

CAPÍTULO I
MARCO TEÓRICO

1. Características generales de la Penca de Tuna

La penca de tuna es una planta con gran capacidad de adaptación al medio, esta adecuación se efectúa mediante modificaciones morfológicas, las cuales tienen relación con la conformación de varios de sus órganos.

Es una planta grande que puede alcanzar los 5 metros de altura. Posee tallos o cladodios suculentos y articulados, comúnmente llamados pencas, que presentan forma de raqueta ovoide o alargada de 60-70 cm de longitud, y además se desarrolla en climas semiáridos ya que posee mecanismos de resistencia a la sequía. (Farfan, 2021)

La penca de tuna también destaca por su capacidad de almacenar agua en sus tejidos suculentos, lo que le permite sobrevivir en condiciones climáticas extremas y suelos pobres en nutrientes.

1.1 Penca de tuna

La penca de tuna, conocida científicamente como *Opuntia ficus-indica*, es originaria de las regiones áridas y semiáridas de Mesoamérica, principalmente en lo que hoy son México y América Central. Se cultiva y se utiliza desde tiempos prehispánicos por diversas culturas indígenas debido a sus frutos comestibles y su capacidad para adaptarse a climas secos. Hoy en día, la tuna se encuentra ampliamente distribuida en todo el mundo.

La tuna es una planta “mágica, noble y fuerte”, ya que se desarrolla en cualquier condición climática y no es exigente en agua ni suelo. Se aclimata y adapta desde los 400 hasta los 4.000 metros sobre el nivel del mar.

Su nombre científico es *Opuntia ficus-indica*, y también se le conoce como nopal o chumbera. Es una planta arbustiva perteneciente a la familia de las Cactáceas, que carece de hojas verdaderas, pero presenta tallos o segmentos capaces de ramificarse, emitiendo flores y frutos. Los tallos de esta planta son ovalados y tienen un color verde amarillento. Además, posee dos tipos de espinas: unas largas y duras, y otras cortas y finas, similares a vellos. (Guerreo, 2016)

En la figura 1, se presenta de forma visual la penca de tuna.

Figura. 1 Penca de tuna



Fuente: (Farfan, 2021)

1.2. Características físicas y química de la penca de tuna (*Opuntia ficus-indica*)

En el departamento de Tarija, particularmente en comunidades como Calamuchita y La Angostura, las pencas se cultivan en cantidades moderadas, destacándose por su adaptación a las condiciones semiáridas de la región. Este cultivo representa una alternativa productiva de interés comercial, dado que sus hojas poseen propiedades nutricionales y funcionales, aptas para consumo directo o comercialización, contribuyendo al desarrollo económico local.

Característica física:

- **Tallo.** - A diferencia de otras especies de cactáceas, está conformado por tronco y ramas aplanadas que posee cutícula gruesa de color verde de función fotosintética y de almacenamiento de agua en los tejidos.

Los cladodios tienen forma ovoide, elíptica u oblonga, alcanzan una longitud de 33 – 60 cm y 18- 25 cm de ancho, son aplanados, con un ancho de corte de 1.8 – 2.3 cm; color verde pálido a oscuro, con o sin espinas dependiendo de la variedad. (Ramírez & Espino, 2015)

• **Las Hojas.** - Sólo se observan sobre tallos tiernos, cuando se produce la renovación de pencas, en cuyas axilas se hallan las aréolas de las cuales brotan las espinas, de aproximadamente 4 a 5 mm de longitud. Las hojas desaparecen cuando las pencas han alcanzado un grado de desarrollo y en cuyo lugar quedan las espinas.

• **Flores.** - Son solitarias, localizadas en la parte superior de la penca, de 6 a 7 cm de longitud. Cada aréola produce por lo general una flor, aunque no en una misma época de floración, unas pueden brotar el primer año, otras el segundo y tercero.

Se abren a los 35 a 45 días de su brotación. Sus pétalos son de colores vivos: amarillo, anaranjado, rojo, rosa. Sépalos numerosos de color amarillo claro a rojizo o blanco. (Cusqui, 2012)

• **Fruto.** - Es una baya polispermo, carnosa, de forma ovoide esférica, sus dimensiones y coloración varían según la especie; presentan espinas finas y frágiles de 2 a 3 mm de longitud. Son comestibles, agradables y dulces. Tabla 1: Parámetros de la Hoja de Penca de Tuna. (Diaz, 2015).

Tabla 1: Características físicas de la hoja de penca de tuna

Peso (g)	125 g
Ancho de corte (cm)	23.86 cm
Longitud (mm)	5.30 mm

Fuente: (Diaz, 2015)

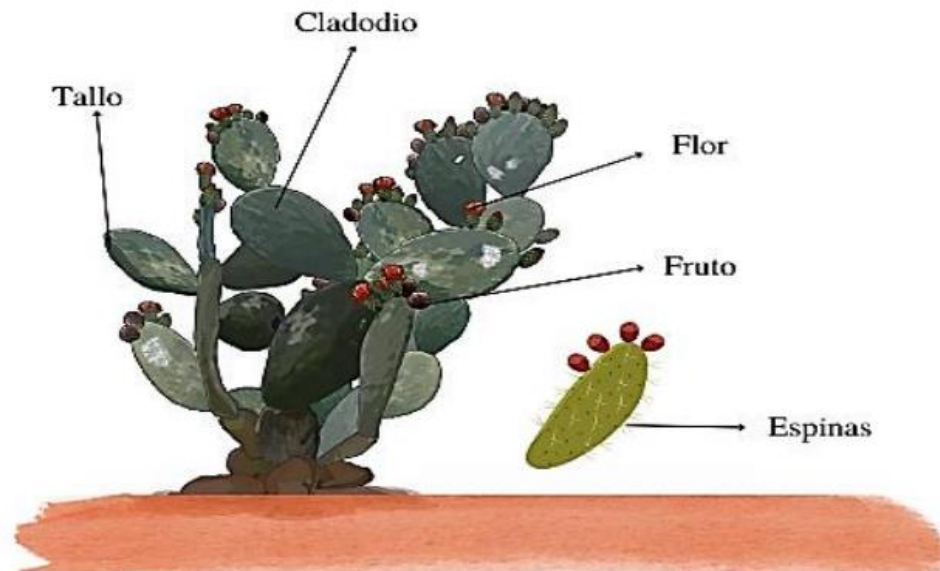
Características químicas:

Tabla 2: Composición química de la hoja de penca de tuna

Concepto	Contenido
Energía (Kcal)	27
Humedad	91.75
Proteínas (g)	1.70
Grasa (g)	0.30
Carbohidratos (g)	5.60
Calcio (mg)	93.00
Hierro (mg)	1.60
Tiamina (mg)	0.03
Riboflavina (mg)	0.06
Niacina (mg)	0.30

Fuente: (Diaz, 2015)

Figura. 2: Estructura de la panta de Tuna



Fuente: (Conlago, 2023)

1.3. Beneficios Nutricionales de la Penca de Tuna (*Opuntia ficus-indica*)

Los componentes nutricionales de la hoja de penca en materia seca son 18.72 % de proteína, 13,09 % de nutrientes y 65% de fibra cruda total, es un recurso potencial de fibra dietaria.

1.3.1. Obesidad

Contiene 17 aminoácidos de los cuales ocho son esenciales, proveen de mayor energía y ayudan al cuerpo a bajar el nivel de azúcar en la sangre, disminuye la fatiga y el apetito, a la vez que provee de nutrientes, las fibras insolubles que contiene crean una sensación de saciedad y ayudan a una buena digestión, absorbe agua y acelera el paso de los alimentos por el tracto digestivo impidiendo o retrasando la absorción de azúcares; las proteínas vegetales promueven la movilización de líquidos en el torrente sanguíneo disminuyéndose la celulitis y la retención de fluidos. (Conlago, 2023)

1.3.2. Colesterol

Los aminoácidos, la fibra y el niacina previene que el exceso de azúcar en la sangre se convierta en grasa; por otro lado, metaboliza la grasa y los ácidos grasos reduciendo así los niveles de colesterol. (Martins, Ribeiro, & Almeida, 2023)

1.3.3. Digestión

La penca de tuna contiene vitamina A, complejo B, minerales: calcio, magnesio, sodio, potasio, hierro y fibra en lignina, celulosa, hemicelulosa, pectina y mucílagos que en conjunto con los 17 aminoácidos ayudan a eliminar toxinas. (Martins, Ribeiro, & Almeida, 2023)

1.4 Producción de Penca de Tuna

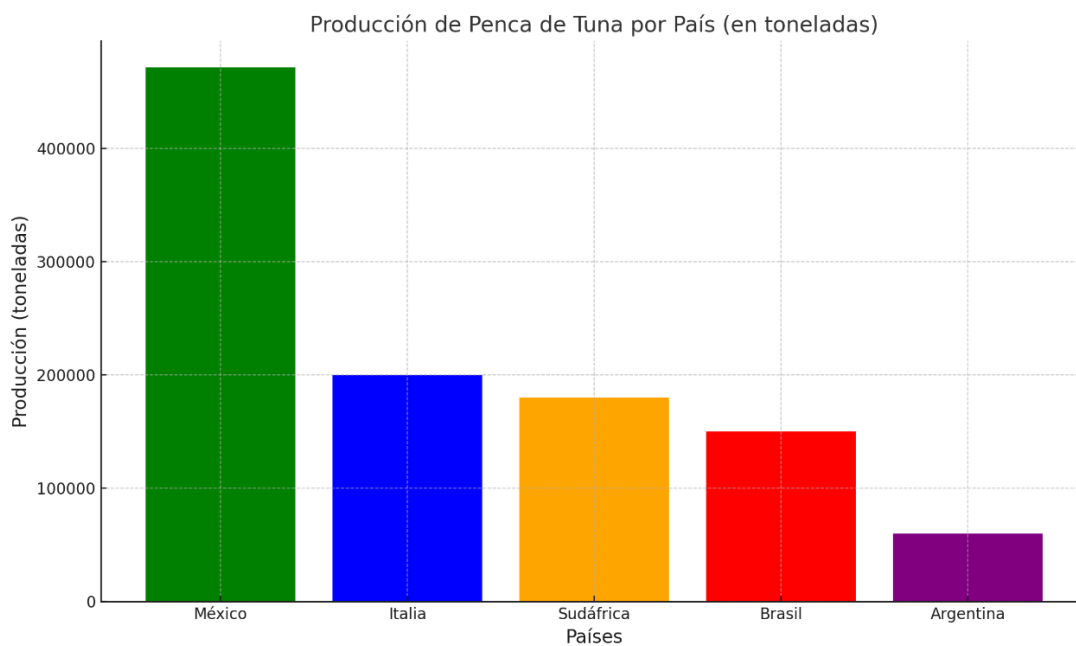
1.4.1. Producción mundial

La producción de penca de tuna tiene una gran importancia a nivel global debido a su multifuncionalidad y sostenibilidad. Además de ser una fuente esencial de alimento en regiones áridas, tanto por sus frutos como por los cladodios jóvenes, la planta actúa como barrera contra la erosión del suelo y ayuda a conservar la humedad en terrenos

desérticos. En la ganadería, es utilizada como forraje en épocas de sequía, gracias a su alto contenido de agua y nutrientes. Asimismo, el cultivo de la penca de tuna promueve el desarrollo económico en comunidades rurales, generando empleo en la cosecha, transformación y comercialización de sus productos, lo que la convierte en un recurso estratégico frente al cambio climático y la escasez de agua.

La producción mundial de penca de tuna, una planta perteneciente al género *Opuntia* y valorada tanto por sus frutos como por sus usos agrícolas y ecológicos, alcanza cifras significativas en términos de volumen. Según datos recientes, se producen alrededor de 4.8 millones de toneladas anuales, siendo México el principal productor, con más de 471,427 toneladas, seguido de países como Italia, Sudáfrica y Brasil. Este cultivo destaca no solo por su adaptabilidad a climas áridos, sino también por su contribución a la seguridad alimentaria y la economía de comunidades rurales en regiones semiáridas del mundo. (Novoa, 2019).

Figura. 3: Producción mundial de Penca de Tuna



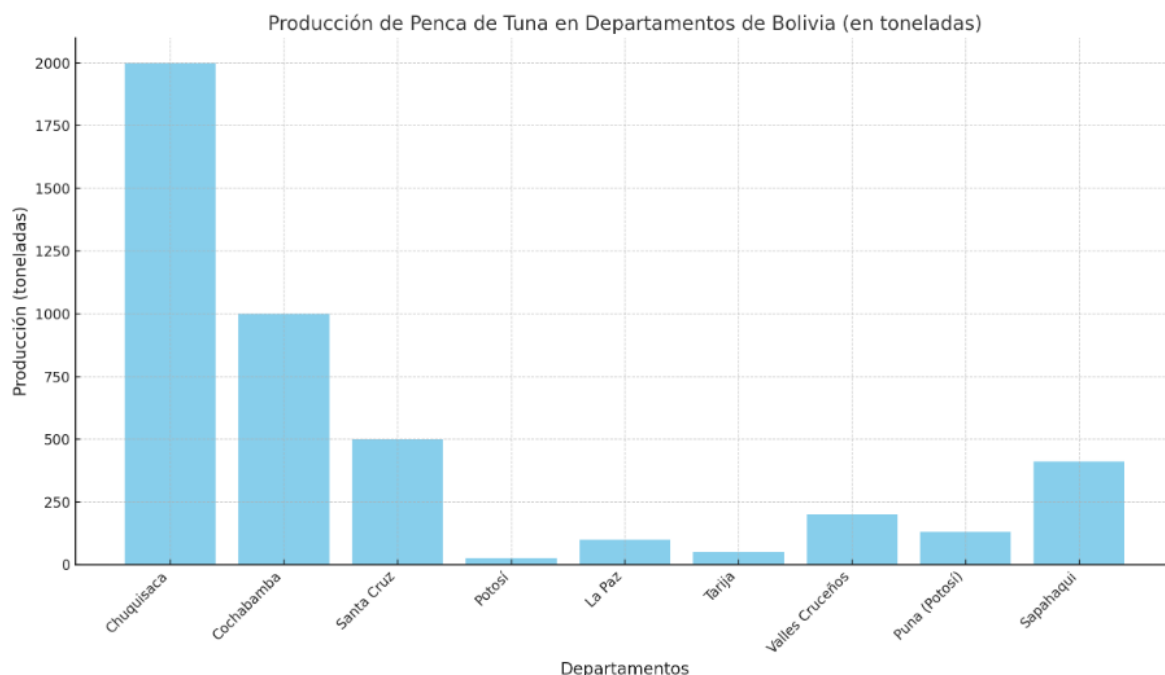
Fuente: (Gobierno de México, 2019)

1.4.2. Producción nacional

En Bolivia, la producción de tuna (*Opuntia ficus-indica*) ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años, tanto para consumo humano como para uso forrajero. Municipios como Camargo en Chuquisaca, los Valles de Potosí y los Valles Cruceños, incluyendo Saipina y Comarapa, destacan por su producción de tuna. Además, se han establecido plantaciones en Tarija y La Paz.

En Cochabamba, se estima que la producción anual alcanza las 1,000 toneladas. En Santa Cruz, la producción es de alrededor de 500 toneladas al año. En Potosí, se reporta una producción de 26 toneladas anuales.

En La Paz, la producción es de aproximadamente 100 toneladas al año. En Tarija, se estima una producción de 50 toneladas anuales. En los Valles Cruceños, incluyendo municipios como Saipina y Comarapa, la producción es de alrededor de 200 toneladas al año. En el departamento de Puna, Potosí, se plantaron 130 hectáreas en agosto y septiembre de 2023, con expectativas de cosecha en aproximadamente tres años. En el municipio de Sapahaqui, se reporta una superficie cultivada de 411.5 hectáreas de tuna. (Ramos, 2022)

Figura. 4: Producción de Penca de Tuna en Bolivia

Fuente: (Ramos, 2022)

1.4.3 Producción de la penca de tuna en el Departamento de Tarija

En el departamento de Tarija, especialmente en el Gran Chaco, la tuna (*Opuntia ficus-indica*) se ha convertido en un recurso relevante por su adaptación a climas áridos y su alto rendimiento de biomasa. Investigaciones de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho (UAJMS) han identificado 22 ecotipos locales, de los cuales 3 demostraron una notable adaptación a las condiciones chaqueñas. En los ensayos realizados, con densidades de plantación entre 2.000 y 50.000 plantas por hectárea, algunos ecotipos superaron las 300 toneladas de biomasa por hectárea, evidenciando su potencial como materia prima para productos como la harina de tuna. (Cespedes, 2021)

La región enfrenta problemas de escasez de agua y limitación de forraje, por lo que la tuna, con su bajo requerimiento hídrico y capacidad de almacenar agua, representa una alternativa sostenible y estratégica. Su uso actual como forraje por productores locales demuestra su disponibilidad y aceptación. De este modo, la alta productividad, la adaptación local y los estudios existentes confirman que la tuna es una materia prima

abundante y viable para su transformación en harina, con beneficios económicos, sociales y ambientales para Tarija. (Reyes, 2023)

1.5. Descripción del Producto (harina de la hoja de penca de tuna)

La harina de penca de tuna se considera un alimento de interés nutricional por ser fuente de compuestos beneficiosos para la salud. Investigaciones realizadas demuestran que el contenido de fibra alimentaria es de 43%, de la cual 28,45% es insoluble y 14,54% es soluble; entre los minerales se destaca el calcio (340 mg%) y potasio (210 mg%), mientras que el contenido en sodio es bajo (200 mg%). La harina representa un ingrediente no tradicional que permite incorporar fibra alimentaria en productos alimenticios, tales como alfajores. (Martins, Ribeiro, & Almeida, 2023)

1.5.1. Categorías de la Harina

Las categorías de la harina vienen determinadas por el porcentaje final de cenizas que permanezca en la harina, mientras menor será el porcentaje de ceniza, mayor sería la calidad y pureza de la harina. (Pelaez, 2013)

- Categoría 1ª: menos del 0.5% de ceniza
- Categoría 2ª: entre el 0.5% y el 0.65% de ceniza
- Categoría 3ª: entre el 0.66% y el 0.73% de ceniza
- Categoría 4ª: entre el 0.74% y el 0.8% de ceniza
- Categoría 5ª: más del 0.8% de ceniza.

