



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**Especificación de condiciones de separación
para recuperación de fibra húmeda de nopal**

TESIS

**PARA OBTENER EL GRADO DE
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTA:

P.I.Q. JOSÉ MARTÍN AGUILAR AGUILAR

ASESOR DE TESIS:

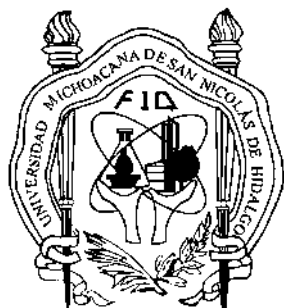
DR. JOSÉ APOLINAR CORTÉS

CO-ASESORA

DRA. MA. DEL CARMEN CHÁVEZ PARGA

Ciudad Universitaria

Agosto de 2019, Morelia, Michoacán.





Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi padre José Martín y a mi madre Leticia, que han estado en todo momento apoyando a cada miembro de nuestra familia, enseñándonos a superarnos y a salir adelante en cada momento difícil así como a disfrutar los momentos felices.

Con el presente trabajo quiero reconocerles, ese gran sacrificio que han hecho para que yo pueda tener una herramienta más con que poderme defender en la vida, así como a superarme cada día más. Muchas gracias papás.



Agradecimientos

Agradecer a mis padres por ser los promotores de mis sueños y metas, ya que gracias a su apoyo incondicional y confianza he ido lográndolos. Este trabajo es un pequeño reconocimiento que les ofrezco, ya que a lo largo de mis estudios académicos hemos pasado muchas dificultades pero ustedes siempre nos han sacado adelante, por eso no tengo palabras para agradecerles lo mucho que han hecho por nosotros, los quiero mucho papás.

Quiero agradecer de manera muy especial a mi esposa Felipa Milagros por todo el apoyo incondicional y consejos que me ha brindado a lo largo de nuestra relación de noviazgo y en esta nueva etapa que comenzamos. Te has convertido en mi razón para salir adelante, cumplir nuestros sueños juntos. Has estado conmigo en los momentos difíciles y en momentos de felicidad, por eso quiero compartir este momento contigo. Eres el amor de mi vida, te amo.

Agradecer a mi hermano Rodolfo que me ha estado apoyando toda la vida, que ha sido un pilar para poder cumplir mis metas, no tengo palabras para agradecerte todo lo que has hecho por mí. Muchas gracias, hermano.

Agradecer a la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y mis profesores por la formación recibida a lo largo de mi preparación académica, en especial a mis asesores de tesis, Dr. José Apolinar Cortés y la Dra. Ma. Del Carmen Chávez Parga por todo el apoyo, comprensión y confianza dada a lo largo de este trabajo. Muchas gracias Doctores.

Agradecer al MCIA Egar Daniel Alanís Silva por todo el apoyo brindado a lo largo de este trabajo.

Agradecer a todos mis amigos que han estado a lo largo de este camino académico apoyándome a lograr mis sueños, en especial a Miguel Ángel Rodríguez, Angel Alfaro, Mauricio Bello, Ricardo Ornelas, Abel Medrano, Ernesto Sánchez, Cristian Navarro, Marco Serrato, Edgar Arévalo, Alejandro Calderón y Daniel Saavedra.



Índice

Resumen	1
Introducción	3
Fibra dietética	4
Nopal	4
Obtención de fibra soluble	5
Obtención de fibra insoluble	5
Filtración	5
Valor agregado a la fibra extraída del nopal	6
Nopal	7
Nopales (<i>Opuntia ssp.</i>)	7
Especies	7
Descripción del nopal	7
Producción	8
Composición química	8
Fibra	9
Clasificación y propiedades de la fibra dietética	9
Efectos fisiológicos de la fibra	11
Efectos adversos de la fibra	11
Tamaño de fibra	12
Ingesta de fibra dietética	12
Métodos para la recuperación de la fibra	12
Centrifugación	12
Filtración	13
Tortas filtrantes compresibles	15
Objetivos e hipótesis	17
Hipótesis	17
Objetivo general	17
Objetivos específicos	17
Metodología	18
Diagrama de flujo	18
Recolección de la penca de nopal	19



Proceso de molienda	19
Selección del tipo de material filtrante	21
Proceso de filtración	23
Determinación del tamaño de fibra	24
Caracterización de los filtrados	27
Equipos piloto	27
Análisis y discusión de resultados	28
Selección de la malla filtrante	28
Prueba de filtración a vacío a 10 cm de Hg	29
Prueba de humedad a la torta obtenida en el proceso de filtración a vacío a 10 cm de Hg	30
Prueba de filtración a vacío a 15 cm de Hg	32
Prueba de humedad a la torta obtenida en el proceso de filtración a vacío a 15 cm de Hg	33
Prueba de filtración al vacío a 20 cm de Hg	34
Prueba de humedad a la torta obtenida en el proceso de filtración a vacío a 20 cm de Hg	36
Espesor de la torta obtenida a diferentes presiones al vacío	37
Tamaño de fibra	38
Imágenes de la fibra de nopal obtenidas a diferentes tiempos	39
Caracterización de los filtrados	41
Costos de los procesos de molienda y filtración al vacío	44
Propuesta del proceso de recuperación de la fibra húmeda de nopal	46
Conclusiones	47
Bibliografía	48
Anexo A	51
Anexo B	57
Anexo C	59



Lista de Tablas e Ilustraciones

Tablas

Tabla 1. Composición Química de nopal verdura	8
Tabla 2. Caracterización de los cladodios a diferentes edades en porcentaje y en base seca	9
Tabla 3. Acciones de los componentes de la fibra dietética	11
Tabla 4. Esquema de los tiempos obtenidos en la filtración	23
Tabla 5. Esquema de los espesores de torta a diferentes tiempos de molienda	24
Tabla 6. Muestras de tamaños de fibras a diferentes tiempos de molienda	27
Tabla 7. Caracterización de los filtrados obtenidos	27
Tabla 8. Resultados del proceso de filtración al vacío a 10 cm de Hg	29
Tabla 9. Porcentaje de humedad en la torta a diferentes tiempos de molienda a -10 cm de Hg	31
Tabla 10. Resultados del proceso de filtración al vacío a 15 cm de Hg	32
Tabla 11. Porcentaje de humedad en la torta a diferentes tiempos de molienda a -15 cm de Hg	33
Tabla 12. Resultados del proceso de filtración al vacío a 20 cm de Hg	35
Tabla 13. Porcentaje de humedad en la torta a diferentes tiempos de molienda a -20 cm de Hg	36
Tabla 14. Espesores de las tortas obtenidas en todas las pruebas	37
Tabla 15. Tamaño de fibra a diferentes tiempos de molienda	38
Tabla 16. Caracterización de los filtrados a la presión de vacío de 20 cm de Hg	41
Tabla 17. Caracterización de los filtrados a la presión de vacío de 15 cm de Hg	41
Tabla 18. Caracterización de los filtrados a la presión de vacío de 10 cm de Hg	42
Tabla 19. Costos energéticos a una presión al vacío de 20 cm de Hg	44
Tabla 20. Costos energéticos a una presión al vacío de 15 cm de Hg	44
Tabla 21. Costos energéticos a una presión al vacío de 10 cm de Hg	45
Tabla 22. Tiempos de las pruebas realizadas con 3 minutos de molienda (-20 cm de Hg)	51
Tabla 23. Tiempo de las pruebas realizadas con 6 minutos de molienda (-20 cm de Hg)	51
Tabla 24. Tiempo de las pruebas realizadas con 10 minutos de molienda (-20 cm de Hg)	52
Tabla 25. Tiempos de las pruebas realizadas con 15 minutos de molienda (-20 cm de Hg)	52
Tabla 26. Tiempo de las pruebas realizadas con 3 minutos de molienda (-15 cm de Hg)	53
Tabla 27. Tiempo de las pruebas realizadas con 6 minutos de molienda (-15 cm de Hg)	53
Tabla 28. Tiempos de las pruebas realizadas con 10 minutos de molienda (-15 cm de Hg)	54
Tabla 29. Tiempo de las pruebas realizadas con 15 minutos de molienda (-15 cm de Hg)	54
Tabla 30. Tiempo de las pruebas realizadas con 3 minutos de molienda (-10 cm de Hg)	55
Tabla 31. Tiempo de las pruebas realizadas con 6 minutos de molienda (-10 cm de Hg)	55
Tabla 32. Tiempos de las pruebas realizadas con 10 minutos de molienda (-10 cm de Hg)	56
Tabla 33. Tiempo de las pruebas realizadas con 15 minutos de molienda (-10 cm de Hg)	56
Tabla 34. Tamaño de fibra a distintos tiempos de molienda	57
Tabla 35. Características de la licuadora industrial	59
Tabla 36. Características del filtro rotatorio al vacío	59

Ilustraciones

Ilustración 1. Diagrama de flujo de la metodología	18
Ilustración 2. Penca de nopal con una maduración de 1 año	19
Ilustración 3. Troceado y pesaje del nopal	20
Ilustración 4. Licuadora convencional para llevar a cabo la molienda	20
Ilustración 5. Sistema a nivel laboratorio para el proceso de filtración a vacío	21
Ilustración 6. Conexión del embudo y del matraz a través de un tapón de caucho	22



Ilustración 7. Malla de acero inoxidable #50	22
Ilustración 8. Torta húmeda	24
Ilustración 9. Extracción sólido-líquido	25
Ilustración 10. Muestra de las fibras a diferentes tiempo de molienda	25
Ilustración 11. Microscopio (marca LEICA, modelo ICC50 HD)	26
Ilustración 12. Escala 0.5 mm	26
Ilustración 13. Estancamiento del concentrado con papel filtro y fibra precipitada en los filtrados	28
Ilustración 14. Filtración a vacío a 10 cm de Hg	30
Ilustración 15. Porcentaje de humedad en la torta a una presión de vacío de 10 cm de Hg	31
Ilustración 16. Filtración al vacío de 15 cm de Hg	33
Ilustración 17. Porcentaje de humedad en la torta a una presión de -15 cm de Hg	34
Ilustración 18. Filtración al vacío a 20 cm de Hg	35
Ilustración 19. Porcentaje de humedad en la torta a una presión de -20 cm de Hg	36
Ilustración 20. Espesor de torta a diferentes presiones al vacío	37
Ilustración 21. Tamaño de fibra a diferentes tiempos de molienda	38
Ilustración 22. Fibra de 1.2 mm de longitud (6 min. de molienda)	39
Ilustración 23. Fibra de 1.3 mm de longitud (6 min de molienda)	39
Ilustración 24. Fibra de 1.5 mm de longitud (6 min. de molienda)	39
Ilustración 25. Fibra de 0.3-0.4 mm de longitud (6 minutos de molienda)	39
Ilustración 26. Fibra de 0.65 y 1 mm de longitud (10 min. de molienda)	39
Ilustración 27. Fibra de 0.25 y 0.6 mm de longitud (6 minutos de molienda)	39
Ilustración 28. Fibra de 1 mm de longitud (10 min. de molienda)	40
Ilustración 29. Fibra de 1.2 mm de longitud (10 min. de molienda)	40
Ilustración 30. Fibra de tamaño 1, 0.2 y 0.4 mm de longitud (10 min. de molienda)	40
Ilustración 31. Fibra de 0.5 mm de longitud (15min. de molienda)	40
Ilustración 32. Fibra de 0.5 mm de longitud (15 min. de molienda)	40
Ilustración 33. Fibras de tamaño 0.2 mm de longitud (15 min. de molienda)	40
Ilustración 34. Solidos Totales a diferentes presiones de vacío	42
Ilustración 35. Solidos Totales Volátiles a diferentes presiones de vacío	43
Ilustración 36. Demanda Química de Oxígeno a diferentes presiones de vacío	43
Ilustración 37. Costo de recuperación de fibra por Kg. de nopal	45
Ilustración 38. Diagrama de flujo del proceso propuesto para la recuperación de la fibra húmeda de nopal	46
Ilustración 39. Licuadora Industrial	60
Ilustración 40. Filtro rotatorio al vacío	60



Abreviaturas

DQO: Demanda Química de Oxígeno.

FS: Fibra Soluble.

FI: Fibra Insoluble.

ha: Hectárea.

ST: Sólidos Totales.

STV: Sólidos Totales Volátiles.

spp: especies individuales dentro de un género.

RPM: Revoluciones por minuto.

mm: milímetros.



Resumen

El nopal es una planta que pertenece a las cactáceas, que por sus características morfológicas y fisiológicas adaptadas a la escasa disponibilidad de agua y a las variaciones extremas de la temperatura, es idónea para su desarrollo en las zonas áridas y semiáridas.

El nopal está compuesto principalmente por agua, carbohidratos, cenizas, proteína, lípidos, fibra y otros compuestos en minoría. La fibra se clasifica en soluble e insoluble; la fibra insoluble está compuesta principalmente por celulosa, lignina y una fracción de hemicelulosa, la fibra soluble está compuesta de mucilagos, gomas, pectinas y hemicelulosa.

Actualmente el uso de la fibra ha ido en aumento por sus propiedades funcionales, las cuales ayudan principalmente como auxiliar en trastornos digestivos así mismo se ha encontrado que ayuda en la reducción de ciertos tipos de cáncer, por ejemplo el cáncer de colon.

En éste trabajo se evaluó la recuperación de fibra insoluble del nopal por medio de molienda y de filtración a vacío. La molienda se realizó durante 3, 6, 10 y 15 minutos, en una licuadora a una velocidad de 3600 revoluciones por minuto, mientras que la filtración se realizó a las presiones de vacío de 10, 15 y 20 cm de Hg. Las variables de evaluación de la recuperación fueron: Tamaño de fibra, humedad de la torta, espesor de la torta, tiempo de recuperación de filtrados y costo de separación.

Los resultados indican que a mayor tiempo de molienda con presión de vacío en la filtración de 20 cm de Hg, se obtienen las mejores condiciones recuperación de fibra, ya que disminuye la humedad y espesor de torta, tiempo de filtración, tamaño de fibra y costos de separación.

De los resultados obtenidos se concluye que es posible recuperar la fibra de nopal con la calidad necesaria para consumo humano a un bajo costo. Además que se observó que existe correlación entre ambas etapas de separación, ya que las variaciones en el tiempo de molienda influyen directamente sobre la capacidad de filtración y la calidad de la torta obtenida.

Palabras claves: Fibra, filtración al vacío, molienda, tiempo de molienda, presión de vacío.



Abstract

The nopal is a plant that belongs to cacti, which due to its morphological and physiological characteristics adapted to the limited availability of water and extreme temperature variations, is ideal for growth in arid and semi-arid areas.

The nopal is mainly composed of water, carbohydrates, ashes, protein, lipids, fiber and other minority compounds. Fiber is classified as soluble and insoluble; The insoluble fiber is mainly composed of cellulose, lignin and a fraction of hemicellulose, the soluble fiber is composed of mucilages, gums, pectins and hemicellulose.

Currently the use of fiber has been increasing due to its functional properties, which help mainly as an aid in digestive disorders and it has been found to help in the reduction of certain types of cancer, for example colon cancer.

This work assessed the recovery of insoluble fiber from the nopal by grinding and vacuum filtration. Grinding was performed for 3, 6, 10 and 15 minutes in a blender at a rate of 3600 revolutions per minute, while vacuum filtration was performed at pressures of 10, 15 20 cm Hg. Recovery evaluation variables were: Fiber size, cake moisture, cake thickness, filter recovery time and separation cost.

