

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

El coagulante natural es una sustancia de origen biológico (vegetal o animal) que induce la desestabilización de coloides y partículas en suspensión dentro de una muestra de agua, su principal mecanismo de acción es la neutralización de carga, a través de la cual los cationes o grupos funcionales del coagulante que tienen carga positiva se adhieren a las partículas coloidales, que generalmente tienen carga negativa. Esto disminuye las fuerzas de repulsión de doble capa eléctrica, lo que facilita la unión de partículas a través de fuerzas de Van der Waals en microfloculos. Posteriormente, en la fase de floculación, estos microfloculos se agrupan en floculos, que son aglomeraciones más grandes y densas, que puede ser separado eficiente del agua mediante proceso de sedimentación y/o filtración (Ndabigengesere, 1995).

Históricamente, el tratamiento de aguas se basaba en procesos físicos como la decantación. Las plantas de tratamiento de agua potable utilizan, hoy en día, principalmente coagulantes químicos inorgánicos, más comúnmente utilizado es el sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), conocido como alumbre, durante el tratamiento algunos pueden dejar remanente de aluminio pudiendo causar enfermedades y altas concentraciones de metales pesados en los lodos finales lo que complica su disposición final y requiere un manejo como residuo peligroso. Por esta razón, la investigación y aplicación de coagulantes naturales se presenta como una alternativa sostenible, son amigables con el medio ambiente y la salud humana. Al implementar los coagulantes químicos debemos considerar su impacto ambiental.

A nivel internacional se evidenciaron que el mucilago extraído del Nopal presenta propiedades coagulantes capaces de reducir la turbidez en aguas superficiales (Miller,2008), también investigaciones sobre coagulante como Moringa oleífera han demostrado eficiencias comparables a coagulantes químicos (Narasiah,1995), en Perú en el trabajo de grado de Dionicio Tirado,2022 utilizó moringa y yuca como coagulantes para la potabilización de aguas del Río Caplina de Tacna. En la cual el rendimiento de la moringa y la yuca, fue del 75 % y 15.6 %, en tesis de Santisteban

Eleazar, 2020 aplica *Opuntia ficus-indica*, como el mucílago, en la descontaminación de aguas residuales. En Colombia jóvenes de la universidad de Sucre determinaron la eficiencia del nopal (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante natural complementario a un coagulante primario en la clarificación de agua en 2015.

A nivel nacional en el norte del país se ha realizado un estudio orientado al uso de coagulantes naturales como solución sostenible para el tratamiento de agua en comunidades rurales, Ortega Laura, 2020 elaboró y aplicó un coagulante de la cáscara de plátano en La Paz; así mismo, Alcázar, determinó la eficiencia del nopal como coagulante en una comunidad de La Paz.

En el departamento de Tarija-Bolivia no se evidenció, la obtención coagulante natural de la penca de tuna, ni de otra variedad u orgánico, por lo cual es de gran interés de la obtención del coagulante natural como un sustituto del coagulante químico como el sulfato de aluminio.

Producción mundial de floculante y coagulante en el mercado

El mercado global de floculantes y coagulantes incluye productos inorgánicos, orgánicos y sintéticos. En la región Asia Pacífico se concentra aproximadamente el 32% del mercado total, impulsado por la industrialización y el crecimiento poblacional (Exactitude Consultancy, 2022). Dentro de este mercado, los coagulantes naturales representan un segmento emergente en crecimiento debido a la demanda de soluciones sostenibles.

Figura 1: Productores de coagulante global de productos inorgánicos (alumbre, cloruro férrico y PAC), orgánicos (taninos y quitosanos) y sintéticos (PolyDADMAC, Poliaminas).

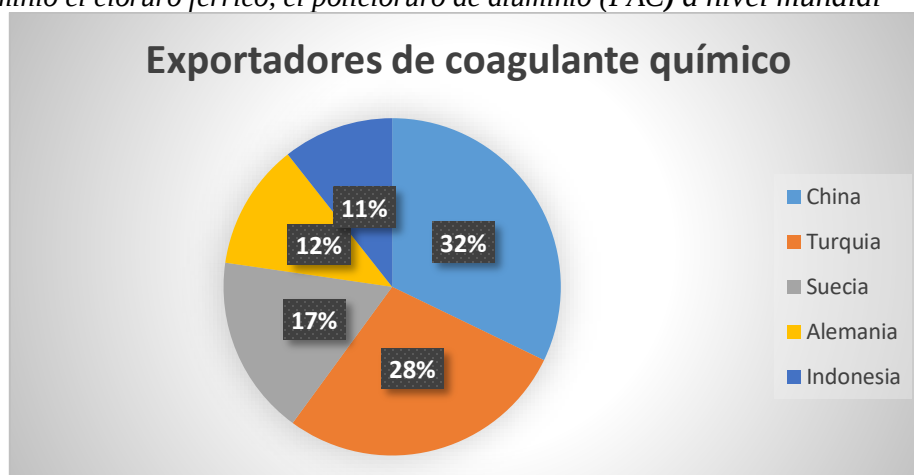


Fuente: Adaptada de Extatitute Consultancy, 2022

<https://exactitudeconsultancy.com/about-us/>

En 2022, los principales exportadores de *coagulante químico* como el sulfato de aluminio, policloruro de aluminio, el cloruro férrico, el policloruro de aluminio (PAC) siendo, el sulfato de aluminio el de mayor uso global debido a su bajo costo y eficacia en la remoción de turbidez, fueron China, Turquía, Suecia, Alemania e Indonesia.

Figura 2: Exportadores de coagulante químico como el sulfato de aluminio, policloruro de aluminio el cloruro férrico, el policloruro de aluminio (PAC) a nivel mundial

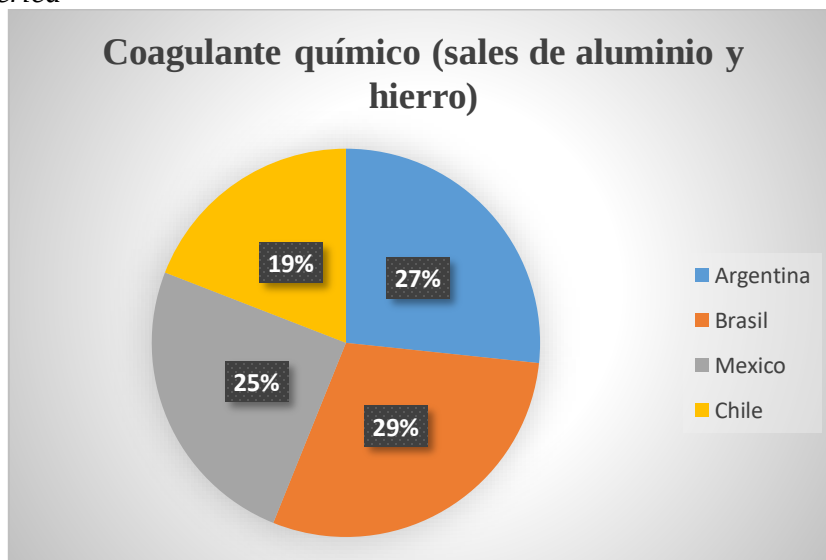


Fuente: Adaptada de Observatorio de Complejidad Económica por (Simoes, 2012)

<https://oec.world/es/profile/hs/aluminium-sulphate>

En América Latina los países como Brasil, México, Argentina y Chile son los principales productores de coagulantes químicos y en América del Sur los mercados productores químicos para el tratamiento del agua son Brasil, Argentina y Chile. (Obula, 2019).

Figura 3: *Productores de coagulante químico de sales de aluminio y hierro en Latinoamérica*



Fuente: Adaptada de Mordor intelligence, por Bharadwaj Obula Reddy, 2019, <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/south-america-water-treatment-chemicals-market-industry>

Producción en América Latina

La producción de coagulante natural de penca de tuna como así también de semilla de linaza, de yuca, moringa, entre otro, en América Latina a menudo se desarrolla como investigación aplicada y a escala piloto, para evaluar la eficacia y seguridad de los coagulantes naturales antes de su uso generalizado para el tratamiento de agua turbias.

En Bolivia no existe producción a gran escala de coagulantes naturales y/o inorgánicos para el tratamiento de agua turbias, y de esta situación genera una dependencia del mercado internacional, forzando a adquirir grandes volúmenes de

coagulantes inorgánicos para su proceso de tratamiento de agua, también consolida la utilización de tecnología con un mayor impacto ambiental asociado a la disposición final de lodos contaminados. Los coagulantes inorgánicos para el tratamiento de agua son el sulfato de aluminio, policloruro de aluminio y hierro (como cloruro férrico y sulfato ferroso).

Como bien sabemos, el agua, es un recurso natural esencial para la vida de los seres humanos y otros seres vivos, el acceso a agua potable es una necesidad para el consumo humano, sin embargo, el agua proviene de fuentes superficiales como ríos y lagos que presenta turbidez y esta afecta negativamente la calidad y limita su uso para el consumo humano, agrícola entre otras. Para mejorar la calidad del agua se emplea proceso de coagulación-floculación con coagulante químico como el sulfato de aluminio, si bien, este compuesto ha demostrado la reducción de turbidez, su uso inadecuado genera problema como la presencia de residuos químicos en el agua tratada, que a la larga afecta la salud de las personas.

En respuesta a esta problemática o limitaciones, ha surgido el interés en coagulante natural a partir del nopal de tuna, estos coagulantes naturales son biodegradables y puede ser una alternativa sostenible para el tratamiento de agua. La formulación del problema es: ¿Cuál es la eficiencia del coagulante natural a partir del nopal en el proceso de clarificación y reducción de turbidez en el agua?

Objetivos**Objetivo general:**

- Obtener un coagulante natural a partir de Nopal (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) por el método de extracción térmica, para tratamiento de aguas turbias para su potabilización en la ciudad de Tarija.

Objetivo específico:

- Caracterizar las propiedades fisicoquímicas del Nopal (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill).
- Analizar y seleccionar el proceso tecnológico experimental para la obtención de coagulante natural a partir de Nopal (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill).
- Ejecutar la parte experimental del proceso de obtención, aplicando el diseño experimental, determinando las variables independientes y dependientes.
- Caracterizar las propiedades fisicoquímicas del coagulante natural de Nopal (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill) obtenido.
- Determinar el rendimiento del proceso de obtención del coagulante de Nopal (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill).
- Determinar el costo de coagulante de Nopal (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill) a escala laboratorio.
- Realizar prueba de efectividad de coagulación y sedimentación del producto para tratamiento de agua superficial turbia a escala laboratorio.

Justificación

Justificación Tecnológica

Con el presente trabajo de investigación se pretende dar una alternativa para tratar aguas turbias con materia prima de origen vegetal. La tecnología para obtención del coagulante natural a partir de Nopal se basa en operaciones unitarias sencillas como la extracción térmica mediante un agitador magnético, la filtración por gravedad, la centrifugación (usando una centrífuga) y el secado mediante una estufa, las cuales pueden ser controladas para la obtención del coagulante natural.

Justificación Social

El presente proyecto tiene como objetivo la revalorización del Nopal como coagulante natural, proponiendo su utilización como una alternativa en el tratamiento de aguas turbias para su potabilización. Esta iniciativa busca contribuir a la salud pública, disminuir la dependencia de productos químicos importados, fomentar la actividad económica de agricultores y comerciantes en la producción de Nopal, y, en consecuencia, mejorar la calidad de vida de la población.

Justificación Económica

En el mercado se encuentra disponible el coagulante químico, como el sulfato de aluminio, que es abastecido como productos importados. Por lo tanto, se plantea la necesidad de investigar la producción de coagulantes naturales, con el presente trabajo de investigación se busca proporcionar un valor agregado al Nopal, específicamente a sus cladodios. Esta iniciativa podría generar ingresos económicos adicionales para los productores y comercializadores de Tuna y/o Nopal, fomentando así una demanda que incentive a los agricultores a aumentar la producción de esta planta. De este modo, se busca no solo añadir valor a la materia prima, sino también generar posibilidades económicas para la producción de coagulantes naturales.

Justificación Ambiental

Los métodos de obtención de coagulante natural, no son sustancialmente contaminantes para el medio ambiente, además de tener un procesamiento químico más reducido, lo que hace que la huella de carbono disminuya y la aplicabilidad de este producto en tratamiento de aguas turbias no genera subproductos tóxicos y son residuos biodegradables, lo que reduce el impacto ambiental y protección del medio ambiente.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Agua

El agua es un líquido incoloro, inodoro e insípido (Snoeyink 2004), formado por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, el agua es uno de los recursos más importantes para la vida en el planeta. Los seres humanos dependemos de su disponibilidad, no solo para el consumo doméstico, sino, también para el funcionamiento y la continuidad de las actividades agrícolas e industriales. En las últimas décadas, con la finalidad de producir más alimento y energía, así como de dotar el servicio de agua potable a una población cada vez más numerosas, la demanda por el líquido ha crecido significativamente. Otro problema importante relacionado con la posibilidad de utilizar el agua es su grado de contaminación, ya que si no tiene la calidad adecuada puede agravar el problema de la escasez. Las aguas de los cuerpos superficiales y subterráneas se contaminan por las descargas sin tratamiento previo de aguas municipales e industriales, así como por los arrastres que provienen de las zonas que practican actividades agrícolas y pecuarias. (Bárcena, 2012).

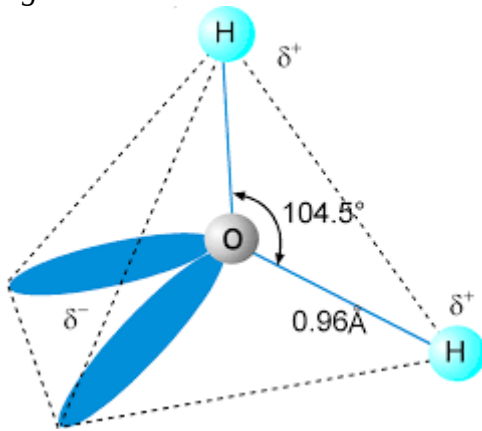
1.1.1 Estructura atómica del agua

El agua es un compuesto (H_2O) que en condiciones normales se encuentra en estado líquido. Su estructura molecular es simple: contiene dos átomos de hidrógeno (H) y uno de oxígeno (O). Cada átomo de hidrógeno está unido al oxígeno por medio de un enlace tipo covalente polar debido a que es la unión de dos elementos no metálicos diferentes que comparten un par de electrones. La geometría de la molécula de agua es angular, el ángulo de enlace es de $104,5^\circ$ y la distancia H-O es de $0.957 \text{ \AA}$ (Figura I-2). La molécula del agua forma un dipolo, donde el oxígeno tiene una densidad de carga negativa, y asociado a los hidrógenos encontramos una densidad de carga positiva (Medina, 2024).

El agua es una molécula "polar"; es decir, existe en ella una distribución irregular de la densidad electrónica. Por esta razón, el agua posee una carga parcial

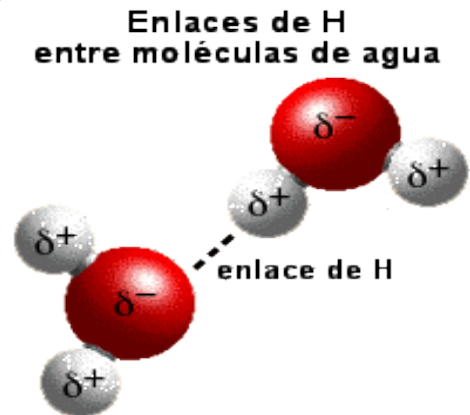
negativa (δ^-) cerca del átomo de oxígeno y una carga parcial positiva (δ^+) cerca de los átomos de hidrógeno (Figura I-1.). Gracias a su polaridad, las moléculas de agua se atraen entre sí con gran facilidad. El lado positivo de una —un átomo de hidrógeno— se asocia con el lado negativo de otra —un átomo de oxígeno. Estas atracciones son un ejemplo de puentes de hidrógeno, interacciones débiles que se forman entre un hidrógeno con una carga parcial positiva y un átomo más electronegativo, como el oxígeno (Figura I-3). (Estrada, 2022).

Figura I-2: Estructura molecular del agua



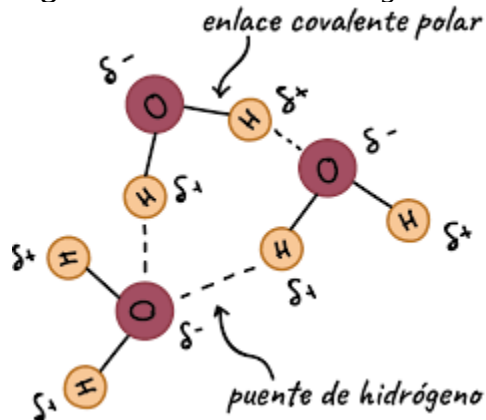
Nota: El valor de 104,5° es el ángulo de enlace H-O-H, no es lineal, el 0,96 Å es la longitud del enlace O-H, color azul son los pares de electrones libres, δ son cargas Fuente: (Lozano,

Figura I-1: Polaridad de enlace del agua



Nota: Adaptado de Biolomodel, por la Universidad de Valencia, España, 2015, <https://biomodel.uah.es/epb/biochemistry/tutorials/chemistry/page3.html>

Figura I-3: Puente de Hidrógeno



Nota: Adaptado de scribd por Jocelyn Delgado <https://es.scribd.com/document/478089780/polaridad-del-agua>

1.1.2 Agua potable

Según la NB 512 (Agua Potable), el agua potable se define como:

“Aquel agua que cumple con los requisitos físicos, químicos, microbiológicos y radiactivos establecidos en esta norma, de manera que su consumo no represente un riesgo para la salud humana (NB-512, 2005)”

El agua potable es agua que ha sido sometido a un proceso de tratamiento que cumple con los estándares de calidad fisicoquímicos y microbiológicos, haciéndola segura para el consumo humano.

1.1.3 Agua turbia

La turbiedad es la propiedad óptica de una muestra de agua, que hace que los rayos luminosos se dispersen y absorban, en lugar de transmitir en línea recta (NB-512, 2015).

Las sustancias responsables de la turbiedad del agua son las partículas en suspensión, tales como arcilla, minerales, sedimentos, materiales orgánicos e inorgánicos finamente divididos, bacterias y otros microorganismos, estas partículas causantes de la turbiedad pueden ser partículas coloidales o materiales insolubles de mayor tamaño (Bastidas, 2016). Los componentes más frecuentes y comunes de las aguas turbias son las arcillas.

Tabla I-1 *Diámetro de partículas*

Diámetro de la partícula (mm)	Tipo de partícula	Tiempo de sedimentación para 1 metro
10	Grava	1sg.
1	Arena	10 sg.
0,1	Arena fina	2 min
0,01	Arcilla	2 h
0,001	Bacteria	8 días
0,0001	Coloide	2 años
0.00001	Coloide	20 años
0,000001	Partícula coloidal	63 años

Fuente: (Perez & Miguel, 1995)

La turbidez se mide en Unidades Nefelometría de turbidez (NTU) o Unidades de Formazina (FTU). El instrumento usado para su medida es el nefelómetro o turbidímetro, que mide la intensidad de la luz dispersada a 90 grados cuando un rayo de luz pasa a través de una muestra de agua (Robles, 2018).

La determinación nefelométrica de la turbiedad utiliza el efecto de Tyndall-Faraday para su medición, la cual es un fenómeno por el cual las partículas coloidales provocan la dispersión de la luz cuando esta pasa a través de una suspensión coloidal, esta dispersión es directamente proporcional al tamaño de las partículas (Bastidas, 2016).

1.1.4 Partículas en suspensión

Las partículas en suspensión de una fuente de agua superficial provienen de la erosión de suelos, de la disolución de sustancias minerales, de la descomposición de sustancias orgánicas y partículas de materia inorgánica (como arcilla), en tanto que el color está formado por las partículas de materias orgánicas e hidróxido de metal.

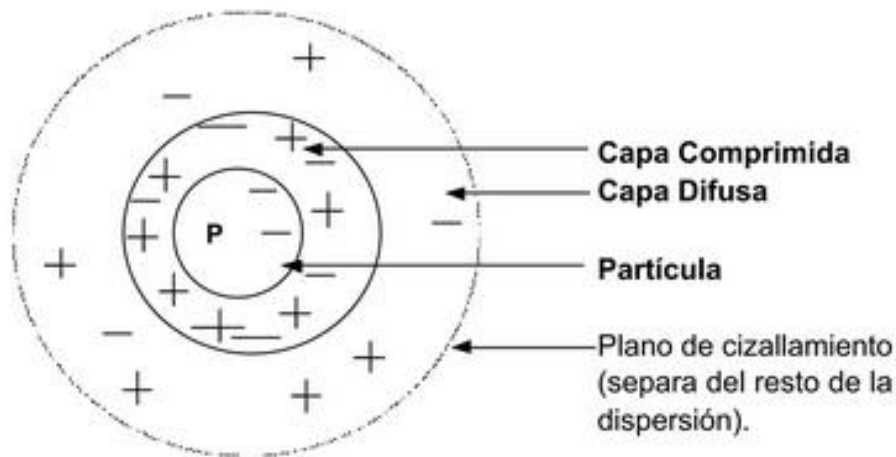
Las características de la partícula en suspensión son las siguientes:

- **Afinidad de la partícula coloidal por el agua:** Las partículas coloidales se caracterizan por ser hidrofílicos (tienen afinidad por el agua) e hidrófobos (es

decir, que rechazan al agua), las primeras se dispersan espontáneamente dentro del agua y son rodeadas de moléculas de agua que previenen todo contacto posterior entre estas partículas; las partículas hidrofóbicas no son rodeados de moléculas de agua, su dispersión dentro del agua no es espontáneo por lo que requiere de la ayuda de medios químicos y físicos. Las partículas hidrofobas son en general partículas de materias inorgánicas, mientras que las hidrofílicas son materias orgánicas.

- **Carga eléctrica y doble capa:** Las partículas coloidales, son las causantes de la turbiedad y del color; estas poseen normalmente una carga eléctrica negativa situada sobre su superficie. Estas cargas llamadas cargas primarias, atraen los iones positivos del agua, los cuales se adhieren fuertemente a las partículas y atraen a su alrededor iones negativos acompañados de una débil cantidad de iones positivos. Los iones que se adhieren fuertemente a la partícula y se desplazan con ella, forman la capa adherida o comprimida, mientras que los iones que se adhieren débilmente constituyen la capa difusa, por lo tanto, hay un gradiente o potencial electrostático entre la superficie de la partícula y la solución, llamado Potencial Zeta (Andia, 2000).

Figura I-4: Doble capa de una partícula coloidal



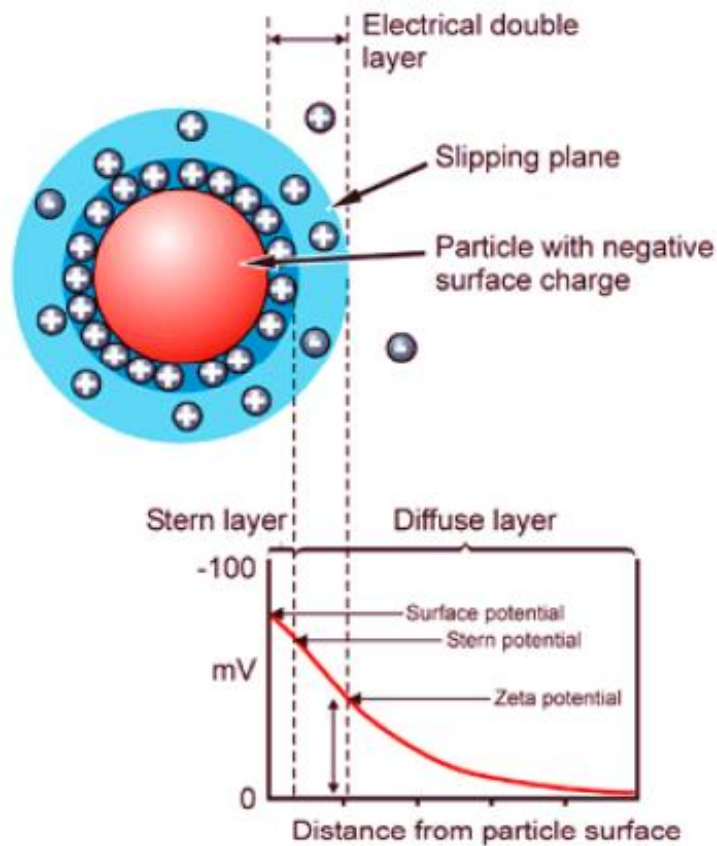
Fuente: (Andia, 2000).

Potencial Zeta

Evidentemente, la partícula coloidal cargada tiene un cierto potencial eléctrico con respecto a la solución neutra en la que se halla, potencial que decrece hasta una distancia suficiente para que los efectos de la carga sean inapreciables. El valor de la diferencia de potencial entre el límite de solución rígidamente unida a la partícula y la masa del líquido se denomina *potencial Zeta*.