La harina de la hoja de penca de tuna no entra en esta clasificación de categorías a pesar que ya cumple con las normas peruanas que se observan en los anexos; en este caso la harina se clasifica como una harina no convencional.

1.5.2. Técnicas industriales de deshidratación para penca de tuna

1.5.2.1. Deshidratación por convección / horno de aire forzado

En estas técnicas las pencas de tuna se cortan (en secciones longitudinales) y se colocan en bandejas dentro de un secador con circulación de aire caliente forzado. Esto acelera

la eliminación del agua por evaporación, porque el aire caliente entra en contacto continuo con el material. (Díaz & García, 2015)

- Ventajas: es una técnica industrial bien establecida, relativamente simple y de costo moderado. Permite controlar parámetros como temperatura y velocidad del aire para optimizar tiempo de secado y calidad del producto.
- Desventajas: si la temperatura es muy alta o el flujo de aire no es bien controlado, puede haber pérdida de compuestos bioactivos (como fenoles), además de posible contracción o daño de la estructura celular. (Medina-Torres, Carter, & Gallegos, 2011)

1.5.2.2 Liofilización (freeze-drying) de penca de tuna

Para la liofilización las piezas de penca primero se congelan, luego se colocan en una cámara de vacío donde el hielo se sublima (pasa directamente a vapor), eliminando agua sin pasar por fase líquida.

- Ventajas: preserva muy bien la estructura celular, el color, el mucílago y los compuestos bioactivos (como polisacáridos, pectinas, fenoles), ya que no hay un calentamiento agresivo.
- Desventajas: es un método costoso (equipo y energía), y el proceso es más lento que los secados convencionales. (Cruz, Mueller, & Loeppert, 2020)

1.5.2.3 Secado por Refractance Window (RW) de penca de tuna

Cómo funciona: la penca de tuna se coloca sobre una lámina delgada de material plástico (“ventana”) por la cual circula agua caliente por debajo. El calor se transmite de forma eficiente a través de esa ventana al tejido de la penca, provocando la evaporación del agua.

- Ventajas: es una técnica moderna con transferencia de calor muy eficiente, lo que reduce el tiempo de secado. Además, provoca menor daño térmico que los hornos tradicionales, lo que permite conservar mejor el mucílago, los polisacáridos y otros compuestos bioactivos.
- Desventajas: requiere un equipo especializado; su implementación a escala industrial puede tener desafíos dependiendo del diseño del secador. (Medina & Moreno, 2022)

1.5.3 Selección de proceso de secado

En la producción de harina a partir de la penca de tuna (*Opuntia ficus-indica*), la deshidratación constituye un paso crítico que determina la humedad final, la estabilidad microbiológica y la preservación de los compuestos bioactivos presentes en los cladodios, como el mucílago, los polisacáridos y los fenoles. Para esta investigación, se seleccionó el secado por horno de tiro forzado como el método más adecuado, considerando su eficiencia y capacidad de conservar la calidad funcional de la harina.

El estudio realizado por (Medina-Torres, Carter, & Gallegos, 2011) evaluó el efecto del secado convectivo con aire forzado sobre los cladodios de *Opuntia ficus-indica*, variando temperatura y velocidad del flujo de aire. Los resultados mostraron que el secado a 45 °C con un flujo de aire de 3 m/s permitió la mayor retención de compuestos bioactivos, incluyendo fenoles totales, flavonoides, β -caroteno y ácido ascórbico. En contraste, temperaturas más altas y flujos de aire más intensos causaron degradación parcial de estos compuestos y cambios en la estructura reológica de los cladodios, lo que evidencia la importancia de controlar cuidadosamente los parámetros de secado para preservar las propiedades funcionales.

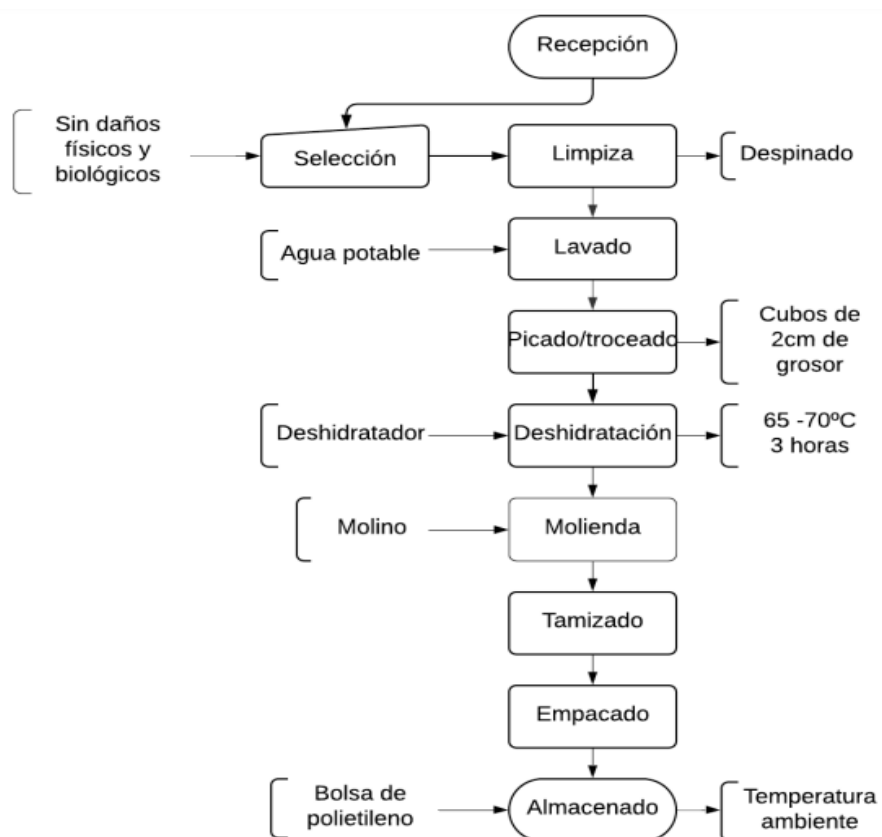
Esta evidencia científica respalda la elección del secado por tiro forzado, ya que este método permite:

- Control preciso de temperatura y flujo de aire, reduciendo la pérdida de compuestos bioactivos y preservando el mucílago y los polisacáridos.
- Secado uniforme y eficiente, evitando zonas con humedad residual elevada que puedan afectar la calidad de la harina.
- Compatibilidad con la molienda posterior, facilitando la obtención de un polvo fino, homogéneo y estable durante el almacenamiento.
- Escalabilidad industrial, ofreciendo un proceso reproducible y económico, adecuado para producir harina funcional de penca de tuna a nivel piloto o industrial.

1.6 Proceso de obtención de harina a partir de la hoja de penca de tuna

La obtención de harina a partir de la hoja de penca de tuna (*Opuntia ficus-indica*) requiere un proceso meticuloso que garantice la calidad y seguridad del producto final. Este proceso incluye las siguientes etapas clave; recepción, selección, limpieza y despinado, lavado, cortado, secado, molienda, tamizado y envasado. Cada etapa es fundamental para asegurar que la harina sea adecuada para el consumo y conserve sus propiedades nutricionales y funcionales. (Cando & Gallardo, 2020)

Figura. 5: Diagrama de flujo del proceso de la harina de la hoja de penca de tuna



Fuente: (Cando & Gallardo, 2020)

1.6.1 Recepción de la materia prima

La recepción de la materia prima es la operación inicial del proceso productivo en la cual se realiza el ingreso, registro y verificación de las características físicas y de

calidad del material vegetal, con el fin de asegurar que cumpla con las condiciones adecuadas para su procesamiento. (Cando & Gallardo, 2020)

1.6.2 Selección

Se debe verificar que los cladodios estén verdes sin ningún defecto ni contaminación que pueda ser física o química y que se presenten en buenas condiciones que estén libre de plagas, enfermedades y de daños mecánicos.

1.6.3 Limpieza y Despinado

La limpieza es una operación previa al procesamiento que consiste en eliminar impurezas físicas presentes en la superficie de la materia prima, tales como tierra, polvo, restos vegetales y otros contaminantes.

Luego de haber seleccionado, se utilizará lo que son guantes y cuchillo para eliminar las espinas y bordes teniendo en cuenta solo retirar la capa más fina del cladodio para evitar la pérdida de su contenido de fibra. (Cando & Gallardo, 2020)

1.6.3.1 Métodos de Despinado

1.6.3.1.1 Despinado Manual

El despinado manual consiste en retirar las espinas utilizando herramientas simples, como cuchillos, raspadores o cepillos. (Navarro, 2010)

Características:

- Es el método más simple y tradicional.
- Se aplica en procesos artesanales o de laboratorio.
- Permite un mayor control sobre la eliminación de las espinas.

1.6.3.1.2 Despinado Mecánico

El despinado mecánico se realiza mediante equipos o máquinas que utilizan rodillos, cepillos o fricción mecánica para retirar las espinas. (Navarro, 2010)

Características:

- Se utiliza en procesamiento industrial.
- Permite procesar grandes volúmenes de materia prima.
- Reduce el tiempo de procesamiento

1.6.3.1.3 Despinado Térmico

El despinado térmico consiste en aplicar una llama directa sobre la superficie de la penca para quemar las espinas. (Navarro, 2010)

Características:

- Método rápido y efectivo.
- Muy utilizado en procesos tradicionales.
- Requiere cuidado para no dañar el tejido vegetal.

1.6.4 Lavado

Se lo realizará con mucha agua para eliminar todo tipo de suciedad que está adherida en los cladodios, además se utilizará guantes para evitar cualquier tipo de imprevisto que pueda pasar. (Cando & Gallardo, 2020)

1.6.4.1 Métodos de Lavado**1.6.4.1.1 Lavado por inmersión**

El lavado por inmersión consiste en introducir la materia prima en un recipiente o tanque que contiene agua, permitiendo que la suciedad se desprenda por contacto directo con el líquido. (Earle, 2013)

Características:

- Método simple y ampliamente utilizado.
- Permite remover tierra y polvo adherido.
- Puede complementarse con agitación o cambio de agua para mejorar la limpieza.

1.6.4.1.2 Lavado por aspersión

El lavado por aspersión consiste en aplicar chorros de agua a presión sobre la superficie de la materia prima mediante boquillas o rociadores. (Earle, 2013)

Características:

- Permite remover suciedad superficial de forma rápida.
- Reduce el consumo de agua en comparación con la inmersión.
- Es común en procesos industriales continuo

1.6.4.1.3 Lavado por agitación

El lavado por agitación consiste en sumergir la materia prima en agua mientras se genera movimiento mediante burbujas de aire o agitadores, lo que facilita el desprendimiento de impurezas. (Earle, 2013)

Características:

- Mejora la eficiencia de limpieza.
- Permite remover suciedad más adherida.
- Se utiliza frecuentemente en procesamiento industrial de frutas y vegetales.

1.6.5 Cortado

Los cladodios se cortarán en rebanadas de 2 cm de espesor, lo cual permitirá un secado más rápido. Es importante cuidar el tamaño de las rebanadas para que sea uniforme y homogéneas durante el secado. (Cando & Gallardo, 2020)

1.6.5.1 Métodos de Corte

1.6.5.1.1 Corte Manual

El corte manual consiste en dividir la materia prima utilizando herramientas simples, como cuchillos o cuchillas. (Reyes P. , 2020)

Características:

- Es el método más común en laboratorio o pequeña escala.

- Permite controlar el tamaño y la forma del corte.
- Se utiliza cuando el procesamiento es artesanal o experimental

1.6.5.1.2 Corte Mecánico

El corte mecánico se realiza mediante equipos o máquinas diseñadas para cortar el material vegetal de forma uniforme. (Reyes P. , 2020)

Características:

- Se utiliza en procesos industriales.
- Permite mayor velocidad y uniformidad en el tamaño del corte.
- Reduce el tiempo de procesamiento.

1.6.5.1.3 Corte Longitudinal

El corte longitudinal consiste en dividir la materia prima a lo largo de su eje principal, formando secciones alargadas o segmentos. (Reyes P. , 2020)

Características:

- Permite aumentar el área superficial.
- Favorece procesos de secado más eficientes.
- Es común en vegetales de forma plana o alargada.

1.6.6 Secado

Los cladodios una vez ya rebanado son colocados en tamices y luego llevados al horno deshidratador para ser deshidratados. La duración del secado es aproximadamente de tres horas a una temperatura de 65°C. (Cando & Gallardo, 2020)

1.6.6.1 Métodos de Secado

1.6.6.1.1 Secado solar

El secado solar consiste en exponer el material vegetal directamente a la radiación solar, permitiendo que el calor del sol evapore el agua contenida en el producto. (Canovas, 2001)

Características:

- Método económico y tradicional.
- No requiere consumo de energía eléctrica.
- Depende de condiciones climáticas.

1.6.6.1.2 Secado en estufa

El secado en estufa o secador de bandejas consiste en colocar el material en bandejas dentro de una cámara donde circula aire caliente, eliminando la humedad del producto. (Canovas, 2001)

Características:

- Permite controlar temperatura y tiempo de secado.
- Produce secado más uniforme.
- Es muy usado en laboratorios y plantas piloto

1.6.6.1.3 Secado en aire caliente (aire forzado)

El secado por aire caliente consiste en hacer circular aire calentado sobre la superficie del producto, provocando la evaporación del agua contenida en el material. (Canovas, 2001)

1.6.7 Molienda

Una vez deshidratado los cladodios se da paso a la molienda para disminuir las partículas, mediante un molino. (Cando & Gallardo, 2020)

1.6.7.1 Métodos de Molienda**1.6.7.1.1 Molienda mediante molino de martillos rotatorios**

La molienda por martillos rotatorios es un proceso de reducción de tamaño en el cual el material es sometido a impactos repetidos generados por martillos giratorios, produciendo la fragmentación del material hasta alcanzar el tamaño de partícula deseado. (Cauvain & Young, 2016)

Características

- Produce polvos o harinas finas.
- Permite procesar materiales secos de origen vegetal.
- El tamaño final depende del tamiz instalado en el molino.
- Es uno de los molinos más utilizados en la industria alimentaria

Funcionamiento

El proceso ocurre de la siguiente manera:

1. El material seco ingresa al molino de martillos.
2. Los martillos rotatorios giran a alta velocidad.
3. El material se impacta contra los martillos y las paredes del molino.
4. Las partículas se reducen de tamaño.
5. El material pasa por un tamiz o malla, que determina el tamaño final de partículas.

Características:

- Muy utilizado en industria alimentaria.
- Permite controlar temperatura, humedad y flujo de aire.
- Produce secado rápido y eficiente.

1.6.7.1.2 Molienda por fricción

La molienda por fricción consiste en reducir el tamaño del material mediante el roce entre dos superficies, como piedras o discos giratorios. (Cauvain & Young, 2016)

Características:

- Produce partículas más uniformes.
- Se utiliza en molinos de discos o molinos de piedra.
- Es común en la producción de harinas vegetales

1.6.8 Tamizado

Consiste pasar por un tamiz de 0,063 micras de la molienda para poder obtener la granulometría deseada. (Cando & Gallardo, 2020)

1.6.8.1 Métodos de Tamizado

1.6.8.1.1 Tamizado manual

El tamizado manual consiste en pasar el material pulverizado a través de un tamiz mediante movimiento manual, permitiendo que las partículas más pequeñas atraviesen la malla mientras que las más grandes quedan retenidas. (Ibarz, 2005)

Características:

- Método simple y económico.
- Utilizado en laboratorios o pequeñas escalas.
- Permite separar partículas según el tamaño de la malla.

