramos (m). Luego se añadieron 10 g de la muestra húmeda (m_1) a la cápsula, que luego se introdujo en una estufa precalentada a 110°C. Tras un período de secado de 1 hora, la cápsula fue retirada de la estufa, enfriada en un desecador con gel de sílice y finalmente pesada nuevamente (m_2), siguiendo el procedimiento definido por la norma (NTE INEN 49, 2015). Los cálculos requeridos se realizaron utilizando la siguiente fórmula:

$$H = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m} \times 100$$

Donde:

(m) Peso de la capsula vacío

(m_1) Peso de la muestra húmeda+Peso de la cápsula vacía

(m_2) Peso de la muestra seca+Peso de la capsula vacía

(H) Humedad del sulfato de calcio

3.3.4 Determinación de granulometría

El propósito de este ensayo consiste en llevar a cabo la clasificación de un material sólido según el tamaño de sus partículas, tal como planteado por (Xavier Girones Guell, 2013). Para la realización de este procedimiento, se requirieron los siguientes materiales: un juego de tamices con su correspondiente plato de recogida, una balanza de alta precisión con una sensibilidad mínima de 0.01 gramos y una estufa termostática.

El desarrollo de este ensayo involucró la realización del tamizado en condiciones de base seca y de manera manual. En este proceso, los tamices se dispusieron de forma ordenada, comenzando desde los de mayor apertura de las mallas y finalizando con el plato colector. Luego, se pesaron 100 g de la muestra en estado seco y se vertieron sobre los tamices. Sujetando el conjunto de tamices con ambas manos, se procedió a realizar movimientos oscilantes y se aplicaron pequeños golpes para fomentar la separación de los granos de acuerdo con las aberturas de las mallas. Posteriormente, se efectuó el pesaje de los materiales retenidos en cada malla y se registraron los resultados (NTE INEN 1688, 1989).

3.4. Análisis de distribución

Se realizó un proceso de recolección de información respecto a la distribución actual de la planta procesadora de sal, en el cual se analizó la distribución de los equipos, personas y flujo de material que permiten la obtención del producto con la mínima manipulación posible. El análisis se lo realizó de acuerdo con parte de la metodología *Systematic Layout Planning* (SLP) establecida por Muther en 1961 (A. Casp Vanaclocha, 2005), utilizando parte de sus principios básicos como lo es el análisis de recorrido.

3.5. Diseño de la línea de proceso

Para el diseño de la línea de proceso se consideraron ciertas condiciones específicas para el área de procesamiento, la distribución de equipos y espacios, la continuidad y dirección del flujo de proceso establecidos por el ARCSA (ARCSA, 2015), además de los principios del diseño de plantas establecidos por (A. Casp Vanaclocha, 2005).

3.6. Rendimiento del proceso

El rendimiento de la línea de proceso se obtuvo a través del cálculo de la producción real dividida por producción esperada multiplicada por 100 (Hugo Leonel Alonzo, 2009). La obtención del rendimiento permitió analizar la eficacia y eficiencia de este proyecto en el planteamiento de una línea productiva.

3.7. Análisis de costos

Se realizó una estimación de costos a partir del proceso productivo de la obtención de sulfato de calcio en la cual incluye los costos de materia prima, mano de obra, materiales, empaques, gastos fijos y variables (Roberto Dammert Tode, 2000). Esto con el fin de la obtención de del precio estimado de venta al público y su grado de rentabilidad.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Procesamiento de Sulfato de Calcio

El Sulfato de calcio en forma de yeso es recolectado y transportado hacia las instalaciones de la planta procesadora de sulfato de calcio, en donde es recibido como prima y apilado en el patio, Con la ayuda de una pala mecánica se deposita en una tolva de abastecimiento que, a través de una banda transportadora, la conduce hacia la trituradora o molienda primaria. El objetivo de esta etapa es reducir el tamaño de las rocas con diámetros superiores a 30 cm.

Al finalizar el proceso de trituración pasa a los molinos de rodillo en se obtiene un material más reducido no mayor a 2 cm de diámetro. A través de un transportador de tornillo, este material es introducido en los secadores de tipo rotatorio tubular. Aquí se procede a secar el material a una temperatura de 190°C en un tiempo de 40 min logrando obtener sulfato de calcio anhidro con una pureza del 74.15% y una humedad inferior al 2.5%. Dado que el material estuvo expuesto a altas temperaturas, se reduce la temperatura mediante un enfriador cilíndrico rotatorio. Este enfriador utiliza la circulación de aire para disminuir la temperatura del producto hasta aproximadamente 130°C.

Una vez que la temperatura ha disminuido, el siguiente proceso es el tamizado con malla 100 para obtener el producto deseado. Posteriormente, el producto se transporta hacia las tolvas de almacenamiento, donde continúa el proceso de reducción de la temperatura. El envasado se realiza con una temperatura de 70°C, utilizando sacos laminados para prevenir la absorción de humedad del ambiente y en una presentación de 50 kilos.

4.2 Diagramas

4.2.1 Diagrama de proceso

En la figura 4.1 se observa el diagrama de proceso, en el cual se ha definido 15 pasos que va desde la recepción de materia prima hasta la finalización en el despacho. El diagrama nos indica que existe 6 etapas de operaciones, 3 etapas de inspección, 3 etapas de desplazamiento, 3 etapas de almacenamiento y ninguna etapa de demora (Richard Cedillo, 2014).