La existencia del potencial Zeta y esta doble capa es lo que impide la aproximación de las partículas a una distancia suficiente como para que las fuerzas atractivas de Van der Waals entren en acción y agrupen los coloides. Unido a ello aparece el fenómeno de la repulsión electrostática entre cargas de igual signo, de modo que todo ello fortalece la estabilidad del sistema. El conseguir la formación de agregados de partículas o flóculos dependerá de la capacidad de ruptura de la estabilidad de los coloides, o dicho de otro modo, será función de la posibilidad de reducir el potencial Zeta existente entre partícula y la capa límite que define la zona de movilidad iónica (Perez & Urea, 2018).

Figura I-5: Potencial Zeta



Nota: Diagrama de la concentración iónica y la diferencia de potencial en función de la distancia desde la superficie de carga de una partícula suspendida (Perez & Urea, 2018).

- **Factor de estabilidad e inestabilidad:** Las partículas coloidales están sometidos a dos grandes fuerzas:

Fuerzas de atracción de Van der Waals: E_a (factores de Inestabilidad); son fuerzas de atracción producidas por el movimiento continuo de las partículas.

Fuerzas de repulsión electrostáticas: E_b (columbicas – factor de estabilidad); son fuerzas que impiden la aglomeración de las partículas cuando estas se acercan unas a otras; por ejemplo 2 partículas de igual signo no se pueden aproximar, estas rechazan.

El equilibrio de una suspensión coloidal depende de la fuerza resultante entre la fuerza de atracción y la fuerza de repulsión: E_r ,

$$E_r = E_a + E_b$$

1.1.5 Contaminación del agua

La contaminación de agua se define como la alteración de cualquiera de las siguientes características: físicas, químicas, biológicas y/o radiológicas en el agua, que deterioran su calidad de modo tal que llega a constituir un riesgo para la salud o a reducir su utilización (Hanna, 2018).

La contaminación del agua se clasifica en los siguientes:

Contaminación física: Los contaminantes físicos impactan principalmente la apariencia física u otras propiedades físicas del agua. Ejemplos de contaminantes físicos son, sedimentos o materiales orgánicos suspendidos en el agua de lagos, ríos y arroyos de la erosión del suelo ((EPA), 2025).

Contaminación química: Los contaminantes químicos son elementos o compuestos. Estos contaminantes pueden estar ocurriendo naturalmente o hechos por el hombre. Ejemplos de contaminantes químicos incluyen nitrógeno, blanquea, sales, pesticidas, metales, toxinas producidas por bacterias y drogas humanas o animales ((EPA), 2025).

Contaminación biológica: La contaminación biológica involucrada en la transmisión hídrica son las bacterias, virus y protozoos, que pueden causar enfermedades con diferentes niveles de gravedad, desde gastroenteritis simple hasta casos fatales de diarrea, disentería, hepatitis o fiebre tifoidea (Arcos, 2005). Los contaminantes biológicos son organismos en el agua. También se les conoce como microbios o contaminantes microbiológicos. Ejemplos de contaminantes biológicos o microbianos incluyen bacterias, virus, protozoos y parásitos.

En el presente proyecto del capítulo II, la contaminación del agua en el proceso de coagulación, el agua a tratar tendrá contaminantes físicos, la cual estará orientado principalmente a la remoción de sólidos suspendidos y partículas coloidales responsable de la turbidez, por lo tanto, para que el tratamiento mediante coagulación sea efectivo, el agua debe presentar un contenido significativo de partículas en suspensión susceptibles de desestabilización y aglomeración.

1.1.6 Tratamiento de agua

Comprende una serie de procesos cuya finalidad es transformar la materia prima inicial (agua contaminada), en producto final (agua apta para consumo). La finalidad de estas operaciones es obtener agua con las características adecuadas al uso que se les vaya a dar, por lo que la combinación y naturaleza exacta de los procesos varía en función tanto de las propiedades de las aguas de partida como de su destino final, se piensa que la turbiedad y el color son sinónimo de contaminación, la clarificación de aguas es uno de los tratamientos esenciales en aguas naturales (Leon A. D., 2015)

El tratamiento del agua se refiere al proceso de mejora de la calidad del agua con el fin de servir a un uso final. Los usos finales más comunes son el agua potable, el suministro de agua industrial, las actividades recreativas y la reposición de fuentes ambientales, como ríos y lagos (Altomonte, 2024).

En otras palabras, se refiere a cualquier proceso que modifique las características del agua para hacerla apta para un uso específico como ser agua para riego, industrial, entre otras y no necesariamente la hace segura para beber.

1.1.6.1 Objetivo del tratamiento de agua

- Proteger la salud (potabilización): El tratamiento de agua potable es el que se utiliza cuando el agua va a ser destinada al consumo humano (Acnur , 2018)

- Proteger el medio ambiente (Tratamiento de agua residual): El proceso de tratamiento de aguas residuales tiene como objetivo reducir o eliminar los contaminantes presentes en el agua para permitir su reutilización o su descarga segura al medio ambiente (Pillado, 2025).
- Cumplir requerimientos industriales y comerciales: El agua industrial se utiliza para procesos industriales como ser refrigeración de maquinaria, generación de vapor (calderas), limpieza de equipos o instalaciones, no está destinada al consumo humano, el tratamiento de aguas está regido por una serie de normas que indican o fijan los límites generales aceptables para las impurezas de las aguas. Estas normas son las especificaciones generales para la aceptación del producto, ya que cuando el tratamiento de las aguas está bien controlado, se pueden obtener mejores resultados que los establecidos en las normas (Salamanca, 2014).

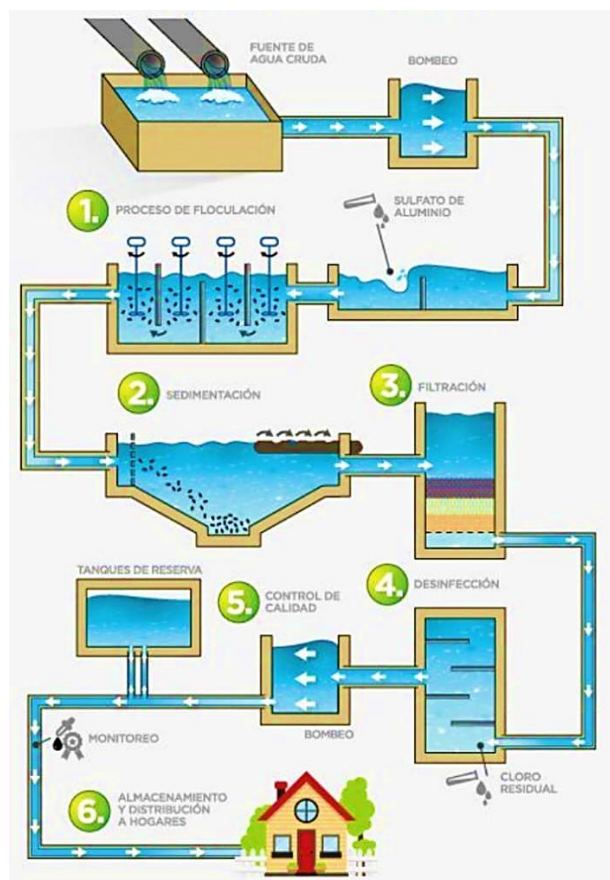
Con la obtención del coagulante natural de la penca de tuna es, contribuir en la protección de la salud de la sociedad y el medio ambiente al ser como un sustituyente del coagulante químico como el sulfato de aluminio.

1.1.7 Potabilización de agua

La potabilización del agua es conjunto de procesos unitarios para purificar el agua y que tiene por objeto hacerla apta para el consumo humano sin que presente un riesgo para su salud. Se refiere tanto para beber como para preparar alimentos. (Huyata, 2017).

Entonces la potabilización del agua es un proceso de tratamiento, con el objetivo de que el agua sea segura para el consumo humano, eliminando contaminante que sean riesgoso para la salud.

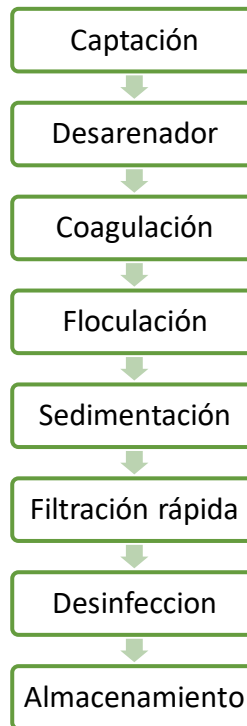
Figura I-6: *Planta de tratamiento de Agua Potable*



Fuente: Campozano, 2021

En la figura I-7 se observa la etapa del proceso de potabilización de agua ubicada en Tabladita-Tarija.

Figura I-7: Diagrama de bloque de proceso de potabilización



Fuente: Elaboración propia basada basado de la planta de tratamiento de agua potable de Tabladita de COSAALT por Ing. Grover Torres, 2025.

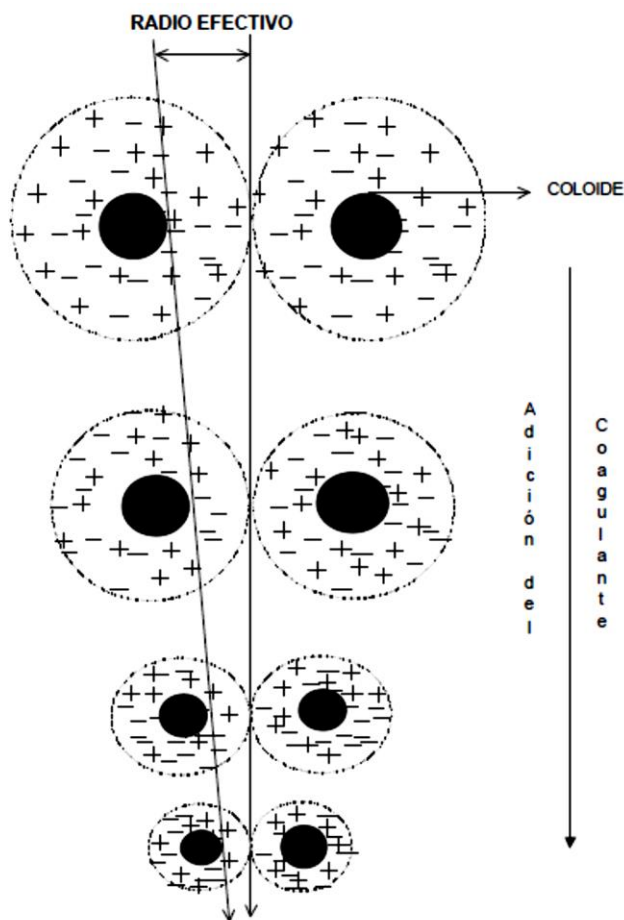
A continuación, se presentan los procesos para la potabilización de agua de Tabladita-Tarija. La inclusión de dicha planta tiene únicamente fines descriptivos del esquema operativo del tratamiento convencional, no contemplándose la realización de ensayos del producto en sus instalaciones, la descripción enfatiza la etapa de mezcla rápida/coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección, con énfasis técnico en la etapa de coagulación/floculación, por ser la unidad de interés en el presente estudio.

1.1.7.1 Coagulación

Es un proceso que tiene por objetivo la desestabilización química de las partículas coloidales que se producen al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados, por medio de la adición de los coagulantes químicos y la aplicación de la energía de mezclado (Leon A. D., 2015).

En la figura I-8 se muestra como las sustancias químicas anulan las cargas eléctricas de las superficies del coloide permitiendo que las partículas coloidales se aglomeren formando flóculos (Andia, 2000).

Figura I-8: *Coagulación*



Fuente: (Andia, 2000)

La coagulación es la primera etapa en el tratamiento, para que se lleve a cabo la coagulación se requiere de una unidad de mezcla rápida. Para esto se usa el mezclador de resalto hidráulico en donde dependiendo a la turbiedad del agua, por la época climática en la que nos encontremos se realiza la dosificación con sulfato de aluminio, donde más adelante hará que el sulfato entre en reacción, para promover la coagulación, sustancia húmicas y microorganismos en general. Al ser esta unidad de

tipo hidráulico, tiene sus dos parámetros físicos (tiempo de mezcla e intensidad de agitación) determinados por la geometría de la unidad y el caudal de entrada. Dependiendo de las características del agua cruda entrante se dosificará el sulfato de aluminio de ser necesario para el proceso de coagulación, en esta unidad se debe realizar el muestreo de los parámetros para saber las características entrantes del agua cruda, parámetros estipulados en la Normativa Boliviana, cada cuatro horas al día. (Galean, 2025).

1.1.7.2 Floculación

La floculación es la acumulación de pequeñas partículas desestabilizadas llamadas microflóculos y que a su vez estas forman flóculos de mayor tamaño que mediante la acción de la gravedad tienden a descender y acumularse en la parte inferior de un recipiente, en este caso en los decantadores. Suelen llamarse proceso de coagulación y floculación, que hace que las partículas se unan entre sí por estar neutralizadas las cargas electrostáticas (Acevedo & Human, 2021).

En otras palabras, la floculación es un proceso fisicoquímico en la cual las partículas coloidales (muy pequeñas y difíciles de sedimentar) se agrupan para formar flóculos.

Figura I-9: Floculación



Fuente: (Andia, 2000)

Esta es la segunda en el tratamiento que recibe el agua, en esta unidad el agua ingresa por un canal y son distribuido a los floculadores que tiene un patrón de flujo pistón, existe 6 unidades de 12,3 metros de largo, 3,50mtros de ancho y 1,50 metro de profundidad diseñadas para tratar 160l/s. desde la unidad de mezclado rápido el agua es conducida por un canal a la unidad de floculación, donde se dispone en su interior pantalla de madera quina. La unidad de floculadores está conformada por 6 cajones, el agua una vez que pasa por el mezclador de resalto hidráulico, entra por gravedad, donde después de un tiempo se forma flocs, (Es un conglomerado de partículas sólidas que se genera a través de los procesos de coagulación y floculación, está constituido en primer lugar por los sólidos que se separan del agua, así como también por los sólidos que aporta el coagulante.) Para precipitar en el sedimentador. (Galean, 2025).

1.1.7.3 Sedimentación

La sedimentación es la remoción por efecto gravitacional de las partículas en suspensión presentes en el agua, las partículas deberán tener un peso específico mayor que el fluido. La sedimentación es, en esencia, un fenómeno netamente físico y constituye uno de los procesos utilizados en el tratamiento del agua para conseguir su Clarificación (Maldonado, 2005).

En el proceso de sedimentación, a la salida de la unidad de floculación el agua es conducida por un canal que distribuye el agua floculada a esta unidad que contiene placas de asbesto cemento inclinadas para precipitar los flóculos. (Galean, 2025)

1.1.7.4 Filtración rápida

La filtración rápida es una operación unitaria física de tratamiento de agua que separa partículas sólidas suspendidas haciendo pasar el agua a alta velocidad, la unidad de filtración es descendente y el agua sedimentada entra a este proceso donde atraviesa una capa de antracitas, arena, grava y finalmente el agua es captada con un fondo tipo Wheler, mediante válvulas el agua en proceso de tratado entra a los filtros y por gravedad pasa por las diferentes capas, hasta desembocar en una tubería que direcciona

el agua a la sala de cloración (Galean, 2025).

1.1.7.5 Desinfección

Es la destrucción o inactivación de los diversos organismos patógenos que están o pueden estar presentes en la fuente de agua que una persona utiliza para satisfacer sus necesidades básicas, y para cumplir con lo estipulado dentro de la Normativa Boliviana vigente. El compuesto químico más utilizado para la desinfección en la Planta es el cloro gaseoso, siendo el hipoclorito de calcio usado en casos de emergencia (Galean, 2025).

1.1.7.6 Almacenamiento

Esta es la última unidad, en la cual el agua ingresa después de ser desinfectada, en la misma se genera el tiempo de retención del agua, donde después de un tiempo es distribuida a la población mediante la red de distribución (Galean, 2025).

El presente estudio no replica la operación total de la planta de potabilización de agua, sino que se concentra en la etapa de coagulación-floculación mediante la dosificación y eficiencia del coagulante la cual se puede apreciar en el capítulo II y III de presente proyecto de investigación, ya que de esta etapa depende el éxito de los procesos posteriores (como la sedimentación y filtración).

1.1.8 Normativas y Leyes

En Bolivia, la normativa de calidad de agua, está regida principalmente por la Norma Boliviana NB 512, que establece los requisitos físicos, químicos y microbiológicos para el agua destinada al consumo humano, NB 496 Agua Potable - Toma de Muestras, la Ley N° 2066 (Agua y Saneamiento Básico), la Ley N° 2878 (Riego), la Ley N° 1210 (Servicios Básicos) y la Ley N° 1333 (Medio Ambiente), que establecen políticas, regulan el uso, promueven la conservación, y establecen competencias para la gestión de los recursos hídricos y servicios de agua potable y

saneamiento.

El Estado promueve el acceso al agua bajo principios de solidaridad, equidad y sustentabilidad, y es la responsabilidad de las empresas de agua (EPSA) el control de calidad hasta la conexión domiciliaria.

1.1.8.1 Ley 1333 de medio ambiente

La Ley 1333 (Ley del Medio Ambiente de Bolivia) clasifica las aguas en cuatro clases (A, B, C y D) según su aptitud de uso y el tipo de tratamiento requerido para hacerlas aptas para consumo humano.

Clasificación general de cuerpos de agua; en relación con su aptitud de uso, obedece a los siguientes lineamientos:

- **Clase A:** Aguas de máxima calidad, aptas para consumo humano sin tratamiento o con simple desinfección bacteriológica.
- **Clase B:** Aguas de utilidad general que requieren tratamiento físico y desinfección bacteriológica para consumo humano.
- **Clase C:** Aguas de utilidad general que requieren tratamiento físico-químico completo y desinfección bacteriológica para consumo humano.
- **Clase D:** Aguas de calidad mínima que, en casos de necesidad pública, pueden requerir un proceso de presedimentación y luego tratamiento físico-químico completo y desinfección bacteriológica para consumo humano.

1.1.8.2 Norma Boliviana 512

La Norma: “Agua Potable – Requisitos” NB 512, tiene por objeto establecer los valores máximos aceptables de los diferentes parámetros que determina la calidad de agua abastecida con destino al uso y consumo humano y las modalidades de aplicación y control. Esta norma se aplica a todas las aguas abastecidas con destino al uso y consumo humano. En la Norma NB 512 se han incluido requisitos químicos, orgánicos y microbiológicos en atención a necesidades actuales de control a nivel nacional (NB-512, 2015).

La NB 512 establece los parámetros que define si un agua es apta para consumo humano.

En atención a la Norma Boliviana NB 512, los parámetros de control de calidad del agua para consumo humano que debería realizarse, se agrupan de acuerdo a su factibilidad técnica y económica en los siguientes grupos: Control Mínimo, Control Básico, Control Complementario y Control Especial.

Parámetro de Control Mínimo: Los parámetros de control mínimo son aquellos que permiten caracterizar y evaluar la calidad del agua, dando una referencia inicial de su aptitud para consumo humano; se pueden determinar en campo con equipos portátiles. Los parámetros microbiológicos establecidos en esta categoría se realizan para determinar el riesgo de contaminación fecal en el agua (Hanna, 2018).

Tabla I-2: Parámetro de control mínimo

Parámetro	Valor máximo aceptable
pH	6.5-9
Conductividad	1.500μS/cm
Turbiedad	5 NTU
Cloro residual	0,2-1,0 mg/l
Coliformes termo resistentes	< 1 UFC/100 ml
<i>Escherichia coli</i>	< 1 UFC/100ml
	< 2 NMP/100ml

Fuente: (NB-512, 2015)

Parámetro de Control Básico: Los parámetros básicos caracterizan el agua y permiten evaluar variaciones de la calidad, de acuerdo a su concentración y valor detectado en los ensayos de laboratorio, en este grupo se encuentran principalmente aquellos elementos que, por su concentración, pueden considerarse mayoritarios (fundamentales) y minoritarios (secundarios), los cuales están presentes en aguas naturales, estos parámetros deben ser controlados por la EPSA (Hanna, 2018)

Tabla I-3: Parámetro de control básico

Parámetro	Valor máximo aceptable
Físico	
Color	15 UCV
Químico	
Sólidos totales disueltos	1.000 mg/l
Químicos inorgánicos	
Alcalinidad total	370,0 mg/l
Calcio	200,0 mg/l
Cloruros	250,0 mg/l
Dureza	500,0 mg/l
Hierro total	0,3 mg/l
Magnesio	150,0 mg/l
Manganeso	0,1 mg/l
Sodio	200,0 mg/l
Sulfatos	400,0 mg/l

Fuente: (NB-512, 2015).

1.1.9 Parámetro de calidad

1.1.9.1 Calidad del agua

La calidad del agua es “aquella que, por sus características organolépticas, físico-químicas, microbiológicas y radiológicas, se considera apta para el consumo humano y que cumple con lo establecido en la Norma Boliviana NB-512” (NB-512, 2005)

El control de calidad del agua es fundamental para garantizar que el agua que consumimos es segura y apta para el consumo humano. A través del control de calidad, se puede identificar y eliminar contaminantes nocivos presentes en el agua, como bacterias, virus, químicos tóxicos y metales pesados (Henry, s.f.).

La importancia del control de calidad del agua tiene un impacto directo en nuestra salud. El consumo de agua contaminada puede causar una serie de problemas de salud, desde enfermedades gastrointestinales hasta afecciones más graves como el cáncer. Por lo tanto, es vital que el agua pase por un riguroso proceso de control de calidad antes de ser suministrada para el consumo humano (Henry, s.f.).

Al aplicar un coagulante natural para tratar agua turbia, el presente estudio se centró en su efectividad en dicha agua, lo cual la calidad de agua se analiza en función de la característica física, mediante la reducción de turbidez y la formación de flóculos, como indicadores de la capacidad de desestabilización de partículas, esto se describe con datos numéricos en el capítulo III de este proyecto. Cabe recalcar que para su consumo de debe cumplir con la NB-512.

1.1.9.2 Parámetros del agua potable

El control de calidad del agua implica la evaluación de diversos parámetros que determinan si el agua es apta para consumo humano, riego, uso industrial o mantenimiento del ecosistema.

El agua debe cumplir con ciertos parámetros para garantizar su calidad, estos parámetros son indicadores de la composición organoléptica, física, química y biológica del agua.

Los parámetros más comunes se clasifican en cuatro categorías las cuales se muestra en la Tabla I-4.

Tabla I-4: Parámetros del agua potable

Parámetros	Definiciones	Determinación Analítica de los parámetros
Organoléptico	aquellos que se detectan sensorialmente (sabor, aspecto y olor) y que influyen en la aceptabilidad del agua	Color, Sabor y Olor
Físicos	son aquellas que miden las propiedades que influyen en la calidad del agua como la turbiedad, conductividad, sólidos totales y otras, resultante de la presencia de un número de constituyentes físicos.	Temperatura, pH, Turbidez, Conductividad y Sólidos totales
Químicos	Las químicas, son aquellas debidas a la presencia de elementos o compuestos químicos, orgánicos e inorgánicos, que en concentraciones mayores a lo establecido en la norma, pueden causar efectos nocivos a la salud	Alcalinidad, Dureza, Calcio, Magnesio, Cloruros, Sulfatos, Nitrato, Sodio, Hierro, Magnesio
Microbiológicos	Aquellos debidas a la presencia de bacterias y otros microorganismos (virus, parásitos u otros organismos) nocivos para la salud humana.	Coliformes totales, Coliformes termoresistentes, <i>Escherichia coli</i> , <i>Heterotróficas</i> totales, <i>Clostridium perfringens</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Cryptosporidium</i> sp., <i>Giardia</i> sp. Amebas

Fuente: Elaboración propia, adoptada de la NB 512.

En el presente trabajo se considerará únicamente el parámetro físico de turbidez como indicador principal de la eficiencia del coagulante natural en el tratamiento de agua turbia ya que la reducción de turbidez es una etapa fundamental dentro del proceso de potabilización, la cual permite la remoción de partículas suspendidas, mejorando el color del agua.

Como referencia normativa se considera la Norma Boliviana 512, la cual establece que la turbidez del agua potable debe encontrarse dentro de los límites permisibles para consumo humano, la cual el parámetro se encuentra en la tabla I-2.

1.2 Coagulante-floculante

Se llama coagulación-floculación al proceso por el cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas con peso específico superior al del agua llamadas floculo (Marin, 2017).

La coagulación-floculación es una técnica química de tratamiento del agua que se aplica, típicamente, antes de un proceso físico de separación que suele hacerse por sedimentación o filtración, con el fin de mejorar su capacidad de eliminación de partículas.

1.2.1 Tipo de coagulante-floculante

Los coagulantes son materiales químicos que se adicionan al agua para lograr la descarga de todas las partículas coloidales dando origen a la formación de medios más grandes (floculos), que se sedimentan más rápidamente (Calleja, 2022).