1.6.8.1.2 Tamizado mecánico o vibratorio

El tamizado mecánico o vibratorio consiste en utilizar equipos que generan vibraciones para facilitar el paso de las partículas a través de los tamices. (Ibarz, 2005)

La norma ISO 972 establece lineamientos generales para especias en polvo, aunque en términos generales, el tamaño puede ser adaptado para cumplir con especificaciones internas de la empresa o del cliente ISO 972(1997).

Características:

- Permite mayor eficiencia y rapidez en la separación.
- Se utiliza en laboratorios y procesos industriales.
- Puede emplear varios tamices de diferente tamaño

1.6.9 Envasado

Se envasa en fundas de polietileno con fines de garantizar que no pase luz al producto ni adquiera humedad. El almacenado se realizará en condiciones adecuadas para que no existan ningún tipo de contaminación. (Cando & Gallardo, 2020)

1.6.9.1 Métodos de Envasado

1.6.9.1.1 Envasado al vacío

El envasado al vacío consiste en extraer el aire del interior del envase antes de sellarlo, con el objetivo de reducir la oxidación y prolongar la vida útil del producto. (Robertson, 2013)

Características:

- Reduce la presencia de oxígeno.
- Aumenta la conservación del producto.
- Muy usado en alimentos deshidratados.

1.6.9.1.2 Envasado manual

El envasado manual consiste en introducir el producto en los envases de forma manual, utilizando utensilios simples o recipientes para llenar las bolsas o envases. (Robertson, 2013)

Características:

- Utilizado en laboratorios o pequeñas producciones.
- Permite controlar la cantidad de producto.
- Requiere posteriormente sellado del envase.

1.6.9.1.3 Envasado hermético o sellado térmico

El envasado hermético o sellado térmico consiste en cerrar el envase mediante calor utilizando una selladora, impidiendo la entrada de aire, humedad o contaminantes. (Robertson, 2013)

Características:

- Muy utilizado en productos en polvo.
- Proporciona mayor protección del producto.
- Es común en procesos de laboratorio o escala piloto.

1.7. Propuesta de guía para análisis físico-químico y microbiológicos la harina de hoja de penca de tuna**1.7.1. Análisis físico-químico**

En su investigación hace referencia que: La producción de harinas requiere realizar análisis fisicoquímicos, ya que estos permiten verificar que el producto cumpla con los requisitos necesarios para el consumo humano y para su uso en la elaboración de otros alimentos, garantizando así su inocuidad (Luna, 2020). Asimismo, el análisis físico consiste en evaluar características como textura, color y sabor, además de observar mediante microscopía la estructura de los granos y detectar la posible presencia de materiales extraños o contaminantes.

1.7.1.1. Requisitos físicos-químicos para la harina de la hoja de penca de tuna

Para los requisitos de análisis físico químico en la harina de la hoja de penca de tuna se realizó una tabla de comparación con la norma peruana para poder tener noción de las propiedades que nos aporta se indica en la tabla 3.

Tabla 3: Comparación harina de trigo y harina d la hoja de penca de tuna

Parámetros	Norma Técnica Peruana 011.182:2016
Humedad	6%
Proteína total	10 -13 %
Fibra	48%
Ceniza	16-20 %
Carbohidratos	10-16 %
Grasa	1-3 %

Fuente: (Cando & Gallardo, 2020)

1.7.1.2. Requisitos microbiológicos de la harina d la hoja de penca de tuna

Para los requisitos de análisis microbiológicos en la harina de la hoja de penca de tuna se realizó una tabla de comparación con la norma peruana para poder tener noción de las propiedades que la hoja de penca de tuna nos aporta como nos indica en la tabla 4.

Tabla 4: Requisitos microbiológicos de la harina de la hoja de penca de tuna NTP 011.182

Característica	Límite Máximo	Método de Ensayo
Aerobios mesófilos UFC/g	10^5	AOAC Official Method 966.23 C
Levaduras UFC/g	10^4	FDA / FCSAN BAM
Mohos UFC7g	10^4	FDA / FCSAN BAM
Salmonella/ 25 g	-	FDA / FCSAN BAM

Fuente: NTP 011.182 Harina de la hoja de penca de tuna

1.8. Análisis Sensorial de la harina de la hoja de penca de tuna (*Opuntia ficus-indica*)

1.8.1 Método Hedónico

El método hedónico es una técnica de análisis sensorial ampliamente utilizada en la evaluación de alimentos, que permite determinar el grado de aceptación de un producto mediante la percepción subjetiva de los consumidores. Se basa en el uso de escalas estructuradas, como la escala hedónica, en las cuales los evaluadores expresan su nivel de agrado o desagrado respecto a atributos sensoriales como color, olor, sabor y textura.

Se muestra las características sensoriales que debe de tener la harina de la hoja de penca de tuna al realizar la producción de la misma. (Lawless & Heymann, 2010)

Tabla 5: Características bibliográficas sensoriales de la harina de la hoja de penca de tuna

Características sensoriales de la harina de la hoja de penca de tuna	
Color	Verde pálido
Olor	Herbáceo
Sabor	Amargo o Herbáceo
Textura	Suave y adherente

Fuente: (Cando & Gallardo, 2020)

CAPÍTULO II
PARTE EXPERIMENTAL

2.1. Descripción y Caracterización de la Materia Prima

2.1.1. Adquisición de la hoja de penca de tuna

La parte experimental del presente trabajo se realiza en los ambientes del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la carrera de Ingeniería Química en la ciudad de Tarija.

En el contexto del departamento de Tarija (Bolivia), las hojas de penca se obtienen principalmente de los cultivos ubicados en los municipios de Calamuchita y La Angostura, en la región del trópico, zonas reconocidas por la adecuada adaptación de *Opuntia ficus-indica* a las condiciones climáticas semiáridas de la zona.

Figura. 6: Mapa del Municipio de Calamuchita, Tarija



Fuente: Google Maps (2025)

Figura. 7: Materia Prima de la comunidad de Calamuchita



Fuente: Elaboración propia (2025)

2.1.2. Caracterización organoléptica de la hoja de penca de tuna (*Opuntia ficus-indica*)

La caracterización organoléptica de la hoja de penca de tuna implica evaluar sus propiedades sensoriales a través de los sentidos, como la vista, el olfato, el gusto y el tacto. A continuación, se describe de manera detallada cada atributo.

• **Aspecto Visual:**

1. **Color:** La hoja de penca de tuna presenta un color verde intenso cuando está fresca, con variaciones que van desde verde claro hasta verde oscuro.
2. **Textura:** La superficie es lisa y brillante, con espinas visibles o finos pelos puntiagudos.
3. **Forma:** Alargada, plana y ovalada, con bordes lisos o ligeramente dentados.

• **Aroma:**

1. **Fragancia Fresca:** Posee un aroma fresco y herbáceo, con notas húmedas similares al aloe vera o al pepino.

• **Sabor:**

1. **Fresco:** Su sabor es neutro o ligeramente amargo. El gel interno presenta un sabor suave y levemente ácido, que varía según el grado de madurez de la hoja.

• **Consistencia:**

1. Cuando está fresca es crocante en la capa externa, suave y algo mucilaginosa en el interior debido a su alto contenido de agua y mucilago dependiendo del grado de madurez de la hoja.

Es importante señalar que la caracterización organoléptica de la hoja de penca de tuna (*Opuntia ficus-indica*) puede variar según el grado de madurez, las condiciones de cultivo y el tipo de procesamiento aplicado. Esta evaluación sensorial permite obtener información detallada sobre sus atributos perceptibles, lo cual resulta de utilidad en la

formulación de productos alimenticios y en la toma de decisiones dentro de la industria alimentaria (Brow, 2018).

2.1.2.1 Evaluación sensorial mediante test hedónico

Para la evaluación sensorial de la harina obtenida a partir de la hoja de penca de tuna, se aplica un test hedónico a un panel conformado por 10 jueces no entrenados, quienes evalúan las características sensoriales del producto. A cada juez se le proporciona una muestra de la harina junto con una ficha de evaluación sensorial estructurada, en la cual se registran las apreciaciones correspondientes a los atributos evaluados.

La valoración se realiza mediante una escala hedónica de cinco puntos, donde 1 corresponde a “me disgusta mucho”, 2 a “me disgusta moderadamente”, 3 a “no me gusta ni me disgusta”, 4 a “me gusta moderadamente” y 5 a “me gusta mucho”. Este procedimiento permite determinar el grado de aceptación sensorial del producto y establecer su potencial de consumo.

2.1.3. Caracterización fisicoquímica de la hoja de penca de tuna

La caracterización fisicoquímica de la hoja de penca de tuna se lleva a cabo, mediante un análisis fisicoquímico en las instalaciones de CEANID (Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo). Este estudio implica la evaluación de aspectos fundamentales de sus propiedades, con el objetivo de obtener una comprensión detallada de su composición y características. Véase **Anexo 5**

Tabla 6: Resultados de Análisis Fisicoquímicos de la Obtención de Harina a partir de la hoja de penca de tuna

PARAMETRO	TÉCNICA y/o MÉTODO DE ENSAYO	UNIDAD	RESULTADO
Humedad	NB 33006:02	g/100g	6,10
Proteína total	NB/ISO 8968 - 1:08	g/100g	5,97
Fibra	Digestión acida	g/100g	4,00
Ceniza	NB 39034:10	g/100g	19,40
Grasa	NB 313019:06	g/100g	1,05
Hidratos de carbono	NB 312031:06	g/100g	67,48

Fuente: CEANID 2024

Los resultados de este estudio no solo contribuyen al conocimiento científico en el campo de la alimentación, sino que también tienen aplicaciones prácticas en la formulación de productos, la optimización de procesos y el desarrollo de tecnologías relacionadas.

2.2. Equipos y materiales

Para la presente investigación se utilizan los siguientes materiales:

Tabla 7: Equipos y materiales utilizados en el proceso

Nº	Equipos y materiales	Aplicación en el proceso
1	Termómetro (El equipo presenta escala en grados Celsius (°C), con un rango de medición de 0 a 100 °C)	El termómetro mide con precisión la temperatura de un sistema. En el proceso de elaboración de harina de hoja de penca de tuna, este instrumento se instala en el secador de tiro forzado para controlar la temperatura del aire, la cual se mantiene entre 60 y 65 °C. Su uso garantiza que la hoja alcance la humedad óptima sin degradar los compuestos nutricionales o funcionales. Además, esta medición asegura un secado uniforme, preserva la calidad del producto final y minimiza el riesgo de sobrecalentamiento o deterioro del material.
2	Recipiente de Plástico (El equipo presenta una capacidad aproximada de 3 litros)	El recipiente de plástico almacena temporalmente la hoja de penca de tuna <i>Opuntia ficus-indica</i> después del lavado y cepillado. Durante el proceso, este elemento se emplea únicamente para contener el material vegetal, sin la adición de agua. Su uso permite una manipulación higiénica de las hojas, evita la contaminación externa y facilita el orden del proceso previo al secado.
3	Tamiz de plástico	El tamiz de plástico sostiene la hoja de penca de tuna (<i>Opuntia ficus-indica</i>) rallada, lo cual permite que el

	(Presenta una capacidad operativa determinada por un diámetro aproximado de 25 cm)	mucílago se separe por gravedad y fluya hacia el recipiente colector. Esta malla polimérica facilita la extracción del mucílago de manera higiénica, evita la pérdida de material y permite un manejo controlado de la materia prima antes de su procesamiento posterior.
4	Envase de polietileno (El material presenta una capacidad aproximada de 500 g)	El envase de polietileno hermético almacena la harina de hoja de penca de tuna después del proceso de molienda y tamizado. Este empaque evita la entrada de aire y humedad, lo cual asegura la conservación de las propiedades organolépticas, nutricionales y funcionales de la harina.
5	Rebanador (Acero inoxidable)	El rebanador manual corta la hoja de penca de tuna en tiras delgadas (longitudinales) con un espesor de 0,3 a 0,5 cm y una longitud de 10 y 12 cm, lo cual permite un raspado o rallado uniforme. Este procedimiento facilita la liberación del mucílago, asegura un tamaño de partículas consistente y optimiza la eficiencia de extracción en las etapas posteriores del proceso.
6	Instrumento de corte metálico afilado (cuchillo)	El instrumento de corte metálico afilado retira mecánicamente las espinas de la hoja de penca de tuna durante la etapa de despinado. Su filo permite un corte preciso y controlado, lo cual asegura la remoción completa de estructuras punzantes sin generar daño excesivo en el tejido vegetal.

7	Balanza Analítica (El equipo presenta una capacidad máxima de 500 g y una precisión de $\pm 0,001$ g)	Este instrumento se emplea para efectuar los pesajes correspondientes en las distintas etapas del proceso, según lo requiere cada procedimiento. Su uso asegura precisión y exactitud en la determinación de las masas involucradas.
8	Secador de tiro forzado	Este equipo se utiliza para efectuar el proceso de deshidratación de la hoja de penca de tuna (<i>Opuntia ficus-indica</i>), mediante la aplicación controlada de temperatura y circulación de aire, con el objetivo de esta operación es reducir el contenido de humedad hasta alcanzar los niveles establecidos según las especificaciones del procedimiento.
9	Balanza infrarroja para la determinación de humedad (Capacidad 510 gr y su precisión de 0,01 g)	Una vez que la hoja de penca de tuna completa la fase de secado, se mide el contenido de humedad utilizando el equipo correspondiente, con el fin de verificar que los niveles de humedad del producto final se ajusten a los parámetros establecidos en las especificaciones del proceso.
10	Molino de martillos (Su capacidad es de 0,2 a 0,5 kg siendo su precisión de 0,063mm)	Este equipo se utiliza para la molienda de la hoja de penca de tuna seca, mediante la aplicación de fuerzas mecánicas específicas que permiten reducir el tamaño de las partículas, hasta obtener una harina de textura fina, adecuada para su uso en diferentes procesos. .

11	Tamiz vibratorio (mallas entre 0,063 - 1mm)	El tamiz vibratorio es un equipo utilizado para la separación y clasificación de partículas sólidas según su tamaño, mediante el paso del material a través de una malla mientras se aplica un movimiento vibratorio que facilita la distribución uniforme del producto. Este equipo permite obtener una granulometría homogénea, lo cual elimina partículas de mayor tamaño y garantiza la uniformidad del producto final. Para el proceso de tamizado de la harina obtenida de la hoja de penca de tuna, se utiliza un tamiz vibratorio de acero inoxidable, con potencia de 0,25 HP, de marca VEVOR. Este instrumento permite una adecuada separación de partículas y mejora la eficiencia del proceso de clasificación.
12	Selladora al vacío	Se utiliza para el envasado de la harina previamente tamizada, con el objetivo de garantizar su conservación adecuada. El proceso protege al producto de factores externos como la humedad y el aire, lo cual asegura su estabilidad y calidad durante el almacenamiento.

Fuente: Elaboración propia (2025)

2.3. Diseño experimental

Se determina las variables que se modifican para observar y cuantificar el efecto que tienen sobre los resultados obtenidos, como son el ancho de corte de la muestra, la temperatura y tiempo de secado de la hoja de penca de tuna, debido a que la combinación de estas influye directamente en el proceso de molienda, sobre la variable respuesta que es humedad.

Es así que el modelo factorial manejado es un diseño 2^3 el cual se compone de tres factores y dos niveles como se presenta a continuación:

$$N^{\circ} \text{ variables} = 3$$

$$\text{Niveles} = 2$$

$$N^{\circ} \text{ experimentos} = 2^3 = 8$$

Se realizará dos repeticiones.

$$N^{\circ} \text{ experimentos} = 8 \times 2 = 16 \text{ experimentos}$$

Los factores son tiempo, temperatura y ancho de corte; con 2 niveles cada uno.

Donde las variables del diseño experimental para la presente investigación son:

- **Factores y Niveles del Diseño Factorial del Experimento**

Tabla 8: Valores asignados al proceso experimental

Variables	Niveles	
	Max.	Min.
Ancho de corte(cm)	0,3	0,5
Temperatura (T° C)	60	65
Tiempo de secado (hrs)	8	9

Fuente: Elaboración propia (2025)

- **Descripción de variables**

Ancho de corte

El ancho de corte de las muestras se selecciona en función del comportamiento experimental observado durante el proceso de secado para la obtención de harina de la hoja de penca de tuna. Se determina que anchos de corte muy finos generan sobrecalentamiento localizado y favorecen el pardeamiento térmico, lo cual conduce al quemado de la muestra. Por el contrario, anchos de corte mayores presentan una difusión interna de humedad insuficiente, lo que dificulta alcanzar un secado adecuado dentro del tiempo de operación. Por este motivo, se establece un rango de ancho de corte que permite una adecuada transferencia de calor y masa sin comprometer la

integridad del material. El ancho de corte de las láminas se mide mediante un calibrador Vernier, instrumento que permite determinar con precisión el espesor de las muestras obtenidas durante el proceso de corte.