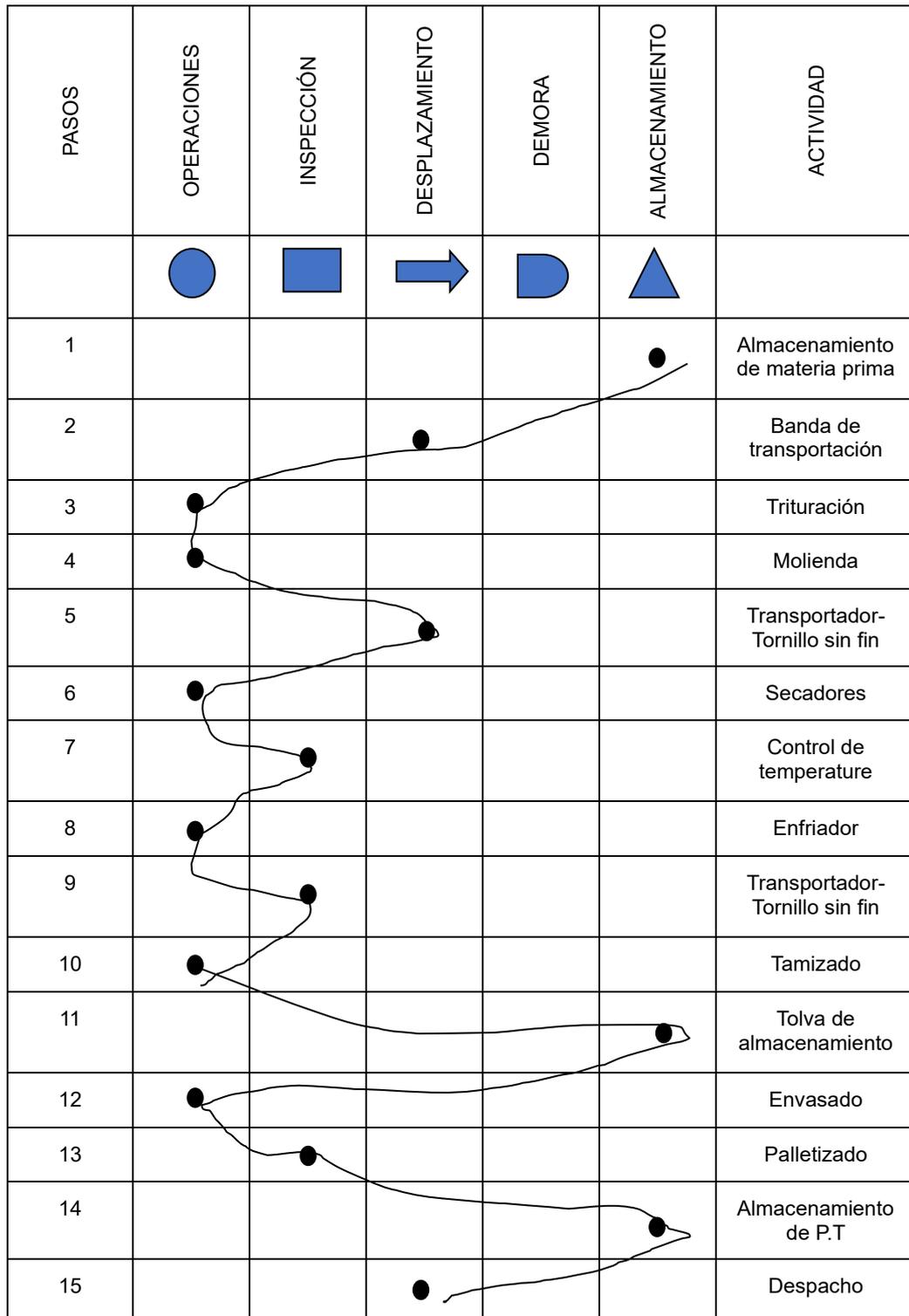


Figura 4.1 Diagrama de proceso de obtención de sulfato de calcio

Fuente: Vicente Reyes Villamar

4.2.2 Diagrama de flujo

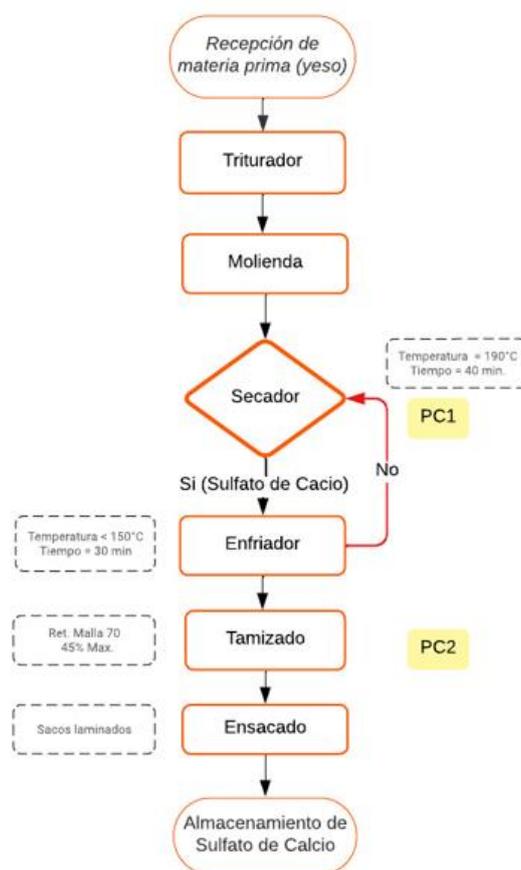


Figura 4.2 Diagrama de flujo de proceso de sulfato de calcio

Fuente: Vicente Reyes Villamar

En la figura 4.2 se muestra el diagrama de flujo para la obtención del sulfato de calcio, así, como los puntos controles que se deben realizar en la etapa de secado como de tamizado. Estos dos puntos de control se encuentran denominados en el gráfico como PC (Chapman, 2006).

- **Punto control en secado:** El secado es un paso crucial en la obtención del sulfato de calcio para garantizar el producto final sea químicamente estable, consistente, de alta calidad y adecuado para su uso en diversas aplicaciones industriales. El control adecuado del secado es esencial para garantizar su forma deseada y cumpla con las especificaciones requeridas (Xavier Girones Guell, 2013)
- **Punto control en tamizado:** La granulometría es un factor crítico en el proceso de la producción de anhidrita porque afecta directamente la calidad del producto final, su aplicabilidad en diversas industrias y su eficiencia en términos de procesamiento y costos. Controlar y ajustar cuidadosamente la granulometría es esencial para cumplir con las especificaciones y los estándares requeridos en diferentes aplicaciones y asegurar un producto final de alta calidad (Xavier Girones Guell, 2013).

4.2.3 Diagrama de Gantt

En el apéndice C se encuentra el diagrama de Gantt, con el cual se pudo obtener el tiempo de procesamiento que toma cada etapa del proceso. En el diagrama todas las actividades del proceso productivo cubren una jornada de trabajo de aproximadamente 8 horas contabilizada con el almuerzo y otras actividades. En la tabla 8 se encuentra un resumen del resultado obtenido con el Diagrama de Gantt, en la cual se muestra el tiempo en minutos de cada una de las etapas involucradas en el proceso, considerando como resultado un tiempo total de 190 min por cada batch, traducido en 3 horas y 10 min.