The results indicate that the longer the grinding time with vacuum pressure in the filtration of 20 cm Hg, the better fiber recovery conditions are obtained, since the moisture and cake thickness, filtration time, fiber size and costs decrease from separation.

The results obtained conclude that it is possible to recover the nopal fiber with the necessary quality for human consumption at a low cost. In addition, it was observed that there is a correlation between the two stages of separation, since variations in grinding time directly influence the filtration capacity and the quality of the cake obtained.

Keywords: Fiber, vacuum filtration, grinding, grinding time, vacuum pressure.



Introducción

Las tendencias mundiales de la alimentación en los últimos años indican un interés acentuado de los consumidores hacia ciertos alimentos, que además del valor nutricional aporten beneficios a las funciones fisiológicas del organismo humano. Estas variaciones en los patrones de alimentación generaron una nueva área de desarrollo en la ciencia de los alimentos y de la nutrición que corresponde a la de los alimentos funcionales. En la actualidad la definición general de los alimentos funcionales de acuerdo al Instituto Internacional de Ciencias de la Vida en Europa (ILSI-Europe) "Un alimento puede considerarse funcional si ha demostrado satisfactoriamente que afecta de manera beneficiosa a una o más funciones del organismo, más allá de sus efectos nutricionales, de manera que es relevante tanto para mejorar el estado de salud y bienestar como para reducir alguno de los factores de riesgo de enfermedades

Sloan (2000) define a los alimentos funcionales como un alimento o bebida que proporciona un beneficio fisiológico, que fortalece la salud, ayuda a prevenir enfermedades o mejora el rendimiento físico o mental por la adición de un ingrediente funcional, por la modificación de un proceso o por el uso de biotecnología.

Se han descubierto que muchos productos alimenticios tradicionales, como las frutas, verduras, soya o leche, contienen componentes que pueden resultar benéficos para la salud y por consiguiente se pueden llamar alimentos funcionales.

Los japoneses clasificaron a los alimentos funcionales en tres categorías que son:

- 1- Alimentos a base de ingredientes naturales.
- 2- Alimentos que deben consumirse como parte de la dieta diaria.
- 3- Alimentos, que al consumirse cumplen un papel específico en las funciones del cuerpo humano, las cuales son:
 - a) Mejoramiento de los mecanismos de defensa biológica.
 - b) Prevención o recuperación de alguna enfermedad específica.
 - c) Control de las condiciones físicas y mentales.
 - d) Retardo en el proceso de envejecimiento.

Los alimentos funcionales contienen diferentes compuestos preventivos de enfermedades como lo son: los terpenos (carotenoides y limonoides), fitoesteroles, fenoles (flavonoides e Isoflavonas), lignanos, tioles (Glucosinolatos, sulfilos alílicos, índoles, isoprenoides).



Fibra dietética

La carencia de fibra dietética en la dieta del hombre, es un factor causal de numerosas enfermedades denominadas “enfermedades de la civilización”, como la diabetes, obesidad, diverticulosis, enfermedades cardiovasculares, etc. (Sáenz, 2002).

Actualmente se dispone de diversas fuentes de fibra dietética, como los cereales, granos, vegetales, frutas y legumbres, las cuales pueden ser consumidas de manera directa o transformadas en productos ricos en fibra. Su importancia radica en las propiedades fisiológicas en el organismo, ayudando a prevenir la presencia de las enfermedades silenciosas.

La fibra es parte de la pared celular de una planta y está compuesta principalmente de lignina y polisacáridos como celulosa, hemicelulosa, pectinas, gomas y mucilagos (Cummings, 2007). Escudero (2006) menciona que existen otros componentes en la fibra tales como el almidón, la inulina, diversos oligosacáridos (fructooligosacaridos, galactooligosacaridos y xilooligosacarido) y disacáridos como la lactulosa. A este conjunto de componentes se le llama fibra funcional.

Según su solubilidad en agua, la fibra se clasifica en soluble e insoluble; la primera la conforman mucilagos, gomas, pectinas y hemicelulosa y la insoluble es principalmente celulosa, lignina y una gran fracción de hemicelulosa (Atalah y Park 1997). Estas fracciones de fibra tienen efectos fisiológicos distintos: la fibra soluble se asocia con la reducción de los niveles de glucosa, de colesterol y la estabilización del vaciamiento gástrico en cambio la fibra insoluble tiene la capacidad de retención de agua (aumento de peso en las heces), el intercambio iónico, la absorción de ácidos biliares, minerales, vitaminas y su interacción con la flora microbiana.

Cerca del 75% de la fibra dietética en los alimentos está presente en la forma de fibra insoluble, sin embargo, la mayoría de las fuentes de fibra en la actualidad son mezclas de ambas fibras, insolubles y solubles (Córdoba, 2005).

Nopal

Existen más de 370 especies de *Opuntia* reconocidas en todo el mundo, y al menos 60 de ellas son nativas de México (Espino-Díaz y col., 2010). Esta planta crece principalmente en las zonas áridas (menos de 250 mm de precipitación anual) y en las zonas semiáridas (250-450 mm de precipitación anual). Cabe mencionar que México es el país líder en la producción de nopal verdura al tener la mayor superficie bajo cultivo (10 400 ha).

El nopal es un alimento nutritivo rico en fibra, la cual; de acuerdo a su solubilidad en agua, se clasifica como soluble e insoluble. La fibra soluble se compone de



mucílago, gomas, pectina, y la hemicelulosa, por otra parte. La fibra insoluble se compone de celulosa, lignina y una gran fracción de hemicelulosa (Sáenz y col., 2004).

Respecto a sus propiedades medicinales, aparte de las que tradicionalmente se le atribuyen, en años recientes se inició la comercialización de fibra deshidratada de nopal como auxiliar en trastornos digestivos. Por otra parte estudios recientes demostraron las características del nopal como hipoglucemiante, es decir, como controlador de los niveles excesivos de azúcar en el cuerpo. La pulpa deshidratada del nopal da por resultado un material fibroso cuya función medicinal se basa, como cualquier otra fibra natural, en favorecer el proceso digestivo, con lo cual se reduce el riesgo de problemas gastrointestinales (Ruíz López, El nopal: propiedades y paquete tecnológico para su producción).

Obtención de fibra soluble

Los procedimientos de obtención de las fibras solubles están fundamentados, en general, en una extracción en medio líquido, basada en las diferentes solubilidades de los compuestos, seguida de etapas de purificación por filtración y de precipitación en presencia de alcohol o de sales. Por último, la obtención se termina con un secado y un triturado.

Obtención de fibra insoluble

Los métodos tradicionales para la obtención de fibra insoluble involucran operaciones como trituración o molienda para disminuir su tamaño de partícula; lavado para eliminar carga microbiana, residuos y azúcares simples; filtración y secado para prolongar su vida útil y, finalmente, la molienda y el envasado (Pérez y Sánchez, 2001). Actualmente también son empleados tratamientos como: extrusión, autoclavado e hidrólisis en medios ácidos o alcalinos, que se aplican en fuentes con alto contenido de fibra dietética insoluble con el fin de hidrolizar parte de esta fracción para obtener una mejor relación fibra dietética soluble e insoluble (López, 2007).

Filtración

En la filtración que es una operación unitaria, se establece una diferencia de presión que hace que el fluido fluya a través de poros pequeños que impiden el paso de las partículas sólidas mayores al tamaño de poro, las que a su vez, se acumulan sobre el material filtrante como torta porosa. El producto de interés puede ser el filtrado



sin sólidos o la torta sólida, en algunos casos, se requiere una eliminación completa de las partículas sólidas y en otros basta con una eliminación parcial.

La alimentación o suspensión de entrada puede contener una gran carga de partículas sólidas o una proporción baja, cuando la concentración es mínima, los filtros operan por tiempos muy largos, antes de que sea necesario limpiar el medio filtrante. Debido a la gran diversidad de problemas de filtración, se ha desarrollado un enorme número de equipos de filtración.

El equipo industrial de filtración difiere del de escala laboratorio únicamente en lo que respecta a la cantidad de materia que se maneja y en la necesidad de operar a costos bajos. El flujo del líquido a través de la tela o papel filtro se produce debido al vacío en el extremo de salida. La suspensión consta del líquido y las partículas suspendidas. Las pequeñas aberturas de los poros de la tela bloquean el paso de las partículas. Se usa un soporte con orificios bastante grandes, sobre el cual se apoya la tela filtrante. Las partículas sólidas se acumulan en forma de una torta de filtrado a medida que se verifica el proceso. Esa torta también actúa como filtro de las partículas suspendidas. La resistencia al flujo aumenta a medida que la torta crece.

Valor agregado a la fibra extraída del nopal

En la actualidad los plantíos de nopal en México han ido en incremento ya que el nopal crece en zonas áridas y semiáridas en las que la mayoría de las frutas y verduras no se pueden cultivar.

Por lo cual en México es un cultivo de gran interés para el consumo humano; sin embargo, si este no es cosechado en la etapa de madurez ideal que va de 1 a 2 meses (nopalitos), este se convierte en alimento para ganado o inclusive se considera como un desecho, los desechos producidos en México son aproximadamente 4 a 8 ton ha⁻¹ año⁻¹.

Los residuos contienen un porcentaje de fibra importante que van de los 10 g a 50 g por kilogramo de nopal dependiendo de la madurez de la penca, la fibra cuenta con las propiedades de facilitar los procesos gastrointestinales, que en la actualidad están siendo un problema muy común en la población; por lo cual el interés en el desarrollo de un proceso de recuperación de la fibra del nopal.



Nopal

Nopales (*Opuntia ssp.*)

Los nopales son originarios de América tropical y subtropical. Hoy en día se encuentran en una gran variedad de condiciones agroclimáticas, en forma silvestre o cultivada, en todo el continente americano desde Canadá a Chile, en países como Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Estados Unidos, México, entre otros. Además, se han difundido a África, Asia, Europa y Oceanía donde también se cultivan o se encuentran en forma silvestre.

Las plantas del género *Opuntia* son nativas de varios ambientes, desde zonas áridas al nivel del mar hasta territorios de gran altura. Uno de sus mayores atractivos es su anatomía y morfología adaptada a condiciones de fuerte estrés ambiental, por lo que son una alternativa de cultivo para regiones donde difícilmente crecen otras especies.

Especies

Se conocen casi 300 especies del género *Opuntia*. Sin embargo, hay solo 10 o 12 especies que son utilizadas por el hombre, ya sea para producción de fruta y nopalitos para alimentación humana, forraje o cochinilla para obtención de colorante. Entre ellas se encuentran especies como: *Opuntia ficus-indica*, *O. amyclaea*, *O. xocconostle*, *O. megacantha*, *O. streptacantha*, *O. hyptiacantha*, *O. leucotricha*, *O. robusta*, entre otras; siendo la más cultivada en el mundo la especie *Opuntia ficus-indica*.

Las características de las especies son variables, diferenciándose en la forma de los cladodios, presencia o ausencia de espinas, tamaño y color de los frutos.

Independiente de la clasificación taxonómica del nopal, el nopal se puede clasificar como nopal a la planta completa, nopalito al cladodio tierno y la penca al cladodio adulto.

Los brotes tiernos (nopalitos) del *Opuntia ficus-indica* se utilizan, principalmente en México como producto alimenticio.

Descripción del nopal

Los nopales son plantas arbustivas, rastreras o erectas que pueden alcanzar una altura máxima de 3.5 m a 5 m aproximadamente. El sistema radical es muy extenso, densamente ramificado, rica en raíces finas absorbentes y superficiales en zonas áridas de escasa pluviometría. La longitud de las raíces está en relación con las



condiciones hídricas y con el manejo que reciba la planta, especialmente el riego y la fertilización (Sudzuki, 1999).

Los tallos suculentos y articulados o cladodios, comúnmente llamados pencas, presentan forma de raqueta ovoide o alongada alcanzando hasta 60-70 cm de longitud, dependiendo del agua y de los nutrientes disponibles (Sudzuki et al., 1993).

El aumento del área del cladodio dura alrededor de 90 días. Sobre ambas caras del cladodio se presentan las yemas, llamadas areolas, que tienen la capacidad de desarrollar nuevos cladodios, flores y raíces aéreas según las condiciones ambientales (Sudzuki y col., 1993).

Producción

En 2015 en México se reportó una superficie sembrada de 84,923.56 hectáreas que incluye sembradíos de tuna-nopalitos, con una producción de 1,414,872.40 toneladas lo que significó un valor económico de 3, 573,941.59 miles de millones de pesos (SIAP, 2015). La producción y el manejo de los cultivos de nopal generan alrededor de 4 a 8 ton/año de desechos orgánicos, que se acumulan en el suelo sin ningún tratamiento, lo que genera gases de efecto invernadero (García y Nobel, 1992).

Composición química

Rodríguez-Félix y Cantwell (1998), indican que la composición química de los nopalitos frescos es:

Tabla 1. Composición Química de nopal verdura

Componente	Porcentaje
Agua	91
Proteínas	1.5
Lípidos	0.2
Carbohidratos totales	4.5
Cenizas	1.3
Fibra	1.1

La fibra cruda aumenta con la edad del cladodio, llegando a 16.1 % en los tallos suberificados, pero siendo cercana al 8 % en promedio en los renuevos. La tabla 2 muestra la caracterización de los cladodios de distintas edades. Composición química de cladodios de distintas edades (porcentaje materia seca)



Tabla 2. Caracterización de los cladodios a diferentes edades en porcentaje y en base seca

Edad (años)	Descripción	Proteína	Grasa	Cenizas	Fibra cruda	Extracto no nitrogenado
0.5	Renuevos o nopalitos	9.4	1.00	21.0	8.0	60.6
1	Penca	5.4	1.29	18.2	12.0	63.1
2	Penca	4.2	1.40	13.2	14.5	66.7
3	Penca	3.7	1.33	14.2	17.0	63.7
4	Tallos Suberificados	2.5	1.67	14.4	17.0	63.9

Fibra

Los cladodios forman parte de los alimentos que se conocen como alimentos funcionales, ya que se encuentran constituidos de forma heterogénea por componentes como lignina, oligosacáridos, celulosa, hemicelulosa, entre otros. (Spiller, 1992; Periago y col.,1993).

Clasificación y propiedades de la fibra dietética

La fibra dietética puede clasificarse de acuerdo a su solubilidad en agua como solubles e insolubles. Sus propiedades y efectos fisiológicos están determinados principalmente por las proporciones que guardan estas dos fracciones, sin importar su origen (Sánchez, 2005).

La fibra soluble (FS) forma una dispersión en agua; la cual conlleva a la formación de geles viscosos en el tracto gastrointestinal, que tienen la propiedad de retardar la evacuación gástrica, puede ser saludable en algunos casos, haciendo más eficiente la digestión y absorción de alimentos y generando mayor saciedad. Este tipo de fibra es altamente fermentable y se asocia con el metabolismo de carbohidratos y lípidos (Llave, 2004). La fibra soluble contiene mayoritariamente, polisacáridos no-celulosicos tales como la pectina, gomas, algunas hemicelulosas (Arabinoxilanos y Arabinogalactanos) y mucilagos (Córdoba, 2005). Esta fibra se encuentra en altas concentraciones en frutas y algas marinas (Lajolo, 2001).