Temperatura

Se seleccionan estos dos valores debido a que el equipo de secado opera únicamente dentro de un rango de ajuste comprendido entre 60 °C y 65 °C. Estas condiciones limitan los parámetros experimentales disponibles para el proceso. Por lo tanto, estas temperaturas se consideran para la evaluación del secado, permitiendo trabajar dentro de las condiciones operativas del equipo.

Tiempo

Se selección de estos valores con base en la evaluación experimental y en la revisión de la bibliografía relevante, la cual indica que corresponden a las condiciones más óptimas dentro del laboratorio de la Carrera de Ingeniería Química. Además, las restricciones de disponibilidad de tiempo para la ejecución de las prácticas experimentales limitan la posibilidad de trabajar con intervalos más amplios, por lo que este rango se establece como el más adecuado y operativamente viable.

A continuación, se define como variable respuesta el rendimiento (R), el cual se considera equivalente al contenido de humedad final de la harina obtenida de hoja de penca de tuna. Esta variable permite evaluar la eficiencia del proceso de secado y la calidad del producto final.

En la tabla 9 se muestran las combinaciones de las variables del diseño experimental para la elaboración del presente trabajo de investigación:

Tabla 9: Matriz del diseño factorial codificada

Nº	Tiempo(h)	Temperatura	Ancho de
		(°C)	corte
			(cm)
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1

Fuente: Elaboración propia (2025)

- **Matriz diseño factorial**

Respecto a los valores especificados para cada nivel, se seleccionan temperaturas bajas con el fin de evitar las propiedades de desnaturalización y el oscurecimiento de las propiedades sensoriales del producto final. El control de este factor garantiza la preservación de la calidad nutricional y funcional de la harina de penca de tuna.

Los siguiente son los valores asignados a los niveles del proceso experimental de esta manera queda la matriz del diseño factorial 2^3 :

- **Primera Réplica**

Tabla 10: Primera réplica del diseño factorial

Experimento	Tiempo (hrs)	Temperatura (T°C)	Ancho de corte (cm)	Rendimiento (%)
1	8	60	0,3	R1
2	8	60	0,5	R2
3	8	65	0,3	R3
4	8	65	0,5	R4
5	9	60	0,3	R5
6	9	60	0,5	R6
7	9	65	0,3	R7
8	9	65	0,5	R8

Fuente: Elaboración propia (2025)

Segunda Réplica:**Tabla 11:** Segunda réplica del diseño factorial

Experimento	Tiempo (hrs)	Temperatura (T°C)	Ancho de corte (cm)	Rendimiento (%)
1	8	60	0,3	R1
2	8	60	0,5	R2
3	8	65	0,3	R3
4	8	65	0,5	R4
5	9	60	0,3	R5
6	9	60	0,5	R6
7	9	65	0,3	R7
8	9	65	0,5	R8

Fuente: Elaboración propia (2025)

Realizando la codificación de datos se tiene la siguiente tabla para la elaboración del experimento:

Tabla 12: Diseño factorial para el experimento

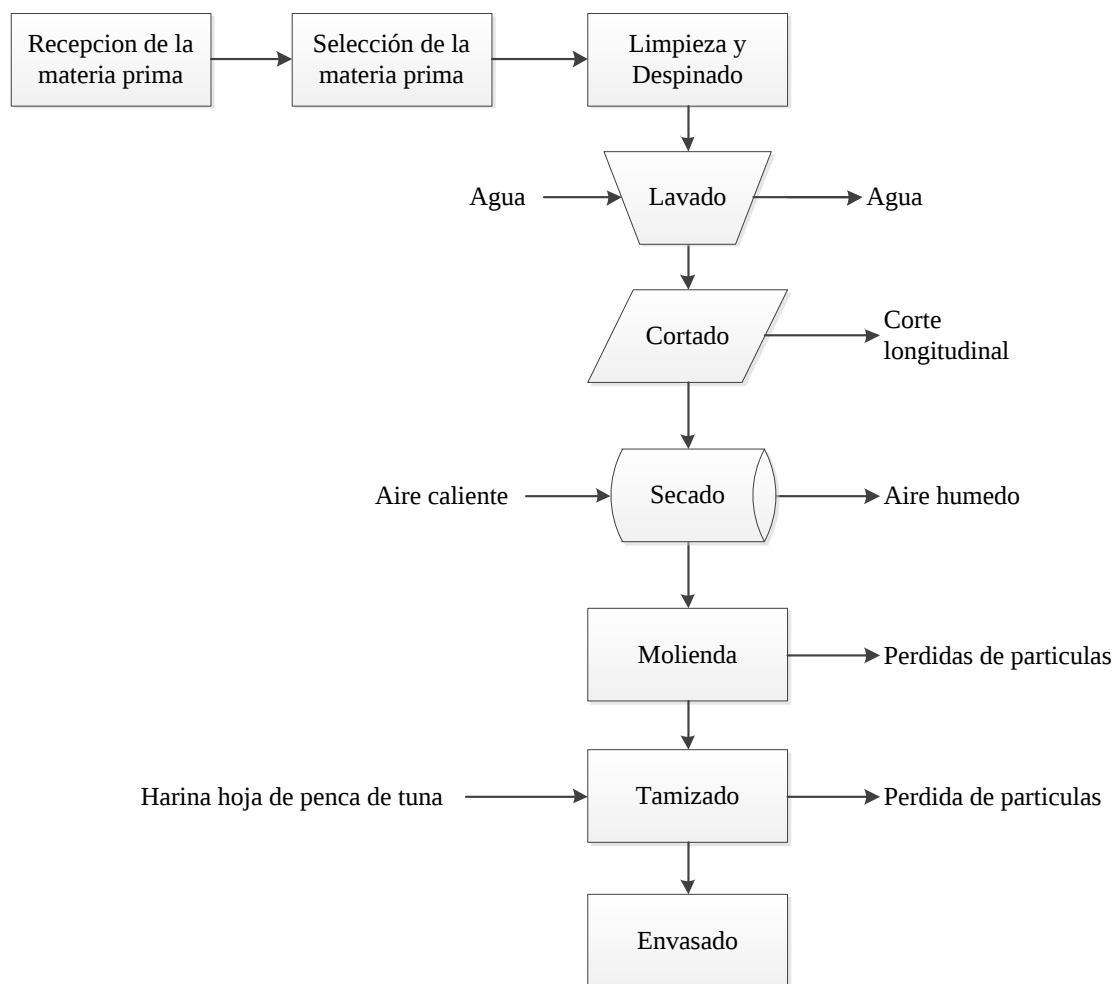
Experimento	Tiempo (hrs)	Temperatura (T°C)	Ancho de corte (cm)	Rendimiento (%)
1	-1	-1	-1	R1
2	-1	-1	1	R2
3	-1	1	-1	R3
4	-1	1	1	R4
5	-1	-1	-1	R5
6	-1	-1	1	R6
7	-1	1	-1	R7
8	-1	1	1	R8
9	1	-1	-1	R9
10	1	-1	1	R10
11	1	1	-1	R11
12	1	1	1	R12
13	1	-1	-1	R13
14	1	-1	1	R14
15	1	1	-1	R15
16	1	1	1	R16

Fuente: Elaboración propia (2025)

2.4. Descripción del método experimental seleccionado para la obtención de la harina de la Hoja de penca de tuna (*Opuntia ficus-indica*)

En la figura 8 se observan las etapas de método experimental para la obtención de harina a partir de la hoja de penca de tuna que se va realizar, mostrando con claridad los parámetros que se tomará en cuenta para cada etapa.

Figura. 8: Diagrama de flujo del proceso de la penca de tuna



Fuente: Elaboración propia (2025)

A continuación, se describe el proceso de las etapas:

2.4.1. Recepción de la hoja de penca de tuna

La materia prima empleada corresponde a la penca de tuna (*Opuntia ficus-indica*) en estado fresco, la cual se recepciona inmediatamente después de la cosecha para preservar su integridad fisicoquímica. La selección garantiza que los cladodios no se encuentren en una etapa excesivamente tierna, debido a su elevado contenido de agua, el cual podría generar procesos fermentativos prematuros y dificultar la etapa de secado.

2.4.2. La Selección de pencas

El conteo con un grado de madurez adecuado es fundamental, ya que a medida que avanza el desarrollo de la planta, se incrementa la concentración de fibra estructural y otros compuestos funcionales relevantes para la obtención de una harina con características nutricionales óptimas. Las hojas de penca maduros presentan una textura más firme y menor humedad relativa, lo que favorece la eficiencia del proceso de deshidratación y mejora la posterior operación de molienda.

La correcta selección de la materia prima constituye una etapa crítica para asegurar la calidad y pureza del producto final.

2.4.3. Limpieza y Despinado de la hoja de penca de tuna

Se ejecuta manualmente el proceso de despinado mediante el uso de un instrumento de corte metálico afilado. El procedimiento se desarrolla bajo los siguientes criterios con estos pasos:

1. Utilizar guantes de protección, instrumento de corte metálico afilado y superficie de corte estable para minimizar riesgos.
2. Sujetar la hoja por el extremo basal más grueso, empleando guantes de protección para preservar la seguridad del operador.
3. Raspar cuidadosamente la superficie de la hoja con el instrumento cortante, eliminando las espinas presentes.
4. Repetir la operación en ambos lados y bordes de la hoja, considerando que las espinas suelen ser más pequeñas en estas zonas.

El despinado garantiza un manejo seguro de la materia prima y facilita las etapas subsecuentes de corte, secado y molienda, lo cual contribuye a la obtención de harina con características físico-químicas y funcionales óptimas.

Figura. 9: Limpieza de la materia prima (Hoja de penca de tuna)



Fuente: Elaboración propia (2025)

2.4.4. Lavado de la hoja de penca de tuna

En el Laboratorio de Operaciones Unitarias, la hoja de penca de tuna (*Opuntia ficus-indica*) se somete a un proceso de lavado exhaustivo con agua potable de la red en el fregadero para eliminar residuos de tierra y espinas superficiales. Se realiza el lavado por aspersión manual varias veces, asegurando la remoción completa de impurezas y garantizando que toda la superficie de las hojas de penca de tuna entre en contacto con el líquido. Posteriormente, se efectúa un cepillado detallado con un cepillo de cerdas de plástico, retirando restos adheridos y espinas residuales.

Figura. 10: Proceso de Lavado de la hoja de penca de tuna



Fuente: Elaboración propia (2025)

El lavado y el cepillado no solo cumple con los estándares de higiene requeridos, sino también ayuda a mantener la integridad de la hoja de penca de tuna. Este proceso es una etapa en la adecuación de la hoja de penca de tuna para su consumo, lo cual asegura que el producto final entregue no solo un sabor delicioso sino también la confianza de calidad y seguridad alimentaria.

2.4.5. Cortado

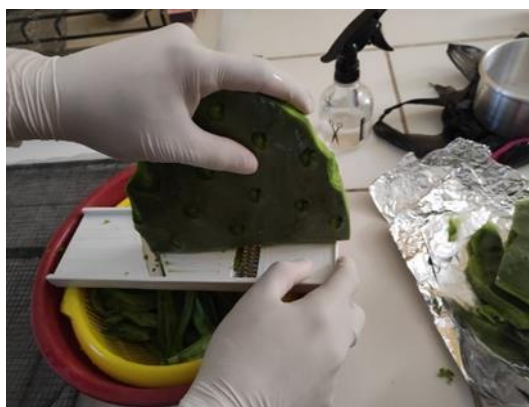
El cortado de la penca de tuna *Opuntia ficus-indica* se realiza mediante un rebanador de forma largas, con el fin de obtener fragmentos delgados y uniformes que permitan un secado más eficiente. Para esta etapa se seleccionan dos ralladores con dimensiones específicas debido a su influencia directa en el tamaño de partícula.

El primer rallador, de 12 cm de largo, 1 cm de ancho y 0,3 cm de espesor, se elige porque su filo delgado genera hebras finas, aumentando la superficie específica y favoreciendo una rápida transferencia de humedad durante el secado.

El segundo rallador, de 10 cm de largo, 1 cm de ancho y 0,5 cm de espesor, se selecciona para mantener una estructura adecuada para que el secado sea uniforme.

La combinación de ambos tamaños de corte permite obtener un material con espesores equilibrados, lo que mejora la circulación de aire caliente alrededor de las partículas y lo cual optimiza la eficiencia del secado por convección forzada (tiro forzado).

Figura. 11: Cortado en trozos alargada de tamaño uniforme



Fuente: Elaboración propia (2025)

2.4.6. Secado

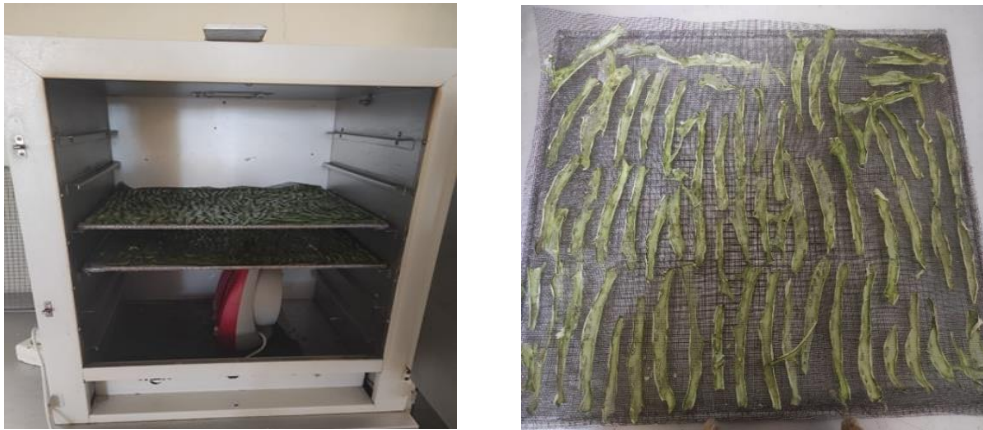
El proceso de secado se realiza utilizando un secador con circulación de aire forzado, siguiendo las recomendaciones bibliográficas. La materia prima se somete a temperaturas a 60°C y 65°C; este rango permite que el material alcance esta temperatura de manera uniforme, aunque puede presentar variaciones debido a las condiciones climáticas externas, logrando un secado eficiente, con un tiempo de secado de 8 horas y 9 horas respectivamente.

Durante este periodo, se realiza un monitoreo continuo de la temperatura interna para garantizar que no ocurriera un sobrecalentamiento, de esta manera, se asegura un secado uniforme y óptimo de la materia prima, y no se vean afectadas propiedades físicas, nutricionales y organolépticas de la hoja de penca de tuna. Este control preciso del proceso es esencial para garantizar que el producto final mantenga su calidad, sabor y color característicos, además de facilitar su posterior molienda.

Una vez completado el tiempo de secado, se determina el contenido de humedad en una muestra aleatoria utilizando un secador infrarrojo. Se utiliza una muestra de aproximadamente 5 gramos, la cual se somete a una temperatura de 105°C hasta alcanzar un peso constante.

El objetivo es verificar que el porcentaje de humedad esté en el rango de 4 %- 9 %, obteniéndose un valor de 3,47 % con los tiempos de secado aplicados. Una vez seco, el material se almacena en bolsas herméticas y se conserva en un lugar oscuro, asegurando la preservación de sus propiedades físicas, químicas y organolépticas.

Figura. 12: Secado de las rebanadas uniformemente de la hoja de penca de tuna



Fuente: Elaboración propia (2025)

Se distribuyen uniformemente las láminas de penca de tuna en las bandejas del secador, asegurando un pequeño espacio entre cada una. Esta disposición facilita el flujo de aire caliente alrededor de las muestras y maximiza la superficie de contacto, lo cual contribuye a un secado más eficiente y homogéneo.

2.4.7. Molienda de la hoja de penca de tuna

Una vez finalizado el proceso de secado, se retira la hoja de penca de tuna *Opuntia ficus-indica* deshidratado del secador.

El molino empleado en la experimentación ejecuta la molienda por impacto, utilizando martillos rotatorios que operan mediante un movimiento oscilatorio inverso al del rotor. Este mecanismo asegura la función primaria del equipo, que consiste en someter el material seco a impactos repetidos dentro de la cámara de trituración. Los impactos permiten desintegrar el material hasta alcanzar el tamaño de partícula deseado, permitiendo su paso a través de la rejilla inferior de la maquinaria. Es importante destacar que las partículas liberadas de la cámara presentan variabilidad en cuanto a su tamaño y forma.

Es importante considerar que este tipo de equipo genera una alta cantidad de polvo, el cual se dispersa en el ambiente durante la operación. Por este motivo, se reconoce la

existencia de pérdidas de materia prima asociadas a la emisión de partículas finas no recuperables.

Figura. 13: Proceso de molienda de la hoja de penca de tuna



Fuente: Elaboración propia (2025)

Una vez triturado se acopla en una bolsa de polietileno de cierre hermético para prevenir la reabsorción de humedad ambiental.