Tabla 8 Equipos para procesamiento de sulfato de calcio

Actividades	Tiempo de operación (min)
Recepción de Materia Prima	10
Triturador	10
Molienda	20
Secado	40
Enfriamiento	30
Tamizado	30
Ensacado	20
Paletizado	30
Total	190

Fuente: Vicente Reyes Villamar

4.3 Análisis Físicoquímico del sulfato de calcio

Tabla 9 Resultados de las propiedades físicoquímicas del sulfato de Calcio

Ensayo	Resultados
Pureza	74,15
Ph	6,5
Humedad	0,47
Granulometría Retenido Malla 70	41,85

Fuente: Vicente Reyes Villamar

En la tabla 9 se encuentran los resultados obtenidos de los análisis físicoquímicos. Estos ensayos fueron realizados en el laboratorio de control de calidad de la empresa salinera.

4.3.1 Determinación de pureza de sulfato de calcio

Tabla 10 Resultados de análisis de pureza del sulfato de calcio

Parámetro	Método de Referencia	Resultado	Unidad
Sulfatos	NTE INEN 237 (Gravimetría)	48,51	%
Calcio	AOAC 945.03 (Volumetría)	21,83	%
Sulfato de Calcio	Estequiometría	74,15	%

Fuente: Vicente Reyes Villamar

En la tabla 10, se observa que el sulfato de calcio tiene un porcentaje de pureza de 74.15% obtenido por estequiometría entre el sulfato y el calcio (ver apéndice B). Este resultado se encuentra por debajo del límite de especificación (mínimo 92%) ofrecido por la empresa de competencia ubicada en Villamil-Playas (El Morro S.A, 2021).

No obstante, la evaluación detallada que se presenta en la Figura 2.2, la cual relaciona la reducción de volumen con la densidad de las salmueras, pone en evidencia que la formación del sulfato de calcio ocurre en un rango que abarca desde los 12°Be hasta los 26°Be. A partir de este análisis, se infiere que la eficacia en la formación del sulfato de calcio se ha visto comprometida por la precipitación de otros componentes, tal como se señala en la Tabla 4, los compuestos químicos formados durante la concentración del agua de mar.

4.3.2 Determinación de pH

El pH es un indicador de acidez o alcalinidad, y en realización al análisis realizado se pudo obtener un resultado de 6.5, el cual es un indicador de un pH neutral y óptimo para los usos correspondientes (Moreno Ramón, Héctor & Gisbert Blanquer, Juan Manuel, 2011).

4.3.3 Determinación de Humedad

Mediante la implementación de la metodología establecida por (NTE INEN 49, 2015) se obtuvo un resultado de 0.46%. A partir de este valor, se puede inferir que el proceso de secado ejecutado en los secadores ha demostrado ser óptimo en términos de la extracción del contenido de agua presente en el componente. Los parámetros específicos determinados para la etapa de secado, a saber, 190°C durante un periodo de 40 minutos, son las condiciones bajo las cuales se ha alcanzado este nivel de humedad particular (El Morro S.A, 2021).

4.3.4 Determinación de granulometría

Conforme a lo establecido en la norma (NTE INEN 1688, 1989), el porcentaje de retención en la malla 70 no debe exceder el 45%. En la Tabla 11 se presenta el resultado del tamizado, revelando un valor del 41.6%, con el cual es posible inferir que el proceso llevado a cabo en los molinos, con una apertura entre rodillos definida, ha alcanzado un nivel óptimo de eficacia. El paso satisfactorio a través del tamiz No. 70 permite cumplir

con los requisitos de ciertos clientes específicos que desean una granulometría más fina para aplicaciones particulares (El Morro S.A, 2021).

Tabla 11 Tabla de granulometría del sulfato de calcio

Numero de malla	Peso retenido (gr.)	% Retenido	% Pasante
70	20.80	41.60	58.15
PAN	29.20	58.40	0.00
SUMA	50.00	100.00	

Fuente: Vicente Reyes Villamar

4.4 Diseño y costo de planta

4.4.1 Localización y terrenos

La selección de la localización para la planta procesadora de sulfato se fundamentó en tres parámetros esenciales, conforme a las directrices de (A. Casp Vanaclocha, 2005):

- **Parámetro económico**, que sirve para identificar áreas geográficas con potencial económico.
- **Parámetros técnico-económico**, que ayudan a definir ubicaciones específicas dentro de esas áreas y los terrenos adecuados en esas localidades.
- **Parámetros legales**, que permiten una elección definitiva de terreno al tener en cuenta todas las restricciones legales.

En la evaluación de la localización se consideraron criterios variados, en donde se destaca en la caracterización social y la distribución poblacional, la disponibilidad de servicios básicos, el nivel de educación, las condiciones económicas, aspectos culturales, seguridad alimentaria, infraestructura vial y transporte, tal como lo expone (Sambito, 2019).

La superficie de construcción se estima en alrededor de 200 m². Este espacio se consideraría como una ampliación a las nuevas instalaciones de la refinera de la planta procesadora de sal. Esta elección se justifica por la obtención de la materia prima necesaria para el procesamiento del sulfato de calcio, que se obtiene de las piscinas de cosecha de sal.

4.4.2 Capacidad de producción

La producción de sulfato de calcio se obtuvo por eliminación del agua que se encuentra en las moléculas del yeso. Esta característica determina que la selección de equipos no sea excesivamente compleja según lo señalado por (Richard Cedillo, 2014), como se refleja en el diagrama de proceso de la Figura 4.1.

La planta de producción se establece con una línea de secado, cuyo flujo de entrada de materia prima se sitúa en 5 Tn/h. Este período se considera necesario para la reducción del contenido de agua en el yeso, resultando en la obtención de sulfato de calcio con una pureza del 74.15%. Dentro del proceso de secado, se elimina alrededor del 10% del peso del agua que se encuentra entre las moléculas del yeso (Richard Cedillo, 2014). Esta acción conduce a una producción de 4.5 Tn/h al término del secado.