La fibra insoluble (FI) aumenta el volumen de las heces hasta 20 veces su peso, debido a su capacidad de retención de agua, y se relaciona con la protección y alivio de algunos transtornos digestivos como estreñimiento y constipación (Zambrano, 1998). Esta fibra no se dispersa en agua, está compuesta de celulosa, hemicelulosa (Arabinoxilanos y Arabinogalactanos) y ligninas (Priego, 2007). Las fuentes de este



tipo de fibra se pueden encontrar mayoritariamente en verduras, cereales, leguminosas y en frutas (Zúgüña, 2005).

Celulosa. Está compuesta de restos de β -glucopiranososa y es el componente principal de las paredes de las células vegetales, donde se encuentran asociada a la hemicelulosa, pectina y lignina (Córdoba, 2005).

Hemicelulosa. Es ampliamente distribuida en las plantas, incluye las sustancias que rellenan los espacios existentes entre las fibrillas de celulosa en las paredes celulares vegetales por lo que actúan como material de soporte para mantener las células juntas. La hemicelulosa está constituida por pentosas y hexosas distribuidas de forma ramificada y lineal conformando polímeros tipo polisacáridos denominados no-celulíticos. La hemicelulosa tiene un peso molecular menor que la celulosa y contiene como azúcares constitutivos a la xilosa, arabinosa, galactosa, manosa, glucosa, ácido glucurónico y ácido galacturínico (Córdoba, 2005). Normalmente es insoluble pero en condiciones especiales puede ser parcialmente soluble.

Pectina. Tiene amplio uso industrial, conocido por su capacidad de ligar agua, es utilizada en la industria de alimentos como agente gelificante, espesante y agente que ayuda a mantener ciertas suspensiones.

Gomas. Las gomas tienen la propiedad básica de espesar o aumentar la viscosidad, también puede actuar como agente gelificante. Se utiliza en forma extensiva en productos con bajos niveles de partículas, para emulsionar grasa, inhibir la cristalización del hielo, inhibir la sinéresis, imitar o simular las propiedades de la grasa,

Mucilagos. Son polisacáridos hidrosolubles presentes en muchas semillas, capaces de absorber 60-100 veces su peso en agua formando geles. Están formados por cadenas de arabinoxilanos muy ramificados (Molina y Paz, 2007).

Lignina. Fennema (2000) describe a la lignina como la más hidrófoba de los componentes de la fibra y que este no es un hidrato de carbono, está compuesto por unidades de fenilpropano que forma una matriz a base de la condensación de tres alcoholes fenólicos primarios. La lignificación de las paredes celulares en especial del xilema y el esclerequima imparte rigidez y dureza a estos tejidos. Por lo tanto, cuando un vegetal se encuentra maduro, esta se hace más rica en lignina y pierde progresivamente la capacidad de retener agua.



Efectos fisiológicos de la fibra

Al ingresar en el sistema digestivo humano la fibra dietética llega intacta al intestino, lugar donde las enzimas producidas por la flora bacteriana realizan una fermentación parcial de dicha fibra, obteniendo como productos gases como el hidrogeno, metano y dióxido de carbono, así como ácidos grasos de cadena corta como el acetato, propionato y butirato; siendo este último el de mayor interés fisiológico por la actividad que presenta al intervenir en procesos de la estabilización de los niveles de azúcar, supresión de la síntesis del colesterol y el incremento en la flora bacteriana colónica.

En la tabla 3 se muestra diferentes acciones que tienen los componentes de la fibra dietética.

Tabla 3. Acciones de los componentes de la fibra dietética

Componente	Acción
Celulosa	- Capacidad de retención de agua - Reducción de la presión colónica - Reducción del tiempo de tránsito intestinal.
Hemicelulosa	- Capacidad de retención de agua - Incremento de la masa fecal - Reducción de la presión colónica - Reducción del tiempo de tránsito intestinal - Posibilidad de retener ácidos biliares.
Pectinas, gomas y mucilagos	- Retiene ácidos biliares - Reduce la evacuación gástrica - Incrementa la fermentación colónica
Lignina	- Capacidad de retención de agua, ligado de minerales - Aumento de excreción - Posibilidad de incrementar la defecación.

Efectos adversos de la fibra

Se han descrito algunos casos de obstrucción intestinal y de formación de fitobezoares con la ingestión de dosis altas de fibra no fermentable, especialmente cuando existe un escaso aporte hídrico (Escudero Álvarez, E., & González Sánchez, P.2006).



Tamaño de fibra

Fuentes (1998) señala que el tamaño ideal de partículas de fibra para el consumo humano se ubica en un rango de 50 a 500 μm ; tamaños mayores pueden afectar la apariencia del producto e impartir una sensación fibrosa dificultando la masticación y deglución, tamaños menores pueden presentar problemas en la hidratación al favorecerse la formación de grumos, ocasionar apelmazamiento y por lo tanto compresión del producto.

Ingesta de fibra dietética

En la actualidad no existe una recomendación específica del consumo de fibra dietética, para los adultos se sugiere un aporte entre 20- 35g/día o bien aproximadamente de 10-14 g de fibra dietética por cada 1.000 kcal.

En los niños mayores de dos años y hasta los dieciocho, se recomienda el consumo de la cantidad que resulte de sumar 5 g/día a su edad (ejemplo: un niño de cuatro años debería ingerir aproximadamente 9 g de fibra al día). De esta manera, a partir de los 18 años alcanzaría el consumo adecuado de un adulto (Escudero Álvarez, E., & González Sánchez, P. 2006).

Métodos para la recuperación de la fibra

Centrifugación

La centrifugación es un método de separación para retirar partículas sólidas o líquidas por medio de fuerzas centrifugas y es utilizado cuando las partículas, por su similitud de densidades, no pueden ser separadas por sedimentación o requieren de tiempos muy prolongados. Se diferencia de la sedimentación en que en ésta solo actúa la fuerza de la gravedad, por lo que la centrifugación alcanza una mayor efectividad y un menor tiempo de operación, aunque los costos energéticos son mayores.

Los separadores centrífugos se basan en el principio común de que la rotación de un objeto en torno a un eje o punto central, a una distancia radial constante desde dicho punto, produce una fuerza que actúa sobre dicho objeto. El objeto que gira en torno al eje cambia de dirección constantemente, con lo cual se produce una aceleración aun cuando la velocidad rotacional sea constante. Si un objeto que se hace girar es un recipiente cilíndrico, el contenido de fluidos y sólidos desarrolla una fuerza igual y opuesta, llamada fuerza centrífuga, hacia las paredes del recipiente. Esta fuerza causa la sedimentación de las partículas a través de la capa de líquido



que las rodea. La fuerza centrífuga es tan grande que la fuerza de gravedad es despreciable y que permite que los sólidos se acumulen en forma vertical (Geankoplis, C. J. 1998).

Filtración

El problema general de la separación de partículas sólidas de líquidos se puede resolver usando gran diversidad de métodos, dependientes del tipo de sólido, de la proporción de sólido a líquido en la mezcla, de la viscosidad de la solución y de otros factores.

La filtración es un método físico-mecánico para la separación de mezclas de sustancias compuestas de diferentes fases. Un medio filtrante poroso es atravesado por un líquido o un gas y las partículas sólidas o gotículas de un líquido quedan retenidas en la superficie o en el interior del medio filtrante.

En el proceso de filtración existen tres componentes principales que son: medio filtrante o membrana, filtrado y torta.

Todo equipo de filtración, independientemente de su diseño, debe de suministrar un soporte para el medio filtrante, un espacio para la acumulación de sólidos, canales para alimentar el pre-filtrado y para retirar el filtrado así como un medio para inducir el flujo del filtrado a través del filtro.

A medida que avanza el proceso de filtración aumenta el espesor de la torta por lo que la resistencia al paso del fluido es cada vez mayor, pudiéndose llevar a cabo la operación de las siguientes formas:

- Filtración a presión constante: el caudal disminuye con el tiempo.
- Filtración a caudal constante: la presión aumenta al avanzar la filtración.

Los volúmenes de las suspensiones a tratar varían desde grandes cantidades que aparecen en la depuración del agua y en el tratamiento de minerales en la industria minera, hasta cantidades relativamente pequeñas de la industria química, en la que la variedad de sólidos será considerable. En la mayor parte de casos en la industria química lo que interesa son los sólidos, siendo sus propiedades físicas y tamaño de gran importancia.

Los filtros también son muy variados: la elección del más adecuado así como de las condiciones óptimas de operación, son función de diversos factores entre los que cabe destacar los siguientes:

- Las propiedades del fluido, especialmente viscosidad, densidad y propiedades corrosivas.



- La naturaleza del sólido: tamaño y forma de las partículas, distribución de tamaños y características del relleno.
- La concentración de los sólidos en la suspensión a filtrar.
- La cantidad de material a tratar y su valor.
- Temperatura del medio a filtrar.
- Si el producto que interesa es el sólido, el fluido o ambos.
- Caudal de suspensión a tratar.
- Necesidad de lavado del sólido filtrado.
- Método de filtración y precisión requerida.

Las exigencias para el filtro son tan diferentes como lo son cada uno de los campos de aplicación. Se tiene que tener en cuenta las características químicas y físicas de la muestra a filtrar, así como el consiguiente análisis o manipulación del precipitado o del filtrado.

Cuando existe una caída de presión a través del filtro, la máxima velocidad de filtración se produce al inicio del proceso, debido a que la resistencia a la filtración es mínima, ya que no existen todavía sólidos depositados. La orientación inicial de las partículas en la torta es muy importante y puede influir significativamente en la estructura y permeabilidad de todo el lecho del filtro. Una caída de presión excesiva y elevadas velocidades iniciales de filtración puede producir un taponamiento de la tela o medio filtrante y una elevada resistencia a la filtración posterior (Doran, 1998).

Los factores más importantes de los que depende la velocidad de filtración son por lo tanto:

- La caída de presión desde la alimentación hasta el lado más lejano del medio filtrante.
- El área de la superficie filtrante
- La viscosidad del filtrado
- La resistencia de la torta filtrante
- La resistencia del medio filtrante y de las capas iniciales de torta.

La función del medio filtrante es, generalmente, la de actuar como soporte para la torta filtrante mientras las capas iniciales de la misma proporcionan el verdadero filtro. El medio filtrante debe ser mecánicamente fuerte, resistente a la acción corrosiva del fluido y debe ofrecer tan poca resistencia como sea posible al flujo de filtrado. Normalmente se utilizan tejidos, aunque para la filtración de líquidos corrosivos en unidades discontinuas los materiales granulares y sólidos porosos resultan útiles. Una característica importante en la selección de un tejido es la



facilidad en la separación de la torta, factor clave en el funcionamiento de las unidades automáticas existentes en la industria.

Existen dos finalidades en la filtración que son: filtración de separación y filtración clarificante. En el caso de la filtración de separación, se trata de recuperar un determinado sólidos de un líquido (torta de filtrado) para seguir trabajando con el sólido. Aquí no es imprescindible que todas las partículas sean eliminadas del líquido. En caso contrario, en la filtración clarificante, el líquido se debe limpiar si es posible completamente de componentes indeseados o precipitados, para poder seguir trabajando con el líquido purificado.

Existen casos en que los sólidos a filtrar son muy finos y forman una torta densa e impermeable, obstruyendo rápidamente cualquier medio filtrante que sea suficientemente fino para retenerlos. La filtración práctica de estos materiales exige que la porosidad de la torta aumente de forma que permita el paso del líquido con una velocidad razonable. Esto se realiza añadiendo un coadyuvante de filtración, tal como tierra de diatomeas, perlitas, celulosa de madera purificada u otros materiales porosos inertes a la suspensión antes de la filtración. El coadyuvante de filtración puede separarse después de la torta de filtración disolviendo los sólidos o quemando el coadyuvante. Si la torta no tiene valor, se desecha junto con el coadyuvante.

Otra forma de emplear el coadyuvante de filtración es mediante pretratamiento, es decir, depositando una capa del mismo sobre el medio filtrante antes de comenzar la operación. En los filtros discontinuos la capa del material es generalmente delgada, mientras que en un filtro continuo, dicha capa es gruesa y la parte superior de la misma se retira de forma continua con una chuchilla rascadora para exponer una superficie de filtración fresca.

La filtración tiene varias aplicaciones: desde el procedimiento analítico de laboratorio hasta aplicaciones técnicas en grandes líneas de producción. En prácticamente todas las ramas industriales se filtra ya sea en el análisis de alimentos, el ensayo de morteros, el análisis de humos o el control microbiológico, en el análisis para el control de plaguicidas o fertilizantes mediante cromatografías ya sea de gases o líquida.

Tortas filtrantes compresibles

La mayoría de las tortas filtrantes son compresibles en cierto grado, pero en muchos casos ese grado de compresibilidad es tan pequeño que la torta puede considerarse, a efectos prácticos, incompresible. Si la resistencia específica de la torta es función de la diferencia de presión a través de la torta, esta será compresible. Esta compresibilidad puede ser un proceso reversible o irreversible; la mayoría de las tortas filtrantes no son elásticas y la mayor resistencia ofrecida al



flujo cuando la diferencia de presión es elevada, se debe al empaquetamiento más compacto de las partículas que forman la torta. La resistencia específica de la torta, por lo tanto, corresponde a la resistencia que experimenta la misma cuando la diferencia de presiones a la que se somete es la más elevada, incluso aunque esta diferencia máxima de presión solo se mantenga un corto periodo de tiempo.

Actualmente existen muchos tipos de filtros como: filtros de papel, filtros de torta, filtros prensa, filtros espesadores de presión, filtros rotatorios, filtro de caja, filtro de nutcha, filtración por gravedad, filtración con membranas, filtración centrifuga.



Objetivos e hipótesis

Hipótesis

La correlación de las variables tiempo de molienda y presión de vacío en la filtración permitirá establecer las mejores condiciones de operación en función de los costos de las mismas.

Objetivo general

Encontrar las condiciones de separación de fibra húmeda de nopal, así como las condiciones que den los menores tamaños de fibra, a través de los procesos de molienda y filtración a vacío, teniendo como principales variables: tiempo de molienda y Presión de Vacío.

Objetivos específicos

- Establecer el tiempo de molienda que se someterá el nopal para reducir problemas en la filtración y recuperación de la fibra, con respecto al mucilago y otros compuestos.
- Determinar el tamaño de la fibra en función del tiempo de molienda.
- Fijar las características que debe tener la malla filtrante como lo es la apertura y el número de malla para poder mejorar las condiciones del proceso de filtración.
- Determinar la presión de vacío a la cual el proceso de filtración obtiene mejores resultados con respecto al tiempo de filtración así como la cantidad de fibra húmeda recuperada.



Metodología

La ilustración 1, muestra la secuencia de pasos que se realizaron en el presente trabajo, siendo detallados cada uno de ellos posteriormente.

