



**Universidad Nacional Autónoma De México**

---

**Facultad De Estudios Superiores**

**Cuautitlán**

**Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote.**

**Tesis**

**Qué Para Obtener El Título De:**

**Ingeniero En Alimentos**

**Presenta:**

**Arturo Alarcón Alpizar**

**Asesora:**

**Dra. Elsa Gutiérrez Cortez**

**Cuautitlán Izcalli, Estado De México, 2018**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

## FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE

ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA  
Jefa del Departamento de Exámenes Profesionales  
de la FES Cuautitlán.

ASUNTO: VOTO APROBATORIO

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: Trabajo de Tesis

Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote.

Que presenta el pasante: Arturo Alarcón Alpizar

Con número de cuenta: 307089708 para obtener el Título de la carrera: Ingeniería en Alimentos

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 14 de Febrero de 2018.

### PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Dra. Elsa Gutiérrez Cortez	
VOCAL	Dr. Enrique Martínez Manrique	
SECRETARIO	M. en C. Araceli Ulloa Saavedra	
1er. SUPLENTE	I.A Dulce María Oliver Hernández	
2do. SUPLENTE	I.A. Janeli Solis Garfias	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

LMCF/mmgm\*

## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*



### **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Nacional Autónoma de México por mantenerse como una de las mejores universidades a nivel mundial.

A la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán y especialmente a la carrera de Ingeniería en Alimentos por permitirme ser parte de ella, el uso de sus instalaciones, las enseñanzas de los profesores, las actividades deportivas y culturales.

A todos los profesores, por su gran labor de apoyar a los estudiantes a convertirse en profesionistas de la carrera.

A la Dra. Elsa Gutiérrez Cortez, por el gran apoyo incondicional para la elaboración de este trabajo, su tiempo, dedicación y compartir su conocimiento.

### **DEDICATORIAS**

Para mi padre, el mejor papá del mundo, que dedica su vida en dar lo mejor a sus hijos, un ejemplo de superación y logro, que demuestra no tener límites para salir adelante y no dejarse caer a pesar de las adversidades, mi ejemplo a seguir.

Para mi mamá Dulce Merlos, una gran mujer, el mayor ejemplo de que para ser una madre no se necesita crecer en su vientre, y como ella dice “una mamá postiza” la cual se convirtió en la mejor mamá real y que me ha guiado desde la adolescencia.

Para mis dos hermanitos David e Ian, los generadores de mis alegrías, uno de mis motivos para salir adelante y estar bien para verlos, que espero presenciar su crecimiento y logros en la vida, siempre estaré para ustedes y tienen todo mi apoyo.

Para Viridiana Navarro, una increíble persona, que ha estado conmigo y me ha apoyado, la cual se ha convertido en alguien muy especial en mi vida, quien tiene un lugar muy importante en mi corazón.

Para mis amigos, Dioni que desde el inicio de esta aventura hemos estado y seguiremos juntos, los bukis que son la pura carrilla y la diversión no falta, el buen Toño con el que me lleve la sorpresa más grande en toda la carrera.



## ÍNDICE

	Pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>CAPÍTULO I ANTECEDENTES</b>	4
1.1 Proceso de nixtamalización	4
1.2 Descripción del proceso de nixtamalización tradicional e industrial	5
1.3 Transformaciones fisicoquímicas durante la nixtamalización del maíz	10
1.4 Nejayote líquido de la nixtamalización	17
1.5 Importancia del tratamiento de aguas residuales	21
1.6 Operación unitaria de centrifugación	24
1.6.1 Fundamento	24
1.6.2 Teoría de la centrifugación	25
1.6.3 Ecuaciones empleadas en la Centrifugación	26
1.6.4 Variables en la operación de centrifugación	28
1.6.5 Clasificación de equipos	30
1.6.6 Características del equipo utilizado en la centrifugación de nejayote	33
1.7 La demanda Química y Bioquímica de oxígeno	42
1.7.1 Demanda Química de oxígeno (D.Q.O.)	42
1.7.2 La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	43

# *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*



<b>CAPÍTULO II METODOLOGÍA EXPERIMENTAL</b>	<b>44</b>
2 Descripción de actividades preliminares	47
2.1 Determinación de contenido de Humedad Método de estufa (AOAC, método 925.10) para obtener sólidos totales	47
2.2 Turbidez de nejayote	51
2.3. Actividades para el objetivo 1 y 2	52
2.3.1 Obtención de volumen clarificado	54
2.3.2 Tiempo de residencia	55
2.3.3 Rendimiento	55
2.3.4 Eficiencia de separación de fases	56
2.4 Actividades para el objetivo 3	56
2.5 Actividades para el objetivo 4	57
2.6 Actividades para el Objetivo 5	59
<b>CAPÍTULO III DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>64</b>
3 Resultados de actividades preliminares	64
3.1 Resultados de determinación de contenido de sólidos totales en el nejayote	64
3.1.1 Resultados de Contenido de sólidos totales de nejayote en dilución	64
3.1.2 Elaboración de curva patrón de sólidos totales	65
3.2 Resultados de la turbidez de nejayote	66
3.2.1 Resultados de la Turbidez en muestras diluidas de nejayote	67



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

3.3 Resultados para el objetivo 1 y 2	68
3.4 Resultados para el Objetivo 3	75
3.5 Resultados para el Objetivo 4	77
3.6 Resultados para el Objetivo 5	78
<b>CONCLUSIONES</b>	81
<b>RECOMENDACIONES</b>	82
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	83



**LISTA DE FIGURAS**

	Pág.
Figura 1.1 a) cocción y reposo de maíz nixtamalizado, b) nixtamal	4
Figura 1.2 Diagrama de bloques de nixtamalización tradicional e industrial	6
Figura 1.3 a) Nejayote, b) recolección de nejayote de una tortillería	18
Figura 1.4 Fuerza centrífuga y centrípeta	27
Figura 1.5 Fuerza centrífuga	28
Figura 1.6 a) Centrífuga de tazón tubular, b) diagrama de la fase líquida y sólida dentro de la centrífuga	31
Figura 1.7 a) Centrífuga de tazón y discos, b) corte transversal interno de los discos de la centrífuga	32
Figura 1.8 a) Centrífuga de tazón, b) corte transversal del tazón	33
Figura 1.9 a) Centrífuga de deslodado automático, b) corte transversal de la centrífuga de deslodado automático	34
Figura 1.10 a) Centrífuga de boquilla, b) corte transversal de la centrífuga de boquilla	35
Figura 1.11 a) Centrífuga de boquilla, b) corte transversal de la centrífuga de boquilla	36
Figura 1.12 a) Centrífuga de boquilla, b) corte transversal de la centrífuga de boquilla	37
Figura 1.13 a) Centrífuga de cinta transportadora de vaivén, b) corte transversal de la centrífuga transportadora de vaivén	38



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*



Figura 1.14 a) Centrífuga de cinta transportadora de vaivén, b) corte transversal de la centrífuga transportadora de vaivén	39
Figura 1.15 Diagrama esquemático de una centrífuga de tazón con discos	41
Figura 2.1 Cuadro metodológico	46
Figura 2.2 a) Charolas de aluminio a peso constante. b) charolas con nejayote	48
Figura 2.3 a) diluciones de nejayote, b) charolas para la determinación de humedad, c) estufa de convección	49
Figura 2.4 a) Matraz de bola con nejayote, b) diluciones de nejayote	50
Figura 2.5 Determinación de turbidez del nejayote y de nejayote diluido	51
Figura 2.6 a) Centrífuga de discos, b) panel de control de la centrífuga	54
Figura 2.7 Volumen de clarificado obtenido	55
Figura 2.8 Técnica de microscopia, a) microscopio electrónico, b) porta muestras de bronce, c) porta muestras de aluminio	57
Figura 2.9 Determinación de calcio en muestras. a) filtración de muestras y adición de óxido de lantano, b) espectrofotómetro de absorción atómica	59
Figura 2.10 Pruebas para realizar la demanda bioquímica y química de oxígeno	60
Figura. 3.1 Curva patrón Contenido de sólidos totales vs Diluciones de nejayote	66
Figura. 3.2 Curva patrón turbidez vs diluciones de nejayote	68
Figura 3.3 Gráfica de contorno para rendimiento	70
Figura 3.4. Gráfica de superficie para rendimiento	71
Figura 3.5 Gráfica de contorno para eficiencia	72



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

Figura 3.6 Gráfica de superficie para eficiencia	73
Figura 3.7 Nejayote original y nejayote centrifugado a condiciones óptimas	74
Figura 3.8 Micrografía del nejayote a 1000 X	75
Figura 3.9 Micrografía de nejayote centrifugado	76
Figura 3.10 Gráfica de concentración de calcio	77
Figura 3.11 Gráfica de la demanda bioquímica de oxígeno	78
Figura 3.12 Gráfica de la demanda química de oxígeno	79

# *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*



## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1 Composición fisicoquímica del nejayote	20
Tabla 2.1 Condiciones experimentales de la centrifugación de nejayote	53
Tabla 3.1 Resultados del contenido de sólidos totales de nejayote	64
Tabla 3.2 Contenido de sólidos totales de nejayote de diferentes diluciones	65
Tabla 3.3 resultados de turbidez del nejayote sin centrifugar	66
Tabla 3.4 Resultados de turbidez de muestras diluidas de nejayote	57
Tabla 3.5. Resultados de los datos de las distintas pruebas obtenidos para los clarificados	69



## RESUMEN

La nixtamalización es un tratamiento para elaborar tortillas y es el proceso más antiguo de la industria alimentaria en México. Sin embargo, utiliza grandes volúmenes de agua para la cocción y reposo del maíz y lavado de nixtamal. Por eso se vierten entre 16 a 22 millones de  $m^3/año$  de aguas de desecho conocidas como nejayote. Estas aguas residuales son consideradas muy contaminantes debido a su carga inorgánica y orgánica que genera altas demandas bioquímicas de oxígeno generalmente mayores a  $7000\text{ mgO}_2/L$ . Dado que es imposible prescindir de ese proceso se han realizado múltiples tratamientos para reutilizar el nejayote y purificarlo, no con mucho éxito. Dentro de los que destaca la filtración, la ultrafiltración y la sedimentación. Esta problemática permitió que el objetivo de este trabajo fuera aplicar la operación unitaria de centrifugación a diferentes niveles de variación. Las condiciones de separación en una centrífuga de discos fueron: tornillo de gravedad con tres niveles de variación; completamente cerrado, abierto y a la mitad. Velocidad de giro a 4000, 4500 y 5000 rpm. Estas dos variables se analizaron para conocer su interacción y obtener las condiciones óptimas de rendimiento y eficiencia de separación del nejayote, para que presentaran la menor demanda bioquímica y química de oxígeno. Se utilizaron como técnicas de evaluación para evaluar al nejayote centrifugado, la concentración de calcio por espectrofotometría de absorción atómica y microscopia electrónica de barrido a bajo vacío para conocer la morfología superficial de los componentes de nejayote original y centrifugado. Los resultados obtenidos al realizar la optimización de respuesta en la centrifugación, con el programa estadístico de superficie de respuesta se obtuvo. Las condiciones óptimas fueron a una velocidad de giro de 4525 rpm y uso de tornillo de gravedad al 50%, y que el rendimiento corresponde a 90.18 % y la eficiencia de 81.9 %. La demanda Bioquímica del nejayote fue de 15, 013.17  $\text{mgO}_2/L$  y disminuyó al centrifugar por lo menos siete veces menos 2,710.13  $\text{mgO}_2/L$ , pero no fue suficiente ya que la normativa ambiental (NOM-002-ECOL 1996) señala un límite máximo de descarga de  $200\text{ mg O}_2/L$ . En cuanto a la demanda química disminuyó cuatro veces menos; y a su vez el calcio residual en nejayote disminuyó de  $1562.16\text{ mg/L}$  a  $149.11\text{ mg/L}$ , lo que hace que su pH disminuya y eso es muy bueno, aunque la cantidad de calcio es importante debido a que este mineral en estas condiciones y como residuo de la nixtamalización es biodisponible al organismo humano. Las micrografías obtenidas por microscopia electrónica evidenciaron esa pérdida de calcio y de componentes propios del nejayote, a saber, celulosa, hemicelulosa, almidones entre otros.