Tabla 12 Resultados de la capacidad de producción

Equipo	Presentación (kg)	Capacidad (Tn/h)	Capacidad (Tn/*Turno)	Capacidad (Tn/mes)	Capacidad (Tn/anual)
Secador		5	40	800	9600
Envasadora	50	4.5	36	720	8640

Fuente: Vicente Reyes Villamar

4.4.3 Capacidad por equipo

La capacidad de los equipos está dada según su funcionamiento ya sea por operacional o vida útil del equipo además las horas laborales que se encuentra destinado el equipo (Richard Cedillo, 2014). En la tabla 13 se encuentran los equipos que se utilizarían en la línea de proceso junto con sus funciones, la marca, capacidad y porcentaje de rendimiento.

Tabla 13 Capacidades y utilización por equipo

Equipo	Funciones	Marca	Capacidad	R. (%)
Triturador	Permite la disminución del tamaño del grano para que su molienda sea eficiente (Parcerisa, 1997).	Hazemag	5 Tn/h	100
Molino	El proceso se lo realiza mediante rodillos que se calibran acorde al tamaño de grano requerido por el cliente y así poder continuar con la siguiente etapa del proceso (Parcerisa, 1997).	Ludman	5 Tn/h	100
Secador tubular rotatorio	Su funcionalidad se da mediante el paso de gases calientes originados por quemadores que se mezclan con el producto con la finalidad de eliminar todo residuo de agua que se encuentre (Richard Cedillo, 2014).	Anivi	5 Tn/h	100
Tamiz	El proceso de tamizado se lleva a cabo utilizando zarandas compuestas por tamices dispuestos en series y con diferentes tamaños de mallas. De esta manera, se logra realizar el tamizado necesario de manera eficiente y precisa (Richard Cedillo, 2014).	McLanahan	4.5 Tn/h	90

Envasadora	Una vez tamizado el producto es llevado a silos para su respectivo almacenamiento y pasa a ser ensacado acorde a la presentación requerida por el cliente (Richard Cedillo, 2014).	Chronos	4.5 Tn	90
------------	--	---------	--------	----

Fuente: Vicente Reyes Villamar

4.4.4 Layout de la línea procesadora

La línea de producción estaría conformada por 4 secciones o áreas, tal como se muestra en la tabla 14: la primera es la sección de triturado y molienda, la segunda por el secado y enfriado, la tercera por tamizado, almacenado y ensacado y la última se encuentra el paletizado y almacenado en la bodega de despacho. La dimensión de la línea de procesamiento del sulfato de calcio es de 190 m².

Tabla 14 Dimensiones por sección del proceso

Secciones	Equipos y medio de transporte	Área en m ²
Sección 1	Trituradora, molinos, banda transportadora	40
Sección 2	Secador, enfriador, tornillo sin fin	60
Sección 3	Tamizado, tolva de almacenamiento, elevadores, tornillo sin fin, ensacado	40
Sección 4	Paletizado y bodega de Producto terminado	50

Fuente: Vicente Reyes Villamar

En las figuras 4.3 y 4.4 se muestra el Layout y la implantación del proceso de producción del sulfato de calcio. En ambas figuras se detallan las áreas o secciones del proceso productivo en donde su flujo continuo toma la figura de U.

En la figura 4.4 Implantación se muestra el recorrido del proceso en donde tiene un inicio desde el almacenamiento de la materia prima hasta el final que es las bodegas de producto terminado.