Diagrama de flujo

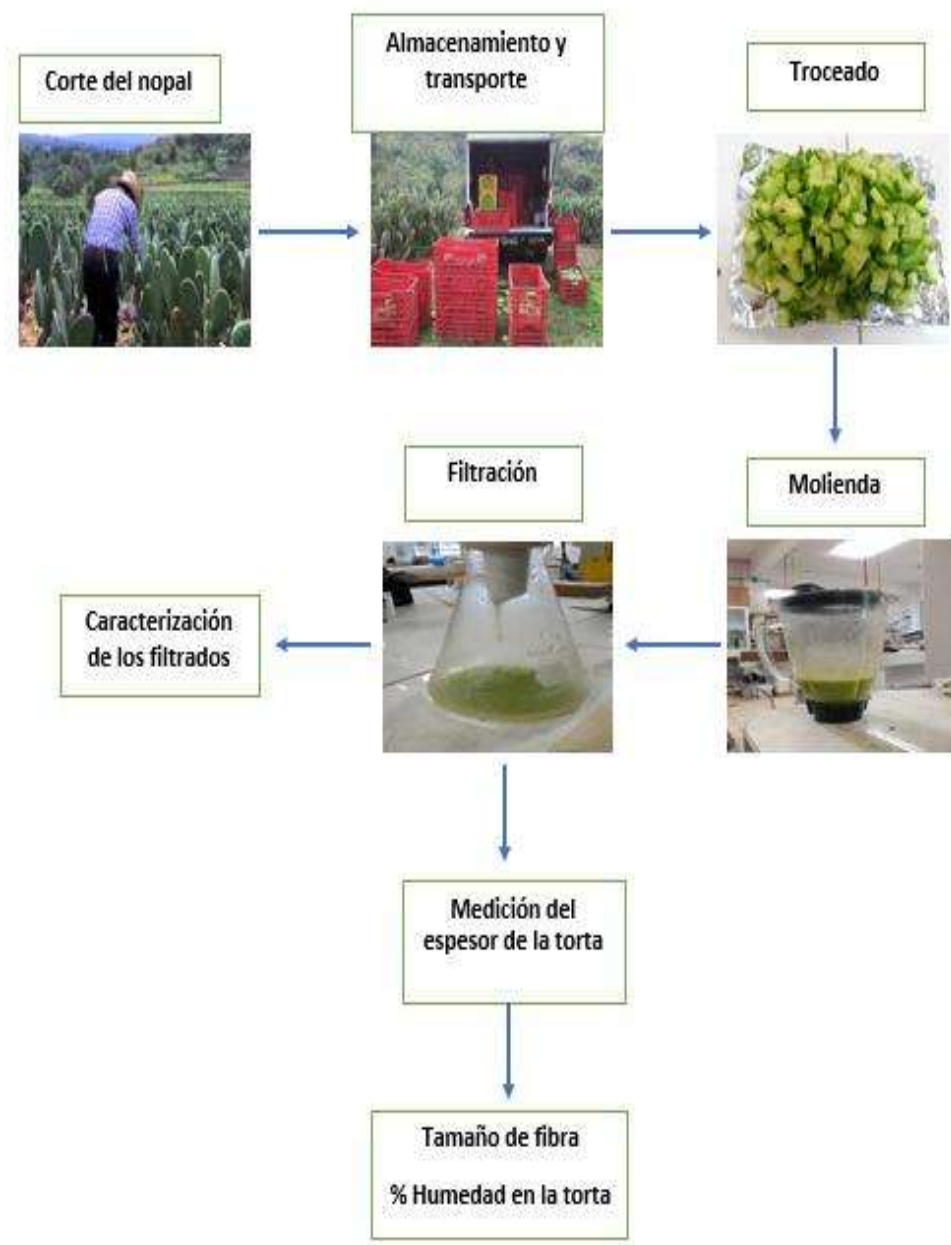


Ilustración 1. Diagrama de flujo de la metodología



Recolección de la penca de nopal

La recolección de la penca de nopal se realizó en un cultivo que se encuentra en el municipio de Tacámbaro, Michoacán, México. Las pencas utilizadas en las diferentes pruebas tenían una madurez de aproximadamente 1 año (Ilustración 1). Para la recolección de las pencas de nopal se utilizaron guantes y utensilios de corte. Posteriormente fueron almacenadas y transportadas en contenedores de plástico.



Ilustración 2. Penca de nopal con una maduración de 1 año

Proceso de molienda

Para el proceso de molienda se utilizaron 250 g de la penca de nopal, que fueron pesados en la balanza analítica (marca OHAUS, modelo SPX621 con un rango de 0.1 g-620 g), posteriormente a los 250 g de nopal se les realizó el proceso de troceado en pequeños cubos de aproximadamente 1 cm³ (Ilustración 3).



Ilustración 3. Troceado y pesaje del nopal

Una vez que se realizó el troceado de los 250 g de nopal, se introdujeron en una licuadora (marca Oster, modelo BEST02-E01) e inició el proceso de molienda (Ilustración 4), a 4 diferentes tiempos (3 minutos, 6 minutos, 10 minutos y 15 minutos), esto con la finalidad de determinar el tamaño de fibra en función del tiempo de molienda. Así mismo se realizó el pesaje del concentrado con la finalidad de saber la cantidad de nopal perdido en el proceso.



Ilustración 4. Licuadora convencional para llevar a cabo la molienda



Selección del tipo de material filtrante

Para determinar las características que debe tener la malla filtrante se instaló el sistema de filtración a vacío (Ilustración 5,6 y 7) el cual consistió de: una bomba de vacío de la marca SIEMENS tipo 1RF3 052-4YC31, un matraz kitasato marca KIMAX de 500 ml, un embudo Büchner, una manguera de látex. Los materiales filtrantes que se evaluaron fueron; malla de acero inoxidable con número 30 y 50 de acuerdo al código TYLER y papel filtro con apertura de 2.5 μm .



Ilustración 5. Sistema a nivel laboratorio para el proceso de filtración a vacío



Ilustración 6. Conexión del embudo y del matraz a través de un tapón de caucho



Ilustración 7. Malla de acero inoxidable #50



Proceso de filtración

Una vez concluido el montaje del sistema se calibró la bomba de vacío a la presión que se realizó cada prueba. Las presiones que se evaluaron fueron 20 cm Hg, 15 cm Hg y 10 cm Hg. Posteriormente el concentrado obtenido en el proceso de molienda fue vertido al embudo Büchner con la malla de acero inoxidable, tomando los diferentes tiempos en que los filtrados alcanzan un volumen de 20 ml, 40 ml, 60 ml, 80 ml, 100 ml, 120 ml, 140 ml y 160 ml en el matraz kitasato, esta prueba se realizó por duplicado.

Tabla 4. Esquema de los tiempos obtenidos en la filtración

Tiempo de molienda			
Volumen (ml)	Tiempo (s) Corrida 1	Tiempo (s) Corrida 2	Tiempo (s) Promedio
0			
20			
40			
60			
80			
100			
120			
140			
160			

Una vez terminado el proceso de filtración a vacío, se procedió a medir el espesor de la torta en el centro, y en dos orillas y se obtuvo un valor promedio. La medición del espesor se realizó mediante una regla de las diferentes corridas (Ilustración 8).



Ilustración 8. Torta húmeda

Tabla 5. Esquema de los espesores de torta a diferentes tiempos de molienda

Presión de vacío	
Tiempo de molienda (min)	Espesor promedio de la torta (cm)
3	
6	
10	
15	

Determinación del tamaño de fibra

Una vez obtenida la torta húmeda del proceso de filtración a vacío a diferentes tiempos de molienda, se realizó un proceso de extracción sólido-líquido utilizando como solvente alcohol etílico, esto con la finalidad de extraer la clorofila de la torta húmeda para poder ser analizada la fibra del nopal con más facilidad (Ilustración 9).

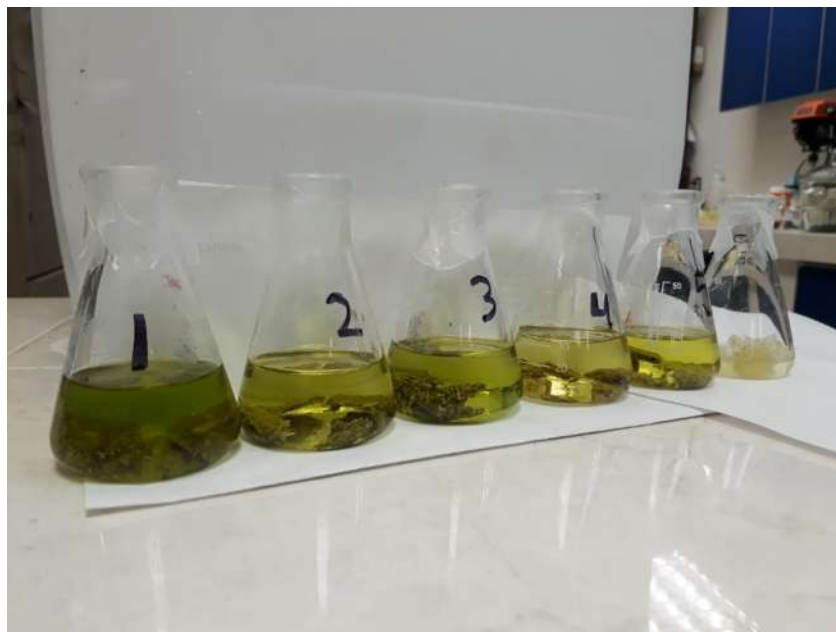


Ilustración 9. Extracción sólido-líquido

Una vez que la fibra se encontraba sin clorofila, se colocó en portaobjetos cubriéndola con un cubreobjetos con la finalidad de identificar la longitud de la fibra (Ilustración 10) por medio de un microscopio (marca LEICA, modelo ICC50 HD) (Ilustración 11).

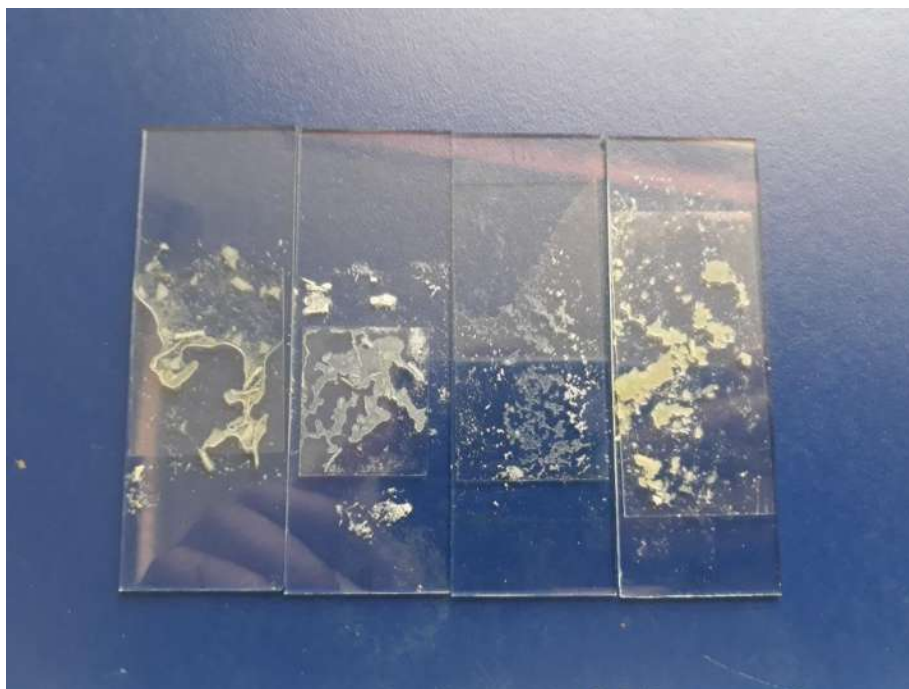


Ilustración 10. Muestra de las fibras a diferentes tiempo de molienda

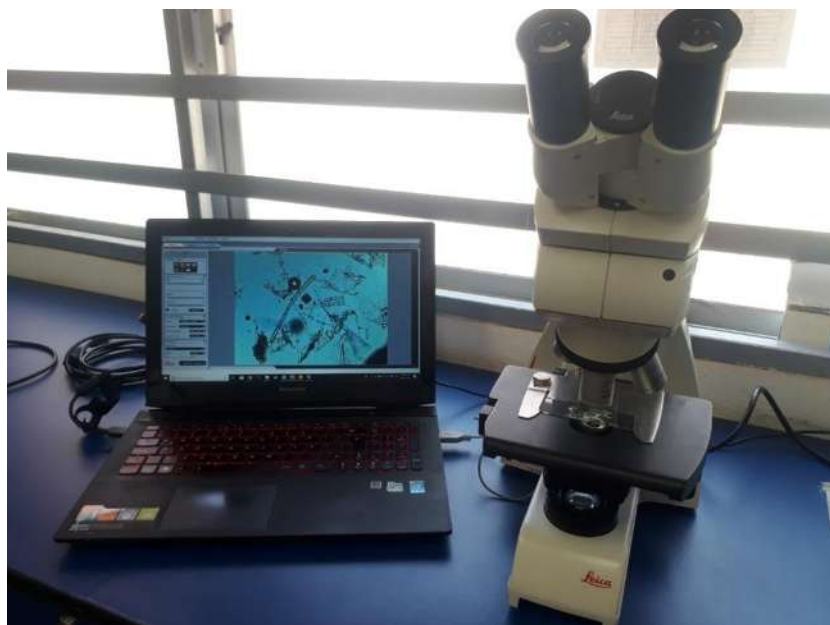


Ilustración 11. Microscopio (marca LEICA, modelo ICC50 HD)

La escala utilizada para la medición de la longitud de la fibra fue 0.5 mm (Ilustración 12)

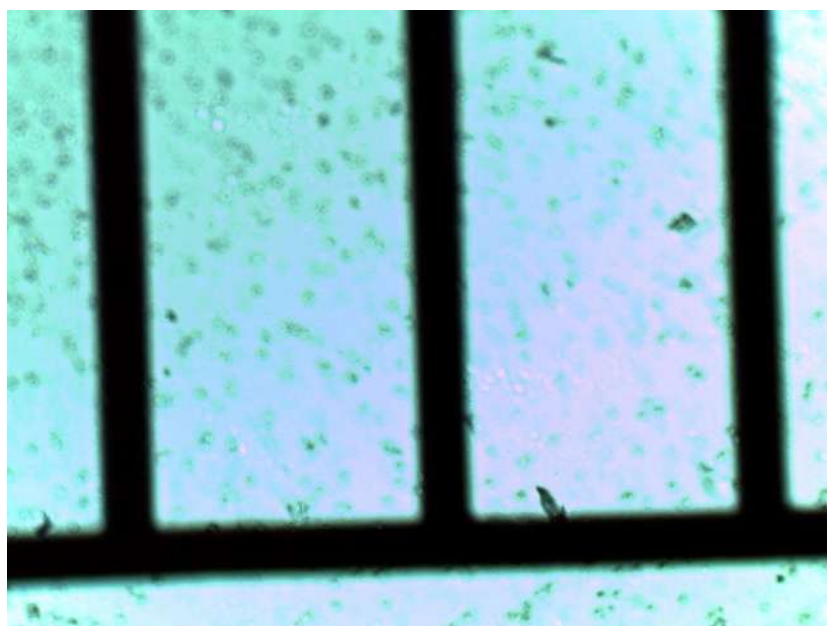


Ilustración 12. Escala 0.5 mm



Tabla 6. Muestras de tamaños de fibras a diferentes tiempos de molienda

Tiempo de molienda (min)	Muestra promedio de tamaño de fibra
3	
6	
10	
15	

Caracterización de los filtrados

Se realizó la caracterización de los filtrados obtenidos en el proceso de filtración a vacío, mediante las pruebas de; sólidos totales (ST), sólidos totales volátiles (STV) y demanda química de oxígeno (DQO).

Tabla 7. Caracterización de los filtrados obtenidos

Tiempo de Molienda	Presión a vacío
Sólidos Totales	
Sólidos Totales Volátiles	
Demanda Química de Oxígeno	

Equipos piloto

Una vez obtenido los datos de las pruebas a los diferentes tiempos de molienda así como las diferentes presiones al vacío, se utilizarán para calcular los costos que tendría cada proceso si se utilizaran equipos piloto, las características de los equipos se muestran en el Anexo C.