*Palabras clave:* Aguas residuales, Centrifugación, maíz, micrografías, nejayote.



## INTRODUCCIÓN

La nixtamalización es el proceso más antiguo de la industria alimentaria en México, es de gran importancia, porque proporciona una gran variedad de alimentos básicos para la dieta de la población mexicana (Trejo-González *et al.*, 1992). Este proceso consiste en un tratamiento térmico-alcalino que se lleva a cabo en dos etapas (Fernández-Muñoz *et al.*, 2014). La primera etapa inicia con la cocción de granos de maíz en una solución saturada de hidróxido de calcio, cuya concentración puede variar de 0.5 a 2 %, la segunda etapa consiste en el reposo del grano en el líquido de cocción (nejayote) e inmediatamente después, el líquido (nejayote) es drenado de los granos hidratados (nixtamal). El nejayote del náhuatl *nejayot*, del *nextli* ceniza y *ayotli* caldo. Es decir, agua con residuos de cal o ceniza y hollejos de granos de maíz. Durante estas dos etapas en la nixtamalización está inmersa una combinación de fenómenos de transporte: transferencia de calor, de momentum y de masa (Gutiérrez-Cortez *et al.*, 2010). Rojas-Molina *et al.* (2009) reportaron que la cantidad de sólidos presentes en el nejayote dependen de las condiciones de proceso como: la temperatura de cocción, el tiempo de reposo, la variedad de maíz y la concentración de hidróxido de calcio utilizada. Así mismo, la pérdida de materia seca es proporcional a las condiciones en que se nixtamalizaron los granos de maíz (Sahai *et al.*, 2002).

Pflugfelder *et al.* (1988) describió al nejayote como un agua de desecho altamente contaminante, la cual contiene altas concentraciones de sólidos solubles e insolubles.

Adicionalmente, el nejayote tiene un alto contenido de cenizas de un 23.15 %, dentro de los que destaca el calcio con un contenido de 7.13 a 13.06 % en promedio y residuos de fracción de partes del grano de maíz: germen, endospermo y pericarpio (Velazco-Martínez *et al.*, 1997). Rosentrater (2006) explicó que se considera como un agua de desecho por que los efluentes generados durante el proceso de nixtamalización son potencialmente dañinos para el medio ambiente. Esto debido a su composición química y un pH altamente



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

alcalino, su demanda química de oxígeno de 1670-21280 mgO<sub>2</sub>/L, total de sólidos suspendidos de 2540mg/L, y alcalinidad total de 180-3260 mg CaCO<sub>3</sub>. Niño-Medina *et al.* (2009) Reportaron que en una nixtamalización tradicional, para procesar 50 kg de maíz se requieren 75 litros de agua, lo cual genera una cantidad equivalente de agua contaminada, calcularon que para 600 toneladas de maíz/día, la cual es la capacidad de una planta, se generan de 1500 a 2000 m<sup>3</sup> de nejayote, lo que representa una alta contaminación si cuantificamos la cantidad de tortillerías totales existentes en México.

Los efluentes industriales vertidos a los cursos naturales de agua o al drenaje municipal, generalmente sin tratamiento alguno, se han convertido en un tema de preocupación ambiental entre los sectores industriales, gubernamentales y la sociedad en general (Serna-Saldivar *et al.*, 1990).

En el caso de la industria del nixtamal se vierten de 16 a 22 millones de m<sup>3</sup>/año de aguas de desecho conocidas como nejayote. Este efluente es considerado altamente contaminante debido a su carga inorgánica y orgánica elevada que genera demandas bioquímicas de oxígeno del orden de 7000 a 10000 mg O<sub>2</sub>/L, mientras que la normativa ambiental (NOM-002-ECOL 1996) señala un límite máximo de descarga de 200 mg O<sub>2</sub>/L.

Hasta la fecha se han probado sin éxito diversos sistemas de tratamiento de aguas residuales por lo que resulta urgente generar alternativas que permitan enfrentar esta problemática que pone en serio riesgo la industria del nixtamal.

Pflugfelder *et al.* (1988) encontraron que aproximadamente el 50 % de los sólidos en suspensión en el nejayote contenía alrededor de 64 % de polisacáridos sin almidón, 20 % de almidón y 1.4 % de proteína. El otro 50 % estaba compuesto de sólidos solubles que consiste en proteínas, azúcares, vitaminas y fitoquímicos rica en fenólicos y carotenoides. Después de la cocción del maíz en cal, los granos se conocen como nixtamal, se muele en una pasta o masa que constituye la columna



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

vertebral de la producción de tortillas de mesa, el maíz para papas fritas, etc. (Serna-Saldivar *et al.*, 1990).

El nejayote, líquido alcalino rico en materia orgánica en suspensión y solución, además de que es un desecho altamente contaminante. La mayoría de los compuestos orgánicos asociados al nejayote son del pericarpio y sólidos solubles que se filtran desde el germen y la capa de aleurona.

Es por eso que uno de los grandes inconvenientes de la nixtamalización cuando se aplica de manera tradicional y a escala mayor es el uso de grandes cantidades de agua para la cocción y el lavado de maíz, poca es la cantidad de agua que absorben los granos de maíz, la mayor parte se convierte en nejayote o líquido sobrenadante del nixtamal que es considerado como un efluente altamente contaminante debido a su alto pH, temperatura y sólidos en suspensión.

Se han hecho grandes intentos por reducir el agua en el proceso de nixtamalización, utilizando nuevos métodos, como es la extrusión, microondas, reutilización de nejayote, el problema es que cuando el proceso se escala los costos son muy elevados y el producto más importante o tortilla no tiene las características que desea el consumidor, entonces se procede a proponer alternativas para trabajar con el desecho del proceso de nixtamalización. Por ejemplo, Valderrama-Bravo *et al.* (2013) trabajaron con una celda de filtración a presión a diferentes condiciones experimentales para separar los sólidos de nejayote utilizando tierra diatomea como coadyuvante de la filtración. Ellos redujeron la concentración de sólidos totales, la turbidez y disminuyó la demanda biológica de oxígeno, entre otros componentes.

El interés de este trabajo fue utilizar la centrifugación como operación unitaria a diferentes niveles de variación que permitiera separar los sólidos de nejayote y disminuir la demanda bioquímica y biológica, debido a que es necesario investigar nuevos métodos para tratar aguas residuales y eficientar los procesos de separación para reutilizar el agua como recurso vital no renovable.



## CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES

### 1.1 Proceso de nixtamalización

La nixtamalización es el proceso más antiguo de la industria alimentaria en México, representativo de la cultura nacional y de suma importancia, porque proporciona una gran variedad de alimentos básicos para la dieta de la población mexicana. Estos productos, están presentes todos los días en su mesa, en cualquier horario del día y en formas tan diversas como variadas dependiendo de la localidad y de la zona geográfica (Trejo-González *et al.*, 1982).

El proceso de nixtamalización se realiza en recipientes de cocción. Consiste en un tratamiento térmico-alkalino que se lleva a cabo en dos etapas. La primera etapa inicia con la cocción de granos de maíz en una solución saturada de hidróxido de calcio, cuya concentración puede variar de 0.5 a 2 % como muestra la Figura 1.1 a. La segunda etapa consiste en el reposo del grano en el líquido de cocción (nejayote) e inmediatamente después, el líquido es drenado de los granos hidratados (nixtamal) de acuerdo a la Figura 1.1 b.

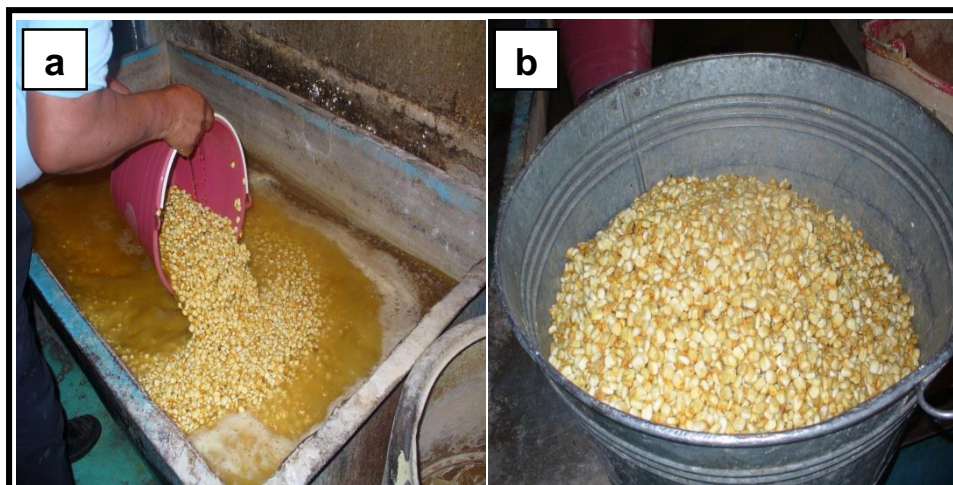


Figura 1.1 a) cocción y reposo de maíz nixtamalizado, b) nixtamal





## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

Durante estas etapas está inmersa una combinación de fenómenos de transporte; transferencia de calor, de momentum y de masa (Gutiérrez-Cortez *et al.*, 2010). El proceso continúa con una secuencia de operaciones unitarias para obtener un granulado que al hidratarse produce masa para elaborar tortillas. Las tortillas son un alimento básico de la dieta diaria en México, su consumo per cápita es de 234 g diarios (Cornejo-Villegas *et al.*, 2010).

En la cocción y reposo de la nixtamalización ocurren cambios al cereal procesado por efecto del tiempo, la temperatura y la concentración de calcio utilizada. La magnitud de las transformaciones dependerá de las condiciones de proceso establecidas (Fernández-Muñoz *et al.*, 2011).