Finalizado el proceso de molienda, la harina obtenida se almacena en un recipiente limpio y en un ambiente seco, protegido de la humedad, con el fin de preservar sus propiedades fisicoquímicas. Posteriormente, el material molido se somete a una operación de tamizado mediante un tamiz vibratorio, empleando una malla con abertura de 0,063 mm (63 μ m), equivalente aproximadamente al tamiz N° 230 de la serie ASTM. Esta operación permite clasificar las partículas según su tamaño, obteniendo una harina con granulometría fina y uniforme, mientras que las fracciones de mayor tamaño son retenidas por la malla.

2.4.8. Tamizado de la harina de la hoja de penca de tuna

Por lo tanto, una vez finalizada la molienda, la harina de hoja de penca de tuna (*Opuntia ficus-indica*) se somete al tamizado mecánico. Se emplean mallas de distintos tamaños, que varían entre 0,063 mm y 1 mm, para clasificar las partículas según su diámetro.

La harina que atraviesa la malla 0,063 mm se considera de mayor calidad, debido a su textura fina y uniforme, así como a su mayor superficie de contacto, lo que mejora su desempeño al mezclarse con otros ingredientes en formulaciones alimenticias.

Tabla 13: Tamices utilizados en la harina de penca de tuna marca ORTO ARLESA

Nº de malla en mm UNE	Designación de tamiz ASTM
1	18
0,5	35
0,25	60
0,063	230

Fuente: Elaboración propia (2025)

Figura. 14: Tamizador utilizado para la elaboración de harina de hoja de penca de tuna



Fuente: Elaboración propia (2025)

En la figura 14 se muestra el modelo de tamiz de marca ORTO-ALRESA que se utiliza en la elaboración de harina de hoja de penca de tuna, indicando el número de malla considerado más adecuado debido al fino tamaño de las partículas obtenidas.

2.4.9. Envasado de la harina de la hoja de penca de tuna

Posteriormente, la harina de hoja de penca de tuna (*Opuntia ficus-indica*) se envasa al vacío para asegurar su conservación óptima. Este método de envasado reduce la exposición al oxígeno y la humedad, contribuye a prolongar la vida útil del producto y a preservar sus propiedades organolépticas y nutricionales. Al eliminar el aire del envase, se minimizan el riesgo de deterioro y contaminación, garantizando que la harina mantenga su calidad y funcionalidad durante su almacenamiento.

Figura. 15: Envasado de la harina de penca de tuna en bolsas de polietileno hermética.



Fuente: Elaboración propia (2025)

2.5. Análisis de la harina de la hoja de penca de tuna

Para el control de calidad de la harina de la hoja de penca de tuna, se lleva a cabo una evaluación sensorial, junto con análisis fisicoquímicos y microbiológicos.

2.5.1. Análisis sensorial mediante el método hedónico

La evaluación sensorial constituye un parámetro fundamental para determinar la aceptación potencial del producto en el mercado, basado únicamente en la degustación de personas al azar.

El análisis se realiza mediante una prueba hedónica, en la cual los participantes evalúan las muestras obtenidas bajo criterios específicos de calidad. Para la cuantificación de estos parámetros, se emplea una escala de cinco puntos, estructurada de la siguiente manera:

1 = Me disgusta mucho.

2 = Me disgusta moderadamente.

3 = No me gusta, ni me disgusta.

4 = Me gusta moderadamente.

5 = Me gusta mucho.

2.5.1.1. Metodología

La prueba de aceptabilidad se desarrolla en distintos puntos de la ciudad de Tarija, escogiendo diez personas no calificadas que estén dispuestas a probar la harina de hoja de penca de tuna, a dicho panel se les entrega una encuesta en donde calificarán los atributos (olor, color, sabor, textura).

Para esta prueba se realizaron ocho pruebas de diferentes muestras que se obtuvo la harina pura de hoja de penca de tuna.

El objetivo primordial de este análisis es determinar si existían diferencias significativas en la aceptabilidad sensorial entre las distintas muestras de harina de hoja de penca de tuna. Mediante un análisis estadístico, se busca identificar si alguna de las muestras presentaba un perfil organoléptico que la diferenciara significativamente del resto.

Mediante pruebas de comparación múltiple, se procedió a evaluar atributos sensoriales. Esta metodología permitió no solo detectar variaciones en la aceptabilidad global, sino también discriminar entre las muestras en función de sus perfiles sensoriales específicos.

Los resultados proporcionan información relevante sobre la percepción del panel evaluador respecto a las propiedades organolépticas de cada muestra. Esta evaluación permite identificar la harina de hoja de penca de tuna que presenta el perfil sensorial más favorable.

La muestra seleccionada presenta un sabor ligeramente amargo, característica asociada a su contenido de compuestos bioactivos, lo cual resulta adecuado para su consumo en poblaciones diabéticas. Asimismo, evidencia una textura suave, un olor tenue y un color uniforme y atractivo, cualidades que contribuyen a su aceptabilidad sensorial. Véase **Anexo 1**.

En conjunto, estos atributos permiten concluir que la harina presenta un nivel de aceptación compatible con los requerimientos del mercado.

Figura. 16: Evaluación sensorial de la harina de penca de tuna



Fuente: Elaboración propia (2025)

2.5.2. Análisis fisicoquímico

El análisis de las propiedades fisicoquímicas de la harina de hoja de penca de tuna (*Opuntia ficus-indica*) es fundamental para garantizar su calidad, ya que determina su valor nutricional y su aptitud como producto final. En la Tabla 13 se presentan los resultados obtenidos en el Centro de Análisis e Investigación de Alimentos (CEANID), donde se evalúan parámetros esenciales, tales como contenido de humedad, cenizas, proteínas y otros indicadores relevantes para la calidad del producto.

Estos análisis permiten caracterizar integralmente la harina, lo cual asegura su estabilidad durante el almacenamiento y proporciona una base científica para su etiquetado nutricional y aplicación en la industria alimentaria.

Tabla 14: Análisis fisicoquímico de la harina de la hoja de penca de tuna

Parámetro	Unidad	Resultado
Ceniza	g/100g	19,40
Fibra	g/100g	4,00
Grasa	g/100g	1,05
Hidratos de carbono	g/100g	67,48
Humedad	g/100g	6,10
Proteína total	g/100g	5,97
Calcio	mg/100g	2356
Fósforo	mg/100g	37,7
Sodio	mg/100g	186
Valor energético	Kcal/100g	303

Fuente: CEANID, 2024.

Se observa que los parámetros evaluados cumplen con los rangos establecidos por la normativa peruanas, ubicándose dentro de los valores aceptables para harina, lo que confirma la conformidad del producto con criterios técnicos y su potencial aceptación en el mercado. Véase **Anexo 5**.

- **Interpretación del análisis fisicoquímico:** De acuerdo con la normativa peruana presentada en el **Anexo 6**, los valores de calcio, fósforo y sodio presentan variaciones en sus parámetros debido a la metodología empleada para el análisis. Dicha metodología considera muestras gelatinizadas, es decir, con la adición de una determinada cantidad de agua, por lo que los resultados no se expresan en base seca.

Por otro lado, los valores determinados en el presente proyecto para la penca de tuna (*Opuntia ficus-indica*) se reportan en base seca, lo que explica una mayor concentración de calcio en comparación con la norma. En el caso del fósforo, los valores obtenidos no resultan comparables ni aceptables debido a que las

condiciones climáticas no son equivalentes, lo cual influye directamente en la variación de su contenido mineral.

2.5.3. Análisis microbiológicos

Se realizan análisis microbiológicos de la harina de hoja de penca de tuna con el objetivo de garantizar su inocuidad y calidad sanitaria para el consumo. Estos análisis incluyen la detección y cuantificación de coliformes fecales, coliformes totales, *Escherichia coli*, levaduras y mohos, parámetros esenciales para evaluar la estabilidad microbiológica del producto y verificar su cumplimiento con criterios de seguridad alimentaria.

A continuación, en la Tabla 14 se mostrarán los resultados del análisis microbiológico. Véase **Anexo 5**

Tabla 15:Análisis microbiológico

Parámetro	Unidad	Resultado	Técnica de ensayo
Coliformes totales	UFC/g	8,0 x10 ¹	NB:32005:02
Bacterias aerobias	UFC/g	4,2 x10 ³	NB:32005:02
Echerichia coli	UFC/g	<1,0*10 ¹ (*)	NB:32005:02
Mohos y levaduras	UFC/g	1,6 x10 ¹	NB:32005:02

UFC/g: Unidades Formadoras de Colonias por gramo.

(*): No se observa desarrollo de colonias.

NB: Norma Boliviana

Fuente: CEANID, 2024.

CAPÍTULO III
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE
RESULTADOS

3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1. Resultados de la Caracterización fisicoquímica de la hoja de penca de tuna

Los resultados de la caracterización fisicoquímica de la hoja de penca de tuna *Opuntia ficus-indica*, proveniente de la comunidad de Calamuchita, se realiza con el fin de determinar las propiedades del producto obtenido. Para la obtención de estos resultados, las hojas se someten previamente a las etapas de recolección, selección, limpieza, despinado, lavado, secado, molienda y tamizado para la obtención de harina. Posteriormente, se envía una muestra representativa de 889 g de harina, la cual se envía al laboratorio CEANID (Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo) para la realización de los análisis fisicoquímicos correspondientes. A partir de estos análisis se obtienen los resultados presentados en esta sección, los cuales permiten conocer las características del producto obtenido y su potencial aplicación en procesos alimentario.

Tabla 16: Resultado de la Caracterización Fisicoquímica de la Hoja de penca de tuna

PARÁMETRO	UNIDAD	RESULTADO
Ceniza	g/100g	0,92
Fibra	g/100g	0,22
Grasa	g/100g	0,51
Hidratos de Carbono	g/100g	4,42
Humedad	g/100g	93,53
Proteína total (Nx6,25)	g/100g	0,62

Fuente: (Resultado de análisis de CEANID),2024

3.2 Resultado del Desarrollo del Proceso Experimental

3.2.1. Resultado de Proceso de Secado de Hoja de Penca de Tuna

3.2.1.1. Discrepancia entre los experimentos y las réplicas

Se detallan inicialmente los resultados obtenidos en cada experimento para las temperaturas de 60 °C y 65 °C, considerando tiempos de secado de 8 y 9 horas.

En cada condición experimental se registran datos específicos que permiten analizar el efecto de la temperatura y del tiempo designado, proporcionando una visión detallada de la variabilidad observada en cada escenario.

Tabla 17: Resultado de la Pérdida de masa en el proceso de secado de la hoja de penca de tuna

Nº	Tiempo (h)	EXP Nº1 60°C (g)	EXP Nº2 60°C (g)	EXP Nº3 65°C (g)	EXP Nº4 65°C (g)	EXP Nº5 60°C (g)	EXP Nº6 60°C (g)	EXP Nº7 65°C (g)	EXP Nº8 65°C (g)
1	00:00	700,26	700,29	700,1	700,59	700,45	700,56	700,4	700,3
2	00:30	405,81	509,34	490,5	561,36	408,91	550,98	593,54	579,36
3	01:00	319,17	409,09	403,67	498,63	325,54	490,67	550,87	500,63
4	01:30	238,91	323,41	314,71	400,52	250,57	402,47	505,36	417,52
5	02:00	158,62	244,06	234,12	313,94	171,92	383,12	457,61	338,94
6	02:30	145,39	198,36	181,36	291,45	155,45	309,76	389,84	299,53
7	03:00	129,79	173,74	121,65	235,55	134,65	225,78	314,71	239,25
8	03:30	115,96	157,48	104,15	198,37	117,89	185,36	234,12	200,16
9	04:00	101,7	133,36	91,37	171,87	105,49	140,17	181,36	170,41
10	04:30	90,78	120,15	78,87	145,65	94,87	101,36	121,65	148,78
11	05:00	77,62	104,38	66,14	111,2	84,69	93,87	104,15	113,82
12	05:30	61,32	91,3	56,37	93,45	68,45	81,36	89,67	91,12
13	06:00	50,98	79,9	47,37	77,98	59,61	70,98	78,87	75,8
14	06:30	43,57	63,37	39,12	60,37	50,81	62,78	69,14	62,11
15	07:00	35,12	51,26	34,37	45,76	47,81	55,98	57,72	46,89
16	07:30	32,45	43,65	33,97	39,03	45,78	49,68	49,45	39,89
17	08:00	31,24	38,7	32,7	35,7	43,14	44,12	42,28	36,41
18	08:30					41,23	41,98	40,87	33,54
19	09:00					40,96	39,1	37,93	31,93

Fuente: elaboración propia (2025)

Luego de haber examinado los datos recolectados en cada experimento se procede a exponer los resultados derivados de la réplica llevado a cabo en relación con cada uno de los experimentos previos.

Mediante la réplica de los experimentos anteriores, brinda una perspectiva adicional sobre la consistencia y reproducibilidad de los resultados.

Tabla 18: Resultado de las réplicas de la Pérdida de masa en el proceso de secado de la hoja de penca de tuna

N°	Tiempo (h)	EXP N°1 60°C (g)	EXP N°2 60°C (g)	EXP N°3 65°C (g)	EXP N°4 65°C (g)	EXP N°5 60°C (g)	EXP N°6 60°C (g)	EXP N°7 65°C (g)	EXP N°8 65°C (g)
1	00:00	700,6	700,32	700,24	700,47	700,63	700,72	700,42	700,34
2	00:30	407,18	508,84	491,35	560,62	410,11	552,18	590,14	581,25
3	01:00	320,17	408,79	404,97	499,78	326,25	494,27	548,17	502,23
4	01:30	240,91	322,91	316,28	401,22	251,14	401,57	504,16	419,52
5	02:00	160,52	243,56	235,52	314,24	173,21	382,92	455,26	339,14
6	02:30	148,98	198,76	190,45	290,59	156,25	310,45	391,18	300,13
7	03:00	128,91	174,17	131,28	236,25	135,75	226,08	315,71	238,15
8	03:30	115,65	156,88	108,23	197,49	119,29	186,26	233,52	201,26
9	04:00	101,67	134,26	94,14	172,17	106,79	139,67	182,76	169,21
10	04:30	91,28	120,85	80,08	147,25	97,17	100,36	122,65	149,12
11	05:00	76,92	104,3	74,27	113,22	85,91	95,07	103,95	115,29
12	05:30	62,21	91,71	60,74	93,45	69,55	80,36	91,16	93,92
13	06:00	51,38	79,87	55,64	77,87	60,61	71,87	79,24	77,82
14	06:30	44,17	63,49	43,38	60,7	50,81	63,81	68,84	61,21
15	07:00	35,72	51,69	38,65	45,25	49,81	57,81	59,12	48,28
16	07:30	32,85	44,55	35,77	39,1	46,18	50,18	50,54	40,09
17	08:00	31,34	38,87	34,23	35,74	43,24	43,92	43,18	35,21
18	08:30					41,33	42,38	41,47	33,54
19	09:00					41,96	39,45	38,73	31,93

Fuente: elaboración propia (2025)

En esta parte se compara los resultados obtenidos en cada ensayo con sus correspondientes réplicas, este proceso permite evaluar la consistencia y reproductibilidad de los datos a lo largo de los experimentos y sus réplicas.

Tabla 19: Diferencia de Resultados entre los Experimentos y Réplicas

Nº	Tiempo (h)	EXP N°1 60°C (g)	EXP N°2 60°C (g)	EXP N°3 65°C (g)	EXP N°4 65°C (g)	EXP N°5 60°C (g)	EXP N°6 60°C (g)	EXP N°7 65°C (g)	EXP N°8 65°C (g)
1	00:00	-0,34	-0,03	-0,14	0,12	-0,18	-0,16	-0,02	-0,04
2	00:30	-1,37	0,5	-0,85	0,74	-1,2	-1,2	3,4	-1,89
3	01:00	-1	0,3	-1,3	-1,15	-0,71	-3,6	2,7	-1,6
4	01:30	-2	0,5	-1,57	-0,7	-0,57	0,9	1,2	-2
5	02:00	-1,9	0,5	-1,4	-0,3	-1,29	0,2	2,35	-0,2
6	02:30	-3,59	-0,4	-9,09	0,86	-0,8	-0,69	-1,34	-0,6
7	03:00	0,88	-0,43	-9,63	-0,7	-1,1	-0,3	-1	1,1
8	03:30	0,31	0,6	-4,08	0,88	-1,4	-0,9	0,6	-1,1
9	04:00	0,03	-0,9	-2,77	-0,3	-1,3	0,5	-1,4	1,2
10	04:30	-0,5	-0,7	-1,21	-1,6	-2,3	1	-1	-0,34
11	05:00	0,7	0,08	-8,13	-2,02	-1,22	-1,2	0,2	-1,47
12	05:30	-0,89	-0,41	-4,37	0	-1,1	1	-1,49	-2,8
13	06:00	-0,4	0,03	-8,27	0,11	-1	-0,89	-0,37	-2,02
14	06:30	-0,6	-0,12	-4,26	-0,33	0	-1,03	0,3	0,9
15	07:00	-0,6	-0,43	-4,28	0,51	-2	-1,83	-1,4	-1,39
16	07:30	-0,4	-0,9	-1,8	-0,07	-0,4	-0,5	-1,09	-0,2
17	08:00	-0,1	-0,17	-1,53	-0,04	-0,1	0,2	-0,9	1,2
18	08:30					-0,1	-0,4	-0,6	0
19	09:00					-1	-0,35	-0,8	0

Fuente: elaboración propia (2025)

3.2.1.2. Determinación de la curva de secado experimentalmente

Para determinar la curva de secado experimentalmente, se emplea la siguiente fórmula:

(Ecuación 1): Curva de Secado

$$\%X_{bs} = \frac{m_{H2O}}{m_s} * 100$$

$$\%X_{bs} = \frac{700,1g - 32,7g}{32,7g}$$

Aplicar esta fórmula al primer conjunto de datos, se obtiene el valor específico del contenido de humedad expresado en base seca para ese momento particular del proceso. Este enfoque proporciona una medida precisa y estandarizada de la humedad, esencial para comprender las características del material bajo estudio y su proceso de secado.