Análisis y discusión de resultados

Selección de la malla filtrante

Se realizó la prueba de filtración utilizando las diferentes mallas teniendo como resultado lo siguiente:

- Papel filtro de 2.5 μm . el resultado obtenido con esta malla filtrante el taponamiento del material filtrante por lo que se detiene el proceso de filtración (Ilustración 13).
- Malla de acero inoxidable # 30. El resultado obtenido con esta malla filtrante fue; el paso de fibra con un tamaño menor a 0.6 mm, por lo que se tenía un pérdida considerable de fibra (Ilustración 13).
- Malla de acero inoxidable # 50. El resultado obtenido con esta malla filtrante fue: la recuperación de la fibra sin taponamiento ni pasó de fibra. La apertura de esta malla es 0.355 mm por lo que esta fue la utilizada para las diferentes corridas posteriores.



Ilustración 13. Estancamiento del concentrado con papel filtro y fibra precipitada en los filtrados



Prueba de filtración a vacío a 10 cm de Hg

La tabla 8 e ilustración 14 muestran los resultados obtenidos en la prueba experimental a diferentes tiempos de molienda y a una presión al vacío de 10 cm de Hg.

En la Ilustración 14 se observa que de manera general el tiempo de molienda tiene impacto en la duración del proceso de filtración ya que para el tiempo de molienda de 3, 6, 10 y 15 minutos, la recolección de 160 mL de filtrados se realiza a 487.7, 238.3, 155.7 y 122.9 segundos respectivamente, realizando un comparativo con los resultados obtenidos en el proceso de filtración de vacío a 20 cm de Hg (Tabla 12) existe un incremento de 68%, 44.4%, 148 % y 158.4 % respectivamente. De forma adicional se observa que conforme pasa el tiempo de filtración la recolección de los filtrados se hace más lenta lo que hace que el comportamiento de recolección sea del tipo de crecimiento exponencial.

En el Anexo A se muestran los diferentes tiempo obtenidos en las corridas realizadas y de los cuales se calcularon los promedios.

Tabla 8. Resultados del proceso de filtración al vacío a 10 cm de Hg

Presión de Vacío = 10 cm de Hg				
V filtrados (ml)	Tiempo de Molienda			
	3 min	6 min	10 min	15 min
0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	9.7	7.5	7.5	7.1
40	19.9	13.3	12.7	12.5
60	40.7	22.8	20.4	19.5
80	63.5	31.0	28.3	26.6
100	104.5	54.3	42.8	36.5
120	154.4	95.9	60.9	52.5
140	268.0	182.8	87.9	82.9
160	487.7	238.3	155.7	122.9

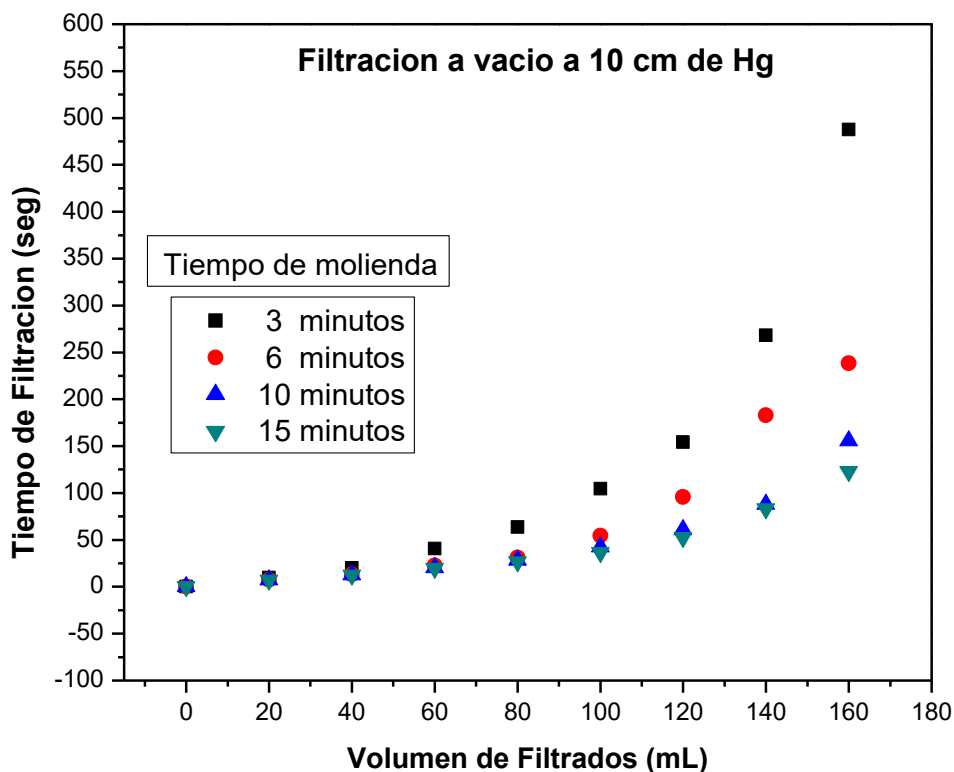


Ilustración 14. Filtración a vacío a 10 cm de Hg

Prueba de humedad a la torta obtenida en el proceso de filtración a vacío a 10 cm de Hg

Una vez terminado el proceso de filtración, se tomaron muestras de la torta obtenida para determinar el % de humedad. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 9 e ilustración 15 donde se observa que conforme se incrementa el tiempo de molienda, el porcentaje de humedad disminuye hasta en un 7.04 % considerando los tiempos de molienda de 3 y 15 minutos. A esta presión de vacío se obtuvieron cantidades mayores de humedad en la torta en comparación de las obtenidas a presiones de vacío de 15 y 20 cm de Hg (Tablas 11 y 13), debido a que la presión no lograr ser suficiente para llevar a cabo la filtración con más eficiencia.

También se observa que el comportamiento entre el tiempo de molienda y el porcentaje de humedad final de la torta es lineal.



Tabla 9. Porcentaje de humedad en la torta a diferentes tiempos de molienda a -10 cm de Hg

Tiempo de Molienda (min)	Porcentaje de humedad en la torta
3	91.26
6	89.5
10	86
15	84.22

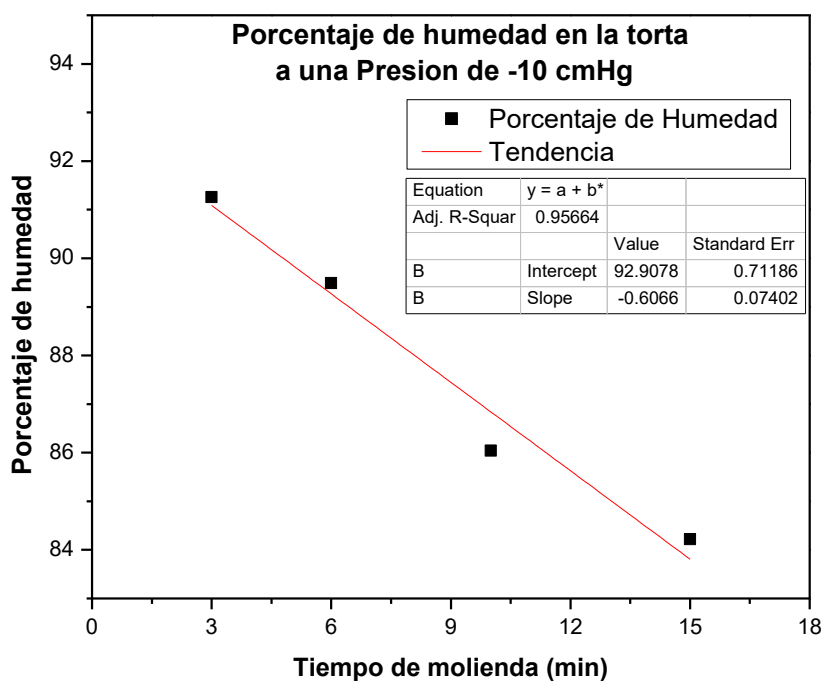


Ilustración 15. Porcentaje de humedad en la torta a una presión de vacío de 10 cm de Hg



Prueba de filtración a vacío a 15 cm de Hg

La tabla 10 e ilustración 16 muestran los resultados obtenidos en la prueba experimental a diferentes tiempos de molienda y a una presión al vacío de 15 cm de Hg.

En la ilustración 16 se observa que de manera general el tiempo de molienda tiene impacto en la duración del proceso de filtración ya que para el tiempo de molienda de 3, 6, 10 y 15 minutos, la recolección de 160 mL de filtrados se realiza a 361.7, 196.3, 133.9 y 111.9 segundos respectivamente, realizando un comparativo con los resultados obtenidos en el proceso de filtración de vacío a 20 cm de Hg (Tabla 12) existe una diferencia de 71.8, 31.3, 71.3 y 64.4 segundos respectivamente. De forma adicional se observa que conforme pasa el tiempo de filtración la recolección de los filtrados se hace más lenta lo que hace que el comportamiento de recolección sea del tipo de crecimiento exponencial.

En el Anexo A se muestran los diferentes tiempo obtenidos en las corridas realizadas y de los cuales se calcularon los promedios.

Tabla 10. Resultados del proceso de filtración al vacío a 15 cm de Hg

Presión de Vacío = 15 cm de Hg				
V filtrados (ml)	Tiempo de Molienda			
	3 min	6 min	10 min	15 min
0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	6.0	6.2	7.3	7.1
40	13.1	10.9	11.9	10.5
60	31.4	19.9	18.2	14.7
80	47.9	29.7	23.6	18.3
100	83.2	49.8	33.8	26.0
120	142.7	85.9	50.9	46.7
140	219.0	130.0	79.7	74.4
160	361.7	196.3	133.9	111.9

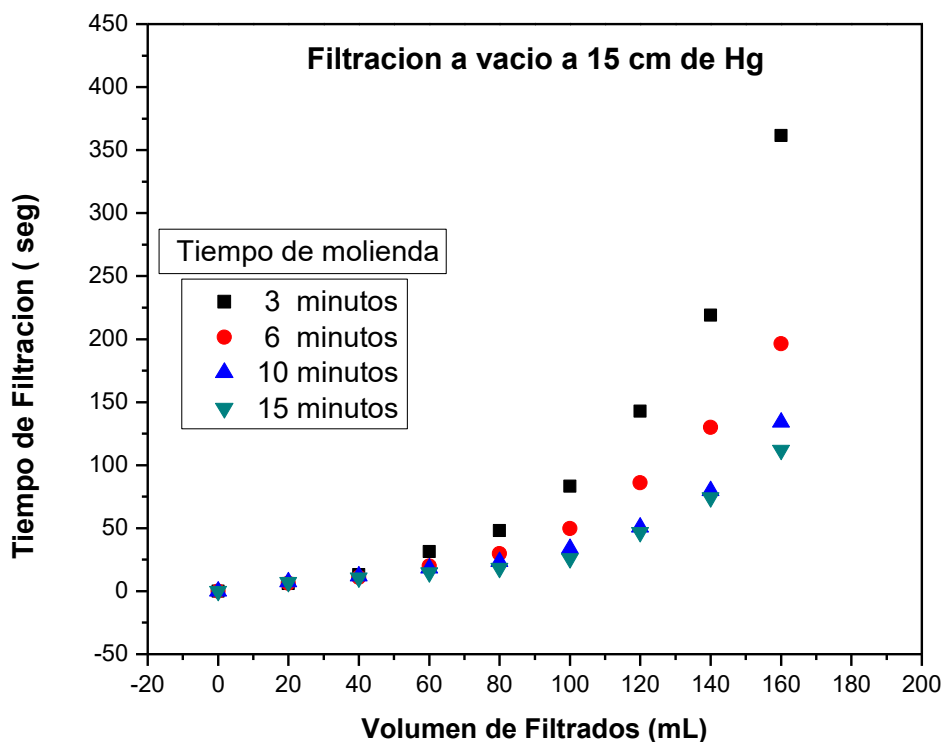


Ilustración 16. Filtración al vacío de 15 cm de Hg

Prueba de humedad a la torta obtenida en el proceso de filtración a vacío a 15 cm de Hg

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 11 e ilustración 17, donde se observa que conforme se incrementa el tiempo de molienda, el porcentaje de humedad disminuye hasta en un 3.95 % considerando los tiempos de molienda de 3 y 15 minutos. También se observa que el comportamiento entre el tiempo de molienda y el porcentaje de humedad final de la torta es un decaimiento exponencial.

Tabla 11. Porcentaje de humedad en la torta a diferentes tiempos de molienda a -15 cm de Hg

Tiempo de Molienda (min)	Porcentaje de humedad en la torta
3	87.46
6	85.1
10	84.3
15	83.51

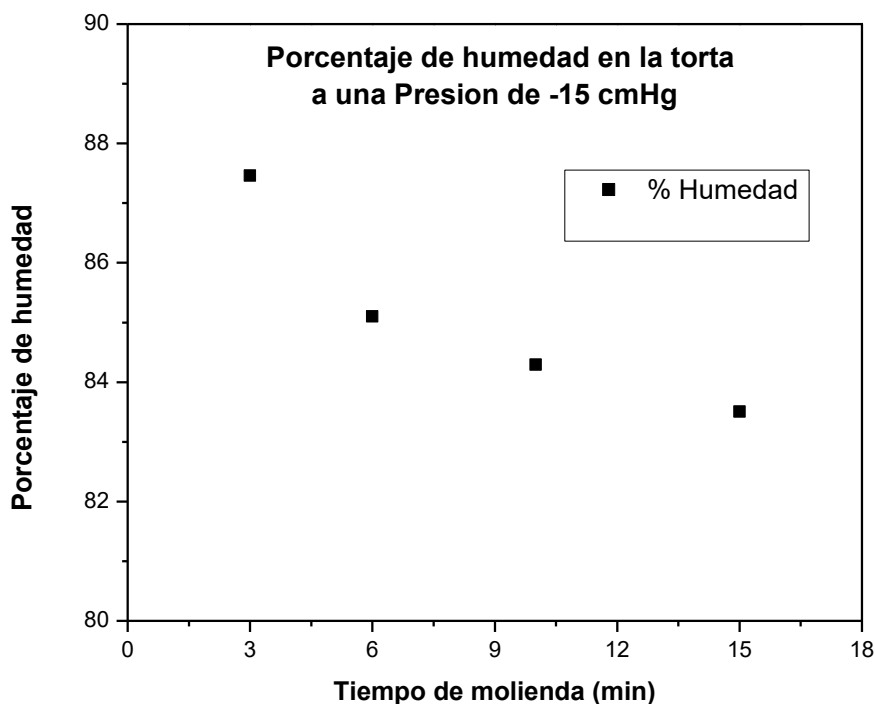


Ilustración 17. Porcentaje de humedad en la torta a una presión de -15 cm de Hg

Prueba de filtración al vacío a 20 cm de Hg

La tabla 12 e ilustración 18 muestran los resultados obtenidos en la prueba experimental a diferentes tiempos de molienda y a una presión al vacío de 20 cm de Hg.