### **1.2 Descripción del proceso de nixtamalización tradicional e industrial**

El proceso de nixtamalización tradicional se presenta en el diagrama de bloques en la Figura 1.2 y se describe etapa por etapa:

# Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote

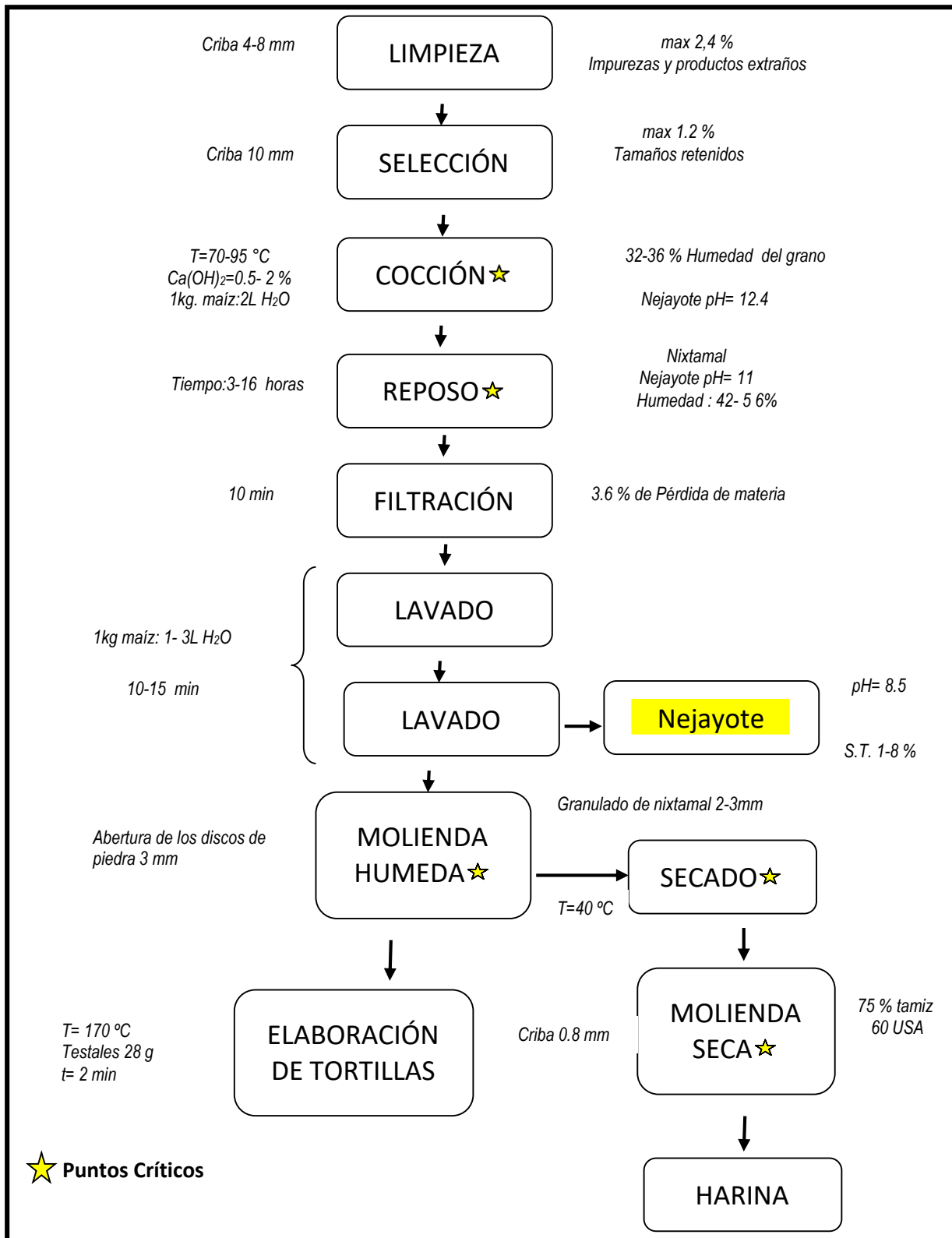


Figura 1.2 Diagrama de bloques de nixtamalización tradicional e industrial



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

**Limpieza:** la Limpieza de los granos de maíz se realiza haciéndolos pasar, a través de cribas móviles metálicas con aberturas de 4.0 mm a 8.0 mm de diámetro interno para eliminar basura, productos extraños y fragmentos de granos. Después se continúa con una selección por tamaño, utilizando una criba de 10.0 mm, y los granos retenidos se recolectan.

**Cocción:** Los granos de maíz se exponen a tratamiento térmico-alcalino, con temperaturas que van desde 70 a 95 °C (en algunos lugares se realiza hasta temperatura de ebullición). Las características químicas de la solución alcalina durante la cocción deben ser tales que la concentración de cal en agua siempre exceda el punto de saturación del hidróxido de calcio. Las concentraciones empleadas durante el proceso son dentro del intervalo de 0.5 a 2.0 % con un pH inicial de 12.4.

El grano de maíz se considera cocido cuando el pericarpio se desprende con facilidad del grano frotándolo con los dedos del operario. Se suspende el calentamiento y concluye la etapa de cocción. En la industria se interrumpe el calentamiento cuando la humedad del grano fue de 32 % dado que su destino es elaboración de harinas. El pH residual del líquido de cocción (nejayote) es de 11. Durante la etapa de cocimiento el maíz se mezcla durante un periodo de 20 segundos cada 10 minutos, para homogenizar el líquido de cocimiento y los sólidos que tienden a sedimentarse (Trejo-González *et al.*, 1982). Las cantidades de maíz-agua son variables, pero generalmente por cada kg de maíz se utiliza un litro de agua y se vierten en el tanque de cocción junto con el hidróxido de calcio. El tiempo de cocción depende de las características del pericarpio de la variedad de maíz utilizada (Gutiérrez-Cortez *et al.*, 2010).

**Reposo:** En esta etapa, ya sin el calentamiento, se deja reposar el grano en su medio de cocción (nejayote), en el mismo tanque con la solución caliente, por un tiempo que puede variar desde 3-16 horas. Aquí ya no se mezcla el nejayote con



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

los granos, la temperatura va descendiendo poco a poco. Al conjunto de granos hidratados y reposados se le conoce como nixtamal. A simple vista se puede observar que la solución va cambiando su viscosidad y su color, debido a los sólidos que se han desprendido de los granos de maíz.

La mayoría de los investigadores coinciden en que en esta etapa se promueven los principales cambios al maíz, porque el agua y los iones de calcio han penetrado al interior del grano y hay una importante pérdida de estructuras como son el endospermo, el germen y el pericarpio (Bello *et al.*, 2002; Fernández-Muñoz *et al.*, 2002). La humedad de los granos de maíz se establece en un rango de 54-56 % para la industria nixtamalera al concluir el reposo y para la industria harinera 36-42 % (Salinas y Vázquez, 2003).

**Drenado de nejayote:** Esta etapa de eliminación del nejayote se realiza utilizando una criba de 2 mm durante 10 minutos para eliminar el líquido sobrenadante o nejayote, que tiene un pH aproximado de 11; aquí se presenta una pérdida importante de materia porque se eliminan fracciones de pericarpio con calcio que se había fijado en el grano de maíz durante la cocción y el reposo y fracciones de germen y endospermo (Pflugfelder *et al.*, 1988).

**Lavado:** Generalmente se realizan dos lavados con un volumen de agua que también es muy variable, y va a depender del lugar de donde se procese. Su función es eliminar el exceso de calcio y disminuir el pH del grano. El agua del último lavado deberá tener un pH aproximado de 8.5 en aguas residuales, de otra manera ocasiona un mal sabor en los productos elaborados. La cantidad de agua regularmente utilizada va desde 2 litros por kilogramo de maíz hasta 3 litros por cada uno de los lavados. Las condiciones de lavado son muy importantes dado que el nixtamal (grano tratado) está más hidratado, dependiendo del tiempo en que ha reposado y de que gran parte del pericarpio se ha desprendido, esto implica pérdidas de las partes del grano (Gutiérrez-Cortez *et al.*, 2010).



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

**Molienda húmeda:** La molienda del nixtamal se puede realizar en molinos de martillos, de piedras o de discos, por un efecto de impacto y/o frotamiento. Generalmente el molino de discos de piedra volcánica es preferentemente utilizado para la molienda de nixtamal. Por otro lado, un molino de nixtamal trabaja en circuito abierto ya que no se recircula el material molido al molino. Algunas veces trabaja en circuito cerrado cuando las partículas gruesas molidas son eliminadas en un separador para recircularlas al molino (McCabe, 1991).

Los discos se mantienen con una abertura entre las piedras o elementos molientes de 3 mm y una velocidad de alimentación constante, proporcionada por el dosificador del molino, que es un tornillo sinfín (Gutiérrez-Cortez *et al.*, 2010).

**Tortillas:** Cuando el proceso es tradicional el granulado húmedo se hidrata y se obtiene masa que es moldeada y troquelada para elaboración de tortillas, las cuales se cocen a temperaturas 220 - 270 °C (Cárdenas, 2014).

**Secado:** La masa del molino se descarga en una tolva de alimentación múltiple que la distribuye a un sistema de secadores de tambor o tipo flash donde se reduce su humedad al 12 %. El granulado de nixtamal húmedo, se deshidrata en una estufa a una temperatura de 40 °C hasta que la muestra alcanza una humedad del 12 %. Al término del secado se coloca en tolvas (Báez-Ramírez, y Martínez-Borrego, 1990).

**Molienda seca:** Las muestras de granulado ya secas se pulverizan en un molino de martillos fijos con elementos molientes estriados (Pulvex, modelo 600). Para tal efecto se utiliza un dosificador para la alimentación de la materia prima al molino, se coloca una criba a la salida de 0.8 mm asegurando con esto la granulometría deseada para harinas de maíz, la cual el 75 % debe pasar por el tamiz 60 USA (Rooney y Serna-Saldívar; 1987; NMX-F-046-S-1980).



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

**Harinas:** El material secado pasa a los cernidores para separar las partículas gruesas de las finas. Las gruesas retornan a los molinos, y las finas constituyen el producto final (harina) (Rooney y Serna-Saldívar, 1987).

**Envasado:** La harina es envasada en México en tres presentaciones básicas: paquetes de 1 kg en ventas al menudeo para el consumo doméstico y sacos de 20 a 40 kg en ventas al mayoreo. El material de empaque empleado, en todos los casos, es papel en forma de doble envase. Una tercera presentación es la de los paquetes consistentes de 10 a 20 unidades de 1 kg (Báez-Ramírez y Martínez-Borrego, 1990).

### **1.3 Transformaciones fisicoquímicas durante la nixtamalización del maíz**

Cada una de las estructuras mayoritarias del maíz es afectada de distinta forma, puesto que sus componentes químicos interactúan por mecanismos diferentes con el calcio: durante la cocción y el reposo en el pericarpio hay absorción de agua, suavizando y ablandando tejidos celulares, provocando el hinchamiento y por tanto un cambio de volumen del grano (Bakshi y Singh, 1980). Gutiérrez *et al.* (2010) reportaron que al principio del proceso de nixtamalización el pericarpio es impermeable a la solución alcalina y que se presentan cambios morfológicos y estructurales por la combinación de temperatura, solución alcalina y tiempo de reposo, lo que permite la entrada de agua y calcio a las estructuras del grano, ya que el pericarpio gobierna la difusión. El álcali actúa sobre los componentes de la pared celular modificándola y degradándola, a su vez cambia la permeabilidad del pericarpio.