En tratamiento de agua, Kasandra Huerta menciona que consta de moléculas con cargas positivas que al añadirse al agua y mezclarse, logran la neutralización de las cargas presentes. Por lo general se usan coagulante inorgánico, orgánicos o una combinación de ambos para tratar el agua y eliminar solidos suspendidos.

1.2.1.1 Coagulante y floculante inorgánico

Los coagulantes/floculantes de origen metálico han sido los más empleados para el tratamiento de aguas residuales. Entre ello encontramos el sulfato de aluminio, sulfato férrico, sulfato ferroso, cloruro férrico y aluminato de sodio (Sergio, 2020). El más usado es:

- **Sulfato de Aluminio:** El sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) es una sustancia química importante en el tratamiento del agua y las aguas residuales. Se utiliza principalmente como precipitante para eliminar impurezas como sólidos en suspensión, sustancias orgánicas y fosfatos del agua. Debido a su aplicación versátil y a su alta eficacia, el sulfato de aluminio es indispensable en muchos procesos industriales, especialmente en el tratamiento de aguas, el tratamiento de aguas residuales y el tratamiento de agua potable (Haring, 2024).

Tabla I-5: Característica del sulfato de aluminio

Característica	Descripción
Fórmula Química	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (comúnmente encontrado en forma hidratada, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)
Apariencia	Sólido cristalino o granular, de color blanco.
Solubilidad	Muy soluble en agua.
pH en Solución	Ácido. Al disolverse, hidroliza y forma soluciones ácidas, lo que potencia su uso principal.
Uso Principal	Agente Coagulante/Floculante. El ion Al^{3+} neutraliza las cargas negativas de partículas suspendidas (turbidez, bacterias) en el agua, haciendo que se agrupen en "flóculos" para su fácil filtración o sedimentación.

Otros Usos	Fijador de colorantes en la industria textil, agente de apresto en la fabricación de papel, agente acidificante en jardinería.
------------	--

Fuente: (DQI S.A., s.f.). Nota: Adapta da la ficha técnica de Distribuidora de Químico Industriales S.A

Tabla I-6: Ventaja y desventaja del sulfato de aluminio en tratamiento de agua

Ventaja	Desventaja
Es uno de los coagulantes más económicos y se produce en grandes cantidades Amplio rango de aplicación	El sulfato de aluminio contiene componentes tóxicos que causan irritación en las membranas mucosas, como los ojos y el tracto respiratorio, y contamina los cuerpos de agua cuando se desechan incorrectamente (Aris, Quimico, 2025). Una de las principales desventajas es la contaminación por lodos. El manejo inadecuado de los lodos puede conducir a la acumulación de residuos de aluminio en el suelo, afectando su calidad y fertilidad (Vargas & Hernandez, 2007) Acidificación de Aguas: Su uso como coagulante puede reducir el pH del agua (acidificación). Si se dosifica incorrectamente, el agua tratada puede volverse corrosiva para las tuberías, lo que puede aumentar la disolución de otros metales pesados en el agua potable (Oduque, Lima, Oliveira, & Araujo, 2024)

Fuente: Elaboración propia, 2025.

1.2.1.2 Coagulante y floculante artificiales

Son aditivos líquidos con carácter orgánico e inorgánico. Demuestran una alta eficiencia coagulante, mayor que otros coagulantes inorgánicos como el cloruro férrico, el sulfato de aluminio o el policloruro de aluminio (Adintus, 2025).

1.2.1.3 Coagulante y floculante naturales

Son una fuente alternativa que los nativos han empleado en varios países del mundo para el tratamiento del agua. Se generan por reacciones espontáneas producidas en animales y plantas, producto de su metabolismo o de las reacciones bioquímicas que ellos producen. Un aspecto importante es que presentan baja toxicidad y pueden ser empleados como agentes coagulantes y floculantes, debido a que aglutinan las partículas que se encuentran suspendidas en el agua, facilitando su sedimentación y posterior remoción (Murillo, 2020).

➤ Coagulante y floculante de origen animal

Dentro de los metabolitos procedentes de los animales, el quitosán, un producto derivado del exoesqueleto de caracoles y cangrejos, se ha empleado como coagulante y floculante. Según Ramírez-Arcila & Jaramillo-Peralta (2015), el quitosán se ha empleado ampliamente en aguas provenientes de la industria y en menor medida en el tratamiento de aguas para potabilización. El porcentaje de remoción de la turbidez que se ha alcanzado con esta sustancia es del 98% en pruebas de laboratorio y a bajas concentraciones de turbidez (< 90 UNT) (Sergio, 2020).

➤ Coagulante y floculante de origen orgánico

Entre los coagulantes naturales están los de origen orgánico que se encuentran en ciertas plantas. Por lo general presentan una mínima o nula toxicidad, en muchos casos son productos de alimentación, con alto contenido en carbohidratos y proteínas. Los diversos tipos de coagulante son la penca de tuna (*Opuntia ficus indica*), las más antiguas son la ferriña obtenida de la planta conocida como mandioca o yuca (*Manihot esculenta*) incluyen semillas de polvo, el polvo de papa de durazno (*Prunus pérsica*), el haba (*Vicia faba*), y árbol de la lluvia es una especie botánica de árbol (*Samanea saman*). También

tiene una alta efectividad para agua con una baja turbidez, ya que presentan buena eficiencia en aguas industriales (Gonzales, 2020), así mismo a partir de la cáscar de plátano (Ortega L. , 2020), semilla de moringa ((Mendieta, 2023)

En el capítulo II de la parte experimental se usó como materia prima el nopal de tuna para la obtención de un coagulante, esta materia prima es un recurso abundante en Bolivia, lo cual garantiza su disponibilidad local, así mismo esta contiene mucilago rico en polisacáridos con propiedades de floculante al facilitar la aglomeración de partículas suspendidas que pueden reducir la turbidez del agua, ofreciendo una alternativa ecológica frente a coagulante químicos como el sulfato de aluminio. Además en la ciudad de Tarija no se hicieron estudios sobre la aplicación de coagulantes naturales, siendo también uno de los motivos de la presente investigación contribuyendo al aprovechamiento sostenible de recursos vegetales locales, promoviendo soluciones accesibles para el tratamiento de agua en zonas rurales de Tarija.

1.2.2 Mecanismo de coagulación/floculación

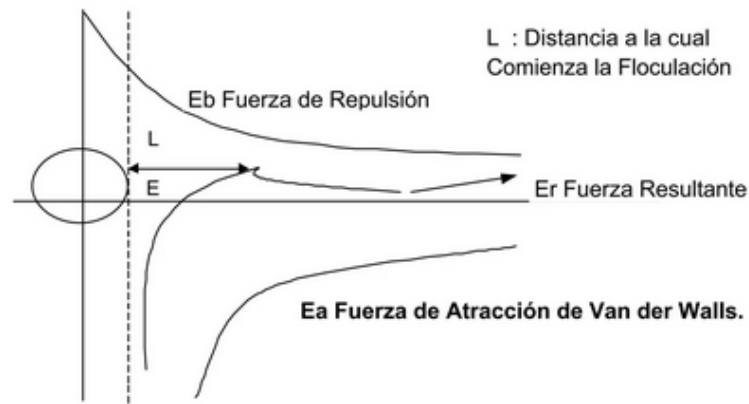
La desestabilización se logra mediante las siguientes etapas:

a. Compresión de la doble capa

Cuando dos partículas similares se aproximan, sus capas interactúan y ocasionan fuerzas de repulsión que están en función de la distancia que las separa y generan un descenso debido al aumento de iones de carga diferente a la de la partícula, eso solo se genera con los iones del coagulante.

De igual manera existen fuerzas de atracción entre las partículas, llamadas fuerza de Van der Waals, que depende de la densidad y de los átomos presentes en las partículas.

Figura I-10: *Fuerza de atracción y repulsión*



Fuente: (Leon D. , 2015)

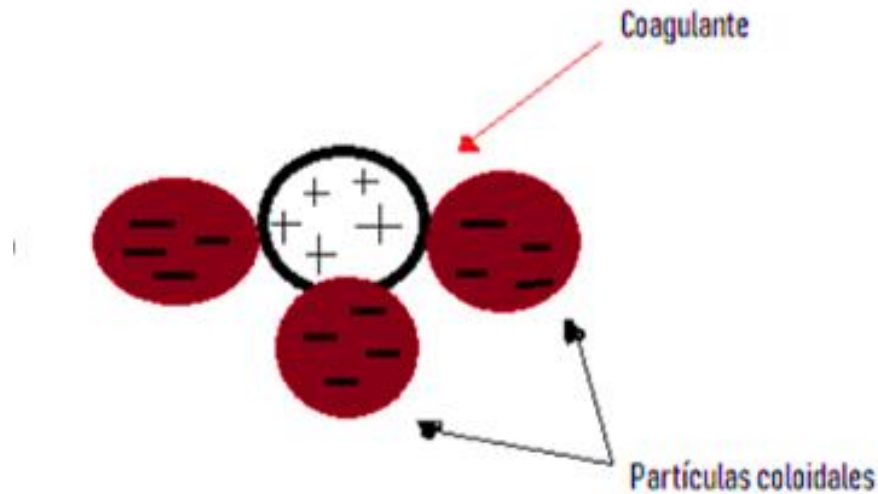
b. Neutralización y adsorción de carga

En la superficie de las partículas coloidales se encuentran cargas negativas que son llamadas primarias y los iones positivos se ubican en la solución de agua, estas dos cargas se atraen formando la primera capa adherida al coloide.

Luego de la teoría de la doble capa; la coagulación se considera como la anulación del potencial obtenido a causa de la adición de productos que generan la coagulación-floculación. La fuerza natural de mezcla debido al movimiento browniano no es lo suficiente, es por eso que se requiere una energía que complemente la acción, en este caso se podría considerar la agitación hidráulica o mecánica.

La reestabilización de la carga de una partícula es causada por el exceso de coagulante en el agua, generando una carga contraria al original, debido a que la partícula absorbe el coagulante en su superficie.

Figura I-11: *Neutralización y adsorción de carga*

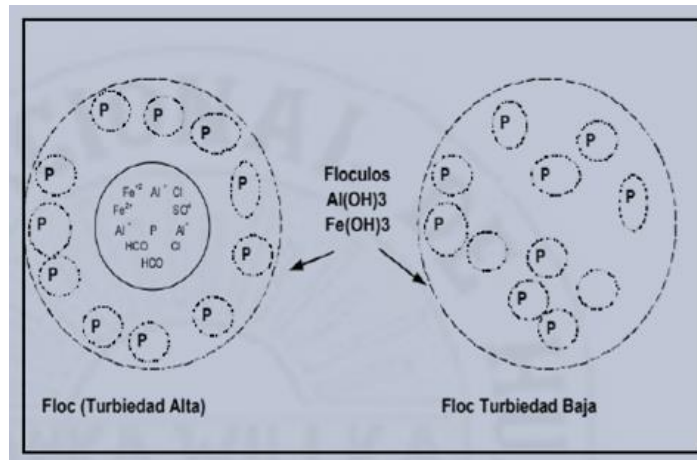


Fuente: (Ceron, 2016).

c. Atrapamiento de partícula en un precipitado

En el interior de un floc se pueden quedar atrapadas las partículas coloidales desestabilizadas, eso sucede al aumentar una cantidad suficiente de coagulantes, comúnmente es el Cloruro Férrico (FeCl_3) o sulfato de aluminio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, es por eso que el floc está conformado por moléculas de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ y $\text{Al}(\text{OH})_3$.

Las partículas coloidales en la formación de flóculos juegan el rol de anillo y con la presencia de ciertos aniones hacen que la formación del precipitado se acelere, este proceso puede generar una relación inversa entre el coagulante requerido y la turbiedad. Es decir, una gran cantidad de partículas en suspensión puede requerir una cantidad menor de coagulante.

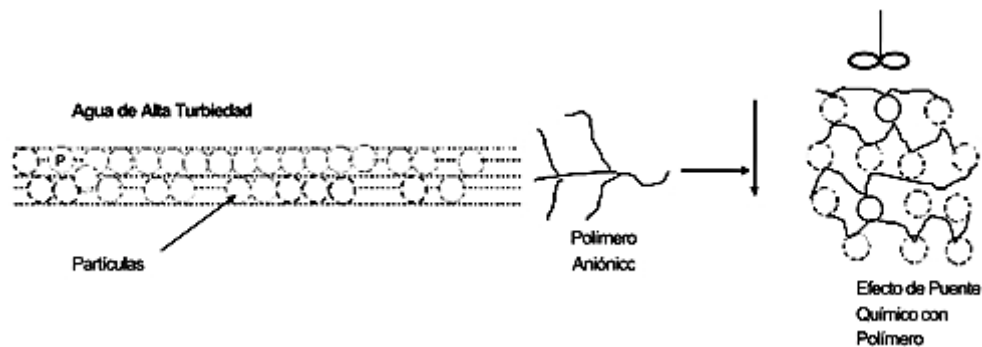
Figura I-12: *Atrapamiento de partícula*

Fuente: (Andia, 2000)

d. Adsorción y puente

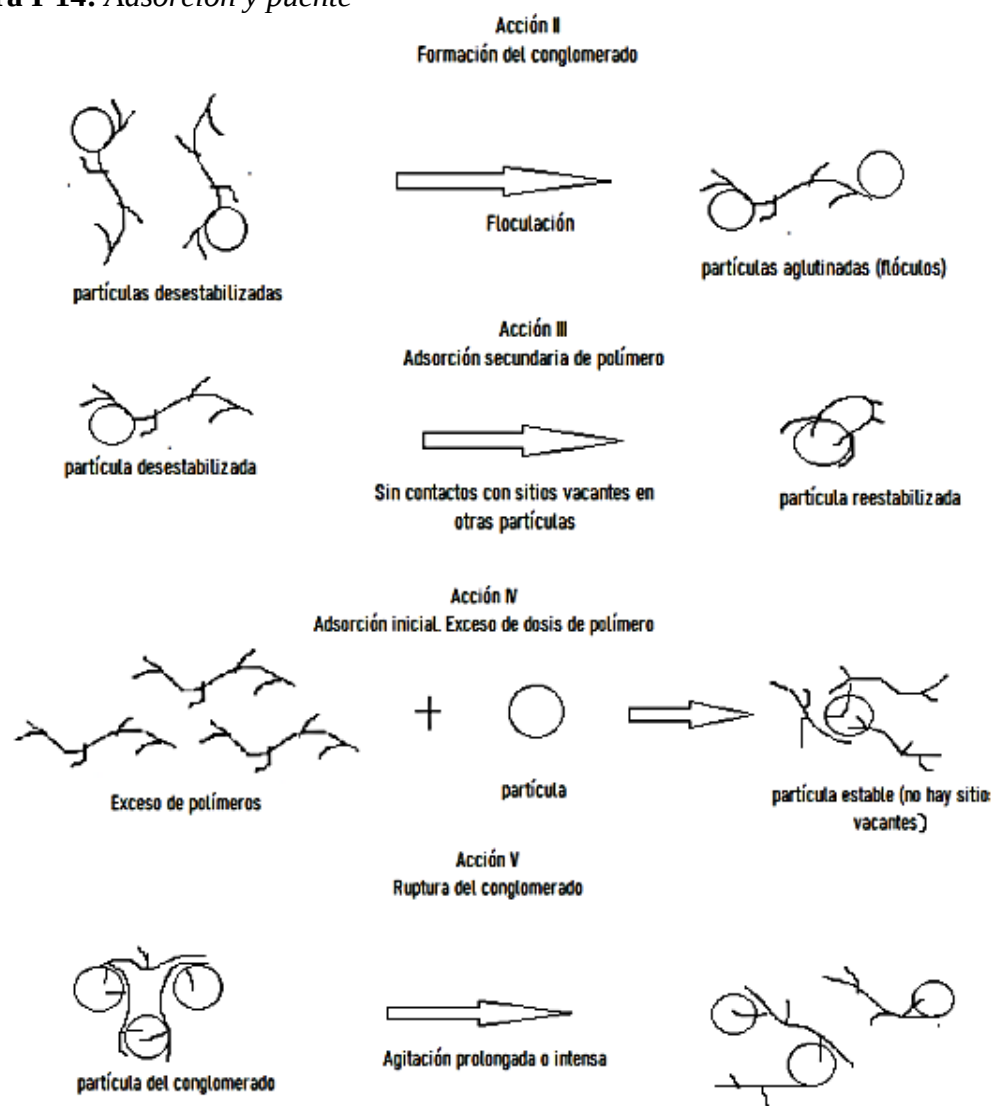
En cualquier caso, se obtiene el tratamiento más económico utilizando un polímero aniónico, cuando las partículas están cargadas negativamente. Este fenómeno es explicado por la teoría “puente”. Las moléculas del polímero muy largas contienen grupos químicos que pueden absorber las partículas coloidales. Las moléculas de polímeros pueden así absorber una partícula coloidal en una de sus extremidades, mientras que los otros sitios son libres para absorber otras partículas.

Por eso se dice que las moléculas de los polímeros forman el “puente” entre las partículas coloidales. Esto puede tener una reestabilización de la suspensión, por una excesiva carga de polímeros.

Figura I-13: *Efecto de puente de las partículas en suspensión*

Fuente: (Andia, 2000)

Figura I-14: Adsorción y puente



Fuente: (Ceron, 2016)

1.3 Métodos de obtención de coagulante de penca de tuna (Nopal)

Los coagulantes naturales son de origen orgánico, principalmente proteínas o polisacáridos extraídos de plantas, algas, microorganismos o subproductos animales, que actúan aglomerando partículas en suspensión en el agua.

1.3.1 Método de Extracción Térmica y precipitación con solvente

Es una técnica que se utiliza para separar compuestos de un sólido o líquido, aprovechando la solubilidad de estos compuestos en agua y acelerando el proceso mediante la aplicación de calor.

Mayte Sheila Nieto propone el siguiente método: Lavar la M.P. y quitar las espinas de las hojas de nopal a emplear, pelar y cortar las hojas de nopal, seguidamente se somete a la extracción de mucílago la cual se pesará hojas de nopal por cada tratamiento a diferentes proporciones de agua destilada, luego mezclar y licuar cada muestra. Posteriormente filtrar para separar la fase acuosa de la sólida. Seguidamente las muestras se someten a un centrifugado, después de obtener el coagulante se pasa a centrifugación; esto más que todo para disminuir el porcentaje de alcohol a emplear. Luego el mucílago obtenido pasará por una estufa; asimismo, la muestra extraída será molida hasta obtener el coagulante en polvo deseado.

Figura I-15: *Extracción térmica*



Fuente: Adaptada de Químico Company por Valeria, s.f.

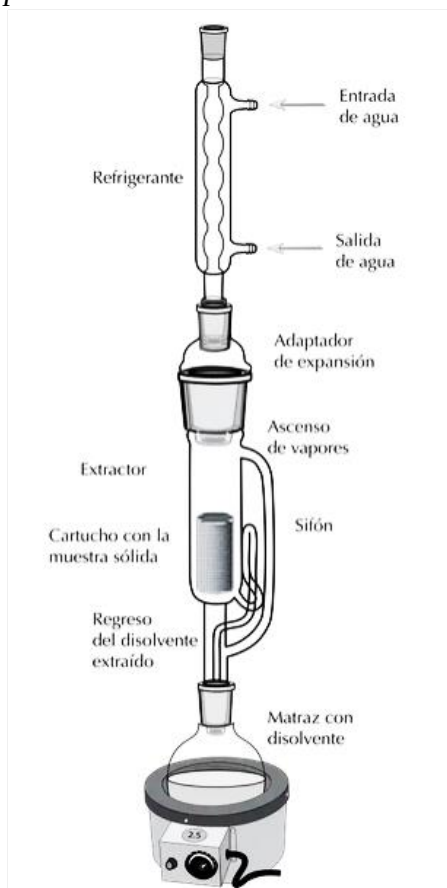
<https://quimicompany.com.co/tienda/agitador-magnetico-con-calentamiento-500-c/>

1.3.2 Método de extracción sólido-líquido por Soxhlet

El método consiste en poner en contacto íntimo el sólido que contiene el componente a extraer (el soluto) con un disolvente líquido. El disolvente penetra en la matriz sólida, disuelve el soluto y lo transporta fuera del sólido, creando una solución (extracto) y el material sólido restante que ya no contiene o contiene muy poco del soluto, se conoce como refinado o residuo.

Yurley Meza y Karen López (Lopez, s.f.) propone este método, para lo cual se usa el tallo de la planta, al que se le aplican ciertos procedimientos como; lavado con agua de grifo, retiro de espinas y corteza, corte en trozos de tamaño adecuado, secado, triturado manual y tamizado. Por otra parte, cabe mencionar que después de los anteriores pasos, llevaron a cabo la extracción Soxhlet, para la extracción de pigmentos del material. Finalmente, se tomaron en cuenta los últimos dos pasos, correspondientes a: secado del material, eliminando la humedad del mismo para evitar cambios en sus características y almacenamiento en recipientes adecuados para posteriores pruebas de laboratorio.

Figura I-16: *Extracción por Soxhlet*



Fuente: Adaptada de Química: Extracción Soxhlet, por J.A. Dobado, 2020, <https://www.dequimica.info/extraccion-solido-liquido/>

1.3.3 Método de maceración artesanal

El método de maceración es un método tradicional que se basa en la simple acción de sumergir un sólido (plantas, frutas o especias) en un líquido disolvente (como agua, alcohol, aceite o vinagre) durante un periodo de tiempo. El objetivo es permitir que los componentes solubles del sólido se disuelvan gradualmente en el líquido.

En el capítulo II, pág. 60 se muestra la selección del método de obtención del coagulante natural de Nopal, también llamada penca de tuna, la cual se realizará una matriz de selección mediante el método de factores ponderados.

1.3.4 Variables que afectan en el rendimiento del coagulante

Diversas investigaciones determinan que los parámetros de tiempo y temperatura en el proceso de extracción son elementos fundamentales para alcanzar mayor rendimiento de coagulante, sin embargo, se debe tener cuidado ya que la extracción se realiza a altas temperaturas y tiempo se tendrá una degradación del coagulante.

Sepúlveda, (2006) en su trabajo de extracción de mucilage las condiciones son Nopal;Agua (1:5 -1:7), Temperatura de 40-16°C y tiempo de 4 – 8h, donde obtuvieron un rendimiento de 1,51% .

(Weirong Cai, 2008) con su tema de “Extraction, purification, and characterization of the polysaccharides from *Opuntia milpa alta*” considera los factores de N:A (1/2 – 1/3 – 1/4), Temperatura de 70°C – 80°C –90°C y un tiempo de 2h, 3h y 4h, en la cual obtuvo un rendimiento de 0.694%.

(Karen Paola Contreras Lozano, 2015) En su trabajo de obtención de coagulante menciona la condición de 1:2 (p/v) a una temperatura de 50 °C durante una hora.

En la parte experimental del capítulo II se presentan las variables seleccionadas aplicadas al proceso de obtención de coagulante de Nopal de Tuna.

1.3.5 Solventes para obtener el coagulante (mucílago)

El coagulante es extraído comúnmente en presencia de agua, siendo este el solvente más utilizado, otro solvente como el etanol, alcohol isopropilico y acetona, también han sido utilizados en la precipitación (Velazquez, Fuentes, Zegbe, & Zapien, 2024)

Mounir, 2014, aplica como solvente insoluble el etanol al 96% y acetona, Rodriguez,2014 usa una relación de mucílago/etanol de 1:4 (v/v). Maite Nieto, aplica el etanol como solvente para separar el coagulante del agua.

Tabla I-7 Ventaja y desventaja de solventes insoluble con el coagulante

Solventes	Desventaja	Ventaja
Etanol 96%	-Evapora rápido	– Eficiente en la extracción – Baja toxicidad – Accesible – Amigable con el medio ambiente
Alcohol isopropílico	– Elevado costo – Evapora rápido	– Eficiente en la extracción – Accesible – Amigable con el medio ambiente
Acetona	– Sustancia Controlada – Precio elevado	– Buen rendimiento – Eficiente en la extracción

Fuente: (Muthusamy, 2024), (Karnik, 2023)

En el proceso de obtención del coagulante de nopal se utilizará etanol al 96%, debido a las ventajas que se muestran en la tabla I-7, como ser su accesibilidad y baja toxicidad así mismo cuenta con un bajo costo respecto a los otros dos alcoholes.

1.4 Factores que influyen en la coagulación

La coagulación es un proceso crucial en el tratamiento del agua que busca desestabilizar las partículas suspendidas y coloidales, permitiendo que se agrupen y formen flóculos más grandes que puedan ser eliminados por sedimentación o filtración. Varios factores influyen significativamente en la eficiencia de este proceso, los cuales son:

pH del agua: El pH es la variable más importante a tener en cuenta al momento de la coagulación, para cada agua existe un rango de pH óptimo para la cual la coagulación tiene lugar rápidamente, ello depende de la naturaleza de los iones y de la alcalinidad del agua. El rango de pH es función del tipo de coagulante a ser utilizado y de la naturaleza del agua a tratar; si la coagulación se realiza fuera del rango de pH óptimo entonces se debe aumentar la calidad del coagulante; por lo tanto, la dosis requerida es alta. (Casas, 2017).