En la ilustración 18 se observa que de manera general el tiempo de molienda tiene impacto en la duración del proceso de filtración ya que para el tiempo de molienda de 3, 6, 10 y 15 minutos, la recolección de 160 mL de filtrados se realiza a 290, 165, 62.6 y 47.6 segundos respectivamente. De forma adicional se observa que conforme pasa el tiempo de filtración la recolección de los filtrados se hace más lenta lo que hace que el comportamiento de recolección sea del tipo de crecimiento exponencial.

En el Anexo A se muestran los diferentes tiempo obtenidos en las corridas realizadas y de los cuales se calcularon los promedios.



Tabla 12. Resultados del proceso de filtración al vacío a 20 cm de Hg

V filtrados (ml)	Presión de Vacío = 20 cm de Hg			
	Tiempo de Molienda			
	3 min	6 min	10 min	15 min
0	0	0	0	0
20	2	4	4.1	4.1
40	3.5	8	7.2	7
60	9.4	17	11.2	10.1
80	20.7	25.2	14.8	14.4
100	46.9	47.3	21	18.4
120	112.7	80	32.9	25.6
140	207	119.3	44	36
160	290	165	62.6	47.6

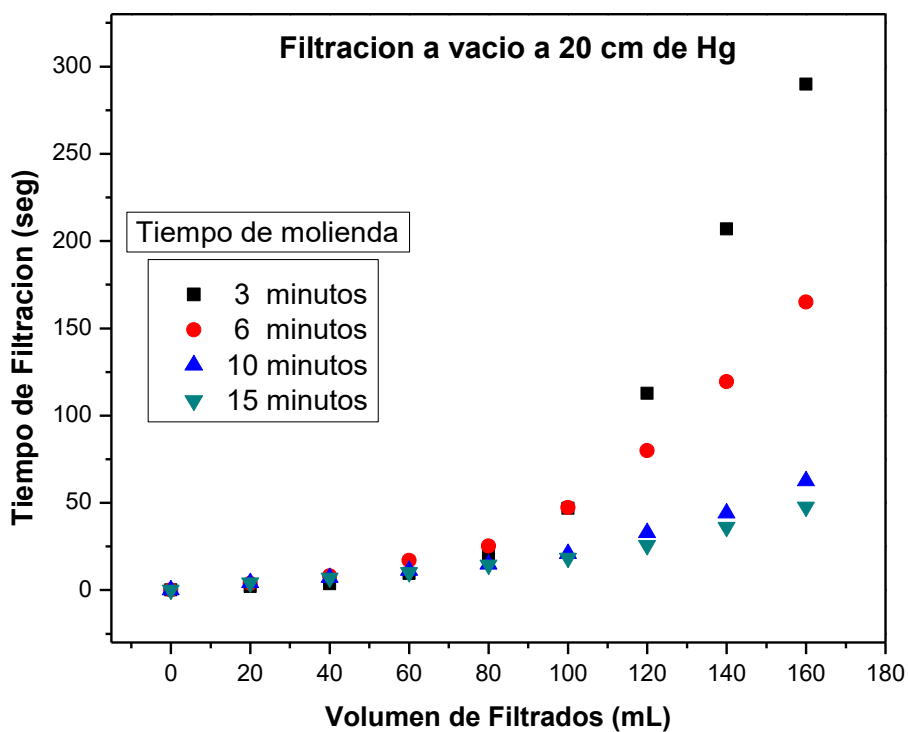


Ilustración 18. Filtración al vacío a 20 cm de Hg



Prueba de humedad a la torta obtenida en el proceso de filtración a vacío a 20 cm de Hg

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 13 e ilustración 19, donde se observa que conforme se incrementa el tiempo de molienda el porcentaje de humedad disminuye hasta en un 4.6 %, considerando los tiempos de molienda de 3 y 15 minutos. También se observa que el comportamiento entre el tiempo de molienda y el porcentaje de humedad final de la torta es lineal.

Tabla 13. Porcentaje de humedad en la torta a diferentes tiempos de molienda a -20 cm de Hg

Tiempo de Molienda (min)	% Humedad en la torta
3	87
6	86
10	83.2
15	82.4

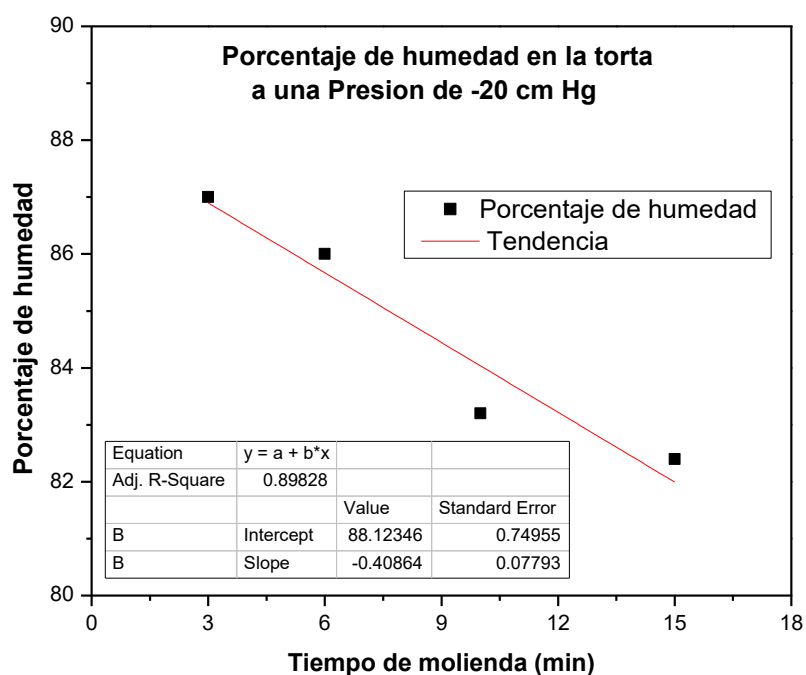


Ilustración 19. Porcentaje de humedad en la torta a una presión de -20 cm de Hg



Espesor de la torta obtenida a diferentes presiones al vacío

En la tabla 14 e ilustración 20 se muestran los valores del espesor de la torta obtenidos en las diferentes pruebas, donde se observa que conforme se incrementa el tiempo de molienda, el espesor de la torta disminuye un 33.3%, 42.3 % y 46.6 % para las presiones de vacío de 20, 15 y 10 cm de Hg respectivamente considerando los tiempos de molienda de 3 y 15 minutos. Las variaciones en el espesor de la torta pueden ser atribuidas entre otras cosas a la cantidad de agua que se queda retenida en los intersticios del sólido. Como se observa en la ilustración 20 el comportamiento entre el espesor de torta y el tiempo de molienda es de tipo decaimiento exponencial;

Tabla 14. Espesores de las tortas obtenidas en todas las pruebas

Tiempo de Molienda (min)	Espesor de torta (cm)		
	Presión a Vacío		
	20 cm de Hg	15 cm de Hg	10 cm de Hg
3	1.2	1.3	1.5
6	1.1	1.2	1.15
10	0.8	0.85	0.9
15	0.8	0.75	0.8

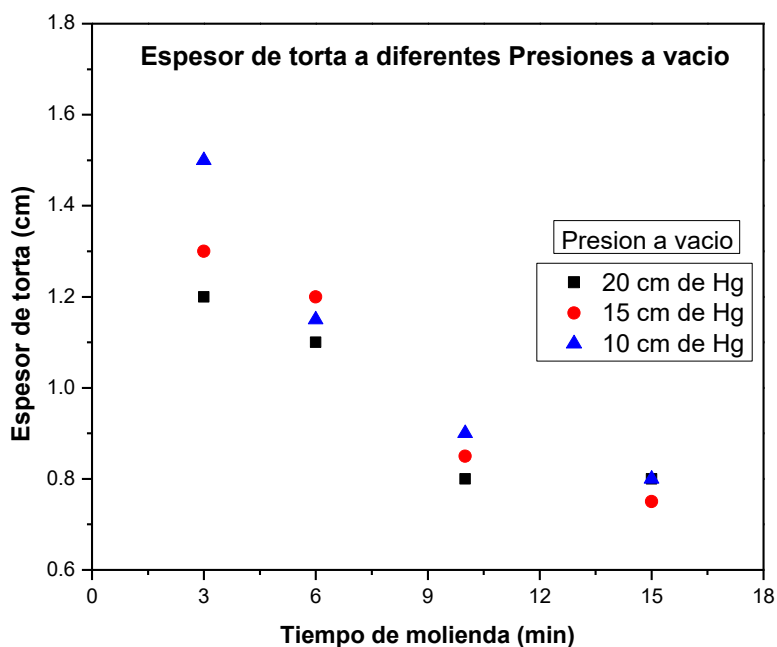


Ilustración 20. Espesor de torta a diferentes presiones al vacío



Tamaño de fibra

En la tabla 15 e ilustración 21 se muestra los tamaños promedio de fibra obtenidos de los diferentes tiempos de molienda. Donde se observa que conforme se incrementa el tiempo de molienda, el tamaño de fibra disminuye en forma decaimiento exponencial.

En el Anexo B se muestran los valores de las mediciones de la fibra a diferentes tiempos de molienda.

Tabla 15. Tamaño de fibra a diferentes tiempos de molienda

Tiempo de Molienda (min)	Tamaño promedio de Fibra (mm)
3	0.66
6	0.53
10	0.41
15	0.37

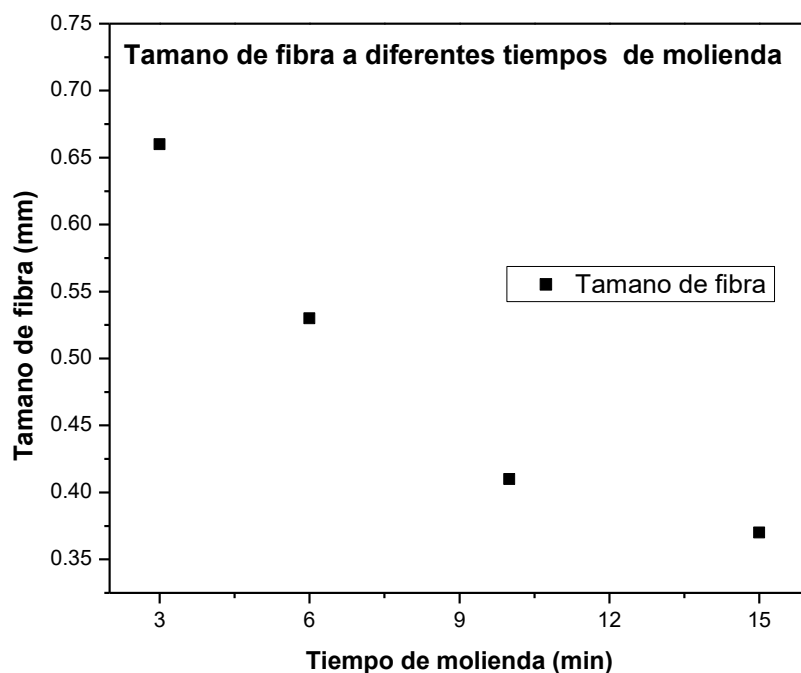


Ilustración 21. Tamaño de fibra a diferentes tiempos de molienda



Imágenes de la fibra de nopal obtenidas a diferentes tiempos



Ilustración 22. Fibra de 1.2 mm de longitud (6 min. de molienda)

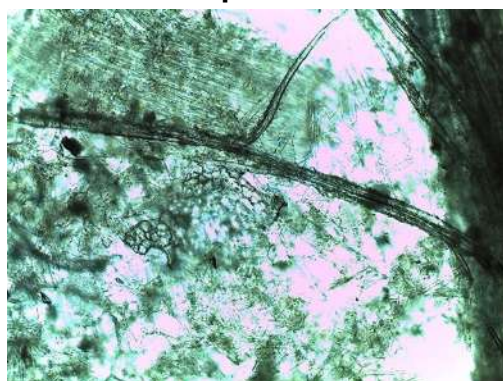


Ilustración 23. Fibra de 1.3 mm de longitud (6 min de molienda)

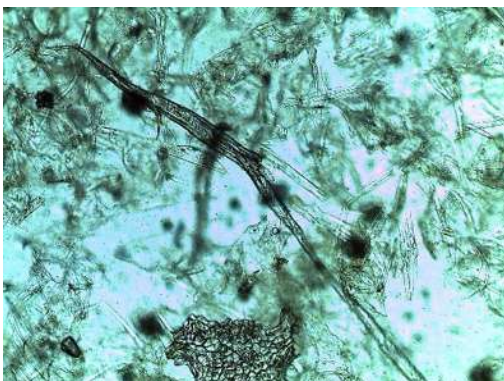


Ilustración 24. Fibra de 1.5 mm de longitud (6 min. de molienda)

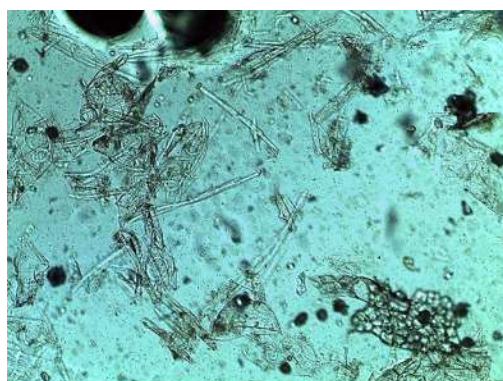


Ilustración 25. Fibra de 0.3-0.4 mm de longitud (6 minutos de molienda)



Ilustración 27. Fibra de 0.25 y 0.6 mm de longitud (6 minutos de molienda)

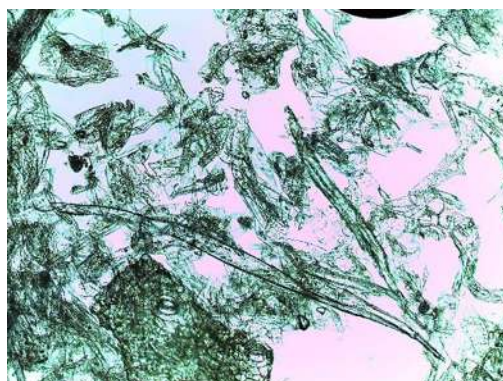


Ilustración 26. Fibra de 0.65 y 1 mm de longitud (10 min. de molienda)



Ilustración 28. Fibra de 1 mm de longitud (10 min. de molienda)



Ilustración 29. Fibra de 1.2 mm de longitud (10 min. de molienda)

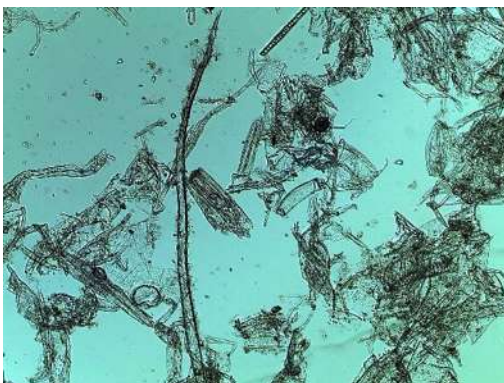


Ilustración 30. Fibra de tamaño 1, 0.2 y 0.4 mm de longitud (10 min. de molienda)



Ilustración 31. Fibra de 0.5 mm de longitud (15 min. de molienda)

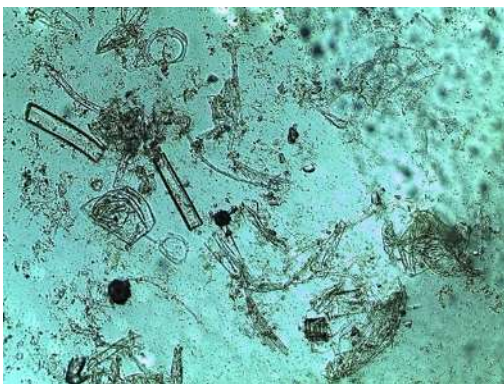


Ilustración 33. Fibras de tamaño 0.2 mm de longitud (15 min. de molienda)



Ilustración 32. Fibra de 0.5 mm de longitud (15 min. de molienda)



Caracterización de los filtrados

Las tablas 16,17 y 18 e ilustraciones 34,35 y 36 muestran la caracterización de los filtrados obtenidos en las diferentes pruebas, donde se observa que conforme aumenta el tiempo de molienda y disminuye la presión de vacío, los valores de Sólidos Totales (ST), Sólidos Totales Volátiles (STV) y Demanda Química de Oxígeno (DQO) tienden a disminuir, ya que para un tiempo de molienda de 6 minutos; los mg/L de ST son 44 625, 40 975 y 39 475 para unas presiones de vacío de 20,15 y 10 cm de Hg respectivamente.