Cuando se degrada el pericarpio, primero se presenta la disolución de sólidos solubles como son las gomas de la capa más externa del pericarpio o pectinas, después las fracciones de hemicelulosa y lignina se desprenden, estos sólidos insolubles se depositan en el nejayote, modificando su viscosidad al formarse una suspensión, que con el tiempo sedimenta fracciones de calcio y de otros



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

componentes del grano. Los grupos ácidos urónicos de la hemicelulosa son neutralizados por el hidróxido de calcio, se retiene calcio en forma de sales con el ácido poliurónico enlazado con grupos fenólicos derivados de la lignina, los cuales se oxidan en el medio básico, otorgándole un color no deseable a los productos tratados (González *et al.*, 2004). Una alta concentración de calcio forma compuestos amarillentos, la intensidad del color está relacionada con los pigmentos carotenoides y flavonoides, al hincharse el grano y procesarse se afecta a la matriz fibrosa formada de hemicelulosa-lignina. Por último, hay una lixiviación parcial del pericarpio en el nejayote, líquido donde se llevó a cabo la cocción, por lo tanto, existe una pérdida importante de materia que incluye fracciones de componentes estructurales del maíz como son: pericarpio, germen, endospermo, fibra dietética, carotenoides, fósforo y calcio.

Las pérdidas de materia pueden variar de 1.08 hasta 6.55 % en peso en el grano, dependiendo de la temperatura de cocimiento del grano, de la concentración inicial de hidróxido de calcio, del tiempo en que reposa el grano en su solución, de la variedad de maíz y de la técnica de lavado utilizada (Serna-Saldívar *et al.*, 1990; Sahai *et al.*, 2002; Zazueta *et al.*, 2002; Rojas-Molina *et al.*, 2009). Se ha reportado que el pericarpio es la estructura que retiene la mayor cantidad de calcio. Sin embargo, representa una fracción muy pequeña del total del grano. Una parte de esta estructura, junto con el calcio quedan en el nejayote durante la etapa de reposo (González *et al.*, 2004).

Durante la nixtamalización las proteínas de más bajo peso molecular, localizadas en el germen, alteran los patrones de solubilidad y parcialmente pasan una parte también al nejayote. Otro de los componentes del germen más susceptibles a sufrir transformaciones durante el proceso de nixtamalización y que al mismo tiempo fija calcio, son los lípidos. En un medio alcalino como en la nixtamalización ocurre la hidrólisis de las grasas a través del mecanismo conocido como saponificación, es decir la formación de sales de ácidos grasos y glicerina. Se ha



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

reportado que el germen retiene cuatro veces más calcio que el endospermo, la razón calcio-fósforo se incrementa significativamente, lo cual favorece el valor nutricional de la tortilla y se acerca a la proporción requerida de estos macro elementos (Gutiérrez *et al.*, 2007).

En el endospermo se presentan gránulos de almidón que pueden estar parcialmente gelatinizados, sin gelatinizar o bien completamente gelatinizados. Estos cambios suceden durante la nixtamalización del maíz en sus etapas de cocimiento, reposo y molienda. El almidón de maíz inicia la gelatinización a una temperatura de 68 °C (Bello *et al.*, 2002; Rojas-Molina *et al.*, 2007).

Los gránulos gelatinizados funcionan como pegamento en la masa. El pericarpio remanente, que ha sido transformado en gomas solubles, es el componente que da cohesividad a la masa; el pH alcalino y el calor provocan rompimientos de algunos puentes de hidrógeno, además de la disociación de los grupos hidroxilo en las unidades de glucosa de las cadenas de amilosa y de amilopectina, lo que lleva a obtener polímeros con una carga negativa y que puede formar puentes de calcio, formándose una red continua que permite que la masa desarrolle flexibilidad, con lo que disminuye la retrogradación del almidón (Bello *et al.*, 2002). Un almidón completamente gelatinizado durante el proceso, es ocasionado por un tiempo de cocimiento excesivo y producen masas pegajosas, que son difíciles de manejar. Por otro lado, tiempos de cocimientos menores producen masas que no presentarán la característica de cohesividad. Se libera niacina y se disuelve parte de las proteínas que rodean a los gránulos de almidón que están contenidas en forma de cuerpos protéicos discretos en una de la matriz que rodea a los paquetes de almidón (Bressani y Billeb, 2001).

La proteína prolamina, o zeina, es típica en la zona del endospermo, tiene poca solubilidad en agua y sus puentes disulfuro no se rompen en condiciones alcalinas, lo cual puede explicar que esta proteína no es determinante para que





## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

desarrolle la flexibilidad de la masa (Badui, 1993). El tratamiento térmico–alcalino modifica el contenido de lisina y de triptófano en función del tiempo de reposo. Ambos aminoácidos esenciales están contenidos en la fracción de albúminas y globulinas (Rojas-Molina *et al.*, 2008).

La susceptibilidad enzimática del almidón se incrementa ligeramente conforme se va cocinando el maíz con la cal. Sin embargo, el mayor incremento se presenta durante la molienda y durante el horneado. Por otro lado, el pH de las cadenas de glucosa de la amilosa y la amilopectina aumenta, lo que ayuda a ser más lenta la retrogradación (recristalización del almidón) y a mantener las tortillas frescas. Se han examinado los gránulos de almidón de maíz nativo y se han comparado con los gránulos de almidón de maíz nixtamalizado en microscopio con luz polarizada y la mayoría de ellos exhiben una birrefringencia, sin embargo, la cruz de malta es menos clara y más ancha que la de los gránulos de almidón naturales. Por lo tanto, la estructura del gránulo de almidón nativo se descompone parcialmente durante la cocción del maíz, lo cual queda confirmado por alteraciones en la cristalinidad según un patrón de Rayos X establecido, es decir, se presenta menos organizado comparado con el maíz crudo o nativo. No obstante, las alteraciones en la cristalinidad del almidón ocasionada por la cocción, se restauran en cierto tiempo parcialmente, por una recristalización o recocido durante el remojo. La reasociación de las moléculas de almidón, puede afectar en forma considerable las propiedades reológicas subsecuentes de los productos elaborados con la masa nixtamalizada (Gómez *et al.*, 1991).

Durante el proceso de nixtamalización, en el endospermo se saponifican los lípidos presentes en la periferia, en la capa de la aleurona, formando sales de calcio con los ácidos grasos. Esta presencia de sales disminuye la temperatura a la cual inicia la gelatinización. Hay un hinchamiento de las regiones amorfas (amilosa) del almidón, debido a la difusión y absorción de agua, luego una ruptura de las estructuras granulares debido a la hidratación a medida que también



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

aumenta la gelatinización, después ocurre una disolución de las moléculas de amilosa. También se forman compuestos de inclusión con ácidos grasos y la amilosa gelatinizada se cristaliza como amilosa tipo V, el progresivo hinchamiento de los gránulos de almidón produce la desintegración total de la estructura granular. Este desorden estructural genera la exudación o gelación de la amilosa (González *et al.*, 2004; Cornejo-Villegas *et al.*, 2013).

En este complejo sistema disperso que se formó dentro del endospermo, la reasociación de la amilosa y la amilopectina depende del tiempo y de la temperatura, lo que constantemente repercute en el cambio del contenido y la distribución del agua. Esto se refleja en las propiedades reológicas y texturales de los productos elaborados a partir de masa o harina, a esto se conoce como capacidad de absorción de agua. Por lo tanto, la distribución uniforme de agua en el nixtamal se consigue durante la etapa de reposo, que es cuando ha migrado una mayor cantidad de agua a las primeras capas del endospermo y se ha generalizado el fenómeno de gelatinización en las capas más externas del endospermo (Pineda-Gómez *et al.*, 2012).

Durante la molienda húmeda del nixtamal para producir masa, los gránulos de almidón también se gelatinizan debido a la fricción que se genera en las dos piedras molidoras. En algunos casos, la molienda puede incrementar la temperatura de la masa en un rango de 26 a 52 °C. Aproximadamente entre un 4 y 7 % de los gránulos de almidón pierden completamente la birrefringencia durante la cocción con cal, el reposo y la molienda. Muchos de los gránulos de almidón tienen una forma irregular y con frecuencia sólo una fracción (menos del 60 al 70 %) de un gránulo individual presenta birrefringencia. Estos cambios pequeños pero importantes en la fracción del almidón de maíz, modifican las propiedades de pasta del almidón. Así mismo promueven que exista una masa con características reológicas y mecánicas necesarias para ser manejable por un operario o por un equipo (Cornejo-Villegas *et al.*, 2010).



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

Alrededor del 5-9 % del almidón gelatinizado forma el pegamento que ayuda a que exista una red continua entre los gránulos de almidón libres y los componentes que forman la masa, puesto que muchos gránulos no se modifican, otros gelatinizan parcialmente y otros completamente (Bello *et al.*, 2002).

El uso de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  es fundamental para conseguir las propiedades mencionadas en las masas. Con otros álcalis como hidróxido de sodio o potasio que contienen iones monovalentes, no se obtienen buenos resultados en cuanto a propiedades plásticas de la tortilla y de otros productos nixtamalizados (Fennema, 2000).

Una adecuada hidratación de los componentes del maíz, un cuidadoso perfil térmico y una buena técnica de lavado, van a proporcionarle las características reológicas necesarias a la masa como son viscosidad, pegosidad, cohesión, elasticidad, etc. Muchos de estos cambios tienen una marcada influencia sobre las propiedades texturales de los productos finales como son la rollabilidad de la tortilla, textura, color, olor y sabor, entre otros (Bello *et al.*, 2002).

La nixtamalización favorece algunos parámetros nutricionales de este cereal y afecta otros. Entre los efectos negativos de la nixtamalización se encuentran la pérdida de vitaminas que van desde un 30 hasta un 70 % durante la cocción, reposo y lavado de maíz. También se pierde tiamina, carotenoides, proteínas, grasas, minerales y parte de la fibra dietética localizada en el pericarpio que es muy importante para darle propiedades mecánicas a la masa y necesaria para la digestión en el organismo humano.

Entre los efectos positivos de la nixtamalización puede citarse, además del mejoramiento de las características reológicas, un aumento en la relación isoleucina-leucina, que son dos aminoácidos indispensables en la alimentación humana. Durante la cocción alcalina se rompe la ligadura de niacina a la estructura del grano y este importante nutriente se hace biodisponible. Este hecho se ha empleado para explicar la ausencia de la enfermedad conocida como



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

Pelagra en los pueblos prehispánicos que emplearon éste método para el proceso de maíz. La nixtamalización es responsable también de la disminución de contaminación por micotoxinas como fumonisinas (producidas por varias especies de hongos *Fusarium*) y de la reducción significativa de los contenidos de aflatoxinas o agentes tóxicos y hepatocarcinogénicos, producidos por los hongos *Aspergillus parasiticus* y *A. flavus* (Bressani *et al.*, 2001). Aunque se ha encontrado que se reactivan las aflatoxinas con un pH ácido a neutro.