El rango de pH es función del tipo de coagulante a ser utilizado y de la naturaleza del agua a tratar; si la coagulación se realiza fuera del rango de pH óptimo, entonces se debe aumentar la cantidad del coagulante, es decir, la dosis requerida será alta.

Turbidez:

Las partículas suspendidas (materia orgánica, algas, bacterias, turbidez) en el agua a tratar influyen directamente en la cantidad de coagulante necesaria. Las aguas con mayor turbidez pueden requerir mayores dosis o una combinación de coagulantes y la presencia de ciertos iones o sustancias disueltas puede afectar la eficiencia del coagulante (Acevedo & Human, 2021).

Dosis de coagulante: Mediante la prueba de jarras se puede determinar la cantidad óptima, el exceso produce una inversión del potencial zeta, actuando de manera contraria a lo que se observa inicialmente (Acevedo & Human, 2021).

La cantidad de coagulante a añadir debe ser la justa. Una dosis insuficiente no logrará la desestabilización completa, por esa razón la prueba de jarra es una herramienta esencial para determinar la dosis.

Temperatura de agua: la variación de 1°C en la temperatura del agua conduce a la formación de corrientes de densidad (variación de la densidad del agua), esto afecta a la energía cinética de las partículas en suspensión, por lo que la coagulación se hace más lenta; temperaturas muy elevadas desfavorecen igualmente a la coagulación. Una disminución de la temperatura del agua en una unidad de decantación conlleva a un aumento de su viscosidad; esto explica

las dificultades de la sedimentación de un flóc. (Leon A. D., 2015).

Mezclado: El grado de agitación que se da a la masa de agua durante la adición del coagulante, determina si la coagulación es completa; turbulencia desigual hacen que ciertas porción de agua tenga mayor concentración de coagulantes y la otra parte tenga poco o casi nada; la agitación debe ser uniforme e intensa en toda la masa de agua, para asegurar que la mezcla entre el agua y el coagulante haya sido bien hecha y que se haya producido la reacción química de neutralización de cargas correspondiente (Casas, 2017).

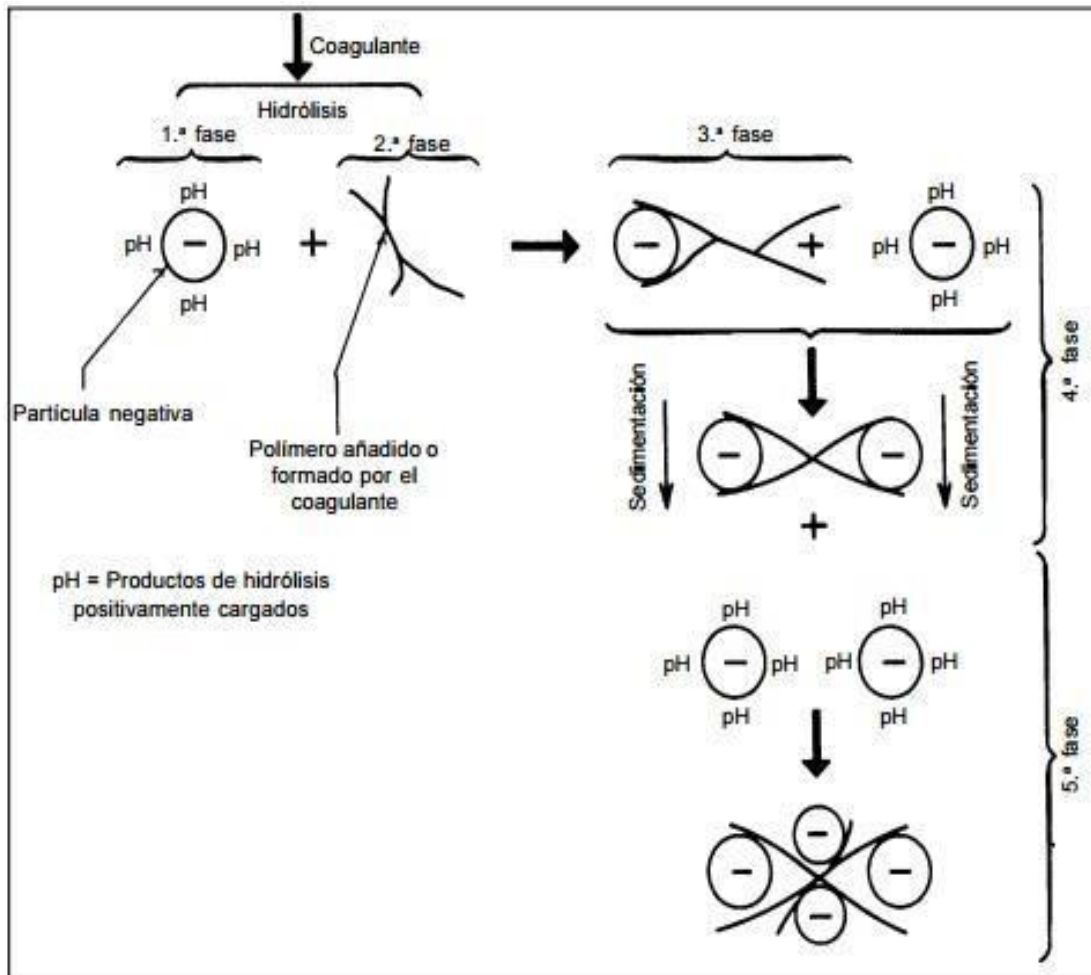
Un mezclado rápido e intenso justo después de la adición del coagulante para asegurar su dispersión homogénea y en contacto íntimo con las partículas, lo cual permite una desestabilización eficiente y formación de microfoculos iniciales y una mezcla lenta (floculación) permite que los microfoculos choque entre sí y crezcan, formando floculos más grandes y densos que puedan sedimentar. Una agitación inadecuada puede afectar la formación de floculos.

1.4.1 Fase de la coagulación

El proceso de coagulación se presenta en las siguientes etapas. (Fig.I-17):

- Hidrólisis de los coagulantes y desestabilización de las partículas en suspensión.
- Formación de compuestos químicos poliméricos.
- Adsorción de cadenas poliméricas por los coloides.
- Adsorción mutua de coloides.
- Acción de barrido.

Figura I-17: Proceso de coagulación



Fuente: (Enriquez & Jadan, 2016)

Se presentan dos tipos básicos de coagulación, los cuales son:

Coagulación por Adsorción: Se presenta cuando el coagulante es adicionado al agua turbia, los productos solubles de los coagulantes son absorbidos por los coloides y forman los floculos en forma casi instantánea (Andia, 2000).

Coagulación por Barrido: Este tipo de coagulación se presenta cuando el agua es clara (presenta baja turbiedad) y la cantidad de partículas coloides es pequeña; en este caso las partículas son entrampadas al producirse una sobresaturación de precipitado de sulfato de aluminio o cloruro férrico (Andia, 2000).

1.5 Nopal de Tuna

El Nopal es una especie herbácea arborescente, arbustiva o rastrera, con forma simple o de matorral. No requiere tierra de gran calidad, puede crecer en terrenos poco fértiles y de escasa humedad y puede vivir hasta 80 años. Dadas las características morfológicas y fisiológicas que presenta esta planta, le permite soportar condiciones ambientales desde escasa precipitación hasta altas y bajas temperaturas. Los cladodios, tallos del nopal, también conocidos como palas o pencas, son articulados aplanados y con tejidos carnosos; en el centro de la penca se encuentra una red bilateral del tejido celulósico que con el transcurso del tiempo se endurece, dándole a ésta una constitución rígida; la forma y el grosor de las pencas es variable, así como su color, el mismo que varía del verde claro hasta el gris o ceniza, según la edad de la planta. Se sabe que esta planta no necesita mayores cuidados en su cultivo; los tunales pertenecen al núcleo de cultivos del futuro que han comenzado a despertar de su desértico letargo (Loayza, 2007).

La penca de tuna es una especie que alcanza gran porte, puede crecer hasta 12 m de alto. Presenta un tronco principal grueso y leñoso. Se caracteriza por la presencia de frutos ovoides, lisos de color verde aun cuando estén maduros. Sus flores son verdosas rosadas no mayores de 10 cm de largo. Ramas con ondulaciones longitudinales, con 8 a 20 costillas. (Galves, Ortega, & Yesid, s.f.)

1.5.1 Origen y distribución

El nopal es originario del continente americano; se le encuentra distribuido desde el Canadá hasta la Argentina y preferentemente en todas las zonas áridas y semiáridas

Esta planta se encuentra incluida dentro del género de las Cactáceas, que se distribuyen por toda América tropical y la región mediterránea. Existen varias especies americanas que se desarrollan favorablemente en lugares cálidos,

semicálidos y desérticos, tales como “*O. ficus indica*, *O. amyclae*, *O. megacantha* y *O. streptacantha*”.

La tuna es una especie originaria de América. Ha sido aprovechada en un primer momento por culturas tecnológicamente avanzadas en la agropecuaria como lo son las civilizaciones Inca y Azteca. Por otra parte, se sabe que la planta de tuna (*Opuntia ficus-indica*) es originaria del Perú, Bolivia, como también de las planicies de México, desde las cuales se han llevado su cultivo al resto del mundo. (Loun, 2015).

1.5.1.1 Plantación de nopal en Bolivia

El nopal es bien conocido en Bolivia, donde se utiliza como alimentos de ganado, cercos, producción de tuna, medicinas naturales, así mismo como investigación. La producción se concentra en Cochabamba, Chuquisaca, Sucre, o Tarija y La Paz, en áreas con 350-640 mm de lluvia y a altitudes de 1500 a 3000m (ONUyA, 2018).

Opuntia spp., se encuentra distribuida en su mayoría en la zona de los valles interandinos de Bolivia, se hace notar que esta especie tiene un rango de adaptación significativo, ya que en la colecta de variedad de tuna realizados por el proyecto, se encontraron diferentes tipos de tuna en zonas contrastantes tan altas como Tecoya (3319 msnm) en Potosí y zonas tan bajas como Yacuiba (577msnm) en Tarija. (Campos, Lazarte, et al, 2016)

Figura I-18: *Plantación de Nopal en Bolivia*



Fuente: (Campos, Lazarte, et al, 2016)

1.5.2 Variedad de penca de tuna (Nopal)

Las características de estas especies son variables, diferenciándose en la forma de los cladodios, en la presencia o ausencia de espinas, en el tamaño y color de los frutos y en otras características botánicas. Se conocen casi 300 especies del género *Opuntia* entre ellas se encuentran, como especies cultivadas para producción de fruta: *Opuntia ficus-indica*, *O. amyclaea*, *O. xocnostle*, *O. megacantha* y *O. streptacantha*. Como especies silvestres: *Opuntia hyptiacantha*, *O. leucotricha* y *O. robusta*. De las especies citadas, la más ampliamente cultivada en distintas partes del mundo es *Opuntia ficus indica* (Paucara, 2017).

Entre las variedades de la penca de tuna como materia prima se utilizó la especie *Opuntias ficus indica*, en Bolivia es conocida como tuna (el fruto) y la planta como penca, es la especie más cultivada y estudiada, además diversos estudios han reportado

que *Opuntia ficus-indica* presenta un alto contenido de mucílago rico en polisacáridos en sus cladodios, lo que le confiere propiedades coagulante- floculantes de interés en el tratamiento del agua (Saenz, Sepulveda, & Matsuhira, 2004) (Medina-Torres et al., 2000).

Tabla I-8: Taxonomía de penca de tuna

Reino	Vegetal
Phylum	Teleomorphytae
División	Tracheomorphytae
Subdivisión	Anthomorphytae
Clase	Angiospermae
Subclase	Dicotyledoneae
Grado Evolutivo	Archichlamydeae
Grupo de Órdenes	Corolinos
Orden	Oppunciales
Familia	Cactaceae
Nombre científico	<i>Opuntia ficus indica</i> (L.) Mill
Nombre común	Penca-de tuna

Fuente: Ing. M.Sc. Ismael Acosta Galarza, 2025

1.5.3 Morfología

1.5.3.1 Raíz

Por su origen, derivan de la radícula, aunque en ocasiones puede estimularse el desarrollo de raíz a partir del tallo.

Por su forma, son raíces típicas o pivotantes con ejes primarios que sirven para fijar a la planta. Generalmente son gruesas, pero no suculentas; de tamaño y ancho variables; en general, su tamaño es proporcional al tamaño del tallo o de la parte aérea. Por su duración es permanente. Otras características de la raíz son la ausencia de pelos absorbentes mientras el medio edáfico (suelo) se encuentre con escasa humedad. En cambio, cuando existe agua disponible, se estimula el desarrollo y la velocidad de absorción de agua y nutrientes se torna sorprendentemente alta (Espino & Tingal, 2012).

1.5.3.2 Hojas

Son pequeñas de menos de 10 mm, cilíndricas, y caducas, en forma de cuernitos; herbáceas, en cuyas axilas se hallan las areolas de las cuales brotan las espinas. Las hojas desaparecen completamente al alcanzar la penca cierto grado de desarrollo, o sea en unos cuantos días, en cuyo lugar quedan las espinas. (Espino & Tingal, 2012).

1.5.3.3 Flores

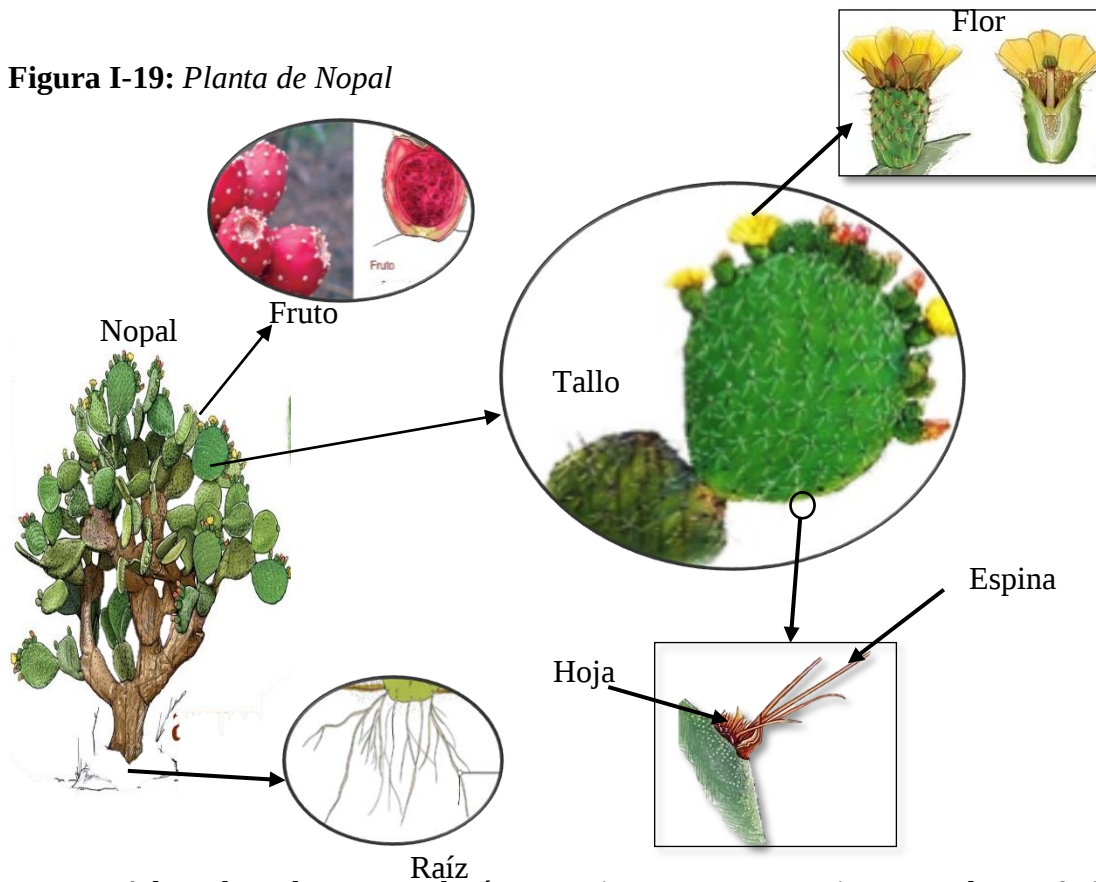
Son hermafroditas, solitarias y sésiles. Presentan una longitud de 6 a 7 cm y se desarrollan preferentemente en la parte apical del margen superior de las paletas. Presentan ovario ínfero y numerosos estambres (más cortos que los pétalos y el pistilo). Sus pétalos son de colores vivos: amarillo, anaranjado, rojo, rosa, blancas, entre otros colores, mientras que los sépalos son de color amarillo claro a rojizo o blanco. Son de antesis diurna y puede haber hasta 25 flores por paleta. Las flores abren a los 35-45 días desde su brote y aparecen después de seis meses (Espino & Tingal, 2012).

1.5.3.4 Frutos

Es una falsa baya con ovario ínfero, uniloculado y carnosos, en que la cáscara corresponde a la envoltura del ovario y la pulpa corresponde al lóculo desarrollado. La forma y tamaño de los frutos encontrados son variables (los hay ovoides, redondos,

elípticos y oblongos, con los extremos aplanados, cóncavos o convexos) aunque en promedio presentan 7-9 cm de largo, 5-6 cm de diámetro y 8-14 g de peso. se encontró frutos de color: cáscaras de colores verdes, amarillos, púrpura, rojos, anaranjados, y con pulpas, de los mismos colores; correspondiente a las variedades: blanca, amarilla, morada y colorada. La epidermis de los frutos es similar a la de las paletas, con areolas y espinas abundantes. La cáscara de los frutos varía en grosor, siendo también variable la cantidad de pulpa entre las variedades. La pulpa presenta semillas de 4-4.5 mm de longitud. Los frutos presentan semillas abortivas, lo que aumenta la proporción de pulpa comestible. (Espino & Tingal, 2012).

Figura I-19: *Planta de Nopal*



Nota: Adaptada de arqueología mexicana por Enrique Vela, 2016, <https://arqueologiamexicana.mx/mexico-antiguo/las-partes-del-nopal>

1.5.3.5 Tallo (Cladodio)

Es un tallo plano, carnoso y verde que almacena agua y hace fotosíntesis. Los tallos se lignifican con el tiempo y pueden llegar a transformarse en verdaderos tallos leñosos, agrietados, de color ocre blancuzco a grisáceo. Tiene de 3 a 5 m de alto, el tronco es de 50cm de diámetro aproximadamente (Espino & Tingal, 2012).

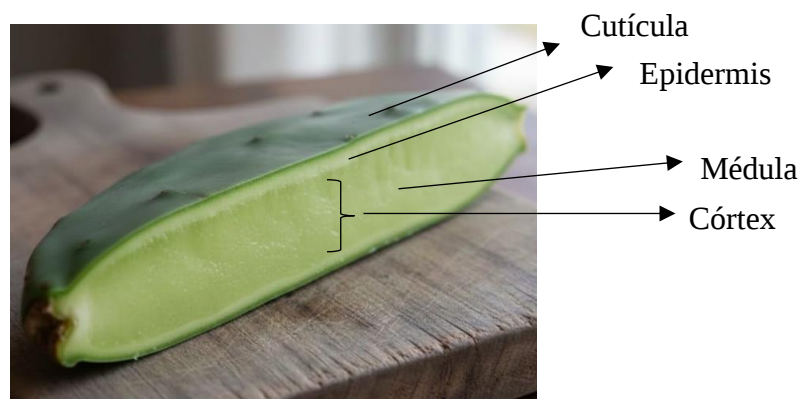
En la parte experimental se utiliza el tallo (cladodio) por el contenido de mucílago rico en polisacáridos, lo que le confiere propiedades coagulantes-floculantes de interés en el tratamiento del agua.

Figura I-20: *Cladodio*



Fuente; Elaboración propia, 2025.

Figura I-21: *Corte transversal del cladodio*



Fuente: Elaboración Propia, 2025.

El cladodio está formado por epidermis, córtex, tejido vascular, en un anillo y organizado en grupos de vasos vasculares separados por tejido de parénquima y médula, la cual forma la mayor parte del tejido.

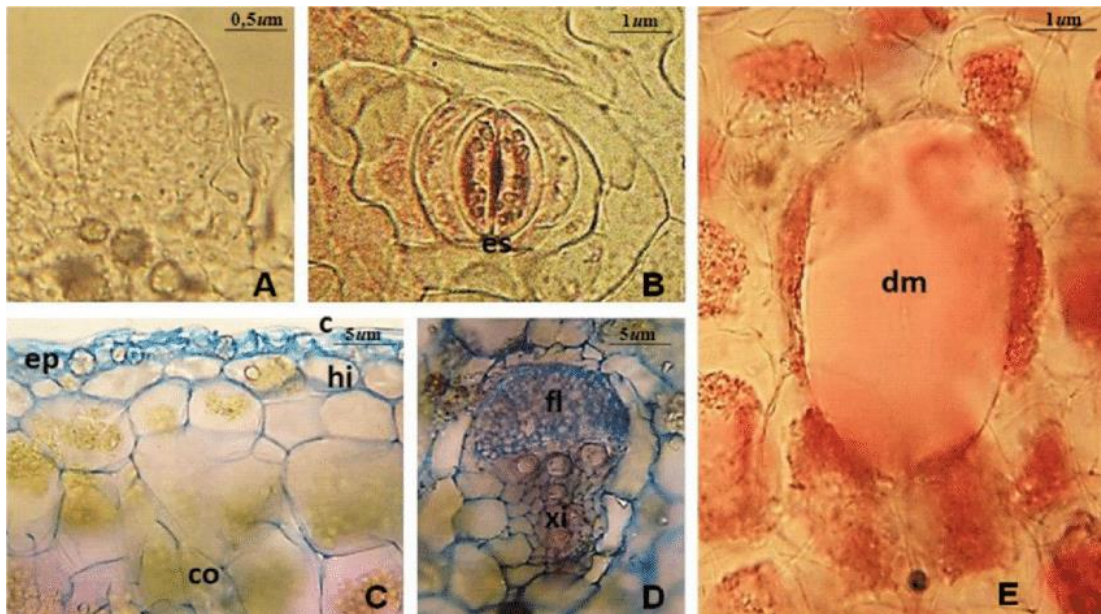
Epidermis: consiste en una capa de células epidermales y 6-7 capas de células hipodermales. La epidermis e hipodermis proveen una barrera efectiva que previene el daño físico y mantiene la integridad mecánica. La epidermis permanece intacta por largo tiempo hasta que eventualmente es reemplazada por corteza (peridermo). El peridermo está formado por células epidermales, La epidermis tiene tres funciones principales:

- Regular la entrada de dióxido de carbono (CO_2) y la salida de oxígeno de la planta
- Retener el agua dentro del cuerpo de la planta
- Proteger la planta de los hongos, insectos y luz solar intensa

Córtex: tienen un córtex interior grueso, con células en empalizada con clorofila cubriendo un córtex interior de células incoloras o casi incoloras. En Opuntia la hipodermis se ubica debajo del clorénquima, el cual constituye el tejido intermedio entre la hipodermis y el anillo de haces vasculares. El clorénquima es grueso y succulento y consiste de un córtex primario, formado por una masa más o menos homogénea de células parenquimatosas. Posee clorofila en la parte exterior y está colocado en hileras radiales largas que forman un clorénquima. La parte interior es blanca y está formada de células parenquimatosas esferoidales, similares a las del mesófilo esponjoso.

La médula: La médula es el corazón del cladodio y comparte características con el córtex interno. Está formada por células parenquimatosas esferoidales de paredes delgadas. En la zona perimedular, presenta "traqueidas bandeadas anchas", un tipo de célula de soporte que normalmente se asocia más a la madera que a un tejido blando.

Figura I-22: Anatomía del Cladodio *Opuntias ficus-indica* L.



Nota: Anatomía de cladodio de Opuntia. A sección transversal del cladodio en formación de la región meristemática del tallo. B, Sección paradérmica que muestra un estoma paralelocítico con una gran cantidad de cloroplastos en sus células oclusivas. C, Sección transversal evidenciando la epidermis y córtex clorofilado. D, Sección transversal de la región de la arteria vascular. E, Corte transversal de córtex donde se encuentra el ducto de mucilaginoso (es – estômato paralelocítico; ep – epidermis; c – cutícula; hi – hipodermis; co – córtex; fl – floema; xi – xilema; dm – ducto de mucilaginoso.)