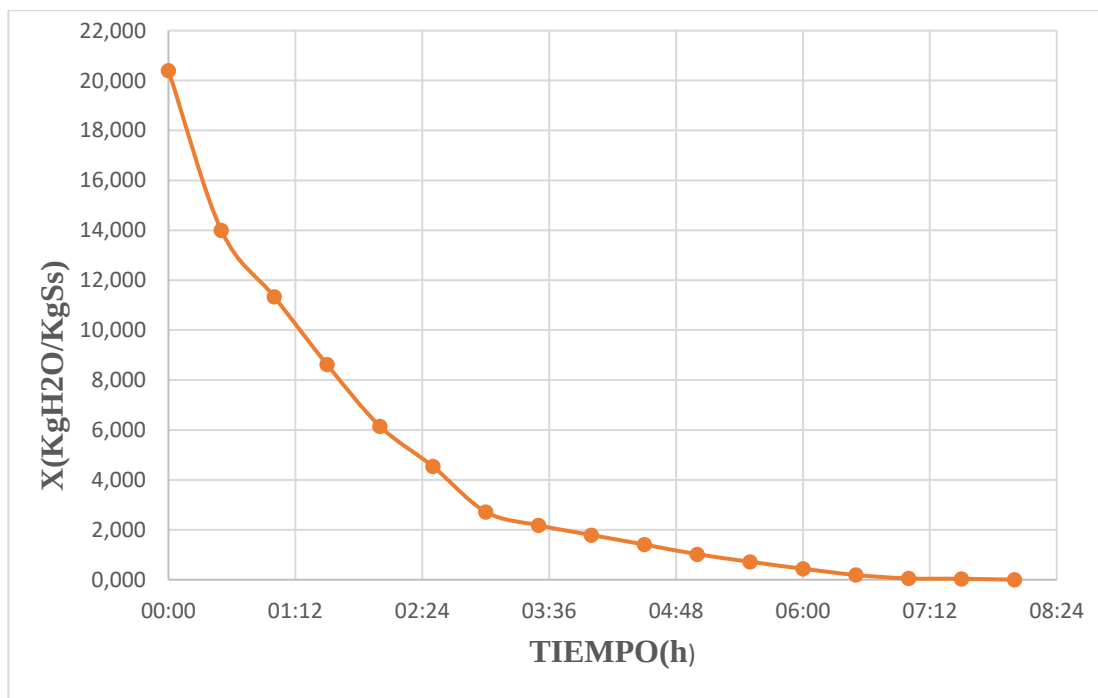
Tabla 20 : Curva de secado expresada en base seca de la hoja de penca de tuna 65°C y 8 horas.

N°	TIEMPO	MASA(g)	X(KgH ₂ O/KgSs)
1	00:00	700,1	20,400
2	00:30	490,5	14,000
3	01:00	403,67	11,340
4	01:30	314,71	8,620
5	02:00	234,12	6,150
6	02:30	181,36	4,540
7	03:00	121,65	2,720
8	03:30	104,15	2,180
9	04:00	91,37	1,790
10	04:30	78,87	1,410
11	05:00	66,14	1,022
12	05:30	56,37	0,720
13	06:00	47,37	0,440
14	06:30	39,12	0,190
15	07:00	34,37	0,051
16	07:30	33,97	0,038
17	08:00	32,7	0,000

Fuente: elaboración propia (2025)

Del mismo modo, se plasma la representación gráfica de la curva de secado.

Figura. 17: Curva de secado expresado en base seca del proceso experimental de la hoja de penca de tuna a 65°C y 8 horas.



Fuente: elaboración propia (2025)

3.3. Análisis estadístico del diseño experimental

El diseño experimental del presente trabajo se desarrolla conforme al diseño factorial 2^3 ya especificado de acuerdo a las variables que influyen en el proceso.

3.3.1 Análisis de varianza

El análisis de varianza muestra las variables principales que influyen en el proceso de obtención de harina a partir de la penca, es decir, sobre la variable respuesta (rendimiento). También se dan las transformaciones acerca de las interacciones entre las variables que influyen en el proceso, así como la significancia de las mismas.

En la siguiente tabla 21 se muestra los datos con los cuales se ha realizado el cálculo del análisis de varianza de un experimento completamente al azar de 3 factores: 2 niveles para el tamaño, la temperatura y el tiempo.

Tabla 21: Datos para Análisis de Varianza

Experimento	Ancho de corte (cm)	Temperatura (T°C)	Tiempo (hrs)	Rendimiento (%)
1	0,3	60	8	3,00
2	0,5	60	8	2,76
3	0,3	65	8	2,72
4	0,5	65	8	3,15
5	0,3	60	9	2,33
6	0,5	60	9	2,82
7	0,3	65	9	2,40
8	0,5	65	9	3,16
9	0,3	60	8	3,01
10	0,5	60	8	2,77
11	0,3	65	8	2,70
12	0,5	65	8	3,15
13	0,3	60	9	2,34
14	0,5	60	9	2,80
15	0,3	65	9	2,66
16	0,5	65	9	3,16

Fuente: Elaboración propia (2025)

Los valores experimentales de la tabla se analizan mediante un análisis estadístico ANOVA, utilizando el programa estadístico SPSS versión 17.0 para la interpretación de las variables respuesta de la obtención de harina a partir de penca.

3.3.1.1 Cálculo de análisis de varianza para el rendimiento (%)

A continuación, en la tabla 22 se observa el análisis de varianza para la variable dependiente rendimiento (%).

Tabla 22: Pruebas de efectos de Inter- Sujetos

Variable dependiente: Rend					
Origen	Tipo III de suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	1, 115a	6	,186	16,203	,000
Intersección	126,169	1	126,169	10997,1 21	,000
Tamaño	,426	1	,426	37,110	,000
Temperatura	,101	1	,101	8,786	,016
Tiempo	,158	1	,158	13,772	,005
Tamaño *	,174	1	,174	15,193	,004
Temperatura					
Tamaño * Tiempo	,205	1	,205	17,847	,002
Temperatura *	,052	1	,052	4,511	,063
Tiempo					
Error	,103	9	,011		
Total	127,388	16			
Total, corregido	1,219	15			
a. R al cuadrado = ,915 (R al cuadrado ajustada = ,859)					

Fuente: Elaboración propia (2025)

Como se observa en la tabla 22 de efectos inter sujeto y aplicando este análisis de varianza se puede observar variables significativas ($p < 0.05$) del proceso para la obtención de harina a partir de la penca con un rendimiento adecuado, se observa que para tener una mayor pérdida de agua estas variables son el tamaño, la temperatura, el tiempo y las interacciones tamaño-tiempo, tamaño-temperatura para un nivel de confianza del 95%. Mientras la interacción temperatura-tiempo no es significativa independientemente.

A continuación, se observa los datos que brinda el modelo en su conjunto, se observa el valor de $p < 0.05$ lo que indica que al menos una de las variables independientes o interacciones tiene un efecto significativo sobre la variable dependiente, en donde para la variable dependiente de rendimiento (%), es significativo para un nivel de confianza del 95%, la cual para su significancia aprueba el modelo general estadísticamente.

La R^2 es igual a 0.915, lo que significa que el modelo explica el 91.5% de la varianza del rendimiento.

Tabla 23: ANOVA^a

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	1,064	5	,213	13,723	,000 ^b
	Residuo	,155	10	,016		
	Total	1,219	15			

a. Variable dependiente: Rend

b. Predictores: (Constante), TaTi, TaTe, Tiempo, Temperatura, Tamaño

Fuente: Elaboración propia (2025)

De la tabla 23 se observa el ANOVA en donde la significancia es menor a 0.05 lo cual explica que el modelo es estadísticamente significativo en respuesta a las variables seleccionadas y al efecto de sus interacciones.

Como se observa el F alto indica que el modelo mejora significativamente la predicción si solo se la compara al no usar ninguna variable. Este valor explica el rendimiento real y significativo.

La media cuadrática brinda el panorama de la regresión y el error que se podría haber cometido en cual es bajo.

Tabla 24: Coeficientes del modelo de regresión lineal

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	95,0% intervalo de confianza para B	
	B	Desv. Error	Beta			Límite inferior	Límite superior
(Constante)	2,808	,031		90,218	,000	2,739	2,877
Tamaño	,163	,031	,591	5,241	,000	,094	,232
Temperatura	,079	,031	,288	2,550	,029	,010	,149
Tiempo	-,099	,031	-,360	-3,193	,010	-,169	-,030
TaTe	,104	,031	,378	3,353	,007	,035	,174
TaTi	,113	,031	,410	3,634	,005	,044	,182

a. Variable dependiente: Rend

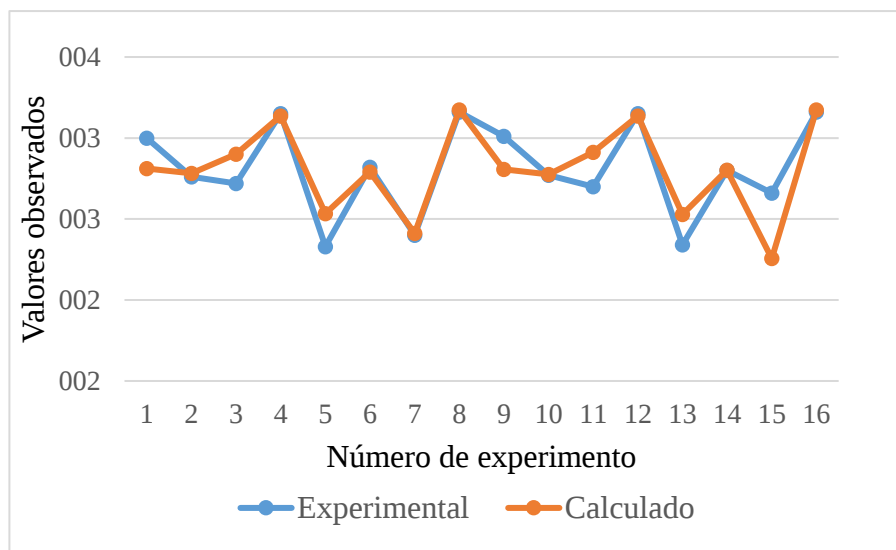
Fuente: Elaboración propia (2025)

De la tabla 24 se determina que el mejor modelo matemático de la variable dependiente rendimiento (%), resultante del proceso de obtención de harina a partir de la penca que correlaciona la cantidad de pérdida de agua con las variables tamaño, temperatura, tiempo y las interacciones tamaño-temperatura y tamaño-tiempo para el caso estudiado es el siguiente:

$$\text{Rendimiento (\%)} = 2.808 + 0.163(\text{Tamaño}) + 0.079(\text{Temperatura}) - 0.099(\text{Tiempo}) + 0.104(\text{Tamaño} \times \text{Temperatura}) + 0.113(\text{Tamaño} \times \text{Tiempo}) \quad \textbf{(Ecuación 2)}$$

Para observar la influencia de una variable o factor sobre otro, se presenta el siguiente análisis:

Figura. 18: Es una figura que compara el error observado vs error calculado del proyecto.



Fuente: Elaboración propia (2025)

La figura 18 muestra la gráfica de la ecuación calculada en comparación con los datos experimentales. Como se puede observar el modelo representa los datos experimentales obtenidos, lo cual demuestra que la ecuación es válida con un grado de exactitud del 95%.

En línea azul se observa el rendimiento experimental y en línea roja se observa el rendimiento calculado por la regresión (predicho).

Ambas líneas siguen un patrón similar, aunque no son idénticas pero la línea ajustada o predicha sigue el trayecto de la forma experimental, lo cual indica que el modelo logra captar adecuadamente la tendencia. Se observa que no hay errores groseros comparando el error real vs el calculado, esta gráfica confirma la R^2 que arrojo el experimento (0.915) dato que muestra la variabilidad del rendimiento experimental.

3.4. Resultados del análisis sensorial

La evaluación sensorial determina el nivel de aceptabilidad de la harina de hoja de penca de tuna desarrollada en el presente proyecto, utilizando un panel de 10 jueces no entrenados. Cada juez recibe una muestra y una ficha de evaluación estructurada que

contempla los atributos de olor, color, sabor y textura, correspondientes a ocho muestras de harina. La evaluación se realiza mediante una escala de 5 puntos.

Dado que a nivel nacional no se elaboran harinas de hoja de penca de tuna, la comparación directa con productos comerciales es limitada; únicamente es posible contrastar con la harina de coca, debido a similitudes en color, olor y sabor. Internacionalmente, existen productos similares, como la “harina de nopal” en México.

El objetivo es determinar si el producto desarrollado cumple con las características organolépticas adecuadas y si presenta un nivel de aceptación potencial en el mercado, considerando productos similares a nivel nacional o departamental.

Los resultados completos del análisis sensorial de las 8 muestras evaluadas para cada atributo (color, olor, sabor y textura) se presentan en las siguientes tablas:

Tabla 25: Evaluación sensorial del atributo de olor

Juez	1	2	3	4	5	6	7	8
1	3	3	3	2	3	3	3	3
2	3	2	3	2	3	2	2	3
3	3	2	3	2	2	3	3	3
4	3	3	3	2	2	3	3	3
5	3	2	4	2	3	2	3	2
6	2	3	3	3	3	2	2	2
7	3	2	3	3	2	2	3	2
8	2	2	4	2	2	2	3	2
9	3	3	3	3	2	3	2	3
10	2	2	3	2	2	2	2	2
Grado de aceptación	2,7	2,4	3,2	2,3	2,4	2,4	2,6	2,5
$\Sigma = 2,56$								

Fuente: Elaboración propia (2025)

Tabla 26: Evaluación sensorial del atributo de color

Juez	1	2	3	4	5	6	7	8
1	4	3	5	3	3	3	3	3
2	3	3	4	3	3	3	3	3
3	4	4	4	4	3	3	4	3
4	3	3	4	3	3	3	3	4
5	4	4	5	4	3	3	4	3
6	3	3	4	3	3	3	3	3
7	4	3	5	4	3	3	3	3
8	3	3	4	3	4	3	3	3
9	3	3	4	3	3	4	3	4
10	3	3	4	3	3	3	3	3
Grado de aceptación	3,4	3,2	4,3	3,4	3,1	3,2	3,2	3,2
$\Sigma = 3,38$								

Fuente: Elaboración propia (2025)

Tabla 27: Evaluación sensorial del atributo de sabor

Juez	1	2	3	4	5	6	7	8
1	3	2	3	2	3	2	3	2
2	2	3	3	2	3	3	2	2
3	2	3	3	2	2	3	2	2
4	3	2	3	1	2	3	2	3
5	2	3	3	2	2	1	2	2
6	1	2	3	2	2	1	2	2
7	1	2	3	2	3	1	2	2
8	2	1	2	2	2	2	1	2
9	2	1	3	2	2	2	2	2
10	1	1	3	2	2	1	2	1
Grado de aceptación	1,9	2,0	2,8	1,9	2,3	1,9	2,0	2,0
$\Sigma = 2,1$								

Fuente: Elaboración propia (2025)

Tabla 28: Evaluación sensorial del atributo de textura

Juez	1	2	3	4	5	6	7	8
1	3	4	4	3	3	4	3	3
2	4	4	4	3	3	3	3	3
3	3	3	4	3	4	3	3	4
4	3	4	5	4	3	4	3	3
5	3	3	4	3	4	3	3	3
6	3	3	4	3	3	4	4	3
7	4	3	4	3	3	3	3	4
8	3	3	4	3	3	3	3	3
9	2	3	4	4	4	3	3	3
10	3	3	5	3	4	2	3	3
Grado de aceptación	3,1	3,3	4,2	3,2	3,4	3,2	3,2	3,3
$\Sigma = 3,49$								

Fuente: Elaboración propia (2025)

3.4.1. Grado de Aceptación General

Para identificar cuál de las muestras de harina de hoja de penca de tuna es la más aceptada en todos los atributos evaluados, se plantea asignar una ponderación según la importancia de cada atributo:

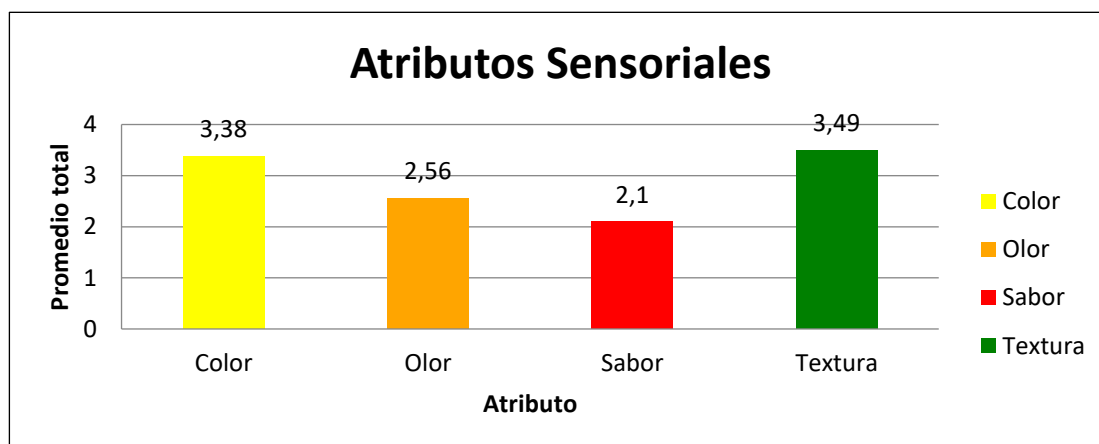
Tabla 29: Promedio total por cada atributo del Análisis Sensorial de la Harina de hoja de penca de tuna

Atributo	Σ promedio total
Color	3,38
Olor	2,56
Sabor	2,1
Textura	3,49

Fuente: Elaboración propia (2025)

Se presenta una gráfica de barras que representa el grado de aceptación de cada muestra.