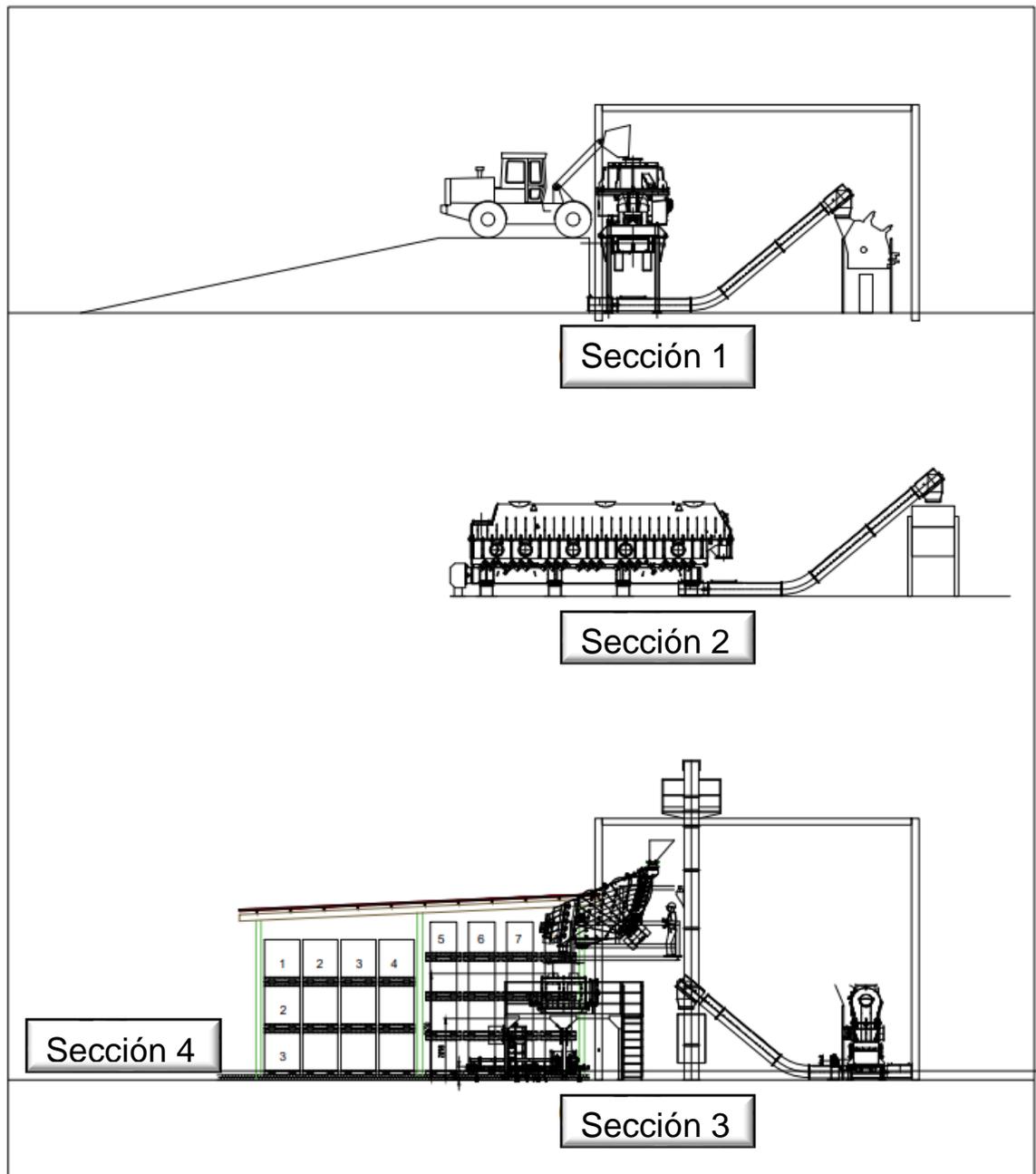


Figura 4.3 Layout del proceso de sulfato de calcio

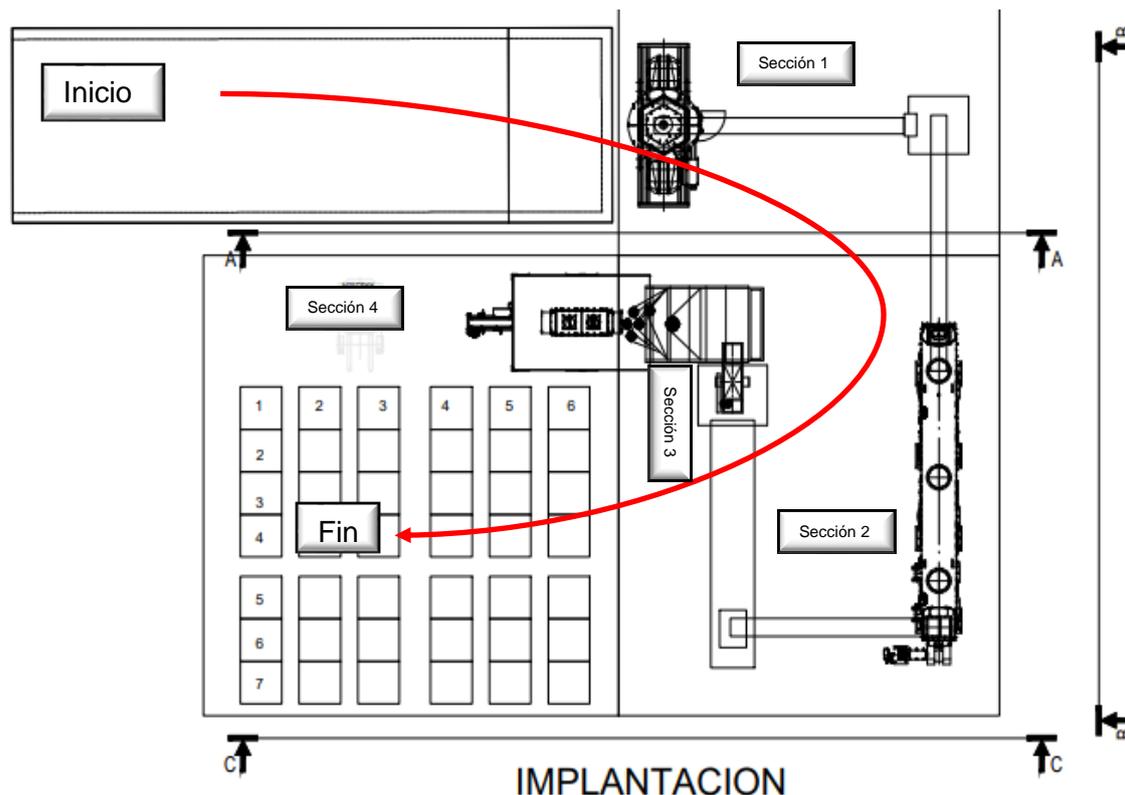


Figura 4.4 Implantación del sulfato de calcio

4.4.5 Costo de inversión

Se consideró como el costo de inversión, aquel dinero que se invierte para la adquisición de los activos necesarios para la construcción o funcionamiento de un proyecto (Saúl Fernández Espinoza, 2007). Los costos de inversión considerados para la actual propuesta variaron desde la materia prima, maquinaria, mano de obra, costos fijos y variables.

Costo de materia prima

La materia prima, que se adquiere en las instalaciones actuales de la planta salinera y surge como un subproducto en forma de yeso, tiene un costo de fabricación mínimo. Sin embargo, fue esencial tomar en cuenta ciertos valores adicionales que se acumulan debido al proceso de extracción, tales como se muestra a continuación en la tabla 15:

Tabla 15 Tabla de costo de producción de Materia Prima (Yeso)

DESCRIPCIÓN	U	CANTIDAD	US\$	US\$/TM
Mano de obra directa	H/H	0.37	\$ 2.80	\$ 1.04
Energía eléctrica	KWH	25.00	\$ 0.08	\$ 2.01
Combustible (DIESEL)	GL	0.55	\$ 3.78	\$ 2.08
Otros Gastos Fijos	H/H	0.07	\$ 70.00	\$ 4.90
Otros Gastos Variable	STD	0.07	\$ 2.44	\$ 0.17
Depreciación	H/M	0.07	\$ 15.00	\$ 1.05
Costo de producción				\$ 11.24

Fuente: Vicente Reyes Villamar

Gastos indirectos

En el proceso de producción de sulfato los gastos indirectos estuvieron dados por el consumo de energía para el funcionamiento de todos los equipos, así como también ese consideró el consumo de combustible (Diesel) que es utilizado para el funcionamiento del secador. En la tabla 16 se muestra el gasto por tonelada de estos suministros.

Tabla 16 Tabla de gastos indirectos

Suministros	U	Cantidad	US \$	US \$/tm
Energía eléctrica	KWH	25.00	\$ 0.08	\$ 2.01
Combustible (Diesel)	GL	0.55	\$ 1.90	\$ 1.05
Total de gastos				\$ 3.06

Fuente: Vicente Reyes Villamar

Inversión inicial

En este apartado se hace referencia al costo de las adquisiciones iniciales como lo son los terrenos edificios, maquinarias, equipos activos intangibles, etc. (Saúl Fernández Espinoza, 2007).