1.5.4 El mucilago *Opuntias ficus indica*

Mucilago: Todos los cladodios planos tienen canales amplios (660-3000 mm) llenos de células mucilaginosas flotando libremente en el mucilago extracelular, desconectadas de las lamellas internas. Los canales están cubiertos de un epitelio multicapa. Los canales de células mucilaginosas se ubican justo afuera del floema primario, que se hace más amplio conforme las células del epitelio se separan y flotan en el lumen. El tejido verde (clorénquima) y el blanco (parénquima) presentan idioblastos, llenos de mucílago con cristales

más pequeños que los de las células epidémicas. Mientras que las partes verdes contienen cloroplastos cuya función es la fotosíntesis, el tejido blanco simplemente es un almacén de agua. Se compone de tejido parenquimatoso homogéneo, con pequeños espacios intercelulares. Empezando con dictiosomas muy activos que producen pequeños sacos o “vesículas” laterales de mucílago, esta sustancia mucilagínosa se deposita fuera del citoplasma conforme aumenta su cantidad. Posteriormente, el citoplasma muere y se deterioran los organelos dejando únicamente el mucílago donde antes había una célula viva. Las células mucilaginosas están presentes en todos los tejidos, hipodérmico, cortical, vascular y medular. El mucílago es muy resbaloso, complejo y está formado de carbohidratos no digeribles.

El mucílago proveniente del *Opuntia* se considera un hidrocoloide natural ya que, tal como las gomas comerciales Carragenina y goma Guar, tiene su origen en extractos de plantas. Es una sustancia gomosa, espesa y proporciona al cactus la capacidad natural de almacenar grandes cantidades de agua. Al momento de entrar en contacto con el agua, el mucílago se hincha, presentando propiedades tensioactivas similares a diversas gomas naturales, dándole al mucílago una habilidad para precipitar partículas y iones de soluciones acuosas.

1.5.4.1 Componente coagulante del Nopal

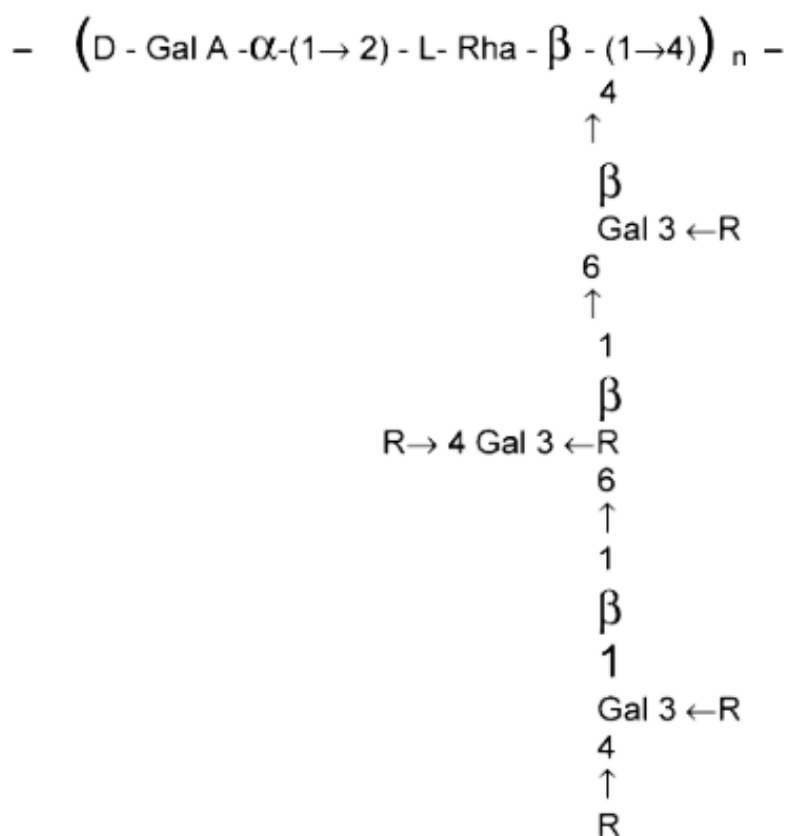
El componente que actúa como coagulante es el mucílago del nopal, dadas sus propiedades como coagulante natural, el mucílago puede incorporarse al proceso de coagulación-floculación para el tratamiento del agua. A través de diversos estudios científicos, se ha establecido que el mucílago contiene carbohidratos como D-galactosa, L-arabinosa, L-ramnosa, ácido galacturónico y D-xilosa, que son responsables de su comportamiento en el proceso de coagulación-floculación. (Bedoya, 2023).

1.5.4.2 Composición química

El mucílago de *Opuntia ficus-indica* es un carbohidrato complejo compuesto

por azúcares residuales, entre los que se encuentran la D-galactosa, L-arabinosa, L-ramnosa, ácido galacturónico y D-xilosa. McGarvie y Parolis, en 1981 encontraron que el mucílago del nopal está compuesto por una familia de polisacáridos altamente ramificados. Ellos consideran una estructura de unidades de ácido α -D-galacturónico unidas 1 $\rightarrow$ 2 a unidades de β -L-ramnosa enlazadas 1 $\rightarrow$ 4 con ramificaciones en el C-4, las ramificaciones de oligosacáridos de galactosa las cuales llevan L-arabinosa y D-xilosa como sustituyente.

Figura I-23: Composición química del mucílago de nopal



Fuente: (Bedoya, 2023).

La proporción de los monómeros en la molécula varía de acuerdo a diversos factores de la planta, como: Variedad, edad, condiciones ambientales y estructura de extracción empleada (fruto, cáscara, cladodio).

1.5.5 Propiedades fisicoquímicas del nopal

1.5.5.1 Propiedad física

Los nopales son plantas carnosas, arbóreas y cuyo tallo son planos, oblongos, de color verde medio y provisto de dos clases de espinas, una larga y dura, y otras cortas y finas. Las propiedades físicas del nopal se muestran en la siguiente tabla:

Tabla I-9: Propiedades física del Nopal

Propiedades físicas del nopal	
Tamaño (altura)	-5m
Cladodios	Altura: 30-40cm
	Ancho: 15-25cm
	Grosor: 1.5-3cm
Flor	Amarilla, naranja, rosada o roja.
Fruto (Tuna)	3,5-8cm

Fuente: (Dietinatura, s.f.)

1.5.5.2 Propiedad química

La composición química del nopal se muestra en la siguiente tabla I-10

Tabla I-10: Composición química del Nopal

Composición química	Cladodio
Humedad	91%
Proteínas	0,66%
Grasas	0,11%
Carbohidratos	5,5%
Celulosa	1,15%
Ceniza	1,58%

Fuente: (Torrez, 2015)

Se considera que el nopal tiene alto valor nutricional, principalmente por su contenido en minerales, proteínas, fibras y fotoquímicos.

CAPÍTULO II
PARTE EXPERIMENTAL

2.1 Descripción de Nopal

La penca de tuna (*Opuntias ficus-indica (L.) Mill.*) es un tallo de tipo cladodio de forma aplanada y ovalada es una planta perenne, suculenta y aérea, vive en lugares áridos, tiene hojas modificadas en espinas.

Esta planta se destaca con su producción en Campo Grande y la comunidad de Limitas, municipio de Yacuiba perteneciente a la provincia del Gran Chaco-Tarija, la cual es accesible y es por ello que se utilizará dicha planta, además se la encuentra en todas las épocas del año. En el 1.2.1.3 del capítulo I se indica por qué la elección del Nopal como materia prima.

Figura II-1 Materia Prima-Nopal de Tuna



Fuente: Elaboración propia, 2024

Para la caracterización de nopal de tuna utilizada en el proyecto de investigación se realizó un análisis fisicoquímico en el laboratorio de Centro de Análisis Investigación y Desarrollo (CEANID) de la U.A.J.S. Los resultados de dicho análisis son mostrados en el capítulo III correspondiente a los resultados.

2.2 Selección del método de obtención del coagulante natural de penca de tuna

Como se vio en el capítulo I, existen tres métodos para la obtención de coagulante natural, las cuales son el método por extracción térmica, extracción solido-liquido por soxhlet y por maceración artesanal o extracción en frio. Para su selección del proceso de obtención del coagulante de la penca de tuna (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.), se realiza una matriz de selección mediante el método de los factores ponderados, el cual realiza un análisis cuantitativo, esto consiste en evaluar y comparar entre si los métodos de obtención de coagulante asignando un peso relativo (%) a cada factor fundamental del proceso, el cual se selecciona el mejor método de acuerdo a la puntuación más alta. Se realizó un cuadro de los factores que se evaluó para la selección del método de activación. La calificación se realizó de acuerdo a una escala predeterminada del 1 al 5. En la tabla II-1 se establece la tabla de factores de evaluación.

Se ha considerado factores comunes y relevantes para la obtención del coagulante de Nopal de tuna.

Tabla II-1: Tabla de factores de evaluación

FACTOR	PONDERACIÓN	JUSTIFICACIÓN
	%	
Rendimiento	25	El rendimiento es importante para determinar la eficiencia del método, un alto rendimiento reduce la necesidad de grandes cantidades de la materia prima, haciendo un proceso más sostenible.
Pureza de coagulante obtenido	20	La pureza afecta directamente la eficacia en el tratamiento de aguas, el método que genera un coagulante con menos impureza son preferibles para evitar contaminación secundaria
Costo Operativo	15	Influye gastos en la energía, reactivos y mano de obra, un método costoso no es viable, se requiere que los costos de inversión y de operaciones sean accesibles y rentables.
Equipos	10	Es importante ya que para algunos métodos se requieren de equipos sofisticado y/o sencillos y accesibles.
Facilidad del proceso	10	Es importante ya que un proceso complicado aumentan errores y pérdidas.
Tiempo de procesamiento	10	Se refiere a la duración desde la extracción hasta el producto final, es importante ya que a mayor tiempo mayor costo.
Impacto ambiental	10	La obtención del coagulante no debe generar problemas con el entorno.

Fuente: Elaboración propia,2025.

En la Tabla II-2 se muestra la escala de calificaciones ponderadas la cual es de 1(malo) al 5 (excelente).

Tabla II-2: Escala de calificación

Escala de calificación	Calificación
Excelente	5
Muy Bueno	4
Bueno	3
Regular	2
Malo	1

Fuente: Elaboración propia,2025

En la tabla II-3 se muestra una matriz de selección donde:

A=calificación

%=peso o porcentaje de cada factor

B= Puntuación=A*%

Tabla II-3: Matriz de selección por factores ponderados

FACTORES	PONDERACIÓN % (1-100)	ALTERNATIVAS DE OBTENCIÓN DE COAGULANTE DE NOPAL					
		MÉTODO A (Extracción Térmica)		MÉTODO B (Extracción sólido-líquido)		MÉTODO C (Extracción mediante obtención artesanal)	
		CALIFICACIÓN (A)	PUNTUACIÓN (B)	CALIFICACIÓN (A)	PUNTUACIÓN (B)	CALIFICACIÓN (A)	PUNTUACIÓN (B)
Rendimiento	25	4	100	3	75	2	50
Pureza de coagulante obtenido	20	4	80	3	60	2	40
Costo Operativo	15	3	45	3	45	4	60
Equipos	10	3	30	3	30	4	40
Facilidad del proceso	10	4	40	3	30	5	50
Tiempo de procesamiento	10	3	30	3	30	2	20
Impacto ambiental	10	3	30	3	30	4	40
Puntuación		Total	355	Total	300	Total	300

Fuente: Elaboración propia, 2025

La calificación total de cada alternativa se calcula como suma de cada peso de factor por la calificación asignada.

Calificación total de la Alternativa = $\Sigma(\text{Peso del factor (\%)} * (\text{A}) \text{ Calificación del Factor})$

De acuerdo con los datos arrojados por la Tabla II-3 de matriz de selección para la obtención de coagulante natural de nopal, muestra que el método de mayor puntaje es el método A (Extracción Térmica) con una puntuación de 355 puntos, mientras que el método B (Extracción sólido-líquido) obtiene una puntuación de 300 puntos, al igual que el método C (Método casero).

2.3 Variable que afecta en la obtención del coagulante

Como variable dependiente se tiene el rendimiento de la obtención del coagulante de Nopal y las variables independientes identificadas son tiempo, tamaño de partícula, temperatura y relación de agua y nopal.

2.3.1 Selección de las variables del proceso experimental.

Como se vio en el capítulo I, diversas investigaciones determinan que los parámetros de tiempo y temperatura en el proceso de extracción son elementos fundamentales para alcanzar mayor rendimiento de coagulante, sin embargo, se debe tener cuidado ya que la extracción se realiza al altas temperaturas y tiempo se tendrá una degradación del coagulante.

Las variables de operación que se emplean en la obtención del coagulante son:

- Relación de Nopal y Agua
- Temperatura de extracción.
- Tiempo de extracción.

Para cada variable se identificaron los límites superiores e inferiores, empleando dicho límite en los experimentos según el diseño experimental.

- **Relación de Nopal y agua**

La relación de Nopal y agua para la obtención del coagulante se utilizó una relación de 1:2 y 1:3, ya que depende del agua la extracción de polisacáridos, un exceso de agua para la extracción del mucílago dificulta la recuperación y aumento en el tiempo de secado.

- **Temperatura de extracción (°C)**

En el presente trabajo de investigación se utilizó un rango de temperatura de extracción entre 55°C y 70°C. Cabe resaltar que la temperatura de extracción, en investigaciones preliminares, fue una variable de estudio para obtener el rendimiento en la extracción del coagulante ya que la Nopal sometida a altas temperaturas ayuda a la solubilidad de los polisacáridos que forma el mucilago, además rompe las paredes celulares de los tejidos vegetales, liberando el compuesto viscoso, así mismo a muy altas temperaturas se extrae mayor impureza y a bajas temperaturas la extracción es lenta, pero útil para evitar la degradación de compuesto.

- **Tiempo de Extracción (min)**

Para la extracción del coagulante se utilizaron los tiempos de 90 min y 120 min, es una variable independiente que se estudiará para determinar su efecto en el rendimiento de pectina extraída.

2.4 Diseño experimental

El diseño experimental son técnicas de estadística que permiten identificar y cuantificar las causas de un efecto dentro de un estudio experimental. En un diseño experimental se manipulan deliberadamente una o más variables, vinculadas a las causas, para medir el efecto que tienen en otra variable de interés (Ortega J. G., 2021).

En otras palabras, son las pruebas experimentales en las cuales se inducen

cambios deliberados en las variables de entrada (X =independiente) en un proceso (sistema experimental de estudio) de manera que sea posible observar las causas de los cambios en la respuesta de salida (Y =dependiente).

Para el presente trabajo de investigación, se considera; como factor influyente en el proceso de la obtención de coagulante natural del nopal; la Temperatura de extracción, tiempo de extracción y la relación de materia prima: agua, debido a que la combinación de esta variable influye en la extracción del coagulante del nopal.

El diseño factorial es del modelo 2^k , donde los niveles son representados por el número 2 y K representa el número de factores. Estos niveles podrían ser cuantitativos o cualitativos y una réplica completa de tal diseño requiere realizar 2^k combinada.

Este diseño describe como realizarlas experimentos de la forma más adecuada para conocer simultáneamente que efecto tiene k factores sobre una respuesta y descubrir si interaccionan entre ellos (Fernández, 2020)

A continuación, en la Tabla II-4 se presentan los factores escogidos para los niveles del proceso experimental.

Tabla II-4: *Valores asignados para los niveles del Diseño Factorial*

Factores (k)	Nivel Mínimo	Nivel Máximo
Relación de Agua: M.P	2:1	3:1
Temperatura de extracción (°C)	55	70
Tiempo de extracción (minutos)	90	120

Fuente: Elaboración Propia, 2025.

2.4.1 Diseño factorial

El diseño factorial es una herramienta poderosa y eficiente para la investigación experimental, cuando se sospecha que múltiples variables pueden influir en un resultado y que sus efectos no son independientes.

Un diseño factorial examina todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores, ya que no muestra solo cómo cada factor afecta la respuesta por sí solo (efectos principales), sino también cómo el efecto de un factor puede cambiar de rango de otro factor (efectos de interacción).

En consecuencia, el modelo factorial adoptado es un diseño 2^3 en el cual se compone de tres factores y 2 niveles.

Por lo cual se aplicó el siguiente diseño factorial:

$$2^3=2*2*2=8 \text{ pruebas a realizar}$$

Sin embargo, se estima la realización de una repetición, para las 8 pruebas, por lo cual se obtienen 16 experimentos.

En este diseño se realizarán todas las posibles combinaciones que se puede dar entre las variables que se someten a prueba, para ello se crea una matriz de diseño. En ella se utilizan los signos $-$ y $+$ para ambos niveles de un factor y se realiza de la siguiente forma: en la primera columna se alteran los signos comenzando por el $-$. En la segunda columna se alteran los signos de dos en dos en la tercera de cuatro en cuatro; en la cuarta de ocho en ocho y así sucesivamente. Siempre comenzando con el signo $-$ (Fernández, 2020).

Tabla II-5: Diseño Factorial 2^3 para el proceso experimental

N° de Exp.	Combinaciones de experimentos	Matriz de diseño			Variable Respuestas	
		Relación Agua: Nopal	Temperatura de extracción (°C)	Tiempo de extracción (h)	R1	R2
1	1	-1	-1	-1	Y1	Y1
2	a	+1	-1	-1	Y2	Y2
3	b	-1	+1	-1	Y3	Y3
4	ab	+1	+1	-1	Y4	Y4
5	c	-1	-1	+1	Y5	Y5
6	ac	+1	-1	+1	Y6	Y6
7	bc	-1	+1	+1	Y7	Y7
8	abc	+1	+1	+1	Y8	Y8

Fuente: Elaboración propia, 2025.

En la siguiente tabla II-6 se presentan todas las posibilidades combinaciones que se pueden dar entre las variables que se someten a prueba y así mismo como variable respuesta se toma el rendimiento del coagulante de nopal de tuna del proceso de elaboración.

Tabla II-6: Plan de Diseño Factorial 2^3 para el proceso experimental

N° de Exp.	Combinaciones de experimentos	Plan de experimentación			Variable Respuesta (Rendimiento)	
		Relación Agua: M.P. (p/p)	Temperatura de extracción (°C)	Tiempo de extracción (min)	R1	R2
1	1	2:1	55	90	Y1	Y1
2	a	3:1	55	90	Y2	Y2
3	b	2:1	70	90	Y3	Y3
4	ab	3:1	70	90	Y4	Y4
5	c	2:1	55	120	Y5	Y5
6	ac	3:1	55	120	Y6	Y6
7	bc	2:1	70	120	Y7	Y7
8	abc	3:1	70	120	Y8	Y8

Fuente: Elaboración Propia, 2025

En este sentido, se establecen las siguientes hipótesis:

Ha: La relación de Agua: M.P., temperatura y/o el tiempo de extracción SI influyen significativamente en el rendimiento de obtención de coagulante de nopal de tuna.

Ho: La relación de Agua: M.P., temperatura y/o el tiempo de extracción NO influyen significativamente en el rendimiento de obtención de coagulante de nopal de tuna.

Los datos obtenidos son analizados posteriormente con el análisis de varianza (ANOVA), para determinar la significancia en el rendimiento del coagulante a partir de la Nopal de tuna.

2.5 Materiales y equipos

2.5.1 Materiales

Los materiales utilizados para la obtención de coagulante natural son los indicados en la Tabla II-7.

Tabla II-7: Materiales utilizados en el proyecto

Materiales	Características	Función	Cantidad
Olla	Acero inoxidable	Contener la muestra de nopal triturado para extraer el coagulante mediante calor y agitación.	1
Fuentes (bandejas)	Plástico	Contener muestra de nopal.	2
Cuchillo	Metálico	Cortar y pelar la materia prima (nopal de tuna).	1
Cepillo	Plástico	Limpiar los utensilios y la materia prima, como también remover residuos de mucílago.	1
Cuchara	Metálico	Mezcla y transferencia de pequeñas cantidades de partículas.	1
Termómetro	Vidrio	Medir la temperatura durante la extracción de coagulante.	1
Colador	Plástico	Separar los sólidos de líquidos.	2

Embudo		Plástico	Transferir líquidos a otro recipiente sin derrames.	1
Mortero de porcelana		Porcelana	Triturar manualmente el coagulante sólido seco, útil para pequeñas cantidades.	1
Malla de amianto		Metálico con asbesto	Distribuir calor uniformemente del calentador y evitar choque térmico en vidrio.	1
Envase		Vidrio	Almacena el mucílago sólido húmedo.	8
Balde		Plástico	Lavar el coagulante con alcohol.	6
Tela gasa		-	Filtrar el bagazo mediante presión.	1
Bolsa Hermética		Plástico	Contener muestra de coagulante sólido triturado.	1
Fuente pequeño		Aluminio	Contenedor de muestra de coagulante húmedo, diseñado para soportar altas temperaturas y distribución de calor uniforme	12
Espátula		Silicona	Uso versátil, limpiar las paredes de recipientes para evitar pérdidas.	1
Probeta		Vidrio	Medir volúmenes de líquidos de forma aproximada.	1

Fuente: (Elaboración Propia, 2025).

2.5.2 Equipos Utilizados

Los equipos utilizados para el presente proyecto de investigación son la mayoría de la propiedad del Laboratorio de Operaciones Unitarias (L.O.U.) de la Carrera de Ingeniería Química de la U.A.J.M.S.

❖ **Balanza gramera electrónica**

Balanza electrónica de marca someont SF-400, cumple la función de pesar cantidades de 1gr-10000gr, consta de una pantalla digital y tiene una precisión de 0,28gr.

Figura II-2: *Balanza gramera*



Fuente: Elaboración propia, 2025

❖ **Licuadaora**

Licuadaora de marca Philips, cumple la función de triturar, es decir reducir el tamaño de partícula, está provista de cuatro cuchillas metálicas inoxidables, la licuadaora trabaja a diez velocidades, la cual se regula mediante los botones según lo necesitado.

Figura II-3: *Licuada*



Fuente: Elaboración propia, 2025

❖ **Agitador eléctrico**

Agitador eléctrico cumple la función de mezclar o agitar de manera homogénea y constante, está provisto de una paleta metálica inoxidable y botones giratorios para regular la velocidad de agitación.

Figura II-4: *Agitador eléctrico*

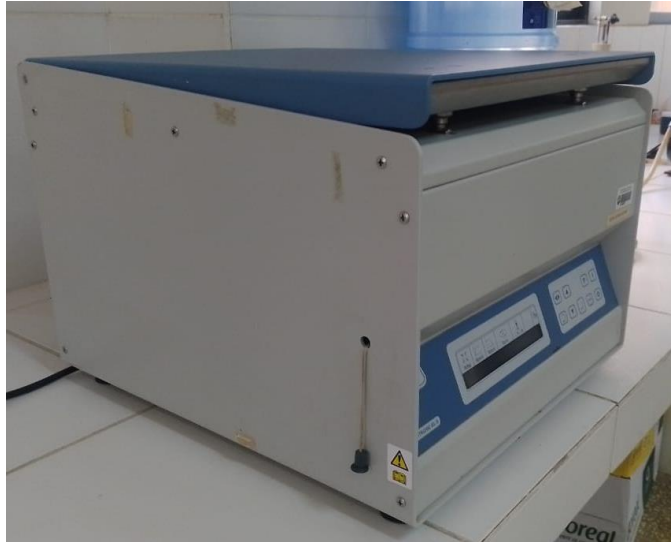


Fuente: Elaboración propia, 2025

❖ Centrifugador

Centrifugador de marca meditronic BL S, cumple la función de separar mediante la sedimentación por gravedad, está provista de una pantalla digital, rotor, porta muestra, tubo de ensayo de plástico para la muestra y una tapa.

Figura II-5: *Centrifugador*



Fuente: Elaboración propia, 2025

❖ Rota vapor

Rota vapor de marca HEIDOLPH modelo LABORATORIO 4000, cumple la función de concentrar para eliminar el agua presente en el extracto del nopal, este compuesto por un baño calefactor HB digital, con velocidad de rotación entre 0-270rpm y con rango de temperatura de 20-180°C, con pantalla de temperatura digital y una bomba al vacío.

Figura II-6: Rota vapor



Fuente: Elaboración propia, 2025

❖ **Balanza analítica**

La balanza analítica de marca Gilbertini se utiliza para el pesaje de las muestras, consta de una pantalla digital y tiene una precisión de 0,001g con capacidad máxima de 510g.

Figura II-7: Balanza analítica



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.5.3 Insumo para el proceso de obtención del coagulante del Nopal.

Como se vio en el capítulo I, investigaciones bibliográficas utilizan etanol al 96%, alcohol isopropílico y/o acetona para separar el coagulante del agua y así mismo usan agua destilada.

Los insumos que se usan en el presente proyecto son solventes, etanol y agua destilada.

2.5.3.1 Etanol

El alcohol se utiliza para concentrar el coagulante de nopal, este es insoluble con el coagulante y soluble con el agua, lo que permite ver la separación del coagulante con respecto al agua y alcohol.