Existe también un notable incremento de calcio en el maíz nixtamalizado, unas 20 veces mayor que él no tratado. Este macro elemento es indispensable en la nutrición humana, que además es la única fuente de este mineral en zonas marginadas, donde una insuficiente ingestión puede dar lugar a raquitismo, osteomalacia, osteoporosis, cáncer de colon y de la glándula mamaria, así como hipertensión arterial, además de que es un constituyente fundamental de los huesos y dientes. Por otro lado, el calcio iónico participa en funciones tales como relajación-contracción del corazón, contracción muscular, coagulación sanguínea, entre otras (Oceguera, 1999).

La cantidad de calcio fijada en el nixtamal (maíz nixtamalizado) depende de las condiciones de proceso trabajadas. En México dichas condiciones no están estandarizadas y se permite una amplia gama de temperaturas, tiempos de cocción y de reposo, así como diferentes concentraciones de hidróxido de calcio utilizadas (Gutiérrez *et al.*, 2010).

Así como el proceso de nixtamalización provoca importantes cambios fisicoquímicos al maíz que mejoran sus características nutrimentales y funcionales, también genera una cantidad considerable de desechos muy contaminantes o aguas residuales conocidos como nejayote. Este nejayote es un líquido muy contaminado, que forma costras en los recipientes donde es cocido y reposado el maíz. Dicho líquido es eliminado durante el drenado y es depositado



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

en el drenaje local generalmente, por falta de una planta de tratamiento de aguas residuales de los molinos y las plantas procesadoras.

### **1.4 Nejayote líquido de la nixtamalización**

Durante el proceso de nixtamalización, el maíz es cocido en una solución saturada de hidróxido de calcio. Posteriormente, se suspende el calentamiento y los granos permanecen en remojo en el mismo líquido por algunas horas en un intervalo de 3-12 horas, esta etapa se conoce como reposo de nixtamal (Fernández-Muñoz *et al.*, 2006). La etapa de cocimiento y reposo se realiza en recipientes, como se observa en la Figura 1.3 a y 1.3 b permiten la remoción del pericarpio, mediante la combinación de temperatura y tiempo. Fracciones de pericarpio se desprenden del grano y se depositan en el líquido de cocimiento, esto permite que se presente mayor difusión de agua y calcio al interior del maíz debido a que hay un gradiente de concentración de calcio, lo que promueve cambios fisicoquímicos en las estructuras internas del grano, las cuales son determinantes para que los gránulos de almidón localizados en endospermo inicien la gelatinización (Gutiérrez-Cortez *et al.*, 2010).

El calcio facilita la remoción del pericarpio, controla la actividad microbiana, disminuye la gelatinización de los gránulos de almidón, aumenta el valor nutricional, imparte sabor y alarga la vida útil a la tortilla (Hallaver, 1987).



## Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote

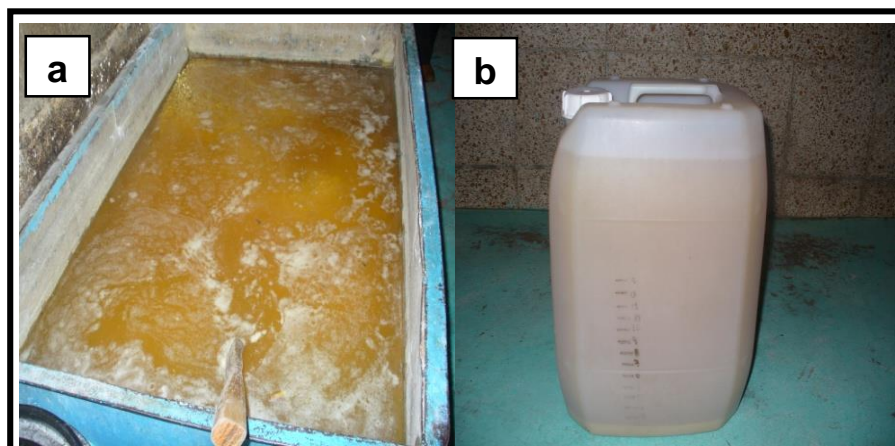


Figura 1.3 a) Nejayote, b) recolección de nejayote de una tortillería

Rojas-Molina *et al.* (2009) Reportaron que la cantidad de sólidos presentes en el nejayote dependen del tiempo de reposo y de la temperatura utilizada. Así mismo la pérdida de materia seca aumenta al aumentar la temperatura de proceso y la concentración de sólidos en el nejayote es mayor.

Pflugfelder *et al.* (1988) describió al nejayote como un agua de desecho altamente contaminante, la cual contiene altas concentraciones de sólidos solubles e insolubles, aproximadamente el 50 % son sólidos insolubles, de los cuales el 64 % son polisacáridos, 20 % almidón y 1.4 % de proteína.

Adicionalmente, el nejayote tiene un alto contenido de cenizas de un 23.15 %, dentro de los que destaca el calcio con un contenido de 7.13 a 13.06 % en promedio y residuos de fracción de partes del grano de maíz; germen, endospermo y pericarpio (Velazco-Martínez *et al.*, 1997).

Rosentrater (2006) explicó que se considera como un agua de desecho por que los efluentes generados durante el proceso de nixtamalización son potencialmente dañinos para el medio ambiente. Esto debido a su composición química y un pH altamente alcalino, su demanda química de oxígeno de 1670-21280 mgO<sub>2</sub>/L, total



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

de sólidos suspendidos de 2540mg/L, demanda biológica de oxígeno 190-7875mgO<sub>2</sub>/L, y alcalinidad total de 180-3260 mg CaCO<sub>3</sub>.

Niño-Medina *et al.* (2009) Reportó que en una nixtamalización tradicional, para procesar 50 kg de maíz se requieren 75 litros de agua, lo cual genera una cantidad equivalente de agua contaminada, mientras que Salmeron-Alcocer *et al.* (2003) calcularon que para 600 ton de maíz/día, la cual es la capacidad de una planta, se generan de 1500 a 2000 m<sup>3</sup> de nejayote.

La tarea es ardua para el tratamiento del nejayote. Ramírez-Romero (2009) preocupado por el excesivo volumen y de la cantidad de agua residual, ha reciclado el nejayote para volver a nixtamalizar con él. Un primer ejercicio para dar tratamiento al nejayote fue sedimentarlo para separar la parte de sólidos formada por almidones, proteína, el excedente de cal y la cubierta del grano, e introducirla en la molienda.

El análisis sensorial de las tortillas obtenidas con esa masa fue excelente, el sabor no cambió y aumentó el rendimiento de la masa. Ellos pretendían diversificar los usos del nejayote, ya que representa un primer paso a la sustentabilidad en la producción de nixtamal en molinos tradicionales, pero esto representa una alta carga de aflatoxinas continúa a nuevo nixtamal y a los productos obtenidos.

Por otro lado, Valderrama-Bravo *et al.* (2012, 2013) trabajaron con una celda de filtración a presión, a diferentes condiciones experimentales para separar los sólidos de nejayote utilizando tierra diatomea como coadyuvante de la filtración. Ellos redujeron la concentración de sólidos totales, la turbidez y la demanda biológica de oxígeno, entre otros, lo cual se presenta en la tabla 1.1.



**Tabla 1.1 Composición fisicoquímica del nejayote**

Contenido	Nejayote	Nejayote filtrado
% Sólidos totales	2.28±0.18	1.12±0.11
% Humedad	97.72±0.26	98.09±0.21
pH	11.39±0.49	10.53±0.32
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1003.54±2.45	991.01±1.91
Viscosidad (Pa s)	0.002301±4.3E-05	0.002097±5.2E-05
% Lípidos	0.008±0.002	0.007±0.003
% Cenizas	0.767±0.014	0.3345±0.0182
% Proteína cruda	0.113±0.007	0.112±0.027
% Fibra	0.581±0.013	0.271±0.014
% Carbohidratos	0.862±0.016	0.379±0.031
Calcio (mg/L)	1526.21±26.53	712.40±11.53
Conductividad eléctrica (µS/cm)	4510.12±14.14	4030.23±11.10
DBO (mg/L)*	14218.75±309.36	6212.25±123.74
DQO (mgO <sub>2</sub> /L)**	40058.14±82.22	21783.68±115.35
Dureza (mg/L)	5768.67±0.46	3847.48±15.20
Sólidos sedimentados (µL/L)	>100,000	<100
Sólidos totales suspendidos (mg/L)	8342.5±25.3	140.6±8.7
Turbidez (NTU)	963.3±6.6	5.8±0.2

\*DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) Fuente: Valderrama-Bravo et al. (2012)

\*\* DQO (Demanda Química de Oxígeno)





## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

En realidad, son muy pocas las propuestas de realizar tratamiento de nejayote para recuperar el agua y los sólidos. Sin embargo, los sólidos obtenidos son una mezcla de sólidos totales de nejayote y ayuda filtro. Buscando alternativas de tratamiento del desecho de nixtamal, se ha recurrido a la filtración a presión, la sedimentación, principalmente con alternativa de destinar los sólidos por su alto contenido de calcio y el líquido filtrado obtenido, ambos para ser utilizados para otros procesos. Sin embargo, no ha sido totalmente exitosa la separación de los sólidos del filtrado. En esta propuesta se consideró la operación unitaria de centrifugación para el nejayote para aplicar fuerzas de mayores dimensiones que puedan tener mayor eficiencia de separación. Es decir, mejor calidad en el filtrado.

Por otro lado, la industria molinero tortillera tira al drenaje todo el desecho, porque no cuenta con plantas de tratamiento de agua. Por lo que se generan al rededor 250 toneladas de sólidos de maíz, esto equivale a la basura diaria de 4 millones de personas, además de 32 toneladas de cal y 10,000 m<sup>3</sup> de agua caliente. Esto representa una problemática importante, ya que el proceso tradicional de nixtamalización es de mayor escala que el proceso industrial y en nuestros días la regulación del tratamiento de nejayote se aplica únicamente para la industria harinera (Valderrama-Bravo, 2012).

### **1.5 Importancia del tratamiento de aguas residuales**

El agua es un recurso indispensable para el desarrollo de cualquier actividad, ya sea industrial, agrícola y urbana, y su uso está relacionado con el crecimiento económico y social del país.

Con el propósito de realizar un manejo sustentable del recurso a futuro, es necesario que todos los ciudadanos se involucren en la toma de decisiones para el manejo responsable de este recurso (C.N.A., 2015).

La contaminación del agua es uno de los más graves problemas ambientales a los que la naturaleza se enfrenta actualmente. Cada día vertemos a los ríos y lagos



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

toneladas de desechos en forma de basura o como agua residual, ocasionando la contaminación del agua que en algún momento fue cristalina natural. La contaminación causada por los efluentes domésticos, la industria, la deforestación, los cambios del uso del suelo y la actividad minera. Son actividades que están reduciendo notablemente la disponibilidad de agua utilizable en el mundo.