Tabla 17 Tabla de inversión inicial o activos fijos

Equipos	Cantidad	Costo Unitario	Total
Trituradora (Hazemag)	1	\$ 20,000.00	\$ 20,000.00
Secador	1	\$ 90,000.00	\$ 90,000.00
Enfriador	1	\$ 90,000.00	\$ 90,000.00
Molienda (Iudman)	1	\$ 60,000.00	\$ 60,000.00
Tamiz	1	\$ 30,000.00	\$ 30,000.00
Envasadora	1	\$ 5,000.00	\$ 5,000.00
Transportadores (banda, tornillo)	1	\$ 60,000.00	\$ 60,000.00
Total de activos fijos			\$ 355,000.00

Fuente: Vicente Reyes Villamar

En la tabla 17 se observa los costos de los equipos para el proceso de sulfato de calcio, estos están dado para una capacidad de productividad de 5 Tn/h. Este total de activo se depreciará en 10 años correspondiente a la vida útil de los equipos.

4.4.6 Análisis financiero

Realizando el análisis financiero (ver el apéndice I) podemos observar que el TIR es de un 26% superando ampliamente al 10% de la tasa de descuento. Este valor que es fundamental para una toma de decisión nos indica que la inversión que se va a tomar tiene un alto potencial en rentabilidad y es atractivo desde una perspectiva de la empresa.

Al obtener un VAN de \$374,294 y un período de recuperación de 3.7 años nos indica que el valor neto obtenido nos genera un gran beneficio económico con respecto a la inversión inicial en un corto periodo de tiempo.

Cabe de indicar que al ser un diseño de atractivo para la empresa el costo de venta es relativamente bajo con cualquier otro proveedor (QuimiNet, 2023). Este hecho tendría ciertas repercusiones tales como ventas adicionales, competitividad, lealtad del cliente.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

1. La pureza extraída del sulfato de calcio se considera satisfactoria (74.15%), lo que sugiere que el porcentaje restante (25.85%) está compuesto por impurezas adicionales u otros elementos que surgen durante la fase de evaporación en la concentración de la sal. El nivel de pureza alcanzado demuestra una alta adecuación para ciertas industrias específicas, como la construcción, mientras que, para industrias químicas más sensibles, su aceptabilidad dependerá de los estándares y requisitos de pureza aplicados en el proceso correspondiente.
2. El proceso operativo propuesto se desarrollaría de manera eficiente y sencilla en términos de recursos y energía, debido a que se trata de una refinación que excluye subprocesos o pasos adicionales. Además, es crucial implementar sistemas de control y gestión de calidad y ambiental por la generación de gases en la etapa del secado. La adopción de tecnologías avanzadas y prácticas sostenibles que asegurarían la competitividad futura en el mercado y mitigaría el impacto ambiental en etapas específicas del proceso.
3. Aunque la inversión inicial en la implementación de la línea de proceso para la producción de sulfato de calcio es significativa, el análisis financiero respalda su justificación a largo plazo debido a la constante importación por la demanda en industrias específicas.

5.2 Recomendaciones

1. Se debe mejorar la calidad de la materia prima, el yeso en este contexto, a través de un enfoque riguroso en su formación. Establecer nuevos parámetros de control, como la densidad y los tiempos, contribuirá significativamente. De esta manera, lograremos obtener una materia prima de calidad superior, lo que inevitablemente se traducirá en un producto final más puro.
2. Realizar ajustes o innovación en todas las etapas del proceso productivo tales como la extracción que minimicen la presencia de impurezas, molienda y trituración más eficiente al momento de romper los granos de gran tamaño con el fin de llevarlos a una medida uniforme.
3. Mejorar el proceso de secado estableciendo un mejor control con todos los sensores o equipos de medición de temperatura, así como el enfriado con ventiladores de flujo de aire.
4. El diseño propuesto aborda riesgos financieros y posibles impactos ambientales, por lo tanto, es esencial realizar un estudio profundo de mercado, jurídico y financiero para prevenir sanciones legales o pérdidas económicas, y asegurar la sostenibilidad a largo plazo del proyecto.
5. Sumar otros factores que influyen en el mejoramiento del proceso tales como innovación, entrenamiento al personal, cumplimientos de normativas, gestión de impurezas, investigación y desarrollo continuo.
6. Realizar un CORELAP (Computerized Relationship Layout Planning) enfocado al proceso de sulfato de calcio con el fin de brindar una mejor distribución a los departamentos productivos, así como todas las etapas del proceso.

APÉNDICES

APENDICE A

CÁLCULO DE HUMEDAD DEL SULFATO DE CALCIO

(m) Peso de la capsula vacío= 16,6104 g

(m1) Peso de la muestra húmeda + Peso de la cápsula vacía= 27,1024 g

(m2) Peso de la muestra seca + Peso de la capsula vacía=27,0531

(H) Humedad del sulfato de calcio

$$\frac{m_1 - m_2}{m_1 - m} \times 100$$

$$H = \frac{27,1024 - 27,0531}{27,1024 - 16,6104} \times 100$$

$$H = 0,46\%$$

APENDICE B

CÁLCULOS ESTEQUIOMÉTRICOS PARA OBTENER EL SULFATO DE CALCIO

Peso molecular - Azufre (S) = 32,065 g/mol

Peso molecular - Calcio (Ca) = 40,078 g/mol

Peso molecular - Oxigeno (O) = 15,9994 g/mol

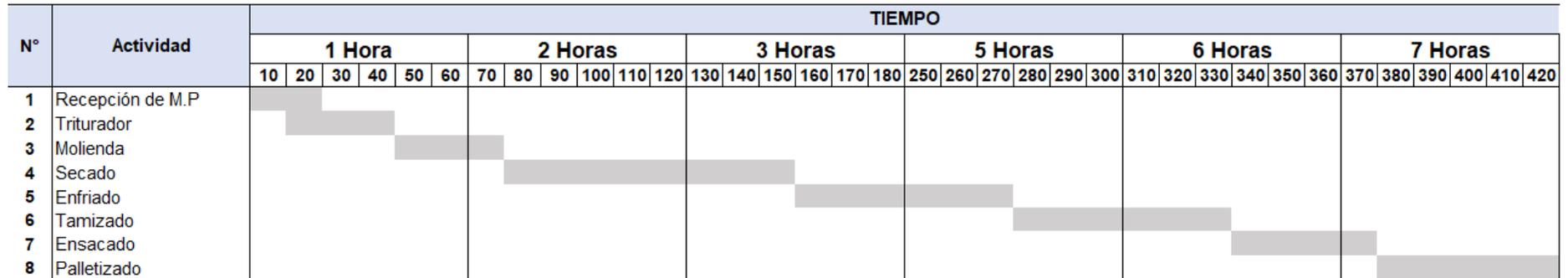
$$\% SO_4Ca = \frac{P.M.(SO_4Ca)}{P.M.(Ca)} \times 100$$