2.5.3.2 Agua Destilada

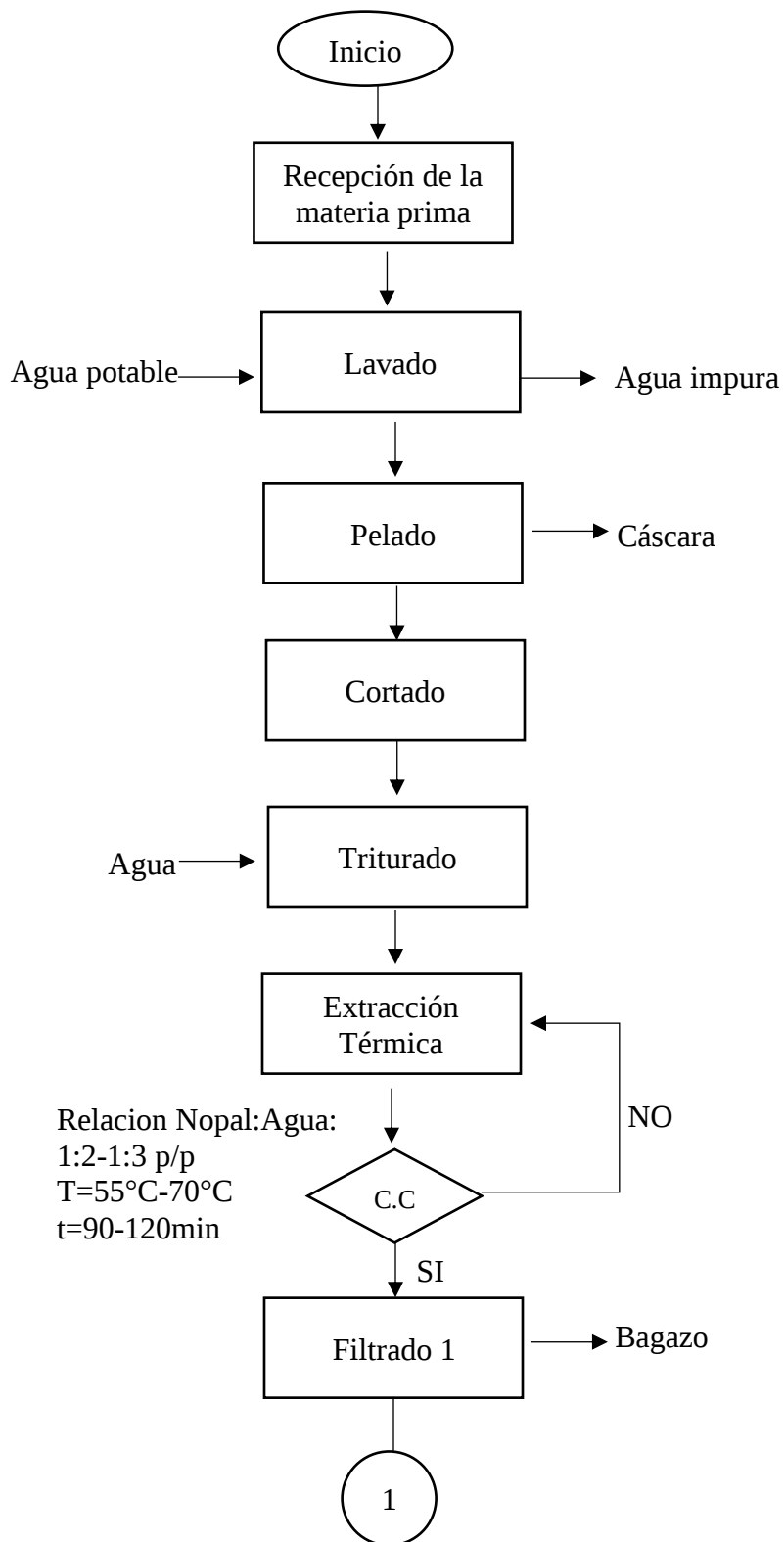
El agua destilada es aquella sustancia compuesta por H_2O sometida a un proceso de destilación en el que se eliminan las impurezas e iones del agua de origen. La destilación del agua consiste en la imitación de los procesos de evaporación y condensación que se producen en la naturaleza. De esta forma, se lleva al agua hasta su punto de ebullición mediante una fuente de calor para que se evapore y, a continuación, se condensa con aplicaciones de frío, de manera que se forman gotas de agua a partir del vapor. (Zarza, s.f.)

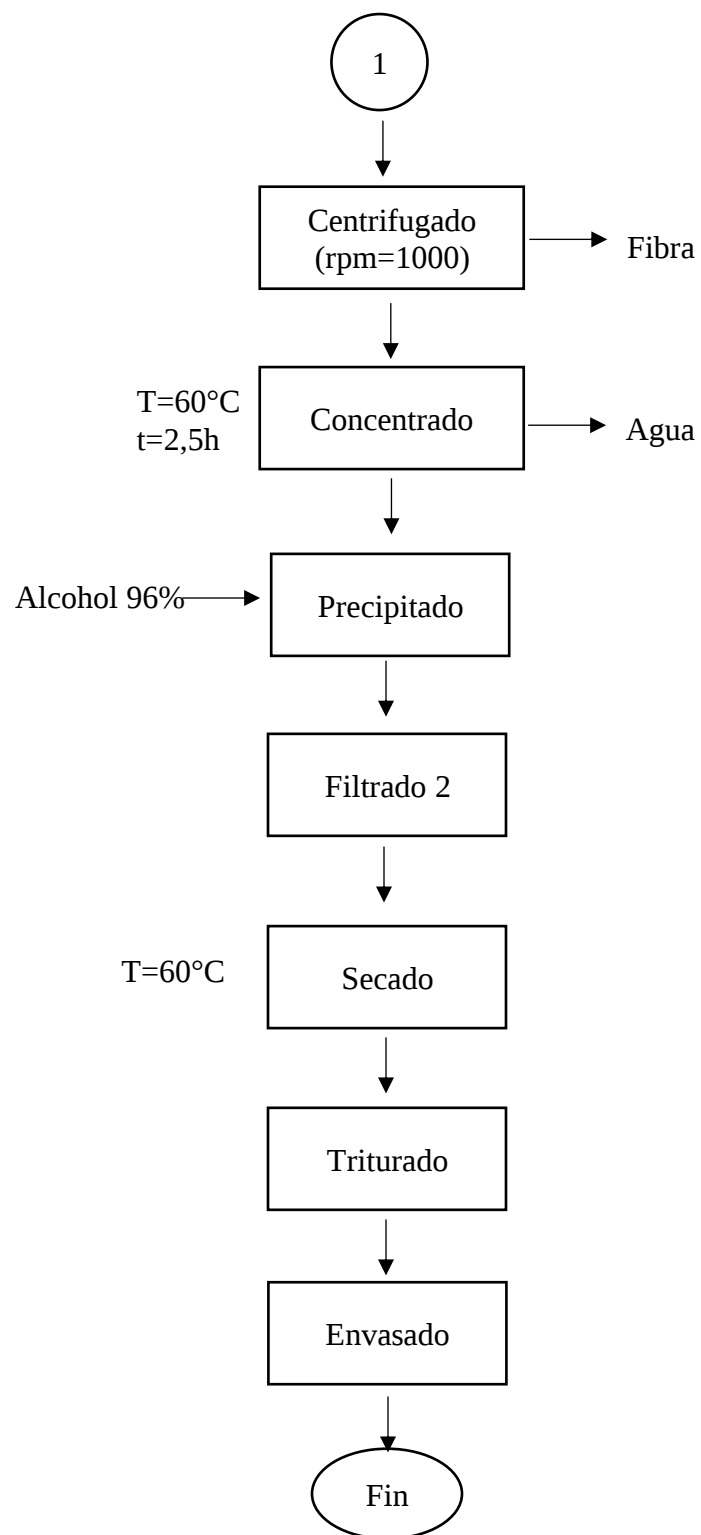
El agua se utiliza para realizar la proporción p/p del nopal triturado con el agua destilada requerido.

2.6 Proceso de obtención del coagulante a partir de nopal de tuna

En la Figura II-8, se observan las etapas del proceso experimental empleado en la extracción del coagulante natural de nopal de tuna con el método de extracción térmica.

Figura II-8 Diagrama del Proceso de obtención del coagulante de nopal de tuna a escala laboratorio.





Fuente: Elaboración propia, 2025

A continuación, se describe el proceso de las etapas:

2.6.1 Recolección de la Materia Prima

La materia prima que se utiliza para el presente trabajo de investigación es el nopal de tuna (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill) recolectado de la comunidad de Limitas, cerca de la Ruta 9 de Yacuiba, perteneciente a la provincia Gran Chaco-Tarija.

La ubicación aproximada es de 7,2 km desde la ciudad de Yacuiba, encontrándose localizada entre las coordenadas geográficas 21°56'40'' de Latitud Sur y 63°40'06'' de Longitud Oeste.

Figura II-9 Ubicación geográfica de la recolección de nopal de tuna



Fuente: Google Earth, 2025

La M.P. se recolecta cuidadosamente con guantes y con la ayuda de un cuchillo para facilitar la obtención del tallo.

Figura II-10: *Lugar de recolección de Nopal*



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.6.2 Lavado de la M.P.

El lavado del Nopal, se realiza en el fregadero del Laboratorio de Operaciones Unitaria de la UAJMS mediante una combinación de cepillado manual y aspersión con, agua potable, primero se humedece la superficie, luego se frota sistemáticamente con un cepillo de plástico para remover e eliminar impureza adherida en su superficie como, partículas de tierras, espinas, entre otras, esto se realiza con la ayuda de un cepillo y guantes para facilitar su manipulación.

Figura II-11: *Lavado de Nopal de tuna*



Fuente: (Elaboración Propia, 2025)

Procedimiento:

1. Pesar la materia prima en la balanza digital.
2. Lavar el Nopal con agua potable en el fregadero, con la ayuda de un cepillo.
3. Pesar la materia prima en la balanza digital.

2.6.3 Pelado

Se utilizó un instrumento manual (cuchillo de acero inoxidable) para el pelado de nopal con la finalidad de eliminar la peridermis, porque es una capa resistente y protectora, la cual dificulta la extracción del componente activo (mucílago) y al eliminarlo hace que sea más fácil de procesar. En la figura II-12 se observa el proceso de pelado de nopal de Tuna.

Figura II-12: *Pelado del Nopal de Tuna*



Fuente: (Elaboración Propia, 2025)

2.6.4 Troceado del Nopal

Una vez pelada el Nopal se procede a cortar en cubo de aproximadamente 1cm de lado, esto se realiza para garantizar la homogeneidad en el proceso de trituración, porque si no se corta en trozo, la trituradora requeriría más tiempo, el cortado se realiza con la ayuda de un cuchillo, en la figura II-13 se observa el proceso de troceado del Nopal.

Figura II-13: *Troceado del Nopal de tun*



Fuente: (Elaboración Propia, 2025)

2.6.5 Triturado

El nopal de tuna troceada uniformemente se tritura utilizando una licuadora Oster (especificaciones en el Anexo) con 50gr de agua, el agua facilita que la cuchilla de la licuadora corte el nopal suavemente y rápida, reduciendo la fricción y el tiempo, esto se realiza para romper su estructura celular y favorecer el contacto con el solvente al momento de la extracción, el tiempo de trituración es de 10 minutos.

Figura II-14: *Triturado del Nopal de tuna*



Fuente: (Elaboración Propia, 2025)

Procedimiento:

1. Pesar el nopal troceado.
2. Agregar 50 gr de agua en la licuadora y colocar el Nopal troceado
3. Pesar el Nopal triturado en la balanza digital.

2.6.6 Extracción térmica

Posteriormente de la trituración, se llevó al proceso de extracción térmica y según a la Tabla II-3, se seleccionó este método, dicho método consiste en el calentamiento y agitación constante a una determinada temperatura y tiempo como se muestra en la figura II-15, esto se realiza para la liberación del gel mediante calor, permitiendo la

mayor cantidad de extracción de gel. Dentro de lo que es el diseño factorial se propuso trabajar con dos niveles para la relación de Agua: Nopal., para la Temperatura y para el Tiempo, con el fin de obtener el mayor rendimiento de coagulante natural.

Figura II-15: *Calentamiento con agitación constante.*



Fuente: Elaboración Propia, 2025

Procedimiento:

1. Pesar el nopal de tuna triturada en una olla de acero inoxidable.
2. Añadir agua con respecto a las variables propuestas de M.P.: Agua (1:2 y 1:3), es decir, añadir el doble o triple de agua con respecto al peso del Nopal triturado.
3. Posteriormente controlar la temperatura una vez llegada a 50°C o/ y 60°C durante el tiempo de 90 minutos o 120 minutos.
4. Enfriar a temperatura ambiente.
5. Pesar y registrar datos.

2.6.7 Filtración 1

Luego de realizar la extracción acuosa de gel (mucílago), se procedió a filtrar con una tela gasa, esto se realiza con el objetivo de separar el líquido del sólido (bagazo), ya que dicha extracción contiene partículas sólidas de nopal de tuna. La imagen se muestra en la Figura II-16.

Figura II-16: Filtración



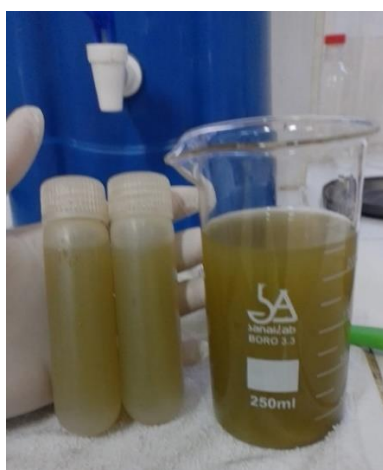
Fuente: Elaboración Propia, 2025.

2.6.8 Centrifugado

El líquido obtenido del filtrado se lleva a centrifugar, donde se utiliza un centrifugador (especificaciones en el Anexo) por 10 minutos a una revolución de 1000 rpm con el objetivo de separar las partículas de fibras del nopal que contiene el mucílago.

Figura II-17: Antes del centrifugado

Figura II-18 Después del centrifugado



Fuente: Elaboración Propia, 2025



Fuente: Elaboración Propia, 2025

2.6.9 Concentrado

La concentración del extracto se realiza en un evaporador rotativo (especificado en el Anexo IV), perteneciente al Laboratorio de Operaciones Unitarias de la U.A.J.M.S. Este equipo utiliza una bomba al vacío que ayuda a reducir la presión del proceso, lo cual disminuye el punto de ebullición del agua y así evitar la degradación del mucílago. Esto se realiza con el objetivo de ocupar menos cantidad de alcohol para el precipitado y para ello se eliminó el agua que contiene el extracto debido a la dilución con agua en la etapa de extracción térmica.

Figura II-19: *Concentración*

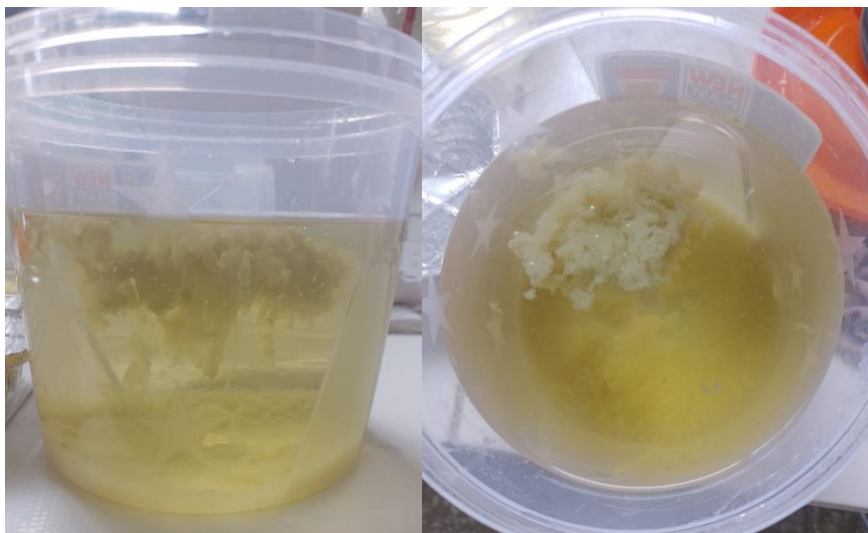


Fuente: Elaboración Propia, 2025.

2.6.10 Precipitado

El líquido concentrado previamente enfriado se lava con alcohol etílico al 96%, con el objetivo de separar el coagulante del agua ya que el coagulante es insoluble en alcohol y soluble en agua, la relación del lavado de alcohol etílico es de 2:1 con respecto a la cantidad del líquido mucilaginoso concentrado obtenido, posteriormente se deja macerar para que ocurra la precipitación, es decir la formación de un sólido.

Figura II-20: Precipitación del sólido



Fuente: Elaboración Propia, 2025.

2.6.11 Filtrado 2

Posterior al precipitado, se filtró con el objetivo de separar la parte sólida del subproducto (líquido), esto se realiza para obtener el coagulante ya que es de interés.

Figura II-21: Filtración

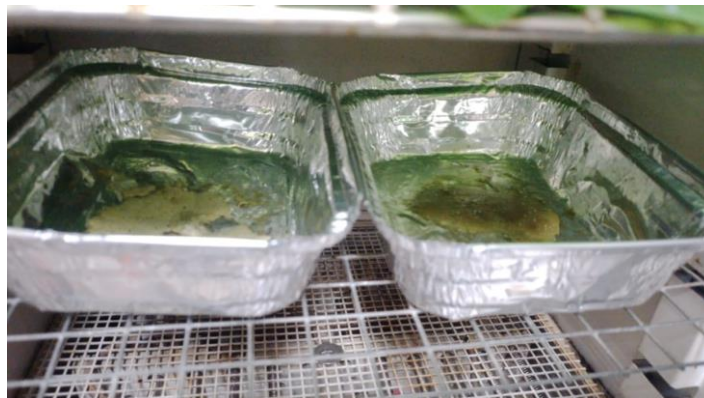


Fuente: Elaboración Propia, 2025

2.6.12 Secado

El sólido (coagulante) obtenido se secó a 60°C, dado que según bibliografía temperaturas superiores pueden causar la degradación del coagulante, el secado se realiza hasta obtener un peso constante, esto se realiza para poder conservar por un periodo largo de tiempo (aumento de vida útil), en comparación con el líquido. Experimentalmente se obtuvo un tiempo de secado de aproximadamente 5hr a una humedad de 5,47%.

Figura II-22: *Secado*



Fuente: Elaboración Propia, 2025.

Procedimiento:

1. Precalentar la estufa hasta alcanzar una temperatura de 60°C.
2. Colocar el coagulante obtenido anteriormente en una fuente de aluminio.
3. Colocar la fuente de aluminio en la estufa y realizar mediciones periódicas de humedad hasta obtener un peso constante.
4. Retirar y pesar el coagulante seco obtenido.
5. Almacenar la muestra en una bolsa hermética.
6. Determinar la humedad y registrar datos.

2.6.13 Molienda

El coagulante obtenido se somete a un proceso de molienda, donde se utilizó un mortero para obtener partículas finas de aproximadamente 0,5mm (polvo blanco amarillento) del coagulante seco, este proceso se realiza con el objetivo de que sea fácil de manipular en el momento de su uso.

Figura II-23: *Trituración*



Fuente: Elaboración Propia, 2025

2.6.14 Envasado

El envasado se realiza en bolsa hermética para protegerlos de factores externos que podrían degradar su calidad (humedad), ayuda a prolongar la vida útil del producto y garantizar su seguridad.

Figura II-24: *Envasado*



Fuente: Elaboración Propia, 2025

2.7 Prueba de efectividad del coagulante

Se tomaron unas muestras de agua turbia del Río Camacho de 246 NTU y 86,05 NTU, donde se ha dosificado una cantidad de coagulante y para corroborar la eficiencia del coagulante, se ha determinado la turbidez del agua con un turbidímetro.

La prueba de efectividad consiste en colocar 8 vasos precipitados, de las cuales 4 vaso se coloca muestra de agua turbia con 246 NTU y los otros 4 vasos se coloca agua turbia de 86,05NTU, posteriormente se aplica las dosis cada vez mayor del coagulante obtenido a partir del Nopal a cada vaso precipitado, a la cual se le aplica una agitación, luego se deja reposar para su respectiva sedimentación y por último se medirá la turbidez de cada muestra para registrar los resultados.

En la Tabla II-8 se muestra las dosis que se añadieron a la muestra de agua turbia.

Tabla II-8: Dosis de coagulante de Nopal

Descripción	Dosis mg/l
Muestra 1=M1=246NTU	60mg/L
	100mg/L
	600mg/L
	1000mg/L
Muestras 2=M2=86,05NTU	60mg/L
	100mg/L
	600mg/L
	1000mg/L

Fuente: Elaboración propia, 2025

En el CAPÍTULO III RESULTADO Y DISCUSIONES se muestran los resultados de turbidez y los % de remoción de turbidez aplicando la siguiente fórmula:

$$\%Remocion = \frac{Turbidez\ Inicial - Turbidez\ final}{Turbidez\ inicial} * 100$$

CAPÍTULO III

RESULTADO Y DISCUSIONES

3.1 Resultado de la característica del Nopal de tuna

Los análisis fisicoquímicos realizados a la Nopal de tuna son determinados por el centro de Análisis Investigación y Desarrollo (CEANID) de la UAJMS, en la cual se detalla a continuación en la Tabla III-1 (ver Anexo 1).

Tabla III-1: Características fisicoquímica del nopal

Nopal de tuna (<i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Mill.)		
Parámetro	Valor	Unidad
Ceniza	1,99	g/100g
Grasa	0,14	g/100g
Coagulante	3,73	g/100g
Humedad	93,48	g/100g
Proteína Total	0,66	g/100g
Valor Energético	19	Kcal/100g

Fuente: Elaboración propia, 2025

3.2 Datos obtenidos de la variación de la masa con respecto al tiempo en el proceso de secado del extracto del coagulante.

Se realizó el análisis del contenido de humedad utilizando el secador (especificaciones en el Anexo III). Este proceso se inicia cuando la muestra ingresa a la estufa y se registra el contenido de humedad cada media hora.

En la siguiente tabla se muestran los datos registrados de pérdida de peso en el secado del coagulante.

Tabla III-2: Dato de pérdida de peso del coagulante en función del tiempo de secado

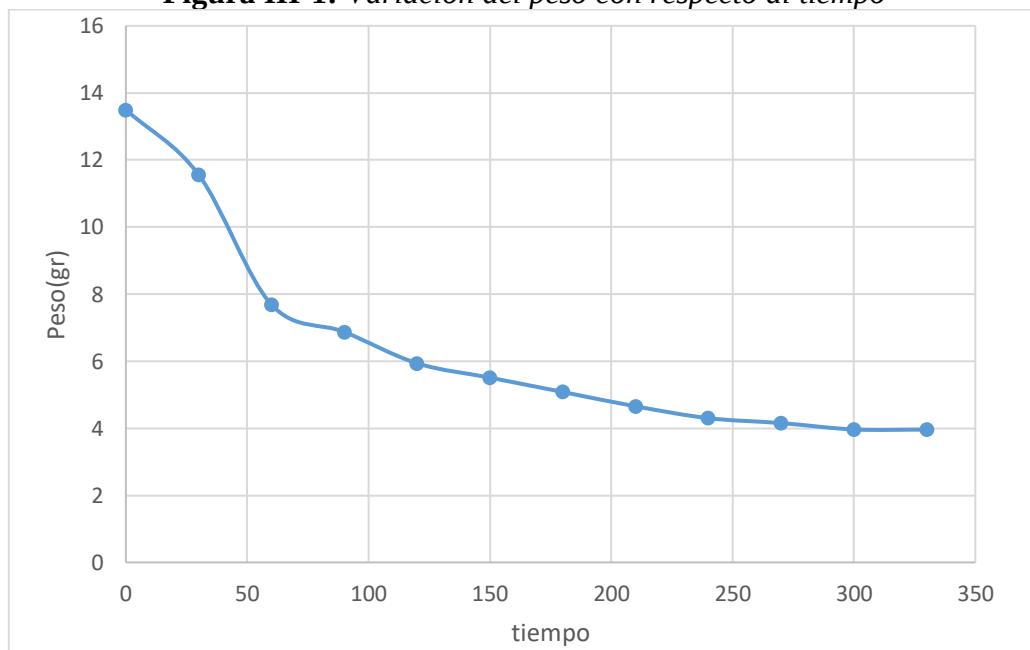
Tiempo (min)	Peso
0	13,495
30	11,559
60	7,687
90	6,873

120	5,938
150	5,51
180	5,083
210	4,655
240	4,302
270	4,155
300	3,965
330	3,961
360	3,959

Fuente: Elaboración propia, 2025

Se obtuvo una humedad de 5,47% del coagulante sólido.

Figura III-1: Variación del peso con respecto al tiempo



Fuente: Elaboración propia, 2025

3.3 Resultado del experimento de la obtención del coagulante

Para la obtención de los datos del rendimiento del coagulante, se utilizó un diseño factorial de 2^3 con una repetición, empleando como variable respuesta el rendimiento del coagulante a partir del nopal.

En la siguiente tabla III-3, se muestran los resultados del rendimiento obtenido al aplicar el diseño experimental.