El vertido de las aguas residuales crudas a los cuerpos de agua contribuye de forma importante a la contaminación ambiental del país, así como al bienestar de su población. Las aguas residuales, producto de actividades domésticas, a menudo contiene heces, orina y residuos de lavandería como principales contaminantes, es por ello que no es difícil establecer la relación entre este tipo de contaminación y la salud humana y ambiental (C.N.A., 2015).

Según estudios realizados, el uso de agua contaminada ocasiona principalmente enfermedades gastrointestinales que, en niños menores, es una de las principales causas de muerte (C.N.A., 2015).

Actualmente, una cuarta parte de la población mundial, es decir, mil quinientos millones de personas, sufren escasez severa de agua. Estas alarmantes cifras nos comprometen a adoptar medidas para reducir la contaminación que a diario vertemos en los cuerpos de agua. Para ello es importante tomar medidas para reducir el consumo de agua en las actividades que diariamente se realizan, así como el cambio en el uso de sustancias tóxicas y no biodegradables que se vierten en las aguas residuales industriales y domésticas, por sustancias biodegradables y más amigables con el ambiente.

El efluente de aguas residuales que cada ente generador descarga debe ser tratado con el objeto de mejorar su calidad, removiendo de ella una parte de los contaminantes que transporta. Esto se consigue mediante una planta de



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

tratamiento de aguas residuales o con técnicas químicas o equipos, que pueden ser; sedimentadores, filtros, centrifugas, entre otros (C.N.A., 2015).

Sea cual fuere la actividad, las empresas deberían de ser responsables con el medio ambiente y contar con sus respectivas plantas de tratamiento de aguas. Lo mismo debería ocurrir con las casas habitación, de manera que exista una cultura para educar y reeducar al individuo, mejorando la calidad del agua que se vierte a los cuerpos receptores y disminuyendo de esta forma el impacto negativo que las aguas residuales crudas provocan en el medio ambiente y en la salud de los habitantes de la tierra (C.N.A., 2015).

En México es grave el problema del nejayote si se considera que son nueve mil molinos de nixtamal y que cada uno tira alrededor de 1.5 metros cúbicos diarios de agua de nejayote (C.N.A., 2015).

En realidad, son muy pocas las propuestas de realizar tratamiento de nejayote para recuperar el agua y los sólidos. Aunado a que los molinos de nixtamal y la mayor parte de las tortillerías no están dispuestos a invertir y no tienen ninguna exigencia de tratar el agua que utilizan. Sin embargo, buscando alternativas de tratamiento de desecho de nixtamal, para destinar los sólidos por su alto contenido de calcio y el líquido filtrado obtenido para otros procesos, se ha considerado a la operación unitaria de centrifugación para tratar nejayote. Con el tratamiento no solo se consigue evitar que se viertan estos contaminantes al medio, sino que también se logra reducir el consumo de agua potable, al utilizar repetidamente la misma agua tratada en diferentes procesos (C.N.A., 2015).



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

### **1.6 Operación unitaria de centrifugación**

Es la operación unitaria que consiste en la separación de sistemas heterogéneos macroscópicos y microscópicos; tales como suspensiones, emulsiones, mezclas (líquido-líquido, líquido-sólido) con una diferencia de densidad y presencia de pequeñas partículas, gotas o burbujas, por acción de la aceleración centrífuga en el seno de un campo de fuerza centrífuga (Perry y Chilton, 1998).

#### **1.6.1 Fundamento**

Los separadores centrífugos se basan en el principio conocido de que un objeto que gira con gran velocidad en torno a un punto central, a una distancia radial constante desde dicho punto, produce una fuerza que actúa sobre dicho objeto. El objeto gira en torno a un eje que cambia de dirección constantemente, con lo cual se produce una aceleración aún cuando la velocidad rotacional sea constante. Esta fuerza centrípeta está dirigida hacia el centro de rotación. Si el objeto que se hace girar es un recipiente cilíndrico, el contenido de los fluidos y sólidos desarrolla una fuerza igual y opuesta llamada fuerza centrífuga hacia las paredes del recipiente. Ésta causa la sedimentación o precipitación de partículas a través de una capa de líquido o la filtración de un líquido a través de un lecho o torta de filtrado en el interior de una cámara de rotación perforada (Geankoplis, 1998).

El uso de centrifugas aumenta en alto grado las fuerzas que actúan sobre las partículas. Por tanto, las partículas que no se precipitan o lo hacen con mucha lentitud en precipitados por gravedad, casi siempre se pueden separar de los fluidos por medio de fuerzas centrífugas. Estas fuerzas de precipitación de gran magnitud permiten obtener velocidades prácticas con partículas mucho más pequeñas que en los precipitadores por gravedad. Las elevadas fuerzas centrífugas no modifican las velocidades relativas de precipitación de las



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

partículas pequeñas, pero si contrastan los efectos perturbadores del movimiento browniano y de las corrientes de convección libre (Geankoplis, 1998).

Cuando se aplica fuerza centrífuga, el líquido más denso tiende a desplazarse hacia la pared y se conoce como fracción pesada. Al llevarse a cabo la operación, el material más denso tenderá a desplazarse a la periferia de la centrífuga y el material menos denso quedará en la parte central del tazón y saldrá en la tolva superior, mientras que la fase densa saldrá en la tolva inferior. Este tipo de separación es más eficiente a comparación de otros métodos como la filtración, la decantación, la sedimentación, entre otros; ya que en ocasiones ambas fases que se obtienen pueden ser reutilizadas y de este modo traería beneficios y favorecería la producción (McCabe *et al.*, 1991).

### **1.6.2 Teoría de la centrifugación**

Cuando un material es sometido a rotación, se genera una fuerza centrífuga, cuya magnitud depende de la densidad del líquido, el radio de giro y la velocidad angular. La fuerza centrífuga es la que se ejerce sobre un cuerpo cuando éste gira alrededor de un eje. Esta puede acelerar el proceso de sedimentación de partículas que tienen tendencia a hacerlo espontáneamente.

La sedimentación se produce cuando las partículas que se alejan del centro de rotación colisionan con las paredes de la cesta. La efectividad del proceso depende de la velocidad que alcanza la partícula dentro de la centrífuga, en comparación con lo que ocurriría bajo influencia de la gravedad (Earle, 1988).

Cuando una partícula de sólido se mueve a través de un medio continuo, su velocidad se ve afectada por dos fuerzas: Fuerza centrífuga y fuerza centrípeta.



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

Por un lado, la partícula se acelera por la fuerza resultante de la diferencia que existe entre su densidad y la del medio en el cual está sumergida. Por otro lado, existe una fuerza de reacción a la acción anterior que tiende a detener el movimiento de la partícula (Earle, 1988).

Por su parte, la fuerza que se opone al movimiento de la partícula viene definida por la ley de Stokes:

$$F_D = 3\pi\rho\mu v \quad (\text{ec.1})$$

Donde:

$\mu$ : es la viscosidad del medio ( )

$v$ : es la velocidad de la partícula ( )

$\rho$ : densidad de la partícula ( )

### **1.6.3 Ecuaciones empleadas en la Centrifugación:**

La fuerza centrípeta es la fuerza que mantiene un cuerpo girando en su trayectoria circular de acuerdo a la Figura 1.4, la fuerza centrífuga es opuesta a la centrípeta.

La ecuación que las representa es la siguiente:

$$F_c = mv^2/r \quad (\text{ec. 2})$$

Donde:

$v$ : velocidad tangencial de giro (rpm)

$r$ : radio de giro (cm)

$m$ : masa del cuerpo que gira (g)

De acuerdo a la relación entre la velocidad tangencial y la velocidad angular. La ecuación que la representa

$$v = \omega \cdot r \quad (\text{ec. 3})$$



## Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote

Donde

$\omega$ : Es la velocidad angular

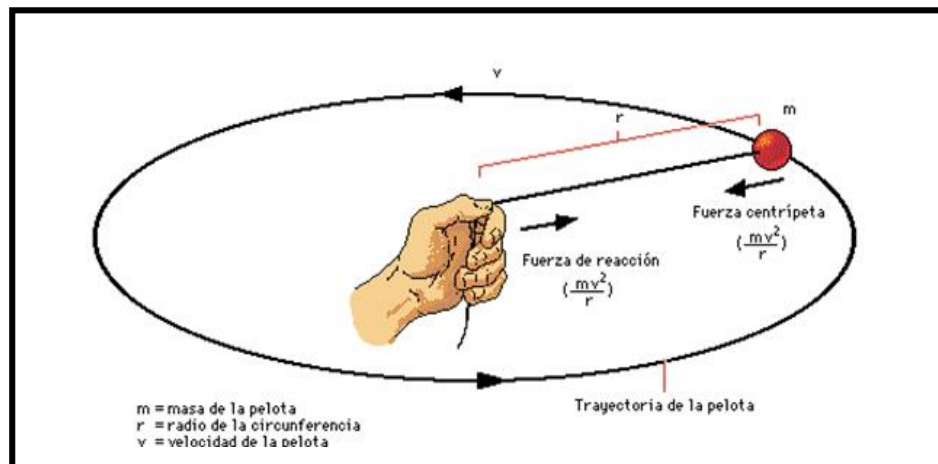
Introduciendo el valor de la velocidad tangencial en relación a la velocidad angular dado por la ecuación 2 en 3, se puede escribir la expresión matemática para la fuerza en la forma:

$$F_c = m \cdot \omega^2 \cdot r$$

(ec. 4)

Donde:

$F_c$ : La fuerza centrífuga



Fuente: Perry y Chilton (1998)

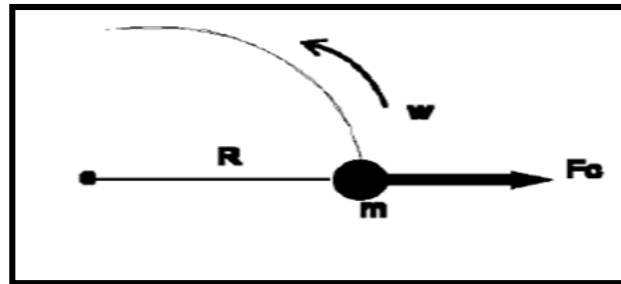
**Figura 1. 4 Fuerza centrífuga y centrípeta**

Todo cuerpo sometido a un movimiento giratorio que sigue una trayectoria circular de radio  $r$ , con una velocidad angular experimenta una fuerza de giro ( $F_c$ ). Esta fuerza se conoce como fuerza centrífuga.