$$= \frac{32,065 + (15,9994 \times 4) + 40,078}{40,078} \times 100$$

$$\% SO_4Ca = 74,15$$

APENDICE C

DIAGRAMA DE GANTT PARA EL PROCESO DE SULFATO DE CALCIO



Fuente: Vicente Reyes Villamar

APENDICE D

COSTO TOTAL DE MANO DE OBRA

Costo Total Mano de Obra Directa

Cargo	Cantidad	Sueldo	Total anual
Operadores	5	\$ 2,250.00	\$ 27,000.00

Costo Total Mano de Obra Indirecta

Cargo	Cantidad	Sueldo Mensual	Total anual
Gerente General	1	\$ 2,500.00	\$ 30,000.00
Jefe de Producción	1	\$ 1,500.00	\$ 18,000.00
Analista de turno	1	\$ 800.00	\$ 9,600.00
Supervisor de Bodega y Despacho	1	\$ 500.00	\$ 6,000.00
		\$ 5,300.00	\$ 63,600.00

MOD+MOI	9		\$ 90,600.00
---------	---	--	--------------

Fuente: Vicente Reyes Villamar

APENDICE E

DEPRECIACIÓN DE EQUIPOS

Activo	Valor de Compra	Vida Contable	Depreciación Anual	Años depreciándose	Depreciación Acumulada	Valor en Libros
Equipos	\$ 355,000.00	10	\$ 35,500.00	5	\$ 177,500.00	\$ 177,500.00
Depreciación anual total			\$ 35,500.00	Valor de Desecho		\$ 177,500.00

Inversión de la empresa en Equipos - Estado Actual

Equipos	Cantidad	Costo Unitario	Capacidad	Total
Trituradora (Hazemag)	1	\$ 20,000.00		\$ 20,000.00
Secador	1	\$ 90,000.00		\$ 90,000.00
Enfriador	1	\$ 90,000.00		\$ 90,000.00
Molienda (lugman)	1	\$ 60,000.00		\$ 60,000.00
Tamiz	1	\$ 30,000.00		\$ 30,000.00
Envasadora	1	\$ 5,000.00		\$ 5,000.00
Trasportadores (banda, tol)	1	\$ 60,000.00		\$ 60,000.00
Total de activos fijos				\$ 355,000.00

Fuente: Vicente Reyes Villamar

APENDICE F

COSTO DE PRODUCCIÓN DE YESO

Descripción Receta	U	CANTIDAD	US\$	US\$/TM
Mano de obra directa	H/H	0.37	\$ 2.80	\$ 1.04
Energía Electrica	KWH	25.00	\$ 0.08	\$ 2.01
Combustible (DIESEL # 1)	GL	0.55	\$ 1.90	\$ 1.05
Otros Gastos Fijos	H/H	0.07	\$ 70.00	\$ 4.90
Otros Gastos Variable	STD	0.07	\$ 2.44	\$ 0.17
Depreciación	H/M	0.07	\$ 15.00	\$ 1.05
Costo de producción Yeso				\$ 10.21

Fuente: Vicente Reyes Villamar

APENDICE G

COSTO DE PRODUCCIÓN DE SULFATO DE CALCIO

Descripción Receta	U	CANTIDAD	US\$	US\$/TM	US\$/SACO
Costos variables					
Materia prima	TO	1.00	\$ 10.21	\$ 10.21	\$ 0.51
Saco de P.P	PZA	20.00	\$ 0.23	\$ 4.58	\$ 0.23
Bobina de hilo	KG	0.02	\$ 8.18	\$ 0.15	\$ 0.01
Energía Electrica	KWH	16.90	\$ 0.08	\$ 1.36	\$ 0.07
Combustible de secador (DIESEL)	GL	2.43	\$ 1.90	\$ 4.62	\$ 0.23
Costos fijos					
M.O.D	H/H	0.40	\$ 3.13	\$ 1.25	\$ 0.06
Depreciación	H/M	0.33	\$ 4.11	\$ 1.37	\$ 0.07
Costo de producción Sulfato de Calcio				\$ 23.53	\$ 1.18
Margen				\$ 4.71	\$ 0.24
P.V.P				\$ 28.23	\$ 1.41

Fuente: Vicente Reyes Villamar

APENDICE H

RESULTADOS DE PUREZA DEL SULFATO DE CALCIO

DATOS DE LA MUESTRA				
Tipo de muestra	Yeso	Cantidad	Aprox.200 g	
No. de muestras	1	Lote	N/A	
Presentación	Funda plastica	Fecha de recepción	18 Julio 2023	
Colecta de muestra	Realizado por el cliente	Fecha Colecta de muestra	N/A	
CONDICIONES DEL ANALISIS				
Temperatura (°C)	24.7	Humedad (%)	59.3	
Fecha de Inicio de Análisis	19-07-2023			
Fecha de Finalización del análisis	25-07-2023			
RESULTADOS				
CODIGO CLIENTE	PARAMETROS	METODO RRREFERENCIA	RESULTADOS	Unidad
Yeso	Sulfatos	NTE INEN 237 (Gravimetría)	48,51	%
	Calcio	AOAC 945.03 (Volumetría)	21,83	%
	Sulfato de Calcio	Estequiometría	74,15	%
Observaciones:				
1. Los resultados emitidos en este informe, corresponden únicamente a la(s) muestra(s) recibidas por el laboratorio. No siendo extensivo a cualquier lote.				
2. Nomenclatura: N.D. = No Detectable; N.A. = No aplica				