Tabla III-3: Resultado del diseño experimental 2³

N° de Exp.	Combinaciones de experimentos	Matriz de diseño			Variable Respuesta Rendimiento	
		Relación Nopal: Agua	Temperatura de extracción (°C)	Tiempo de extracción (min)	Y1 (%)	Y2 (%)
1	1	1:2	55	90	6,23	5,53
2	a	1:3	55	90	8,40	8,92
3	b	1:2	70	90	3,74	4,41
4	ab	1:3	70	90	5,27	4,89
5	c	1:2	55	120	11,50	12,56
6	ac	1:3	55	120	14,37	13,76
7	bc	1:2	70	120	5,44	6,17
8	abc	1:3	70	120	7,22	6,60

Fuente: Elaboración propia, 2025.

La Tabla III-3: Resultado del diseño experimental nos muestra que la mejor combinación de variable es la corrida número seis (6) donde sus variables son Relación Agua: Nopal de 3:1, una Temperatura de 55°C, tiempo de extracción de 120 minutos y la variable respuesta es de 14,37% y su réplica fue de 13,76% un mayor porcentaje de mucílago.

3.4 Resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos del coagulante natural de tuna

Los análisis fisicoquímicos realizados al coagulante son determinados por el Centro de Análisis Investigación y Desarrollo (CEANID) de la U.A.J.M.S. Se detallan a continuación en la Tabla III-4: (ver Anexo C)

Tabla III-4: *Análisis fisicoquímico del coagulante seco*

Nopal de tuna (<i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Mill.)		
Parámetro	Valor	Unidad
Ceniza	20,83	g/100g
Grasa	n.d.	g/100g
Coagulante	60.94	g/100g
Proteína Total	18,23	g/100g
Valor Energético	6	Kcal/100g

Fuente Elaboración propia,2025

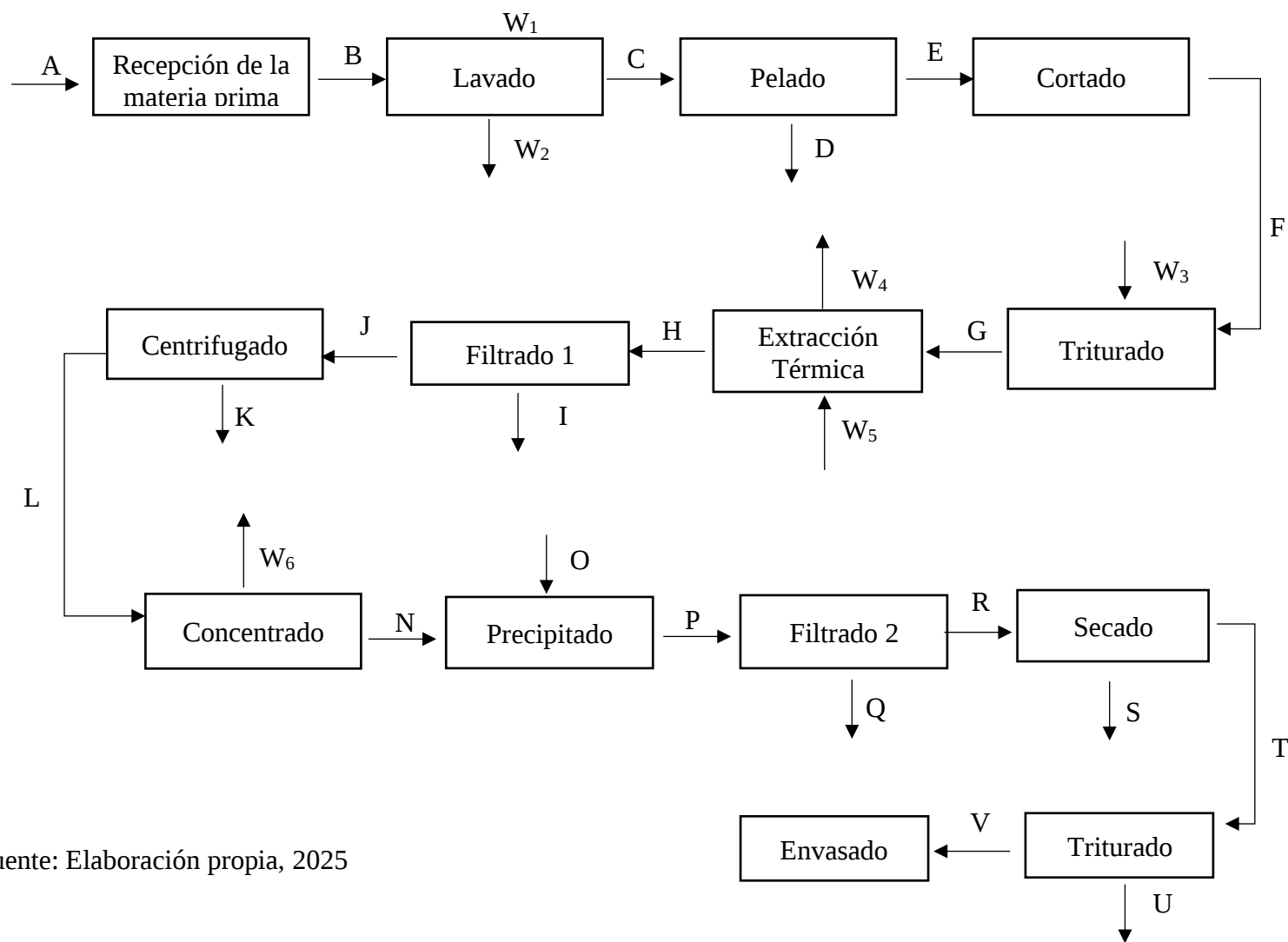
3.5 Balance de materia y energía del proceso tecnología experimental

Los balances de materia y energía se realizaron según los resultados obtenidos durante la parte experimental del proyecto.

3.5.1 Balance de materia

Se realiza el balance de materia del proceso de obtención del coagulante con la muestra que obtuvo el mayor rendimiento, en este caso es la muestra M6 el cual usó la variable de: Temperatura de 55°C, tiempo de 120 minutos con relación de Agua:M.P de 1:3 p/p.

Figura III-2: Diagrama de bloque para el proceso experimental de la obtención del coagulante de Nopal



Fuente: Elaboración propia, 2025

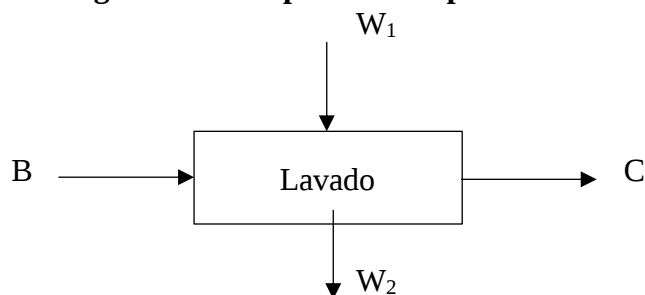
En la siguiente tabla se muestran las especificaciones de las corrientes de diagrama de bloque del proceso.

Tabla III-5: *Corriente del proceso*

Corriente	Especificación	Corriente	Especificación
W₁ (g)	Agua limpia	W₂ (g)	Agua impura
W₃ (g)	Agua	W₄ (g)	Vapor de agua
W₅ (g)	Agua	W₆ (g)	Agua
A (g)	Nopal de tuna	B (g)	Nopal de tuna
C (g)	Nopal de tuna limpia	D (g)	Cascara de Nopal
E (g)	Nopal de tuna pelada	F (g)	Nopal cortada
G (g)	Nopal de tuna triturada	H (g)	Extracto del Nopal
I (g)	Bagazo	J (g)	Extracto Filtrado
K (g)	Fibra	L (g)	Extracto
N (g)	Extracto concentrado	O (g)	Alcohol 96%
P (g)	Alcohol al 96% más agua	Q (g)	Alcohol con agua
R (g)	Coagulante húmedo	S (g)	Alcohol evaporado
T (g)	Coagulante seco	U (g)	Perdida
V (g)	Coagulante molido	X(g)	Perdida
Z (g)	Coagulante envasado		

Fuente: Elaboración propia, 2025

3.5.1.1 Balance de coagulante de Nopal en la etapa de lavado



W₁ (Agua potable) =2000gr

B (M.P. (Nopal))=421,5gr

C (M.P limpia) =424gr

W_2 (Agua impura) =

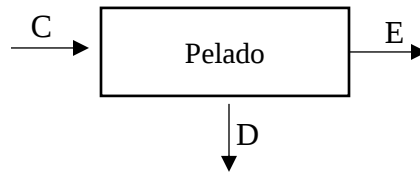
Balance global

$$B+W_1=C+W_2$$

$$W_2=B+W_1-C$$

$$W_2=421,5\text{gr}+1000\text{gr}-424\text{gr}=997,5\text{gr}$$

3.5.1.2 Balance de coagulante de Nopal en la etapa de pelado



C (Nopal de tuna limpia) =424g

D (Cáscara de la Nopal de tuna) =

E (Nopal de tuna pelada) =388gr

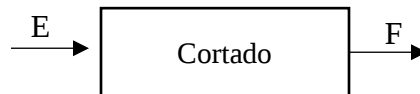
Balance global

$$C=D+E$$

$$D=C-E$$

$$D=424\text{g}-388\text{g}=36\text{g}$$

3.5.1.3 Balance de coagulante de Nopal en la etapa de cortado



E (Nopal de tuna pelada) =388g

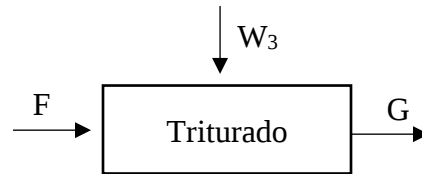
F (Nopal de tuna cortada) =388g

Balance global

$$E=F$$

$$388\text{g}=388\text{g}$$

3.5.1.4 Balance de coagulante Nopal en la etapa del Triturado



F (Nopal de tuna cortada) = 388g

G (Nopal de tuna triturada) = g

W_3 (Agua) = 50 g

Balance global

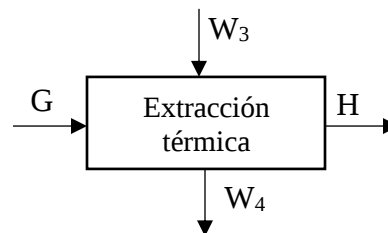
$$F + W_3 = G$$

$$G = F + W_3$$

$$G = 388 + 50$$

$$G = 438g$$

3.5.1.5 Balance de coagulante de Nopal en la etapa de extracción térmica



G (Nopal de tuna cortada) = 438g

W_3 (Agua) = 1314g

W_4 (Vapor de agua) =

H (Extracto obtenido) = 1529g

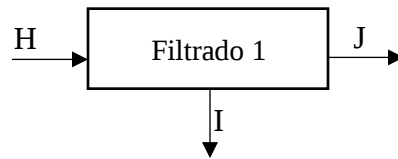
Balance global

$$F + W_3 = W_4 + G$$

$$W_4 = F + W_3 - G$$

$$W_4 = 438 + 1314 - 1529 = 223g$$

3.5.1.6 Balance de coagulante de Nopal en la etapa de Filtrado 1



H (Extracto obtenido) =1529g

I (Bagazo) =

J (Extracto filtrado) =1435g

Balance global

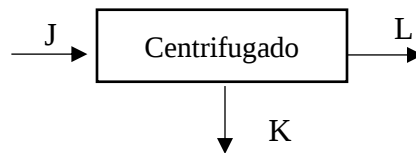
$$H=J+I$$

$$I=H-J$$

$$I=1529-1435g$$

$$I=94g$$

3.5.1.7 Balance de coagulante de Nopal en la etapa de centrifugado



J (Extracto filtrado) =1435g

K (Fibra) =

L (Extracto) =1400g

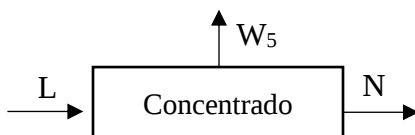
Balance global

$$J=L+K$$

$$J=1435-1400$$

$$J=35g$$

3.5.1.8 Balance de coagulante de Nopal en la etapa de concentrado



$$L(\text{Extracto}) = 1400\text{gr}$$

$$N(\text{Extracto concentrado}) = 778\text{gr}$$

$$W_5(\text{agua}) =$$

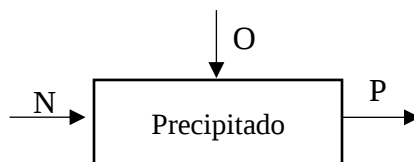
Balance global

$$L = N + W_5$$

$$W_5 = L - N$$

$$W_5 = 1400 - 778 = 622\text{g}$$

3.5.1.9 Balance de coagulante de Nopal en la etapa de precipitado



$$N(\text{Extracto concentrado}) = 778\text{g}$$

$$O(\text{Alcohol 96\%}) = 1556\text{g}$$

$$P(\text{Concentrado con alcohol}) =$$

Balance global

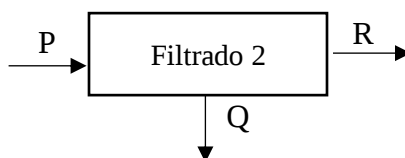
$$N + O = P$$

$$P = N + O$$

$$P = 778 + 1556\text{g}$$

$$P = 2334\text{g}$$

3.5.1.10 Balance de coagulante de Nopal en la etapa de filtrado 2



P (Concentrado con alcohol) = 2334g

Q (Alcohol más agua)

R (Coagulante húmedo) = 13,497g

Balance global

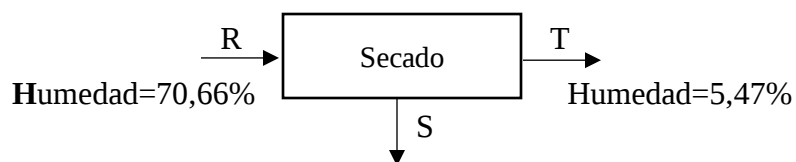
$$P=Q+R$$

$$Q=P-R$$

$$Q=2334\text{gr}-13,497$$

$$Q=2320\text{g}$$

3.5.1.11 Balance de coagulante de Nopal en la etapa de secado



R (Coagulante Húmedo) = 13,497g

S (vapor)=

T (Coagulante seco)=3,945gr

Balance global

$$R=S+T$$

$$S=R-T$$

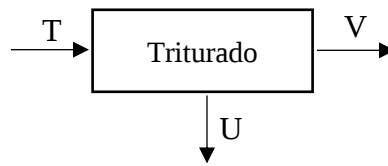
$$S=13,497-3,945$$

$$S=9,552\text{g}$$

Balance parcial del agua:

$$X_{H_2O,T} = \frac{5.47}{100} = 0.0547$$

$$X_{H_2O,S} = 1$$

3.5.1.12 Balance de coagulante de Nopal en la etapa de triturado

$T(\text{coagulante seco})=3,945\text{g}$

U (pérdida)=

$V(\text{coagulante molido})=3,937\text{g}$

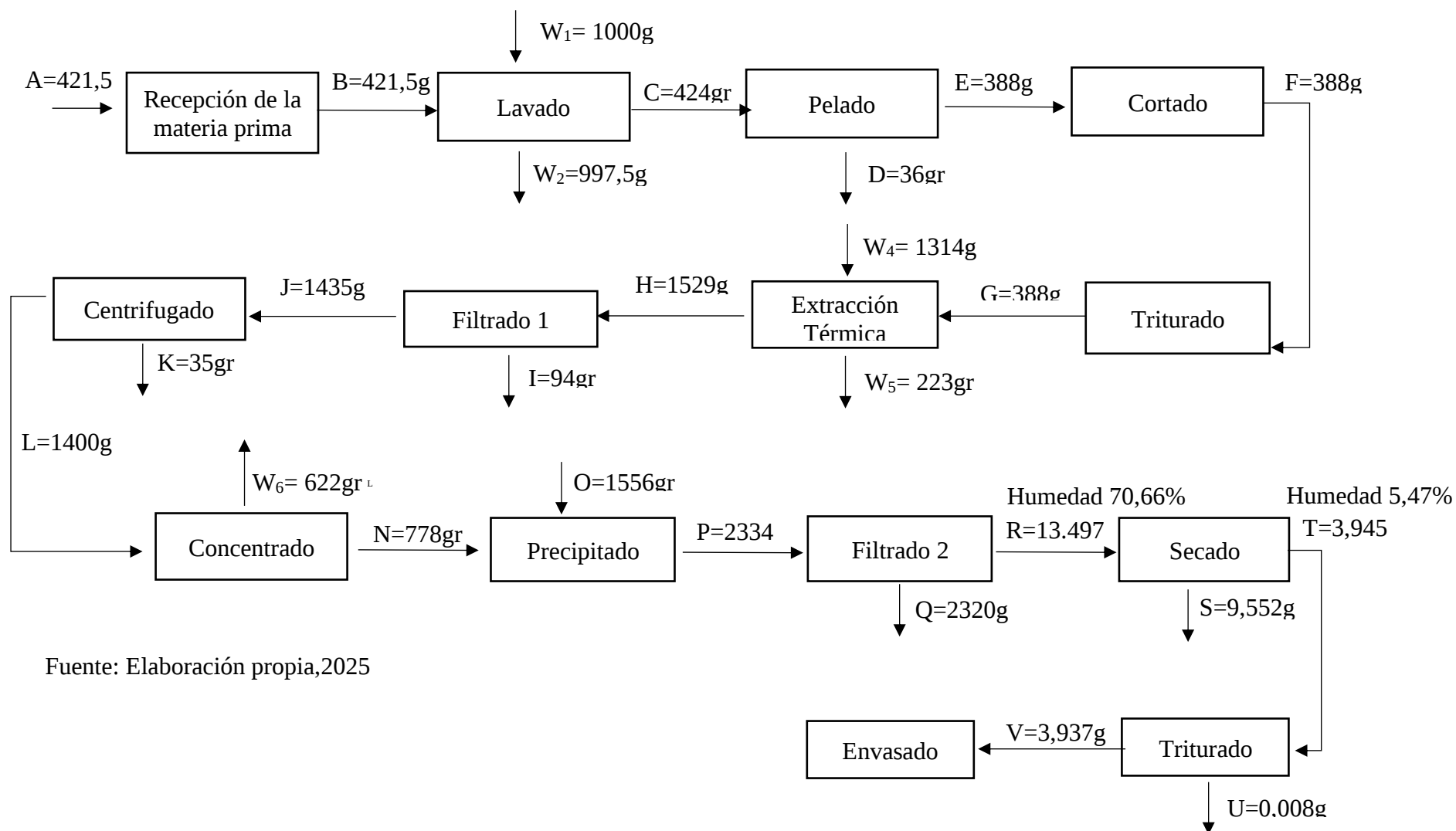
Balance global

$$T=U+V$$

$$U=T-V$$

$$U=3,945-3,937=0,008\text{g}$$

Figura III-3: Diagrama de bloque para el proceso experimental de la obtención del coagulante de Nopal



Fuente: Elaboración propia, 2025

3.5.2 Balance de energía del proceso tecnología experimental

Se desarrolla el balance de energía del proceso de obtención de coagulante natural en las etapas donde hubo consumo de energía eléctrica, este balance se realiza con la muestra que obtuvo el mayor rendimiento, que es la muestra 6 (seis), el cual usó las variables de: Temperatura de 55°C tiempo de 120 minutos y relación de M.P:Agua de 1:3.

3.5.2.1 Balance de energía en la etapa de extracción térmica

Datos:

Tiempo= $t=120\text{min}=2\text{hr}$

Temperatura= $T=55^{\circ}\text{C}$

Potencia de calentador eléctrico= $0,64\text{KW}$

Energía consumida por el calentador= $E_{\text{calentador}}$

$$E_{\text{calentador}}=P_{\text{calentador}}*t$$

$$E_{\text{calentador}}=0.64\text{KW}*2\text{hr}$$

$$E_{\text{calentador}}=1.28\text{kw}*h$$

$$E_{\text{calentador}}=1.28\text{KWh}*3600\frac{\text{KJ}}{\text{KWh}}=4608\text{kJ}$$

Energía consumida por el calentador eléctrico = 4608kJ

3.5.2.2 Balance de energía en la etapa de centrifugado

Datos:

Tiempo= $t=40\text{min}=0,67\text{hr}$

Potencia del centrifugador= $520\text{W}=0.52\text{kw}$

Energía consumida por el centrifugador= $E_{\text{centrifugador}}$

$$E_{\text{centrifugador}}=P*t$$

$$E_{\text{centrifugador}}=0.52\text{kw}*0.67\text{h}$$

$$E_{\text{centrifugador}}=0.35\text{kwh}$$

$$E_{\text{centrifugador}}=0.35\text{kwh}*3600\frac{\text{KJ}}{\text{KWh}}=1260\text{KJ}$$

La energía consumida en la etapa de centrifugado es de 1260KJ.

3.5.2.3 Balance de energía en la etapa del concentrado

$$P_{\text{sistema}} = P_{\text{atm}} - P_{\text{vacío}}$$

$$P_{\text{sistema}} = 101.3 \text{ kPa} - 50 \text{ kPa} = 51.3 \text{ kPa}$$

$$Q_{\text{Baño calefactor}} = m_{\text{agua-baño}} * \Delta T * C_{p \text{ H}_2\text{O}}$$

$$Q_{\text{Baño calefactor}} = 4 \text{ Kg} * (60 - 18^\circ \text{C}) * 1 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}^\circ \text{C}}$$

$$Q_{\text{Baño calefactor}} = 168 \text{ Kcal}$$

$$Q_{\text{Baño calefactor}} = 168 \text{ Kcal} * 4.184 \frac{\text{KJ}}{\text{Kcal}} = 702.912 \text{ KJ}$$

Bomba al vacío

$$\text{Tiempo} = t = 2.5 \text{ hr}$$

$$\text{Potencial de bomba al vacío} = P_{\text{bomba al vacío}} = 0.23 \text{ KW}$$

$$\text{Energía consumida por la bomba al vacío} = E_{\text{bomba}}$$

$$E_{\text{bomba}} = P_{\text{bomba}} * t$$

$$E_{\text{bomba}} = 0.23 \text{ Kw} * 2.5 \text{ h}$$

$$E_{\text{bomba}} = 0.575 \text{ kwh}$$

$$E_{\text{bomba}} = 0.575 \text{ kwh} * 3600 \frac{\text{KJ}}{\text{KWh}} = 2070 \text{ KJ}$$

$$\text{Energía consumida por la bomba es } 2070 \text{ KJ}$$

Condensador

$$Q_{\text{Condensador}} = m_{\text{agua}} * \Delta T * C_{p \text{ H}_2\text{O}}$$

$$Q_{\text{Condensador}} = 28 \text{ Kg} * 1 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}^\circ \text{C}} * (22 - 18)^\circ \text{C}$$

$$Q_{\text{Condensador}} = 112 \text{ Kcal} * 4.184 \frac{\text{KJ}}{\text{Kcal}} = 468.6 \text{ KJ}$$

3.5.2.4 Balance de energía en la etapa de secado

$$\text{Tiempo} = t = 6 \text{ h}$$

$$\text{Potencia del secador} = P_{\text{secador}} = 2 \text{ kw}$$

$$\text{Energía del secador} = E_{\text{secador}}$$

$$E_{\text{secador}} = P_{\text{secador}} * t$$

$$E_{\text{secador}} = 2 \text{ KW} * 6 \text{ hr}$$

$$E_{\text{secador}} = 12 \text{ kw} * \text{h}$$

$$E_{\text{secador}} = 12 \text{ KWh} * 3600 \frac{\text{KJ}}{\text{KWh}} = 43200 \text{ kJ}$$

La energía consumida en la etapa de centrifugado es de 43200KJ.

3.6 Determinación del rendimiento del proceso tecnológico

Para determinar el rendimiento del proceso se toma en cuenta la relación de la cantidad de coagulante seco entre la masa del Nopal seco

$$\% \eta = \frac{\text{masa del coagulante}}{(\text{masa de Nopal} * \% \text{seco})} * 100$$

$$\% \eta = \frac{3,937 \text{ gr}}{(421,5 \text{ gr} * 0,0652)} * 100 = 14,37\%$$

3.7 Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó mediante el programa IBM SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) versión 25. El cual permite realizar el análisis de datos mediante un tratamiento integrante de todas las fases, obteniendo de esta manera resultado confiables y significativos.

3.7.1 Análisis de Variancia Unitaria

Se realiza el análisis de varianza unitaria para determinar la influencia que tiene los factores de relación de Nopal: Agua, tiempo y Temperatura y sus interacciones sobre la variable respuesta, la cual es el rendimiento.

En la Tabla III-6 se muestra los datos introducido en el programa IBM SPSS de acuerdo al diseño planteado.