Tabla 16. Caracterización de los filtrados a la presión de vacío de 20 cm de Hg

Caracterización de los Filtrados a la Presión de Vacío a 20 cm de Hg				
Filtrados	Tiempo de Molienda (min)			
	3	6	10	15
Sólidos Totales (ST) mg/L	48,250	44,625	36,600	34062.5
Sólidos Totales Volátiles (STV) mg/L	25,800	24,175	24,987.5	22,450
Demanda Química de Oxígeno mg de O ₂ /L	57,500	56,000	53,500	52,000

Tabla 17. Caracterización de los filtrados a la presión de vacío de 15 cm de Hg

Caracterización de los Filtrados a la Presión de Vacío a 15 cm de Hg				
Filtrados	Tiempo de Molienda (min)			
	3	6	10	15
Sólidos Totales (ST) mg/L	42,125	40,975	39,537.5	38,637.5
Sólidos Totales Volátiles (STV) mg/L	30,975	29,350	28,825	24,162.5
Demanda Química de Oxígeno mg de O ₂ /L	19,000	17,000	16,500	16,000



Tabla 18. Caracterización de los filtrados a la presión de vacío de 10 cm de Hg

Caracterización de los Filtrados a la Presión de Vacío a 10cm de Hg				
Filtrados	Tiempo de Molienda (min)			
	3	6	10	15
Sólidos Totales (ST) mg/L	42,500	39,475	38,100	37,791.25
Sólidos Totales Volátiles (STV) mg/L	33,000	27,925	26,537.5	26,012.5
Demanda Química de Oxígeno mg de O ₂ /L	19,000	14,000	13,000	12,500

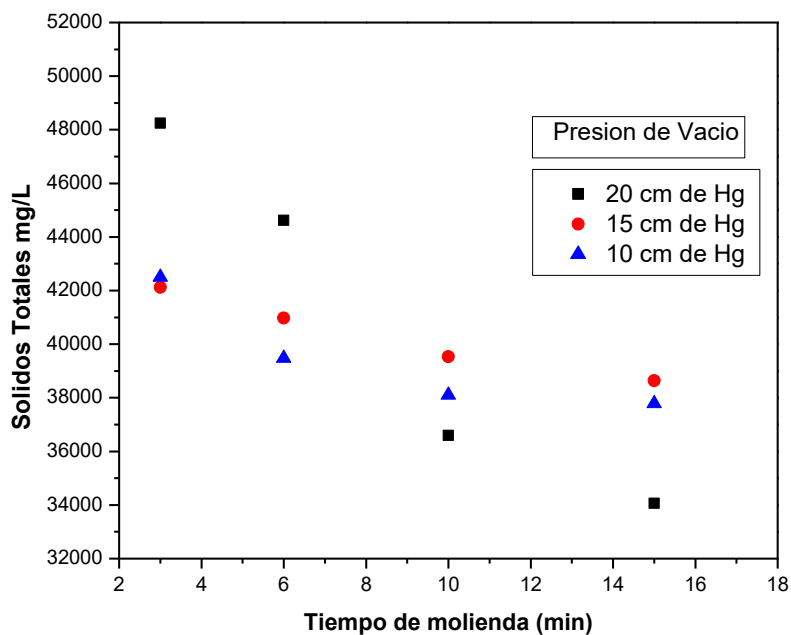


Ilustración 34. Solidos Totales a diferentes presiones de vacío

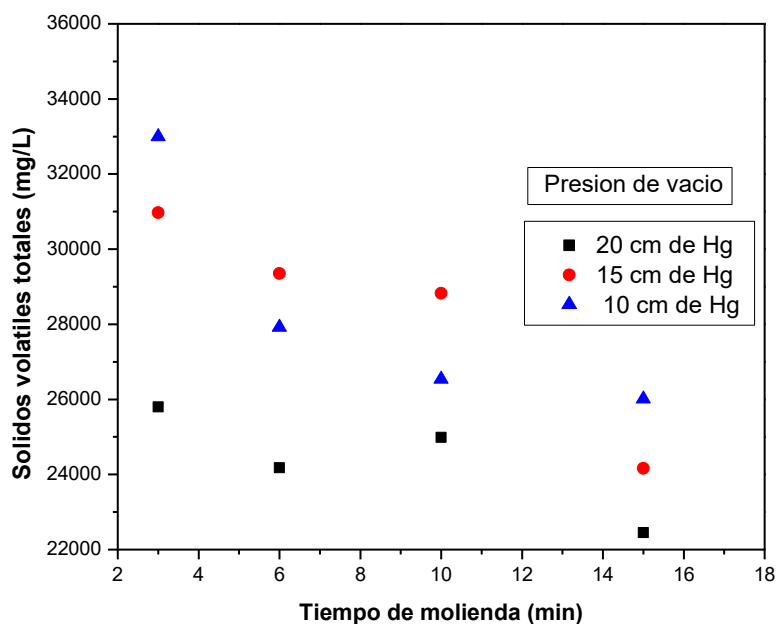


Ilustración 35. Solidos Totales Volátiles a diferentes presiones de vacío

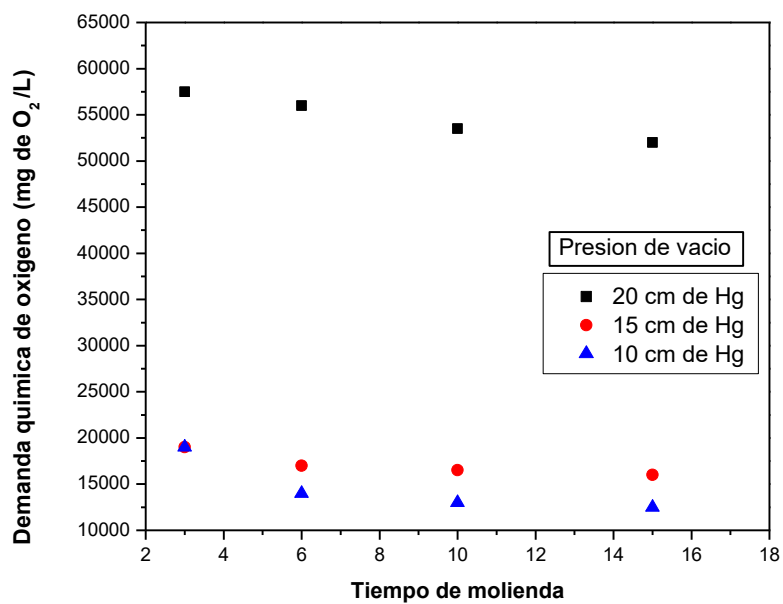


Ilustración 36. Demanda Química de Oxígeno a diferentes presiones de vacío



Costos de los procesos de molienda y filtración al vacío

Las tablas 19, 20 y 21 e ilustración 37 muestran la producción y costos de producción de los equipos pilotos propuestos para llevar a cabo la recuperación de la fibra húmeda de nopal. Se observa que conforme disminuye la presión de vacío, el costo total de la recuperación incrementa; ya que para las presiones al vacío de 10, 15 y 20 cm de Hg, los costos totales de la recuperación de la fibra húmeda de nopal son: 0.258, 0.2268 y 0.1298 pesos/ kg de nopal respectivamente

Tabla 19. Costos energéticos a una presión al vacío de 20 cm de Hg

Presión al vacío de 20 cm de Hg			
Tiempo de Molienda	6 min	10 min	15 min
Licuadora Industrial			
Kg de Nopal Molidos /h (kg/h)	209	125.4	83.6
Costo de Molienda/Kg de Nopal (\$/kg)	0.0177	0.0295	0.0443
Filtro Rotatorio a Vacío			
Kg de Nopal filtrados /h (kg/h)	44.98	50.87	78
Costo de filtración/Kg de Nopal (\$/h)	0.1483	0.1311	0.0855
Total del costo de la recuperación de la fibra húmeda de nopal (\$/kg)	0.166	0.1606	0.1298

Tabla 20. Costos energéticos a una presión al vacío de 15 cm de Hg

Presión al vacío de 15 cm de Hg			
Tiempo de Molienda	6 min	10 min	15 min
Licuadora Industrial			
Kg de Nopal Molidos /h (kg/h)	209	125.4	83.6
Costo de Molienda/Kg de Nopal (\$/kg)	0.0177	0.0295	0.0443
Filtro Rotatorio a Vacío			
Kg de Nopal filtrados /h (kg/h)	51.03	41.126	36.55
Costo de filtración/Kg de Nopal (\$/kg)	0.174	0.1621	0.1825
Total del costo de la recuperación de la fibra húmeda de nopal (\$/kg)	0.1917	0.1916	0.2268



Tabla 21. Costos energéticos a una presión al vacío de 10 cm de Hg

Presión al vacío de 10 cm de Hg			
Tiempo de Molienda	6 min	10 min	15 min
Licuadora Industrial			
Kg de Nopal Molidos /h (kg/h)	209	125.4	83.6
Costo de Molienda/Kg de Nopal (\$/kg)	0.0177	0.0295	0.0443
Filtro Rotatorio a Vacío			
Kg de Nopal filtrados /h (kg/h)	42.0675	32.92	31.21
Costo de filtración/Kg de Nopal (\$/kg)	0.1816	0.2026	0.2137
Total del costo de la recuperación de la fibra húmeda de nopal (\$/kg)	0.1993	0.2321	0.258

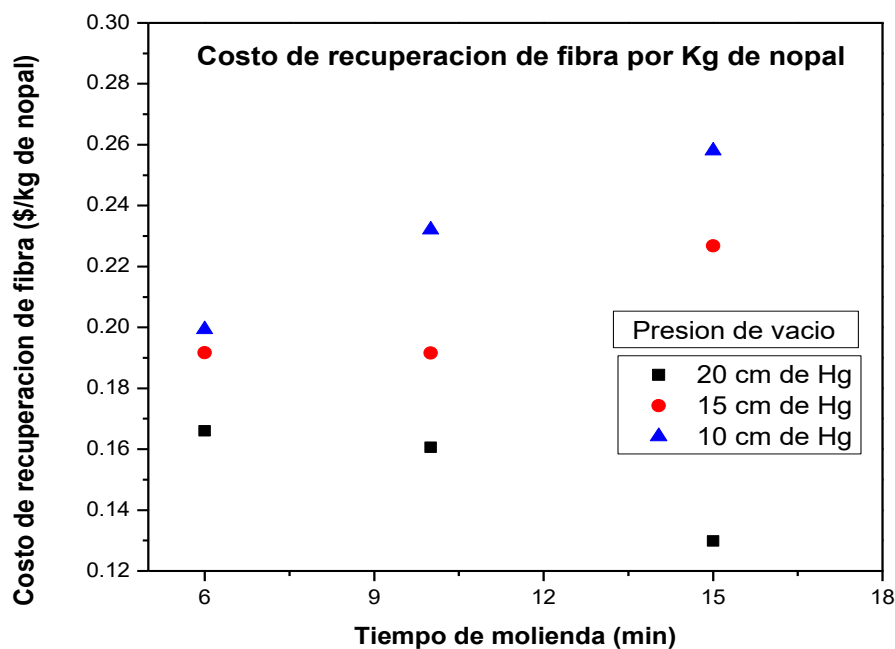


Ilustración 37. Costo de recuperación de fibra por Kg. de nopal



Propuesta del proceso de recuperación de la fibra húmeda de nopal

La ilustración 38 muestra el proceso propuesto para llevar a cabo la recuperación de la fibra húmeda de nopal, con las condiciones de operación para el proceso de molienda y filtración de vacío, así como la cantidad de torta y filtrados obtenidos con su caracterización.

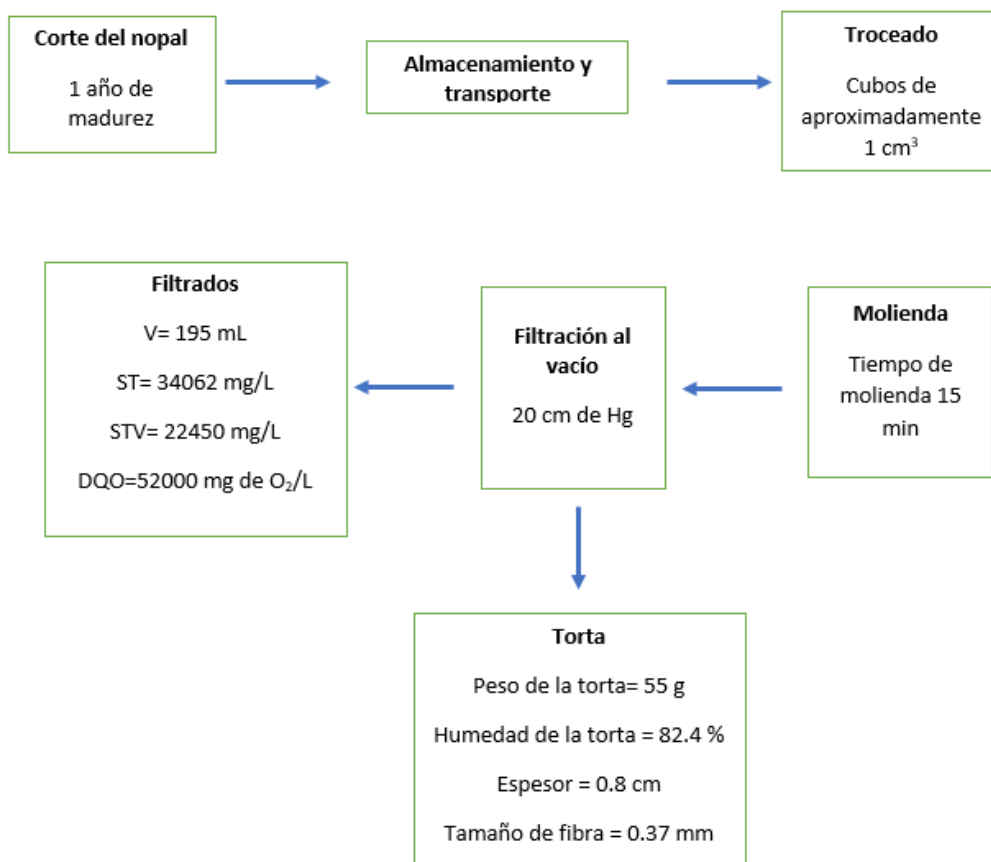


Ilustración 38. Diagrama de flujo del proceso propuesto para la recuperación de la fibra húmeda de nopal



Conclusiones

Existe una marcada correlación entre el tiempo de molienda y la presión de vacío del filtro ya que en función de ambas variables, se presentaron modificaciones en las características de la torta y filtrados obtenidos.