Figura. 19: Grado de aceptación de las muestras de color, olor, sabor y textura.



Fuente: Elaboración propia (2025)

3.4.1.1. Determinación de la muestra con mayor grado de aceptación sensorial

Al aplicar la ponderación de los atributos sensoriales, se determina que la muestra N° 3 presenta el mayor grado de aceptación sensorial con un valor de 4,02. Esta muestra corresponde a las condiciones de secado de 65 °C durante 8 horas y un ancho de corte de 0,3 cm, las cuales favorecen las características organolépticas de la harina de hoja de penca de tuna.

Tabla 30: Resultado ponderado del análisis sensorial de las muestras experimentales

Muestra	Color	Olor	Sabor	Textura	Resultado ponderado
1	3,4	2,7	1,9	3,1	3,12
2	3,2	2,4	2	3,3	3,02
3	4,3	3,2	2,8	4,2	4,02
4	3,4	2,3	1,9	3,2	3,1
5	3,1	2,4	2,3	3,4	3,01
6	3,2	2,4	1,9	3,2	2,99
7	3,2	2,6	2	3,2	3,02
8	3,2	2,5	2	3,3	3,03

Fuente: Elaboración propia (2025)

3.5. Balance de Materia y Energía

3.5.1. Balance de Materia

El balance de materia para el proceso de “Elaboración de la Harina de Penca” muestra la transformación desde la etapa de recepción de la materia prima hasta el envasado del producto final.

Los valores obtenidos durante los diferentes procesos se obtienen experimentalmente.

Tabla 31: Nomenclatura utilizada en el Balance de Materia

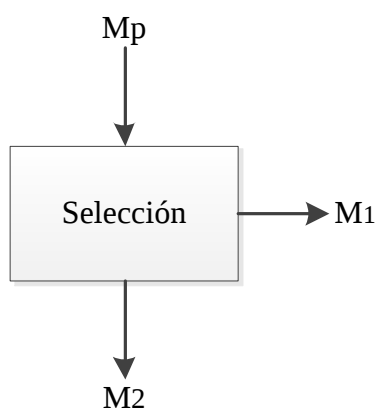
Nomenclatura	Descripción
Mp	Materia prima
M1	Materia rechazada
M2	Salida de selección
M3	Impurezas
M4	Salida de limpieza
M5	Agua absorbida
M6	Salida de lavado
M7	Residuos extraídos
M8	Penca cortada
M9	Agua evaporada
M10	Penca secada
M11	Pérdida en Molienda
M12	Harina de penca
M13	Pérdida en tamizado
M14	Harina de penca tamizada
M15	Harina de penca envasada

Fuente: elaboración propia (2025).

3.5.1.1. Recepción de materia prima

Donde:

M_p =masa de materia prima	962.064 gr
M_1 =masa rechazada (pérdidas) por putrefacción o daños que tiene la hoja de penca de tuna.	61.344 gr
M_2 = masa de salida útil seleccionada	900.720 gr



Balance global

$$M_P = M_1 + M_2 \text{ (Ecuación 3)}$$

$$M_2 = M_P - M_1$$

$$M_2 = 962.064 \text{ gr} - 61.344\text{gr}$$

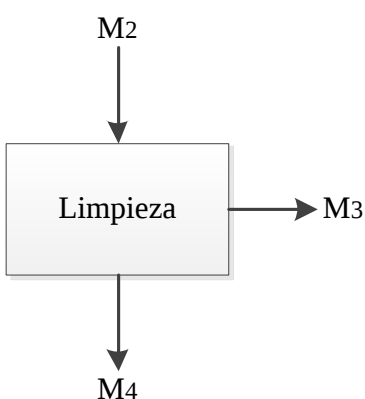
Realizando el cálculo matemático quedaría lo siguiente:

$$M_2 = 900.720\text{gr}$$

3.5.1.2. Etapa de limpieza

Donde:

M ₂ = masa de salida útil seleccionada	900.720 gr
M ₃ = impurezas, restos de espinas, partes dañadas eliminadas	8.947 gr
M ₄ = Salida de limpieza	891.773 gr



Balance global

$$M_2 = M_3 + M_4 \text{ (Ecuación 4)}$$

$$M_4 = M_2 - M_3$$

$$M_4 = 900.720 \text{ gr} - 8.947 \text{ gr}$$

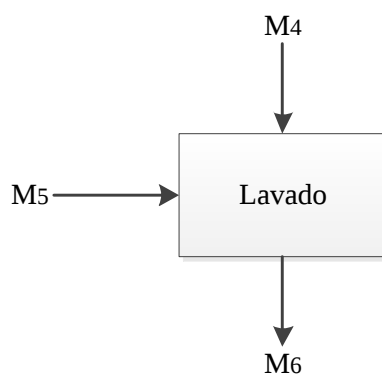
Realizando el cálculo matemático:

$$M_4 = 891.773 \text{ gr}$$

3.5.1.3. Etapa de lavado

Donde:

M ₄ = Salida de limpieza	891.773 gr
M ₅ = Agua absorbida	71.810 gr
M ₆ = Salida del lavado	963.583 gr



Realizando el balance y reajustando términos quedaría lo siguiente:

$$M_6 = M_4 + M_5 \quad \text{(Ecuación 5)}$$

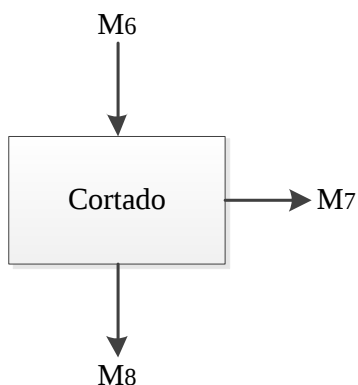
$$M_6 = 891.773 \text{ gr} + 71.810 \text{ gr}$$

$$M_6 = 963.583 \text{ gr}$$

3.5.1.4. Etapa de Cortado

Donde:

M ₆ = Salida de limpieza	963.583 gr
M ₇ = Residuos extraídos (porciones descartadas)	257.592 gr
M ₈ = Penca cortada	705.991



Siguiendo la corriente en este proceso se elabora el balance y se reajusta los términos para obtener lo siguiente:

$$M_8 = M_6 - M_7 \quad \textbf{(Ecuación 6)}$$

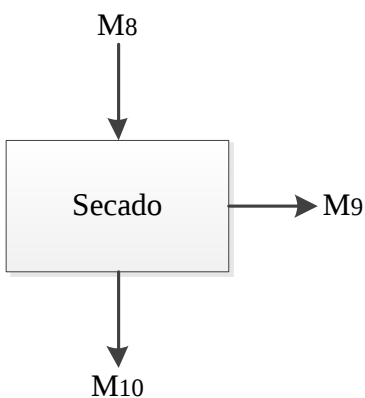
$$M_8 = 963.583 \text{ gr} - 257.592 \text{ gr}$$

$$M_8 = 705.991 \text{ gr}$$

3.5.1.5. Etapa de Secado

Donde:

M ₈ =penca cortada (entrada)	705.991 gr	Humedad= 93,53%
M ₉ = Salida de Agua evaporada	659.376 gr	Humedad= 100%
M ₁₀ = Penca (secada)	46.615 gr	Humedad= 6,10%



Trabajando con la fracción de sólido seco X_{SS} :

M_8	M_9	M_{10}
$X_{H_2O}=0,938$	$X_{H_2O}= 1$	$X_{H_2O}= 0,061$
$X_{SS}= 0,061$	$X_{SS}= 0$	$X_{SS}= 0,939$

Si $X_{SS(9)} = 0$

$$M_8 \cdot X_{SS} = M_9 \cdot X_{SS(9)} + M_{10} \cdot X_{SS(10)} \quad \textbf{(Ecuacion7)}$$

$$M_8 \cdot X_{SS(8)} = M_{10} \cdot X_{SS(10)}$$

$$M_{10} = M_8 \cdot X_{SS(8)} / X_{SS(10)}$$

$$M_{10} = \frac{705,991 \text{ gr} \cdot (0,061)}{0,939}$$

$$M_{10} = 46,615 \text{ gr}$$

Teniendo la masa de la corriente M_{10} :

$$M_8 = M_9 + M_{10} \quad \textbf{(Ecuación 8)}$$

$$M_9 = M_8 - M_{10}$$

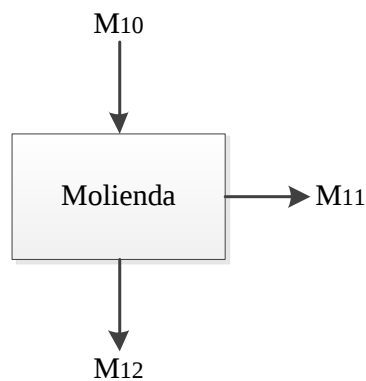
$$M_9 = 705,991 - 46,615 \text{ gr}$$

$$M_9 = 659,376 \text{ gr}$$

3.5.1.6. Etapa de Molienda

Donde:

M_{10} = Penca secada	46.615 gr
M_{11} = Pérdidas en molienda	7.320 gr
M_{12} =Harina de penca	39.295 gr



Realizando las operaciones para el balance de la etapa de molienda se obtiene lo siguiente:

$$M_{12} = M_{10} - M_{11} \text{ (Ecuación 9)}$$

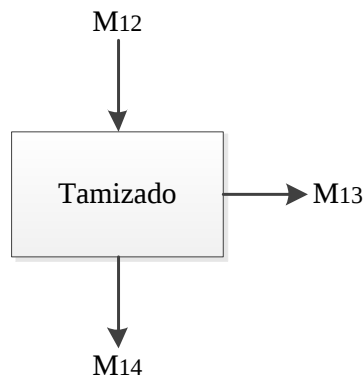
$$M_{12} = 46.615\text{gr} - 7.320 \text{ gr}$$

$$M_{12} = 39.295 \text{ gr}$$

3.5.1.7. Etapa de Tamizado

Donde:

M_{12} = Harina de penca	39.295 gr
M_{13} = Pérdida en tamizado	0.640 gr
M_{14} = Harina de penca tamizada	38.665 gr



En el tamizado ya se ha obtenido la harina, pero es necesario tamizarla para obtener el producto final, en donde una vez realizado el balance se procede a reemplazar términos quedando lo siguiente:

$$M_{14} = M_{12} - M_{13} \quad \textbf{(Ecuación 10)}$$

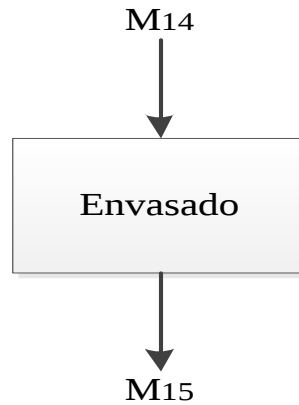
$$M_{14} = 39.295 \text{ gr} - 0.640 \text{ gr}$$

$$M_{14} = 38.655 \text{ gr}$$

3.5.1.8. Etapa de Envasado

Donde:

M_{14} = Harina de penca tamizada	38.655 gr
M_{15} = Harina de penca envasada	38.655 gr



Las corrientes M_{14} y M_{15} son iguales, ya que solo se procede a una etapa de envasado en donde no existiría ninguna alteración física del producto obtenido.

Realizando el balance, queda lo siguiente:

$$M_{14} = M_{15} \text{ (Ecuación 11)}$$

$$M_{15} = 38.665 \text{ gr}$$

3.5.2. Balance de energía en el secado

La energía transferida en el proceso de secado comprende el calor sensible y el calor latente.

$$Q_{\text{Secado}} = Q_{\text{Sensible}} + Q_{\text{Latente}} \quad \text{(Ecuación 12)}$$

3.5.2.1. Calor sensible

El calor sensible aplicado a la penca se obtiene de la siguiente ecuación:

$$Q_{\text{Sensible}} = m_{\text{penca}} * C_{p_{\text{penca}}} * (T_{\text{secado}} - T_{\text{ambiente}}) \quad \text{(Ecuación 13)}$$

Donde:

$$m_{\text{penca}} = \text{Masa de la penca de tuna para el secado} = 700 \text{ g} = 0,7 \text{ Kg}$$

$$T_{\text{secado}} = \text{Temperatura de secado de la penca de tuna} = 65 \text{ }^{\circ}\text{C} = 338,15 \text{ K}$$

$$T_{\text{ambiente}} = \text{Temperatura del ambiente} = 21 \text{ }^{\circ}\text{C} = 294,15 \text{ K}$$

El calor específico se obtuvo de la estimación basada en los componentes de la tuna, dicha expresión fue propuesta por Heldman y Singh(1984) HELDMAN & SINGH, D.R.1984. Introduction to food Engineering.. Editorial Elsevier. 258

$$C_p = \sum_{i=1}^n C_{p_i} * X_i \quad \text{(Ecuación 14)}$$

$$C_{p_{\text{tuna}}} = C_{p_{\text{Carbohidratos}}} * X_{\text{Carbohidratos}} + C_{p_{\text{Proteina}}} * X_{\text{Proteina}} + C_{p_{\text{Grasa}}} * X_{\text{Grasa}} + C_{p_{\text{Ceniza}}} * X_{\text{Ceniza}} + C_{p_{\text{Humedad}}} * X_{\text{Humedad}} \quad \text{(Ecuación 15)}$$

Según Heldman (1981) los calores específicos C_p de dichos componentes son:

$$C_{p_{\text{Carbohidratos}}} = 1,424 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg K}}$$

$$C_{p_{\text{Proteina}}} = 1,549 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg K}}$$

$$C_{p_{\text{Grasa}}} = 1,675 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg K}}$$

$$C_{p_{\text{Ceniza}}} = 0,837 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg K}}$$

$$Cp_{Humedad} = 4,187 \frac{KJ}{Kg K}$$

$$Cp_{tuna} = 1,424 \frac{KJ}{Kg K} * X_{Carbohidratos} + 1,549 \frac{KJ}{Kg K} * X_{Proteina} \\ + 1,675 \frac{KJ}{Kg K} * X_{Grasa} + 0,837 \frac{KJ}{Kg K} * X_{Ceniza} + 4,187 \frac{KJ}{Kg K} \\ * X_{Humedad}$$

Mientras que las fracciones másicas X se obtienen de los análisis realizados a la penca de tuna.