Fuente: Vicente Reyes Villamar

APENDICE I

ANÁLISIS FINANCIERO DE EMPRESA ACTUAL

ANÁLISIS FINANCIERO DE EMPRESA ACTUAL											
AÑOS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Precio de Venta		\$ 40.00	\$ 40.40	\$ 40.80	\$ 41.21	\$ 41.62	\$ 42.04	\$ 42.46	\$ 42.89	\$ 43.31	\$ 43.75
Producción (Toneladas)		8640	8700	8787	8875	8964	9143	9326	9512	9600	9600
Ingresos por Venta		\$ 345,600	\$ 351,480	\$ 358,545	\$ 365,751	\$ 373,103	\$ 384,371	\$ 395,979	\$ 407,937	\$ 415,817	\$ 419,975
Costo de producción		\$ -203,284	\$ -205,316	\$ -207,370	\$ -209,443	\$ -211,538	\$ -213,653	\$ -215,790	\$ -217,947	\$ -220,127	\$ -222,328
Otros Fijos (M.O.I.)		\$ -63,600	\$ -64,236	\$ -64,878	\$ -65,527	\$ -66,182	\$ -66,844	\$ -68,181	\$ -69,545	\$ -70,936	\$ -72,354
Varios		\$ -10,000	\$ -10,000	\$ -10,000	\$ -10,000	\$ -10,000	\$ -10,000	\$ -10,000	\$ -10,000	\$ -10,000	\$ -10,000
Valor libro maquinaria		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 177,500
Utilidad antes de Impuestos		\$ 68,716	\$ 71,928	\$ 76,297	\$ 80,781	\$ 85,383	\$ 93,874	\$ 102,008	\$ 110,445	\$ 114,754	\$ 115,293
Impuestos		\$ -15,118	\$ -15,824	\$ -16,785	\$ -17,772	\$ -18,784	\$ -20,652	\$ -22,442	\$ -24,298	\$ -25,246	\$ -25,364
Utilidad Neta		\$ 83,834	\$ 87,752	\$ 93,082	\$ 98,553	\$ 104,167	\$ 114,526	\$ 124,450	\$ 134,743	\$ 140,000	\$ 140,657
(+) Depreciación maquinaria		\$ 35,500	\$ 35,500	\$ 35,500	\$ 35,500	\$ 35,500	\$ 35,500	\$ 35,500	\$ 35,500	\$ 35,500	\$ 35,500
Valor libro maquinaria											\$ -177,500
(-) Inversión por maquinaria	\$ -355,000										
Capital de trabajo	\$ -100,000										\$ 100,000
Flujo de caja neto (-)	\$ -455,000	\$ 119,334	\$ 123,252	\$ 128,582	\$ 134,053	\$ 139,667	\$ 150,026	\$ 159,950	\$ 170,243	\$ 175,500	\$ 98,657
Flujo de caja acumulado		\$ -335,666	\$ 242,586	\$ 251,834	\$ 262,635	\$ 273,720	\$ 289,693	\$ 309,976	\$ 330,193	\$ 345,743	\$ 274,157
Tasa de descuento (TMAR)	10%										
VAN	\$ 374,294										
TIR	26%										
Periodo de recuperacion		3.7 años									

Fuente: Vicente Reyes Villamar

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Casp Vanaclocha. (2005). *Diseño de industrias agroalimentarias*. Mundi-Prensa.
- [2] AOAC INTERNATIONAL 945.03. (1945). *Calcio (soluble en ácido) en fertilizantes*.
- [3] ARCSA. (2015). *Resolución ARCSA-DE-067-2015-GGG*.
- [4] Blanco-Fernández, J., Martínez-Cámara, E., Jiménez-Macías, E., Cuevas, A., & Sáenz-Díez, J. C. (2014). Layout. En J. L. García-Alcaraz, A. A. Maldonado-Macías, & G. Cortes-Robles (Eds.), *Lean Manufacturing in the Developing World* (pp. 461-482). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-04951-9_22
- [5] Chapman, S. N. (2006). *Planificación y control de la producción*. Pearson Educación.
- [6] El Morro S.A. (2021). *Ficha Técnica de sulfato calcio Malla-200*.
- [7] Hinojosa, M. A. (2003). *Diagrama de Gantt*.
- [8] Hugo Leonel Alonzo. (2009). *Una herramienta de mejora, el OEE (Efectividad Global del Equipo)*.
- [9] Moreno Ramón, Héctor, báñez A., Sara & Gisbert Blanquer, Juan Manuel. (2011). Sulfato. *Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural*.
- [10] Nelly M. Baena. (2014, agosto). *Diagrama de Proceso*.
- [11] NTE INEN 49. (2015). *Norma Inen 49. Determinación de Humedad*.
- [12] NTE INEN 237. (2013). *Fertilizantes o abonos. Determinación del azufre*.
- [13] NTE INEN 1688. (1989). *Yesos para construcción. Ensayos físicos INEN 1688*.
- [14] NTE INEN 10390. (2014). *Norma NTE INEN 10390. Calidad del suelo. Determinación de Ph*.

- [15] Orion Star™ A214 pH/ISE Benchtop Meter. (2023).
<https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/STARA2140>
- [16] Parcerisa, J. C. (1997). *Extracción, explotación, minería y proceso de tratamiento del yeso*. 36(6).
- [17] QuimiNet. (2023, julio). *Precios de Yeso (anhidrita)*. QuimiNet.
<https://www.quiminet.com/productos/yeso-anhidrita-286735272769/precios.htm>
- [18] Richard Cedillo. (2014). *Implementación de la metodología PAMCO (plant and machine control) para la mejora continua en la línea de empaque de la empresa "ecuasal c.a." Estatal de Guayaquil*.
- [19] Roberto Dammert Tode. (2000). *Bosquejo Diseño de industria de Carbonato. Universiada Catolica de Perú*.
- [20] Sambito. (2019). *Estudio de impacto ambiental por la construcción, operación y mantenimiento de la planta de refinación de sal de la empresa ecuatoriana de sal y productos químicos c.a. ecuasal*.
- [21] Saúl Fernández Espinoza. (2007). *Los proyectos de inversión: Evaluación financiera* (Tecnología de Costa Rica). Editorial Tecnológica de CR.
- [22] Vincenzina La Spina. (2014). *Calcinación industrial del yeso*.
- [23] Wiendahl, H.-P., Reichardt, J., & Nyhuis, P. (2015). *Handbook Factory Planning and Design*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-46391-8>
- [24] Xavier Girones Guell. (2013). *Metodología y análisis de la fabricación de anhídrita en horno rotativo mediante elementos de inteligencia artificial*.