Esta fuerza tiende a alejar al cuerpo del centro de acuerdo a la Figura 1.5



## Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote



Fuente: Earle, (1988)

**Figura 1.5 Fuerza centrífuga**

Todo rotor tiene unas propiedades que determinan las condiciones en que se podrá centrifugar la muestra. Son especialmente importantes el ángulo de giro, el radio mínimo, medio y máximo, y la velocidad máxima de giro. La relación entre la velocidad de giro, medida en revoluciones por minuto (rpm) y la fuerza de aceleración (fuerza centrífuga relativa) a que se somete la muestra (g) se recoge en la expresión siguiente:

$$RCF = 1.118 * 10^{-5} * r * (rpm)^2$$

### 1.6.4 Variables en la operación de centrifugación

En la centrifugación se ven implicadas varias variables, que se pueden considerar independientes, ya que el operador puede manipularlas para sus propios fines:

- **Velocidad angular**

Es la velocidad tangencial del objeto en un instante de tiempo (magnitud vectorial con módulo, dirección y sentido) determinados en ese instante estudiado puede calcularse a partir de la velocidad angular. La centrífuga cuenta con un tablero de control que permite programar la velocidad angular requerida para separar las fracciones ligera y pesada de la suspensión dentro de la centrífuga (Perry y Chilton, 1998).





## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

- **Densidad**

Cuando se someten a separación líquidos inmiscibles, el líquido más denso es desplazado a la pared del recipiente de centrifugación ocupando el menos denso la parte más próxima al eje de rotación.

El grosor de las capas está determinado por las densidades de los líquidos, la diferencia de presión entre las mismas y la velocidad de rotación.

Eliminar el líquido menos denso retenido en una masa de líquido de mayor densidad y el tiempo de residencia en la capa externa deberá ser superior que la capa interna. Ello se consigue reduciendo el radio de la zona neutra.

En la alimentación, el líquido más denso se descarga por la abertura más cercana a la periferia y el más ligero a la abertura cercana al eje (Perry y Chilton, 1998).

- **El tamaño de partícula**

El tamaño de partícula es una variable de la materia prima que puede generarse por el operario de acuerdo a sus necesidades. Este tamaño de partícula puede obtenerse mediante un análisis granulométrico en húmedo o en seco depende del tipo de proceso que se estudiará.

Por su parte se puede observar en el proceso porque:

Las partículas se desplazan hacia la pared del tazón por acción de la fuerza centrífuga. Si el flujo del líquido es turbulento, la velocidad del movimiento viene determinada por las densidades de las partículas y del líquido, viscosidad del líquido y la velocidad de rotación.

Para partículas de un determinado diámetro el tiempo medio de centrifugación de una suspensión es igual al tiempo que tardan las partículas en desplazarse por el líquido hasta alcanzar la pared de la centrífuga. Es decir, las velocidades de flujo pueden ajustarse para retener así en el líquido las partículas de un determinado tamaño (Perry y Chilton, 1998).



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

- **Los tornillos de gravedad**

Son dispositivos que se encuentran colocados en la parte superior de la tapa del tazón, son dos tornillos planos con un orificio en la parte superior. Estos tienen la función de regular la salida de la fase ligera. También pueden retirarse y trabajar sin ellos, lo que representa un orificio mayor en el equipo y un tiempo de residencia de la suspensión menor. Sin embargo, la fracción ligera será de menor calidad y pureza. Otra opción es abrirlos a la mitad sin necesidad de retirarlos del equipo, lo que traerá como consecuencia la mitad del flujo y dejar una selección media de salida de la fracción ligera (Perry y Chilton, 1998).

- **El número de discos**

Los discos son dispositivos de forma cónica con dos orificios en los costados, estos pueden estar en la parte superior o inferior del disco, depende del funcionamiento. Los de orificios arriba son para centrifugar emulsiones o para separar la crema de la leche. Los de orificios abajo para cualquier tipo de suspensión de vegetales o frutos. En los discos es donde se lleva a cabo la separación de las fases contenidas en una suspensión. El número de discos se puede modificar en el equipo y con esto el área trabajada. Esto, siempre y cuando cuente con un accesorio separador de discos (Perry y Chilton, 1998).

- **La velocidad de alimentación**

Se considera así al flujo volumétrico de entrada a la centrífuga, este es posible modificarlo con una válvula de globo ubicada a la salida del tanque alimentador. La velocidad de alimentación influye directamente en el tiempo de residencia del material dentro del tazón (Zeki-Berk, 2009).

### **1.6.5 Clasificación de equipos**

De acuerdo a las aplicaciones específicas de las centrífugas estas se clasifican según:



## Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote

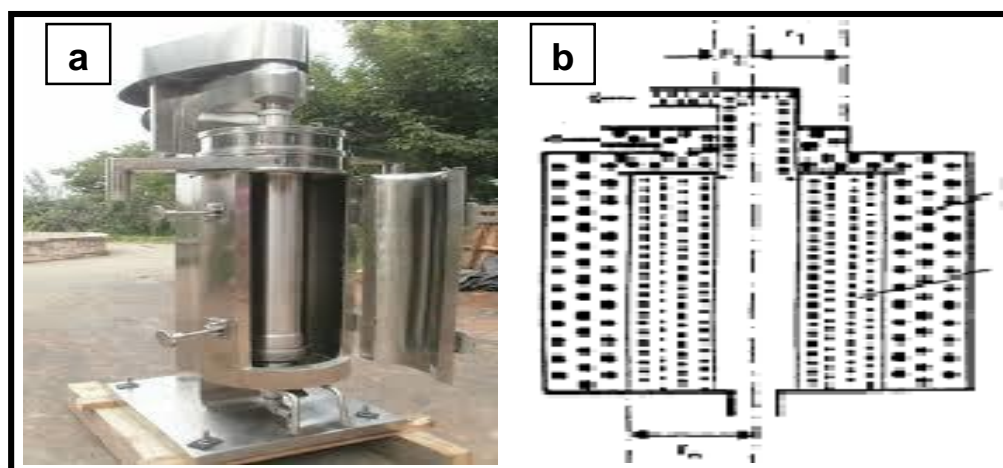
- Aplicaciones**
- Separación de líquidos no miscibles
  - Clarificación de líquidos y eliminación de sólidos a bajas concentraciones
  - Eliminación de sólidos

(Zeki-Berk, 2009)

- **Clasificación por Separación de líquidos no miscibles**

- a) *Centrífuga de tazón tubular.*

Constituida por un tubo vertical, que suele medir 0.1 m de diámetro y 0.75 m de longitud, que rueda a una velocidad de 15,000-50,000 rpm en el interior de una carcasa estacionaria. El líquido a centrifugar (ejemplo: aceite vegetal o animal y jarabes) entran en la centrífuga en forma continua por la base del tazón y al atravesarlo, los dos líquidos se van separando en dos capas concéntricas ocupando el más denso la capa externa. En la Figura 1.6 a se aprecia la centrífuga de tazón tubular y en la Figura 1.6 b su diagrama donde se ejemplifican las fases dentro de ella y sus salidas (Zeki-Berk, 2009).



Fuente: Zeki-Berk (2009)

**Figura 1.6 a) Centrífuga de tazón tubular, b) diagrama de la fase líquida y sólida dentro de la centrífuga**

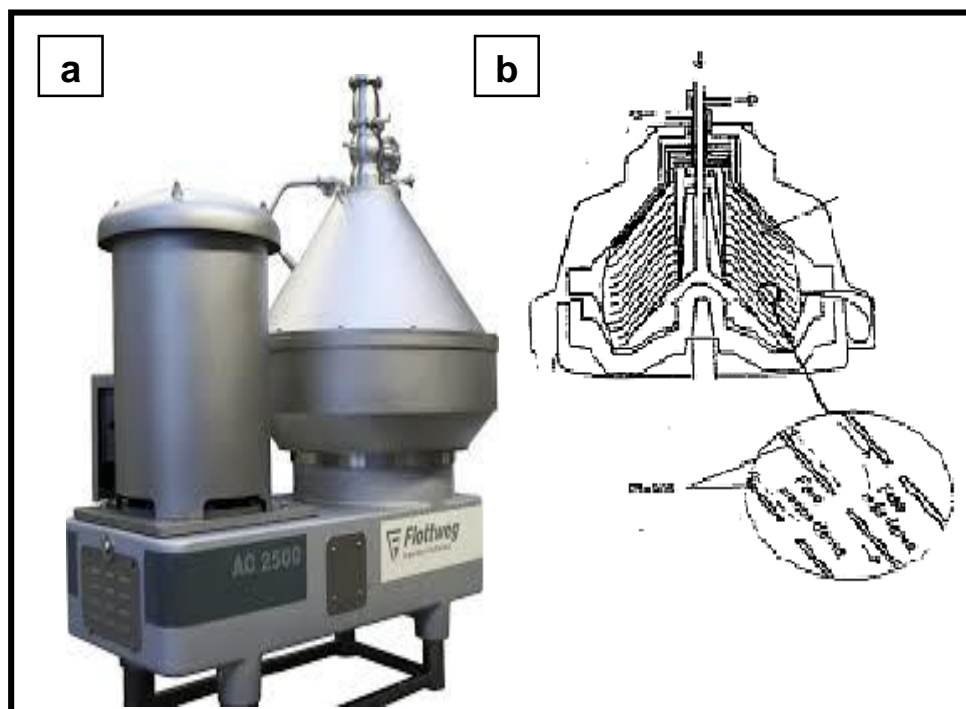


## Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote

En la centrífuga de tazón tubular los dos líquidos caen a sendos receptáculos circulares, saliendo finalmente de la centrífuga a través de las correspondientes tuberías fijas a la carcasa.

### b) Centrífuga de tazón con discos:

El tazón que mide 0.2-1.2 m de diámetro (conos metálicos) concéntricos invertidos (o discos). La separación entre ellas que es fija, es de 0.5-1.27 mm y la velocidad de rotación de 2,000-8,000 rpm. Cada uno de los conos posee un orificio en la misma posición que el siguiente, configurándose así un orificio que atraviesa todos los conos, por el que el líquido fluye durante la centrifugación. En la Figura 1.7 a se muestra la centrífuga de tazón y discos y en la Figura 1.7 b la centrífuga de tazón y discos (Zeki-Berk, 2009).



Fuente: Zeki-Berk, (2009)

Figura 1.7 a) Centrífuga de tazón y discos, b) corte transversal interno de los discos de la centrífuga



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

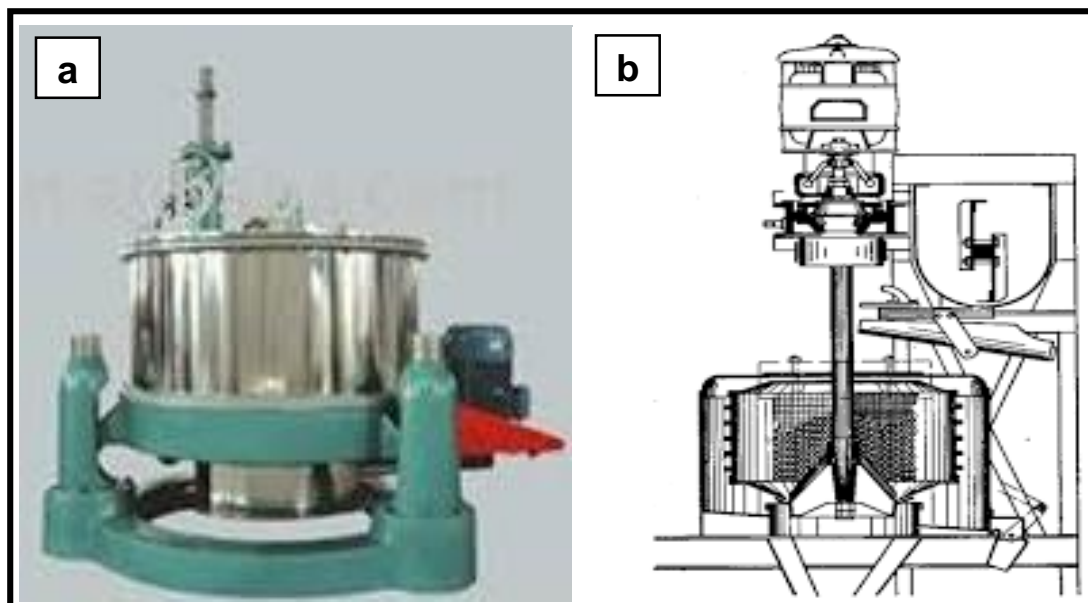
El líquido a centrifugar se introduce por la parte superior y baja a la parte inferior de la pila de conos. Durante la centrifugación la fracción más densa (impulsada por la fuerza centrífuga) se desplaza hacia la pared del tazón por la cara inferior de los discos y la fracción más ligera hacia el eje vertical por la cara superior de los mismos.