Tabla 32: Fracciones másicas de la penca de tuna

Componente	Masa (gramos)	X
Ceniza	0.92	0,0092
Grasa	0.51	0,0051
Carbohidratos	4.42	0,0442
Humedad	93.53	0,9353
Proteína total	0.62	0,0062
Total	100	1

Fuente: elaboración propia (2025).

$$Cp_{tuna} = \left(1,424 \frac{KJ}{Kg K}\right) * (0,0442) + \left(1,549 \frac{KJ}{Kg K}\right) * (0,0062) + \left(1,675 \frac{KJ}{Kg K}\right) \\ * (0,0051) + \left(0,837 \frac{KJ}{Kg K}\right) * (0,0092) + \left(4,187 \frac{KJ}{Kg K}\right) * (0,9353) \\ Cp_{tuna} = 4,004 \frac{KJ}{Kg K}$$

Reemplazando en la Ecuación (13)

$$Q_{Sensible} = 0,7 Kg * 4,004 \frac{KJ}{Kg K} * (338,15 K - 294,15 K)$$

$$Q_{Sensible} = 123 KJ$$

3.5.2.2. Calor latente

$$Q_{Latente} = m_{agua} * \lambda \text{ (Ecuación 16)}$$

Donde:

m_{agua} = Masa de agua evaporada= 659,040 g= 0,659 Kg

λ = Calor latente de evaporación a 65 °C= 2346 KJ/Kg (Transferencia de calor y masa, Yunus A. Cengel)

$$Q_{Latente} = 0,659 \text{ Kg} * 2346 \text{ KJ/Kg}$$

$$Q_{Latente} = 1546,108 \text{ KJ}$$

Reemplazando en la ecuación (12)

$$Q_{Secado} = 123 \text{ KJ} + 1546,108 \text{ KJ}$$

$$Q_{Secado} = 1669,108 \text{ KJ}$$

3.5.2.3. Consumo de energía eléctrica en la etapa de molienda

$$E_{electrica} = P_{molino} * t_{molienda} \text{ (Ecuación 17)}$$

Donde:

P_{molino} = Potencia del molino eléctrico = 1 KW-h = 1 kJ/h

$t_{molienda}$ = Tiempo de molido= 6 min= 0,1 h

Reemplazando la ecuación (15)

$$E_{eléctrica} = 1 \frac{\text{KJ}}{\text{h}} * 0,1 \text{ h}$$

$$E_{eléctrica} = 0,1 \text{ KJ}$$

3.5.2.4. Consumo de energía eléctrica en la etapa del tamizado

$$E_{eléctrica} = P_{Tamizado} * t_{Tamizado} \text{ (Ecuación 18)}$$

Donde:

P_{molino} = Potencia del equipo de tamizado = 0,92 KW-h = 0,92 kJ/h

$t_{molienda}$ = Tiempo de tamizado = 12 min = 0,2 h

Reemplazando la ecuación (17)

$$E_{eléctrica} = 0,92 \frac{KJ}{h} * 0,2 h$$

$$E_{eléctrica} = 0,184 KJ$$

3.6. Determinación del Rendimiento del Proceso

Para determinar el rendimiento del proceso en la producción de harina de hoja de penca de tuna es un indicador crucial que evalúa la eficiencia y la efectividad de cada etapa.

Este rendimiento se mide en términos de la calidad del producto final, la optimización de recursos y la eficiencia operativa.

Para determinar esto se aplica la siguiente ecuación:

Ecuación 19: Porcentaje de Rendimiento

$$\%Ren = \frac{Masa\ final}{Masa\ inicia} * 100\%$$

En donde la masa inicial es la cantidad de materia prima, es decir masa de hoja de penca de tuna y la masa final es la cantidad de harina obtenida. Los datos se utilizaron del mejor experimento:

Masa inicial (hoja fresca): 962,064 gr

Masa final (harina seca): 38,665 gr

$$\%Ren = \frac{38,665\ gr}{962,064\ gr} * 100\%$$

$$\%Ren = 4,01\%$$

Dado que la hoja fresca posee un contenido de humedad muy elevado (93,33 %), al secarla y transformarla en harina, la mayor parte del peso se pierde en forma de agua. Por esta razón, el rendimiento calculado en base a masa fresca resulta siempre

considerablemente menor que el obtenido en base a masa seca. Este valor es normal y esperado en la obtención de harinas a partir de hojas con alto contenido de humedad, como la penca de tuna.

El cálculo del rendimiento en masa fresca permite representar de manera realista la proporción de producto final obtenida a partir de la materia prima inicial, ya sea comprada o cosechada.

CAPÍTULO IV
COSTOS DEL PROYECTO DE
INVESTIGACIÓN

4.1. Costos del Proyecto

4.1.1. Estudio económico

El desarrollo de este trabajo de investigación implica diversos costos que deben ser considerados y se presenta a continuación:

4.1.2. Costo de la materia prima

El presupuesto del presente proyecto de investigación se llevó a cabo una evaluación detallada de los costos asociados con la ejecución integral del proyecto.

Tabla 33: Costos de materia prima e insumos necesarios

Detalle	Cantidad	Unidad	Costo Unitario (Bs)	Costo Total (Bs)
Penca	36	kilos	2	72
Agua destilada	10	litros	8	80
TOTAL				Bs. 140

Fuente: Elaboración propia (2025)

Tabla 34: Costo de materiales

Detalle	Cantidad	Unidad	Costo Unitario (Bs)	Costo Total (Bs)
Bandejas de plástico	3	Uni.	15	45
Guantes	2	Caja	20	40
Bolsas de polietileno	25	Uni.	2	50
Cepillo de plástico	2	Uni.	5	10
Instrumento de corte manual (cuchillo)	1	Uni.	5	5
TOTAL				Bs. 150

Fuente: Elaboración propia (2025)

Tabla 35: Costo de Energía Eléctrica

N°	Detalle	Potencia (kW)	Tiempo (h)	Energía consumida (kWh)	Costo unitario (Bs)	Costo Total (Bs)
1	Secado	1,2	208	249,6	0,9	224,64
2	Molienda	1	3	3		2,7
3	Tamizado	0,92	3	2,76		2,48
4	Selladora al vacío	0,1	0,15	0,015		0,0135
TOTAL						Bs. 229,83

Fuente: Elaboración propia (2025)

Tabla 36: Detalle de Servicio Público de Agua

N°	Detalle	Precio Unitario (Bs)	Unidad	Cantidad	Costo Total (Bs)
1	Agua	6,4	litros	1	6,4

Fuente: Elaboración propia (2025)

Los materiales e insumos necesarios para la realización de la parte experimental y análisis, fueron proporcionados por el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la carrera de Ingeniería Química.

Para la caracterización fisicoquímica y microbiológica, se recurre a los servicios del Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo (CEANID). En cumplimiento de las políticas de apoyo a la investigación estudiantil de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho (UAJMS), se aplica una subvención del 60 % sobre el costo total de los análisis.

Tabla 37: Costo de Análisis de laboratorio CEANID

N°	Detalle	Unidad	Cantidad	Costo unitario (Bs)	Costo total (Bs)
1	Humedad	Análisis	2	40	80
2	Proteína	Análisis	2	100	200
3	Cenizas	Análisis	2	70	140
4	Fibra	Análisis	2	70	140
5	Grasa	Análisis	2	90	180
6	Valor energético	Análisis	2	20	40
7	Hidratos de carbono	Análisis	2	40	80
8	Coliformes totales	Análisis	1	100	100
9	Mohos y levaduras	Análisis	1	100	100
10	Calcio	Análisis	1	180	180
11	Fosforo	Análisis	1	180	180
12	Hierro	Análisis	1	180	180
13	Potasio	Análisis	1	180	180
14	Sodio	Análisis	1	180	180
15	Bacterias aerobias	Análisis	1	100	100
16	Echerichia coli	Análisis	1	100	100
TOTAL				Descuento = 60% Costo Real = 40% (2180 Bs*0.3) =Bs.872	

Fuente: Elaboración propia (2025)

Para el análisis de laboratorio que muestra la Tabla 37 se mandó una muestra representativa de la materia prima utilizada para el proceso de elaboración del presente proyecto.

Tabla 38: Detalle de costo total del proyecto

Detalle	Costo Total (Bs)
Materia prima e insumos necesarios	140
Costo de materiales	150
Costo de Energía Eléctrica	229,83
Detalle de otros servicios	6,4
Costo de Análisis de laboratorio CEANID	872
TOTAL	Bs.1398,23

Fuente: Elaboración propia (2025)

4.1.3. Costo de Producción

El costo de producción se realiza al mejor experimento obtenido en el diseño experimental, el cual tiene las siguientes variables en el proceso de secado: tiempo de 8 horas, temperatura 65°C y ancho de corte de 0,3 cm.

Tabla 39: Requerimiento de material y consumo energético de los equipos

Detalle	Potencia (kW)	Tiempo (h)	Energía consumida (kWh)	Costo unitario (Bs)	Costo Total (Bs)
Secado	1,2	7,38	8,856	0,9	7,9704
Molienda	1	0,12	0,12		0,108
Tamizado	0,92	0,05	0,046		0,0414
Selladora al vacío	0,1	0,05	0,005		0,0045
TOTAL					Bs. 8,1243

Detalle	Cantidad	Unidad	Costo Unitario (Bs)	Costo Total (Bs)
Penca	2	piezas	2	4
Agua destilada	0,5	litros	8	4
TOTAL				Bs. 16,1243

Fuente: Elaboración propia (2025)

El costo de producción de 38,665gr de harina de penca de tuna es de Bs. 16,1243 a partir de 968,04 gr de penca de tuna, el factor de seguridad a tomar es de 1,5. Entonces se tiene:

$$\text{Costo real por gramo} = \frac{16.1243}{38.665} = 0.414 \text{ Bs/gr (Ecuación 20)}$$

$$\text{Costo real por 100 gramo} = 0.414 \frac{\text{Bs}}{\text{gr}} * 100 \text{ gr} = 41.4 \text{ Bs (Ecuación 21)}$$

$$\text{Costo 100 gr con factor de seguridad} = 41.4 \text{ Bs} * 1.5 = 62.1 \text{ Bs (Ecuación 22)}$$

Entonces para la obtención de 100gr de harina a partir de penca de tuna el costo total para la venta de la misma seria de Bs 62,10

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES
Y
RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

La obtención experimental de harina a partir de la hoja de penca de tuna (*Opuntia ficus-indica*) permite desarrollar un proceso de secado y molienda para la producción de este producto. Los resultados obtenidos evidencian características sensoriales, fisicoquímicas y microbiológicas adecuadas, cumpliendo con los objetivos planteados en la investigación.

De acuerdo con la totalidad de los procedimientos ejecutados en el presente proyecto de investigación enfocado en la obtención experimental de harina a partir de la hoja de penca de tuna, y considerando los objetivos específicos planteados junto con los resultados obtenidos, se presentan las conclusiones siguientes:

- Se lleva a cabo una caracterización detallada de obtención de harina a partir de la hoja de penca de tuna realizando un análisis proximal en el Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo (CEANID) donde se determinó las propiedades fisicoquímicas del mismo.
- La caracterización fisicoquímica de la hoja fresca evidencia que la materia prima presenta una humedad inicial de 93,53 %, lo cual confirma que su estructura vegetal está constituida predominantemente por agua. Este comportamiento es típico de tejidos succulentos y condiciona directamente el diseño del proceso de secado. La composición proximal obtenida concentraciones reducidas de proteínas, lípidos y fibra, y un contenido moderado de carbohidratos permite identificar a la penca de tuna como un sustrato de bajo aporte energético, pero con potencial funcional debido a la presencia de componentes estructurales como polisacáridos y mucílagos. Estos resultados demuestran que la hoja es adecuada para su transformación en harina, siempre que se aplique una etapa de deshidratación eficiente que permita concentrar los sólidos totales.
- El proceso experimental, que incluye despinado, lavado, corte en espesores controlados, secado convectivo y molienda, opera de manera estable y reproducible bajo las condiciones seleccionadas. El comportamiento de pérdida de masa durante

el secado confirma una cinética de deshidratación continua y coherente con materiales vegetales de alta humedad. Las temperaturas de operación (60 y 65 °C) y los tiempos definidos (8 y 9 horas) resultan adecuados para garantizar una remoción eficiente de humedad sin provocar degradación visible del material vegetal. La uniformidad lograda en la molienda demuestra que la harina se obtiene con granulometría consistente, lo que favorece su aplicación posterior en matrices alimentarias. En conjunto, el proceso demuestra ser técnicamente viable y escalable, ya que utiliza operaciones unitarias simples, de bajo costo y compatibles con infraestructura de laboratorio.

- El balance de materia confirma que la mayor parte de la masa inicial se pierde en forma de agua, coherente con la humedad de la hoja fresca superior al 93 %. La relación entre masa inicial (962,064gr) y masa final (38,665 gr) valida la coherencia experimental del proceso y demuestra que las pérdidas no atribuibles a evaporación son mínimas, lo que refleja un control adecuado de cada operación unitaria. Este comportamiento confirma que el secado es la operación crítica del proceso, siendo responsable de la mayor parte de la reducción de masa y del rendimiento final obtenido.
- La harina final presenta un contenido de humedad de 6,10 %, valor que cumple con los requisitos de estabilidad para productos deshidratados, garantizando menor actividad de agua y menor susceptibilidad a microorganismos deteriorantes. La composición proximal evidencia un incremento significativo en los sólidos totales debido a la concentración generada por el proceso de secado, reflejándose en valores superiores de cenizas, carbohidratos, proteínas y fibra respecto a la hoja fresca.

Los resultados microbiológicos permanecen dentro de los límites establecidos por normativas para alimentos deshidratados, lo que confirma adecuadas condiciones higiénicas durante el procesamiento. El bajo recuento de coliformes totales, ausencia de *E. coli* y niveles seguros de mohos y levaduras demuestran que la harina es microbiológicamente apta para consumo.

- El rendimiento final obtenido es 4,01 %, valor completamente coherente con la humedad inicial elevada de la hoja de penca de tuna. Este rendimiento refleja que la mayor parte de la masa corresponde a agua y que la fracción sólida disponible para conversión a harina es reducida. Aunque el rendimiento numérico es bajo, esto no compromete la viabilidad del proceso, ya que la materia prima es abundante, de bajo costo y accesible durante todo el año en regiones productoras. Además, el rendimiento obtenido se encuentra dentro de los rangos esperados para vegetales succulentos, lo que confirma la consistencia técnica del proceso de secado implementado.
- La evaluación sensorial indica que la harina de penca de tuna presenta aceptación favorable en atributos de color, olor, sabor y textura. Los panelistas describen un aroma tenue característico, un sabor ligeramente amargo propio del tejido vegetal, un color uniforme y una textura fina, lo cual demuestra que el producto cumple criterios organolépticos básicos. La muestra con mejor desempeño sensorial evidencia que la metodología de secado y molienda conserva adecuadamente las propiedades esenciales del producto sin generar defectos perceptibles. Este resultado confirma que la harina es apta para consumo y tiene potencial para incorporarse en diferentes formulaciones alimentarias.
- El análisis de costos demuestra que la producción de 100 gramos de harina de penca de tuna requiere un gasto de **Bs. 62,10** cuando se considera un factor de seguridad de 1,5, el cual incorpora pérdidas del proceso, variabilidad operativa y costos indirectos no visibles en la corrida experimental.

5.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda evaluar temperaturas adicionales fuera del rango 60–65 °C utilizado en el estudio, con el fin de identificar condiciones que mejoran la tasa de deshidratación sin comprometer la estabilidad térmica de los componentes de la penca de tuna *Opuntia ficus-indica*. Asimismo, se sugiere analizar la influencia del tiempo y el espesor de corte mediante un diseño experimental más amplio, ya que estas variables controlan la resistencia interna a la transferencia de masa y afectan directamente la humedad final de la harina.
- Dado que el documento evidencia diferencias en la velocidad de secado entre 0,3 y 0,5 cm, se recomienda estandarizar el espesor mediante equipos de corte calibrados. La uniformidad dimensional reduce gradientes de humedad dentro del producto, evita zonas de sobrecalentamiento y mejora la reproducibilidad del proceso, condición fundamental para un posible escalado a nivel industrial.
- Aunque la harina obtenida alcanza 6,10 % de humedad, se recomienda establecer un control continuo mediante termobalanza o secador infrarrojo, asegurando que el producto final permanezca siempre por debajo del 7 %. Esta práctica garantiza estabilidad microbiológica, reduce actividad de agua y prolonga la vida útil durante almacenamiento.
- Los resultados microbiológicos se encuentran dentro de límites aceptables; sin embargo, se recomienda reforzar las Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) durante el despinado, lavado, corte y possecado. El uso de superficies sanitizadas, guantes, recipientes herméticos y utensilios de acero inoxidable disminuye significativamente el riesgo de contaminación cruzada y mantiene la inocuidad del producto final.
- Se recomienda estudiar propiedades funcionales como absorción de agua, índice de solubilidad, capacidad gelificante y comportamiento térmico. Estas propiedades determinan el desempeño de la harina en formulaciones como

panes, bebidas instantáneas, sopas, mezclas fortificadas o productos funcionales. Este análisis incrementa el valor agregado del producto y permite establecer posibles usos industriales.

- Finalmente, se recomienda explorar subproductos de la hoja, como mucílago, fibra insoluble y extractos bioactivos, para desarrollar productos derivados (espesantes, estabilizantes, suplementos vegetales). Este enfoque mejora la sostenibilidad del proceso y permite valorizar completamente la biomasa, integrándose a modelos de economía circular.