Las mejores condiciones para llevar a cabo la recuperación de la fibra húmeda de nopal considerando las características de la fibra y su costo de recuperación, son: 15 minutos de molienda y presión al vacío de 20 cm de Hg ya que a estas condiciones se tienen los costos totales de recuperación menores de la fibra de 0.1298 \$/ kg de nopal.

Por cada kilogramo de nopal procesado se tuvo una recuperación de fibra de 38.4 g de fibra seca, con una longitud promedio de fibra de 0.37 mm.

La malla filtrante seleccionada para utilizar en la recuperación de la fibra es; la malla de acero inoxidable # 50 con una apertura de 0.355 mm, ya que con esta malla se evitan problemas de estancamiento y paso de fibra a través del material filtrante.

Sería conveniente continuar con el proyecto en cuestión de la torta húmeda obtenida, ya que aún contiene un porcentaje de agua considerable por lo que se recomienda que se someta a un proceso de secado.

Es conveniente utilizar los filtrados obtenidos para un proceso posterior, por ejemplo para la obtención de biogás en procesos anaerobios.



Bibliografía

Geankoplis, C. J. (1998). *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. Compañía Editorial Continental.

Calabro, P. S., Catalán, E., Folino, A., Sánchez, A., & Komilis, D. (2018). Effect of three pretreatment techniques on the chemical composition and on the methane yields of *Opuntia ficus-indica* (prickly pear) biomass. *Waste Management & Research*, 36(1), 17-29.

Sáenz, C., & Berger, H. (2006). *Utilización agroindustrial del nopal* (Vol. 162). Food & Agriculture Org.

Quintanar-Orozco, E. T., Vázquez-Rodríguez, G. A., Beltrán-Hernández, R. I., Lucho-Constantino, C. A., Coronel-Olivares, C., Montiel, S. G., & Islas-Valdez, S. (2018). Enhancement of the biogas and biofertilizer production from *Opuntia heliabravoana* Scheinvar. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(28), 28403-28412.

Escudero Álvarez, E., & González Sánchez, P. (2006). La fibra dietética. *Nutrición hospitalaria*, 21, 61-72.

Herrera, B., Irma, M., González, G., Eglis, P., & Romero, J. G. (1998). Fibra dietética soluble, insoluble y total en leguminosas crudas y cocidas. *Arch. latinoam. nutr*, 48(2), 179-82.

Sette, R., Jiménez, D., & De Lora, F. (1996). Tratamiento de aguas residuales. *Barcelona: Reverte*.

Orozco, M. (1998). *Operaciones unitarias*. Editorial Limusa.



Bernal Negrete, L. G., Vargas Téllez, G. E., & García Arellano, H. E. (2016). la transición hacia la sustentabilidad: el caso de las microempresas de nopal en la comunidad de urireo, salvatierra, gto.

López, D. C., Rodríguez, L. V., Arroyo, Z. G., & Ramírez, R. F. (2018). Mucilago de nopal y su aplicación en la obtención de biopolímeros. *Naturaleza y Tecnología*, (16).

Lugo, E. B., Pérez, F. D. C. S., Fernández, S. F. P., & Sandoval, R. C. S. Efecto de las formulaciones de composta a partir de residuos de poda de nopal (*Opuntia ficus indica*)/estiércol vacuno en plantaciones de nopal verdura.

González, J. C. M., Jiménez, A. L., Hernández, J. P. C., & Alvarado, A. D. (2001). Poda y época de despunte en cladodios de nopal tunero. *Agrociencia*, 35(2), 159-167.

Flores Mendiola, G. R. (2012). *Producción de biomasas y calidad nutrimental de opuntia ficus-indica (L) mill para consumo humano cultivado en forma hidropónica* (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).

Torres-Ponce, R. L., Morales-Corral, D., Ballinas-Casarrubias, M. D. L., & Nevárez-Moorillón, G. V. (2015). El nopal: planta del semidesierto con aplicaciones en farmacia, alimentos y nutrición animal. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 6(5), 1129-1142.

Zúñiga-Tarango, R., Orona-Castillo, I., Vázquez-Vázquez, C., Murillo-Amador, B., Salazar-Sosa, E., López-Martínez, J. D., ... & de Santa Rita, C. P. P. (2009). Desarrollo radical, rendimiento y concentración mineral en nopal *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. en diferentes tratamientos de fertilización. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 11(3), 53-68.

Ruíz Lopez, S. (2011). El nopal: propiedades y paquete tecnológico para su producción. 7–20. *Recuperado a partir de <http://www.fps.org.mx/divulgacion/attachments/article/981/MC Nopal>*.



Ayala, M. L. G., Méndez, N. G., Muñoz, E. S., & Figueroa, J. C. R. (2014). Optimización de la extracción de mucilago de nopal (*Opuntia spp.*) mediante la aplicación de ultrasonido de alta potencia. *cibia*, 121.

Maki-Díaz, G., Peña-Valdivia, C. B., García-Nava, R., Arévalo-Galarza, M. L., Calderón-Zavala, G., & Anaya-Rosales, S. (2015). Características físicas y químicas de nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*) para exportación y consumo nacional. *Agrociencia*, 49(1), 31-51.

Sáenz, C., Sepúlveda, E., Pak, N., & Vallejos, X. (2002). Uso de fibra dietética de nopal en la formulación de un polvo para flan. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 52(4), 387-392.

Escudero Álvarez, E., & González Sánchez, P. (2006). La fibra dietética. *Nutrición hospitalaria*, 21, 61-72.

Araya, H., & Lutz, M. (2003). Alimentos funcionales y saludables. *Revista chilena de nutrición*, 30(1), 8-14.

Wang, D., Shen, F., Yang, G., Zhang, Y., Deng, S., Zhang, J., ... & Mei, Z. (2018). Can hydrothermal pretreatment improve anaerobic digestion for biogas from lignocellulosic biomass?. *Bioresource technology*, 249, 117-124.

Ramos-Suárez, J. L., Martínez, A., & Carreras, N. (2014). Optimization of the digestion process of *Scenedesmus* sp. and *Opuntia maxima* for biogas production. *Energy conversion and management*, 88, 1263-1270.



Anexo A

Datos de la Filtración al vacío a 20 cm de Hg

Tabla 22. Tiempos de las pruebas realizadas con 3 minutos de molienda (-20 cm de Hg)

3 Minutos de Molienda			
V (ml)	t promedio (s)	t ₁ (s)	t ₂ (s)
20	1.96	1.85	2.07
40	3.54	3.8	3.28
60	9.425	12.64	6.21
80	20.675	29.88	11.47
100	46.86	62.16	31.56
120	112.69	120.21	105.17
140	206.96	195.29	218.63
160	289.85	280.95	298.75
176.6	562.36	562.36	

Tabla 23. Tiempo de las pruebas realizadas con 6 minutos de molienda (-20 cm de Hg)

6 Minutos de Molienda			
V (ml)	t promedio (s)	t ₁ (s)	t ₂ (s)
20	3.9	3.98	3.82
40	8.06	7.41	8.71
60	16.965	16.55	17.38
80	25.27	25.95	24.59
100	47.305	51.12	43.49
120	80.005	83.56	76.45
140	119.345	135.32	103.37
160	164.975	170.25	159.7
176.6	429.365	452.1	406.63



Tabla 24. Tiempo de las pruebas realizadas con 10 minutos de molienda (-20 cm de Hg)

10 Minutos de Molienda			
V (ml)	t promedio(S)	t ₁ (S)	t ₂ (S)
20	4.145	3.5	4.79
40	7.245	6.41	8.08
60	11.205	10.37	12.04
80	14.815	13.09	16.54
100	20.975	19.81	22.14
120	32.85	31	34.7
140	44.03	40.75	47.31
160	62.615	58.46	66.77
189.9	276.63		276.63

Tabla 25. Tiempos de las pruebas realizadas con 15 minutos de molienda (-20 cm de Hg)

15 Minutos de Molienda			
V (ml)	t promedio(S)	t ₁ (S)	t ₂ (S)
20	4.13	3.8	4.46
40	7.01	6.39	7.63
60	10.155	8.44	11.87
80	14.455	13.93	14.98
100	18.455	17.35	19.56
120	25.605	22.38	28.83
140	36	33.98	38.02
160	47.575	42.29	52.86
194	180	180	



Datos de la Filtración al vacío a 15 cm de Hg

Tabla 26. Tiempo de las pruebas realizadas con 3 minutos de molienda (-15 cm de Hg)

3 Minutos de Molienda			
V (ml)	t _{promedio} (s)	t ₁ (s)	t ₂ (s)
20	6.005	5.84	6.17
40	13.065	12.46	13.67
60	31.35	26.74	35.96
80	47.935	42.51	53.36
100	83.15	72.66	93.64
120	142.73	126.66	158.8
140	218.95	202.9	235
160	361.65	331.66	391.64
164	562.36	511.6	581.64

Tabla 27. Tiempo de las pruebas realizadas con 6 minutos de molienda (-15 cm de Hg)

6 Minutos de Molienda			
V (ml)	t _{promedio} (s)	t ₁ (s)	t ₂ (s)
20	6.18	6.97	5.39
40	10.925	9.9	11.95
60	19.885	20.34	19.43
80	29.665	30.52	28.81
100	49.765	47.95	51.58
120	85.895	82.97	88.82
140	130.005	128.53	131.48
160	196.285	187.59	204.98
173	412.895	409.59	416.2



Tabla 28. *Tiempos de las pruebas realizadas con 10 minutos de molienda (-15 cm de Hg)*

10 Minutos de Molienda			
V (ml)	t promedio (s)	t ₁ (s)	t ₂ (s)
20	7.32	7.94	6.7
40	11.89	12.62	11.16
60	18.21	18.29	18.13
80	23.55	23.16	23.94
100	33.805	32.54	35.07
120	50.875	50.2	51.55
140	79.685	81.57	77.8
160	133.94	136.07	131.81
178	362.83	362.15	363.51

Tabla 29. *Tiempo de las pruebas realizadas con 15 minutos de molienda (-15 cm de Hg)*

15 Minutos de Molienda			
V (ml)	t promedio (s)	t ₁ (s)	t ₂ (s)
20	7.105	7.33	6.88
40	10.49	9.82	11.16
60	14.715	13.77	15.66
80	18.255	17.78	18.73
100	25.975	25.57	26.38
120	46.675	44.63	48.72
140	74.37	71.17	77.57
160	111.94	105.65	118.23
181	360.5	361	360



Datos de la Filtración al vacío a 10 cm de Hg.

Tabla 30. Tiempo de las pruebas realizadas con 3 minutos de molienda (-10 cm de Hg)

3 Minutos de Molienda			
V (ml)	t _{promedio} (s)	t ₁ (s)	t ₂ (s)
0	0	0	0
20	9.665	10.14	9.19
40	19.935	18.61	21.26
60	40.715	40.95	40.48
80	63.545	64.79	62.3
100	104.485	107.93	101.04
120	154.39	161.75	147.03
140	268.025	272.81	263.24
160	487.695	488.23	487.16

Tabla 31. Tiempo de las pruebas realizadas con 6 minutos de molienda (-10 cm de Hg)

6 Minutos de Molienda			
V (ml)	t _{promedio} (s)	t ₁ (s)	t ₂ (s)
20	7.475	7.65	7.3
40	13.345	13.51	13.18
60	22.78	23.2	22.36
80	30.99	31.55	30.43
100	54.28	53.35	55.21
120	95.92	91.32	100.52
140	182.8	190.2	175.4
160	238.3	225.4	251.2
174	480	480	480



Tabla 32. *Tiempos de las pruebas realizadas con 10 minutos de molienda (-10 cm de Hg)*

10 Minutos de Molienda			
V (ml)	t _{promedio} (s)	t ₁ (s)	t ₂ (s)
20	7.49	6.68	8.3
40	12.655	12.74	12.57
60	20.44	20.8	20.08
80	28.305	30.09	26.52
100	42.785	46.26	39.31
120	60.915	59.54	62.29
140	87.915	83	92.83
160	155.74	132.05	179.43
177	480	480	480

Tabla 33. *Tiempo de las pruebas realizadas con 15 minutos de molienda (-10 cm de Hg)*

15 Minutos de Molienda			
V (ml)	t _{promedio} (s)	t ₁ (s)	t ₂ (s)
20	7.08	5.69	8.47
40	12.505	12.33	12.68
60	19.52	20.94	18.1
80	26.6	26.09	27.11
100	36.53	35.25	37.81
120	52.465	48.81	56.12
140	82.94	81.68	84.2
160	122.925	125	120.85
177	300	300	300



Anexo B

Datos obtenidos de la medición de la longitud de la fibra por medio de las imágenes tomadas en el microscopio, sacando un promedio de los datos para tomarlo como el valor del tamaño de la fibra.

Tabla 34. Tamaño de fibra a distintos tiempos de molienda

Tiempo de Molienda	tamaño(mm)	Tiempo de Molienda	tamaño(mm)	Tiempo de Molienda	tamaño(mm)	Tiempo de Molienda	tamaño(mm)
3 Minutos	1	6 Minutos	0.5	10 minutos	0.3	15 minutos	0.6
	1		0.35		0.2		0.2
	0.5		0.2		0.45		0.5
	0.8		0.5		0.3		0.1
	0.7		0.5		0.2		0.2
	0.3		0.2		0.65		0.2
	0.4		0.2		1		0.3
	0.2		1.2		1		0.4
	1.1		0.5		1		0.2
	1		0.2		0.5		0.5
	0.5		0.4		0.25		0.3
	0.6		0.4		0.15		0.2
	0.6		0.25		0.35		0.2
	0.5		0.7		0.9		0.15
	0.7		0.5		0.15		0.25
Tamaño Promedio	0.66		0.3		0.15		0.2
			1		0.2		0.5
			1.3		0.3		0.4
			1.5		0.1		0.2
			0.4		0.35		0.4
			0.3		0.95		0.2
			0.4		0.6		0.35
			0.7		0.2		0.7
			0.3		0.2		0.2
		Tamaño Promedio	0.53333333		0.2		0.25
					0.35		0.3
					0.45		0.5
					0.4		0.35
					1.2		0.2



	0.25		0.05
	0.8		0.35
	0.1		0.5
	1		0.8
	0.1		0.5
	0.1		0.4
	0.35		0.2
	0.15		0.5
	0.35		0.4
	0.25		0.4
	0.1		0.7
	0.2		0.75
Tamaño Promedio	0.4097561		1.1
		Tamaño Promedio	0.37380952



Anexo C

Características de los equipos para poder llevar a cabo la recuperación de la fibra húmeda a nivel piloto.

Tabla 35. Características de la licuadora industrial

Características de la licuadora industrial	
Marca	KRETOR
Modelo	R-LFVR20LT
Capacidad	22 litros
Potencia	2.0 HP
Voltaje	220V / 60Hz
RPM	3 500 R.P.M

Tabla 36. Características del filtro rotatorio al vacío

Características del filtro rotatorio al vacío	
Perímetro del tambor	135.1 cm
Altura del tambor	38 cm
Potencia	2.7 KW
RPM Mínima	0.1366 RPM
RPM Máxima	1.5 RPM



Ilustración 39. Licuadora Industrial



Ilustración 40. Filtro rotatorio al vacío