Tabla III-6: Datos para el uso del programa IBM SPSS

N° de Exp. (Corridas)	Matriz de diseño			Variable Respuesta
	Relación Agua: M.P.	Temperatura de extracción (°C)	Tiempo de extracción (t)	Rendimiento (%)
1	-1	-1	-1	6,23
2	+1	-1	-1	8,40
3	-1	+1	-1	3,74
4	+1	+1	-1	5,27
5	-1	-1	+1	11,50
6	+1	-1	+1	14,37
7	-1	+1	+1	5,44
8	+1	+1	+1	7,22
9	-1	-1	-1	5,53
10	+1	-1	-1	8,92
11	-1	+1	-1	4,41
12	+1	+1	-1	4,89
13	-1	-1	+1	12,56
14	+1	-1	+1	13,76
15	-1	+1	+1	6,17
16	+1	+1	+1	6,60

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Los factores inter-sujetos se muestra en la Tabla III-7, las cuales son variables independientes (factores) y cada uno de estas variables independiente tiene dos niveles las cuales son -1 y 1 para determinar la variable significativas.

Tabla III-7: Factores inter-sujetos

Factores inter-sujetos		
		N
N_A	-1,00	8
	1,00	8
T	-1,00	8
	1,00	8
tiempo	-1,00	8
	1,00	8

Fuente: Elaboración propia (programa SPSS),2025.

En la Tabla III-8, se muestra la prueba inter-sujeto es la tabla de resultado de un ANOVA (Análisis de Varianza), donde se observa si las variables y sus interacciones son significativas, es decir si las variables independientes estudiado tuvieron efectos significativos en la variable dependiente en este caso es el rendimiento.

- Si Sig. Es menor que 0,05 es estadísticamente significativos
- Si Sig. Es mayor que 0,05 el efecto no es significativo.

Tabla III-8: Pruebas de efectos Inter-Sujetos

Pruebas de efectos inter-sujetos					
Variable dependiente:	Rendimiento				
Origen	Tipo III de suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	175,049 ^a	6	29,175	127,348	0,000
Intersección	976,719	1	976,719	4263,376	0,000
N_A	11,989	1	11,989	52,332	0,000
T	88,031	1	88,031	384,257	0,000
Tiempo	57,116	1	57,116	249,310	0,000
N_A * T	1,829	1	1,829	7,985	0,020
N_A * tiempo	0,104	1	0,104	0,454	0,517
T * tiempo	15,980	1	15,980	69,753	0,000
Error	2,062	9	0,229		
Total	1153,830	16			
Total corregido	177,111	15			
a. R al cuadrado = ,988 (R al cuadrado ajustada = ,981)					

Fuente: Elaboración propia (programa SPSS),2025.

En la Tabla III-8 se muestra que la interacción del Factor N_A*tiempo es mayor que 0,05, lo que indica que; la relación no influye significativamente en el proceso de obtención del coagulante.

Para los demás factores influye significativamente, ya que los factores son mayores a 0,05, es decir que cada factor influye y lo que más influye significativamente es el Factor de Temperatura por lo que requiere un mayor control.

Determinación del modelo matemático

Una vez identificadas las variables significativas, se realiza una regresión lineal para determinar el modelo matemático.

Tabla III-9: Resumen del modelo matemático

Resumen del modelo^b				
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	,994 ^a	0,988	0,982	0,46539
a. Predictores: (Constante), Tt, N_AT, tiempo, T, N_A				
b. Variable dependiente: Rendimiento				

Fuente: Elaboración propia (programa SPSS),2025.

La Tabla III-10 muestra el ANOVA (Análisis de Varianza) compara las medidas de tres o más grupos y determina si existe diferencias significativas.

- Si Sig. < 0,05 existen diferencias significativas.
- Si Sig. > 0,05, no hay diferencia significativa.

Tabla III-10: Resultado del Análisis ANOVA

ANOVA^a						
Modelo		Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	174,945	5	34,989	161,548	,000 ^b
	Residuo	2,166	10	0,217		
	Total	177,111	15			
a. Variable dependiente: Rendimiento						
b. Predictores: (Constante), Tt, N_AT, tiempo, T, N_A						

Fuente: Elaboración propia (programa SPSS),2025.

Los resultados de ANOVA indica que el modelo de regresión es estadísticamente significativo ya que Sig. < 0,05, es decir que demuestra que las variables en conjunto son significativas con respecto al rendimiento, lo que indica que el modelo matemático es correcto.

Tabla III-11: Coeficiente del Modelo Matemático

Coeficientes^a								
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	T	Sig.	95,0% intervalo de confianza para B	
		B	Desv. Error	Beta			Límite inferior	Límite superior
1	(Constante)	7,813	0,116		67,154	0,000	7,554	8,072
	N_A	0,866	0,116	0,260	7,440	0,000	0,606	1,125
	T	-2,346	0,116	-0,705	-20,161	0,000	-2,605	-2,086
	tiempo	1,889	0,116	0,568	16,239	0,000	1,630	2,149
	N_AT	-0,338	0,116	-0,102	-2,906	0,016	-0,597	-0,079
	Tt	-0,999	0,116	-0,300	-8,590	0,000	-1,259	-0,740
a. Variable dependiente: Rendimiento								

Fuente: Elaboración propia (programa SPSS),2025.

De acuerdo al diseño factorial propuesto, se observa que todas las variables son significativas ya que poseen un nivel de significancia menor a 0,05 como se observa en la Tabla III-11. Con los valores numéricos de B se obtiene la ecuación de la regresión lineal para el rendimiento con la siguiente fórmula:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p + \varepsilon$$

Donde:

Y: Variable dependiente

β_0 : **Intercepto** (coeficiente constante)

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$: **Coeficientes de regresión**

$X_1, X_2, \dots, X_p$: Variables independientes

ε : Término de error

Entonces tenemos:

$$\text{Rendimiento} = 7,813 + 0,866N_A - 2,346T + 1,889t - 0,338N_A * T - 0,999T * t + 0,116$$

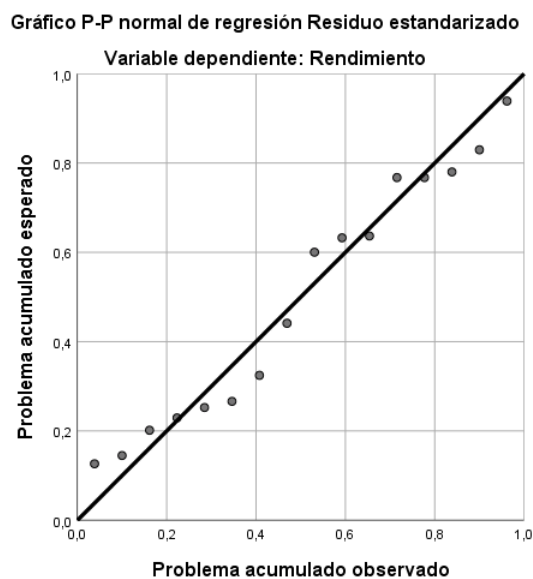
Donde:

N_A = Relación de Nopal: Agua

T = Temperatura

t = Tiempo

Tabla III-12: Coeficiente del Modelo Matemático



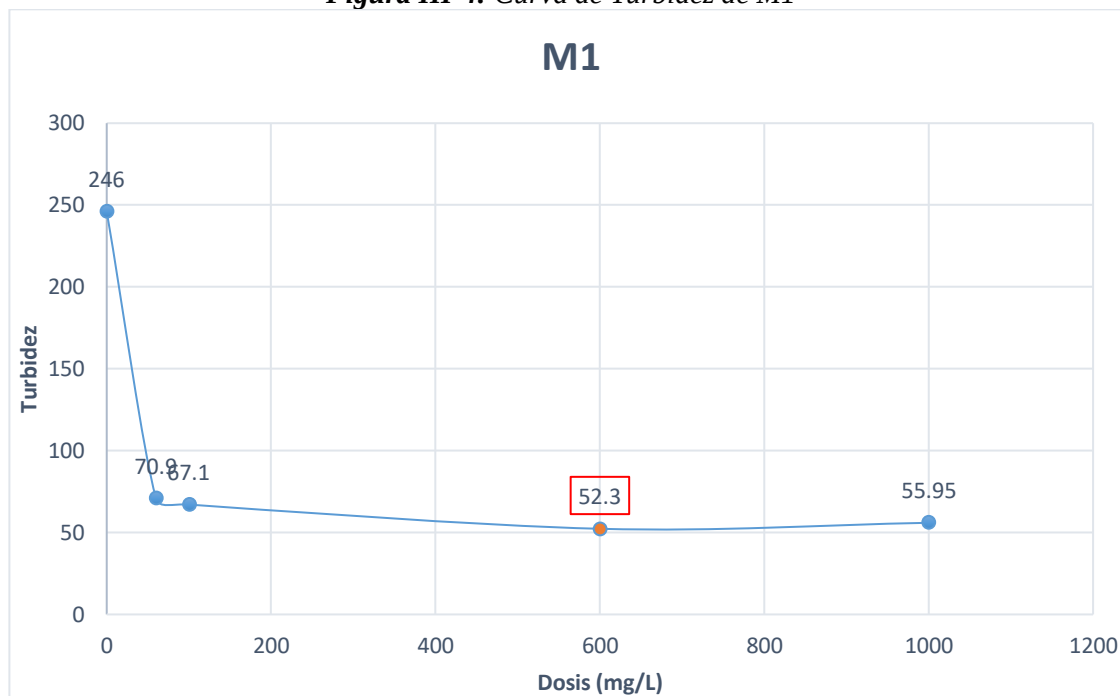
Fuente: Elaboración propia, 2025.

Se observa que algunos puntos no se ajustan al modelo, sin embargo, el análisis ANOVA no muestra gran significancia de ajuste, por lo que el modelo es correcto.

3.8 Prueba de efectividad de coagulación y sedimentación del coagulante de Nopal para tratamiento de agua turbia.

3.8.1 Dosis de la muestra 1 (M1)

En la figura III-4 se muestra una gráfica que relaciona el comportamiento de la turbidez en relación con la dosificación de la dosis del coagulante de Nopal de Tuna.

Figura III-4: Curva de Turbidez de M1

Fuente: Elaboración propia, 2025

En la gráfica de la figura III-4: Curva de Turbidez M1, se observa que la turbidez de la Muestra 1(M1) pura sin coagulante disminuye a medida que se adiciona la dosis de coagulante, pero por otro lado a dosis altas arriba de los 1000mg/l se observa un incremento de turbidez, esto es debido a la sobredosificación del coagulante, entonces podemos decir que la dosis es de 600mg/l para turbidez arriba de 246FNU.

Tabla III-13: Resultado de la dosificación de la Muestra 1

Código	Muestra 1=M1	Turbidez (FNU)	%Remoción
M1-Puro	M1-Puro	246	0
M1-1	M1- 60mg/L de coagulante	70,9	71,1788618
M1-2	M1- 100mg/L de coagulante	67,1	72,7235772
M1-3	M1- 600mg/L de coagulante	52,3	78,7398374
M1-4	M1- 1000mg/L de coagulante	55,95	77,2560976

Fuente: Elaboración propia, 2025

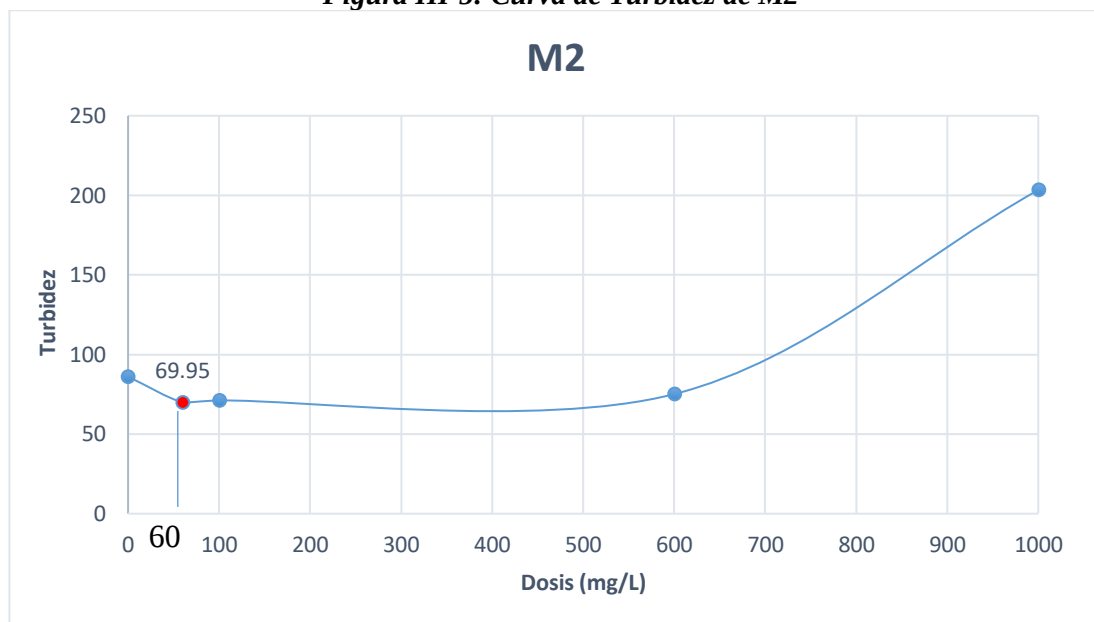
De acuerdo a los resultados de la tabla III-13: la dosis óptima para alta turbiedad

fue de 600mg/L, la cual se logra una turbidez más baja de 52,3 FNU, con una remoción de turbidez de 78,7%, lo que indica que el coagulante es altamente efectivo para tratar aguas turbias.

3.8.2 Dosis de la muestra 2 (M2)

En la Figura 6 se muestra una gráfica que relaciona el comportamiento de la turbidez en relación con la dosificación de la dosis del coagulante de Nopal de Tuna.

Figura III-5: Curva de Turbidez de M2



Nota. Fuente Elaboración propia, 2025

En la gráfica de la figura III-5 Curva de Turbidez M2, se observa al igual que la muestra 1 que la turbidez de la Muestra 2(M2) pura sin coagulante disminuye a medida que se adiciona la dosis de coagulante, pero por otro lado a dosis altas arriba de los 600mg/l se observa un incremento de turbidez, esto es debido a la sobredosificación del coagulante, entonces podemos decir que la dosis está por debajo de los 600mg/l.

Tabla III-14: Resultado de la dosificación de la Muestra 2

Código	Muestra 2=M2	Turbidez (FNU)	%Remoción
M2-Puro	M2-Puro	86,05	0
M2-1	M2- 60mg/L de coagulante	69,95	18,7100523
M2-2	M2- 100mg/L de coagulante	71,1	17,37362
M2-3	M2- 600mg/L de coagulante	75,1	12,7251598
M2-4	M2- 1000mg/L de coagulante	203	-135,909355

Fuente: Elaboración propia,2025

De acuerdo a los resultados de la tabla III-14: la dosis óptima para baja turbiedad fue de 60mg/L, la cual se logra una turbidez 69.95 FNU, con una remoción de turbidez de 18,7%, lo que indica que el coagulante es efectivo para tratar aguas turbias entre 70 a 86,07FNU.

CAPÍTULO IV

COSTO DEL PROYECTO

4.1 Evaluación de costos

Para determinar el presupuesto del presente proyecto de investigación, se realizó la evaluación de costo de los gastos en la elaboración de todo el proyecto, tanto como costos directos e indirectos.

En la Tabla IV-1 se presentan detalles de costo directo, se observa que la mayor inversión se concentra en el etanol al 96% y el Nopal de Tuna, los cuales representan los componentes activos principales del proceso.

Tabla IV-1: *Detalle de costo de reactivos y materia prima utilizados en la parte experimental en la obtención de coagulante de nopal de tuna.*

N°	Detalle	Cantidad	Unidad	Precio Unitario (Bs)	Costo (Bs)
1	Nopal de Tuna	25	Unidad	12,00	300,00
2	Etanol al 96%	25	Litros	12,60	315,00
3	Agua Purificada	40	Litros	0,90	36,00
4	Agua destilada	2	Litros	13,00	26,00
TOTAL					677,00

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Los materiales adquiridos para realizar el proceso de obtención de coagulante natural son presentados en la IV-2, el resto de los materiales y equipos fueron proporcionados por el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la carrera de Ingeniería Química, de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Tabla IV-2: Detalle de costo de materiales adquirido en la parte experimental del proceso de obtención de coagulante a partir del nopal de tuna

N°	Detalle	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (Bs)	Costo (Bs)
1	Fuente (plástico)	pza.	2	12	24
2	Espátula	pza.	1	23	23
3	Cuchillo	pza.	1	10	10
4	Cepillo	pza.	1	6	6
5	Cuchara	pza.	1	3	3
6	Termómetro	pza.	1	85	85
7	Embudo (plástico)	pza.	1	6	6
8	Envase	pza.	8	12	96
9	Balde	pza.	6	15	90
10	Olla	pza.	1	90	90
11	Colador	pza.	2	10	20
12	Tela gasa	metro	0,5	32	16
13	Bolsa hermética	paquete	1	25	25
14	fuelle de aluminio	doc.	1	14	14
15	pH-metro	pza.	1	120	120
16	Licuada	pza.	1	700	700
17	Probeta	pza.	1	65	65
18	Balanza digital	pza.	1	55	55
Total					1448

Fuente: Elaboración propia, 2025.

El costo de análisis fisicoquímicos se detalla en la Tabla IV-4 la cual se tuvo un descuento de 60% del precio real debido al convenio que tiene la Facultad de Ciencia y Tecnología con el Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo.

Tabla IV-3: Detalle de costo de análisis fisicoquímicos

Nº	Detalles	Cantidad	Precio (Bs)
1	Ceniza	1	80,00
2	Grasa	1	120,00
3	Hidrato de carbono	1	20,00
4	Humedad	1	50,00
5	Proteína	1	120,00
7	Valor energético	1	20,00
8	Análisis de turbidez	1	200,00
TOTAL			610,00

Fuente: Elaboración propia, 2025.

En la Tabla IV-4 se presenta de forma detallada los costos de los materiales de apoyo y gasto de movilidad necesario para la elaboración del presente documento físico.

Tabla IV-4: Detalle de costo de material de apoyo

Nº	Detalle	Cantidad	Unidad	Precio Unitario (Bs)	Costo (Bs)
1	Investigación en internet	6	Meses	150,00	900,00
2	Impresión	1050	Hoja	0,30	315,00
3	Anillado	6	Anillado	6,00	36,00
4	Transporte diario	560	Pasaje	2,00	1.120,00
5	Transporte de materia prima	35	Pasaje	45,00	1.575,00
TOTAL					3.946,00

Fuente: Elaboración propia, 2025.

En la siguiente tabla IV-5 se observan los valores de costos de energía consumida que se obtuvieron en el balance de energía que se encuentra en el capítulo III.

Tabla IV-5: Detalle de costo de energía en los equipos utilizados

N°	Detalle	Potencia (kwh)	Tiempo (h)	Costo (Bs)
1	Calentador	0,64	2	1,92
2	Centrifugado	0,64	0,67	0,64
3	Bomba al vacío	0,23	2,5	0,86
4	Secador	2	6	18,00
TOTAL				21,43

Fuente: Elaboración propia, 2025.

La Tabla IV-6 detalla la estructura consolidada de los costos totales requeridos para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

Tabla IV-6: Detalle de costos totales del estudio

N°	Detalle	Costo (Bs)
1	Costo de materia prima y reactivos	677,00
2	Costo de materiales adquirido	1.448,00
3	Costo de análisis	610,00
4	Costo de energía	21,43
5	Costo de material de apoyo	3.946,00
6	Costo de mano de obra	3.000,00
TOTAL		9.702,43

Fuente: Elaboración propia, 2025.

El costo total de investigación es de 9702,43Bs

4.2 Costo de producción

La determinación de los costos de producción se fundamenta en las condiciones óptimas identificadas durante la fase experimental. Dichos parámetros corresponden a una relación materia prima-solvente (Nopal:Agua) de 1:3, operando a una temperatura controlada de 55°C durante un periodo de 120 minutos.

Tabla IV-7: Detalle de costo del proceso de obtención

N°	Detalle	Cantidad	Unidad	Precio Unitario (Bs)	Costo (Bs)
1	Nopal	1	Unidad	12	12,00
2	Etanol 96%	1,569	Litro	12,6	19,77
3	Agua purificada	1,364	Litro	0,9	1,23
TOTAL					33,00

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Tabla IV-8: Detalle de costo de energía en los equipos utilizados

N°	Detalle	Potencia	Tiempo	Costo (Bs)
1	Calentador	0,64	2	1,92
2	Centrifugado	0,64	0,67	0,64
3	Bomba al vacío	0,23	2,5	0,86
4	Secador	2	6	18,00
TOTAL				21,43

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Costo total=33Bs+21,43Bs=54,43Bs/3.937gr de coagulante de Nopal

Para la producción de 3,937g≈4g de coagulante sólido de Nopal tiene un costo aproximadamente de 54,43Bs.

Un 1g de coagulante tiene un costo de 13,78Bs. Para la coagulación se prepara una solución de 1g de coagulante en 100ml de agua destilada, lo cual equivale a 10000mg/L y tiene un costo de 14,98 Bs y 1ml de la solución equivale a 10mg/ml, cada

ml de solución tiene un costo de 0.15Bs. Los 3,937g rinde para aproximadamente 64,5litro de agua turbia (246NTU).

Comparando el precio del coagulante natural con el coagulante químico (sulfato de aluminio), se identificó una brecha significativamente alta entre ambos productos, ya que el coagulante de sulfato de aluminio tiene un precio de 18,00Bs por kilogramos, el coagulante natural obtenido del Nopal representa un costo de aproximadamente 54Bs por cada 4gramos. Está marcada diferencia se debe a que el coagulante químico es industrial producida en grandes volúmenes, mientras que el coagulante de Nopal presentado en este trabajo es un prototipo obtenido a nivel experimental. El elevado costo unitario del coagulante natural refleja los gastos actuales de procesamiento manual, adquisición de materia prima al detalle y el uso de reactivos y/o insumos en laboratorio. No obstante, se proyecta que, mediante un escalamiento industrial, estos costos podrían optimizarse competitivamente. Los valores se resumen en la Tabla IV-9.

Tabla IV-9: Precios del coagulante

Coagulante	Cantidad (g)	Precio (Bs)
Coagulante natural de Nopal obtenido	3,937	54,43
Coagulante químico (sulfato de aluminio)	1000	18

Fuente: Elaboración propia, 2025.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

El presente estudio de investigación nos permite generar información sobre la obtención de coagulante natural solido a partir de Nopal de tuna existente en el departamento de Tarija y mediante análisis poder conocer su efectividad.

Se concluye lo siguiente:

- Las características fisicoquímicas del Nopal ((*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) procedente de Yacuiba-Tarija, de la cual se obtuvo los siguientes resultados por el laboratorio del CEANID de la U.A.J.M.S.: Ceniza 1,99%, Grasa 0,14% Coagulante 3,73%, Humedad 93,48%, Proteína Total 0,66% y Valor Energético 19%.
- El método aplicado fue el de extracción térmica, el cual fue seleccionado tras un análisis comparativo mediante una matriz de factores ponderados, esta herramienta permitió evaluar de manera cuantitativa factores como el costo operativo, tiempo de procesamiento, pureza, rendimiento, entre otras, garantizando la elección técnica más eficiente para el proceso.
- En el diseño experimental aplicado y desarrollado fue un diseño factorial, las variables de la fase experimental fueron la relación de Nopal.: Agua, Temperatura y tiempo, teniendo como variable respuesta el rendimiento, en la que se determinó la prueba ganadora la muestra seis (6) con un rendimiento de 14,37 % a las condiciones de una relación de M.P.: Agua de 1:3, una temperatura de 55°C y un tiempo de 120minutos.
- Se caracterizó el coagulante natural a partir del nopal, en el cual se obtuvieron los siguientes resultados por el laboratorio del CEANID de la UAJMS:
 - Ceniza 20,83%,
 - Hidratos de carbono 60,94%
 - Proteína Total 18.23%.
- El rendimiento de la obtención del coagulante orgánico a partir del Nopal (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) el cual fue de 14,37% de coagulante.

- El costo de producción de coagulante de Nopal a escala laboratorio es de 53,5Bs/3,937g de coagulante de Nopal.
- Se realizó prueba de efectividad de coagulación y sedimentación con el coagulante natural de Nopal, en la cual primeramente se dosificaron dos muestras de agua turbia (M1=246FNU y M2=86,05FNU), al agregar distintas dosis de coagulante y floculante dio como resultado que a mayor turbidez la dosis de coagulante es de 600mg/L y a menor turbidez la dosis límite es de 60mg/L

5.2 Recomendaciones

- La utilización o sustitución de coagulante de Nopal en tratamiento de aguas residuales y/o potabilización ya que es beneficioso y ayuda a la disminución de alta turbidez, posteriormente aplicar otros procesos para que el agua cumpla con la Ley 1333 y la NB 512.
- Probar la mezcla de dosificaciones con mayor proporción de coagulante natural y menor proporción de coagulante químico, para una comparación.
- Realizar la extracción con otra variedad de Nopal que se encuentra en la ciudad de Tarija, para una comparación de la efectividad del coagulante.
- Buscar maneras de aprovecharlos subproductos de la obtención de coagulante de Nopal, que pueden funcionar como alimento balanceado, abono, entre otras.