Ejemplos de aplicación: desnatado de la leche, clarificación de aceites, extractos de café y diversos jugos (Zeki-Berk, 2009).

- **Clasificación por clarificación de líquidos y la eliminación de sólidos a bajas concentraciones**

### *a) Centrífuga de tazón*

Consiste en un tazón cilíndrico rotatorio de 0.6-1.0 m de diámetro y permite centrifugar líquidos con una concentración máxima de 3 % p/p. En la Figura 1.8 a se muestra la centrífuga de tazón y en la Figura 1.8 b su corte transversal.



*Fuente: Zeki-Berk, (2009)*

**Figura 1.8 a) Centrífuga de tazón, b) corte transversal del tazón**

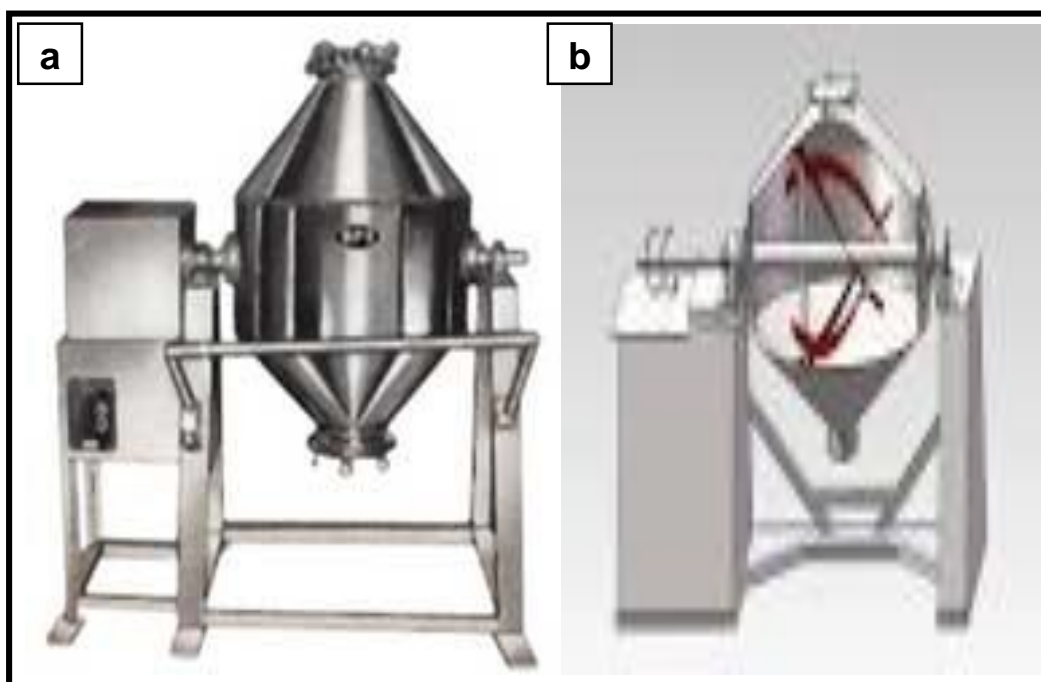


## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

Los sólidos, durante la centrifugación, se acumulan contra la pared del tazón cuando la capa de sólidos acumulada alcanza un grosor predeterminado, el residuo se despega automáticamente mediante agua a presión y se eliminan por un orificio situado en la base del mismo (Zeki-Berk, 2009).

### *b) Centrífuga de desludado automático*

Son centrífugas utilizadas para un contenido más elevado de sólidos. Son semejantes a las de discos, pero en estas el tazón es bicónico y el funcionamiento es continuo. En la Figura 1.9 a se presenta la centrífuga de desludado automático y en la Figura 1.9 b un corte transversal al bicono.



Fuente: Zeki-Berk, (2009)

**Figura 1.9 a) Centrífuga de desludado automático, b) corte transversal de la centrífuga de desludado automático**

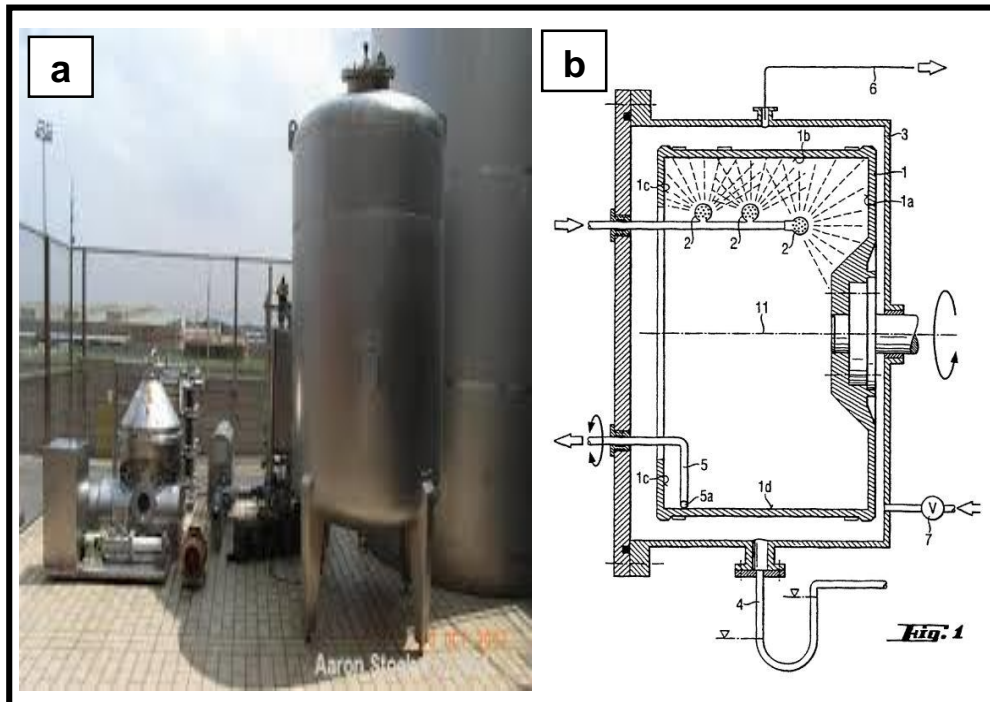
Este tipo de equipo se utiliza para centrifugar aceites, jugos diversos, cerveza y almidones y para recuperar levaduras (Zeki-Berk, 2009).

## Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote



### c) Centrífuga de boquilla

En la centrífuga de boquilla, los sólidos son eliminados continuamente a través de unos pequeños orificios existentes en la periferia del tazón acumulándose en un recipiente de recogida. En la Figura 1.10 a se presenta la centrífuga de deslodado automático y en la Figura 1.10 b su corte transversal.



Fuente: Zeki-Berk, (2009)

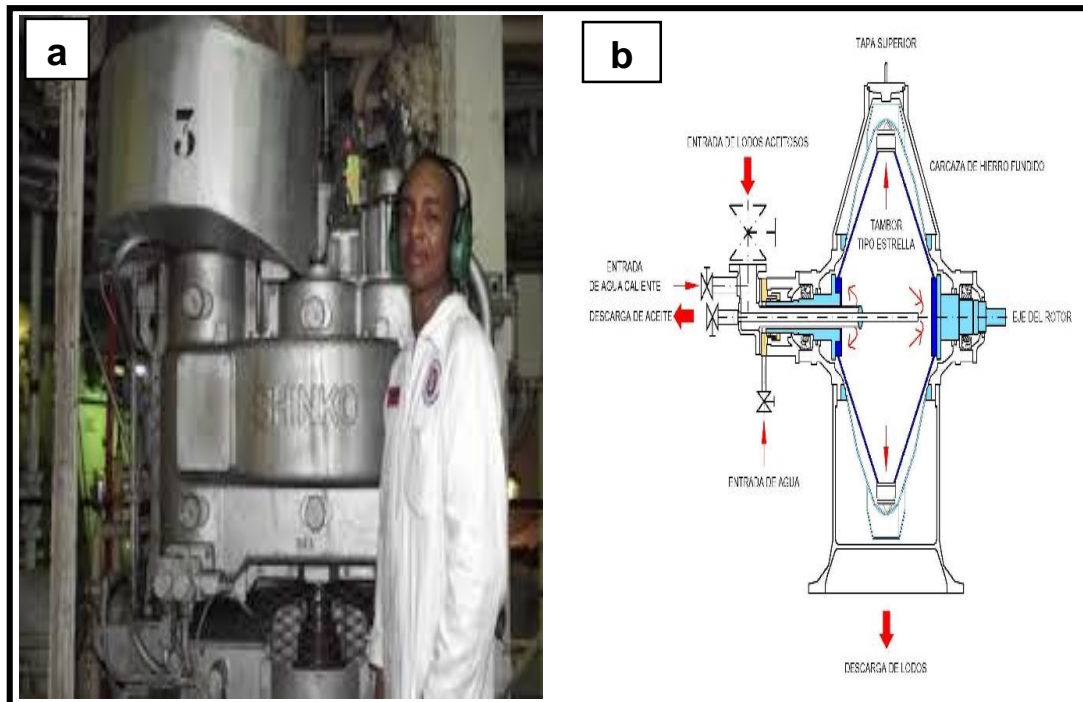
**Figura 1.10 a) Centrífuga de boquilla, b) corte transversal de la centrífuga de boquilla**

Esta centrífuga es similar a la de discos y tazón con la modificación de que los sólidos salen por una boquilla al recipiente contenedor (Zeki-Berk, 2009).

### d) Centrífuga de tipo de válvula

Los orificios poseen unas válvulas que se abren periódicamente durante una fracción de segundo para permitir las evacuaciones de los sólidos acumulados. En la Figura 1.11 a se presenta una centrífuga de válvula y en la Figura 1.11 b un diagrama interno de a centrífuga de válvula.





Fuente: Zeki-Berk, (2009)

Figura 1.11 a) Centrífuga de boquilla, b) corte transversal de la centrífuga de boquilla

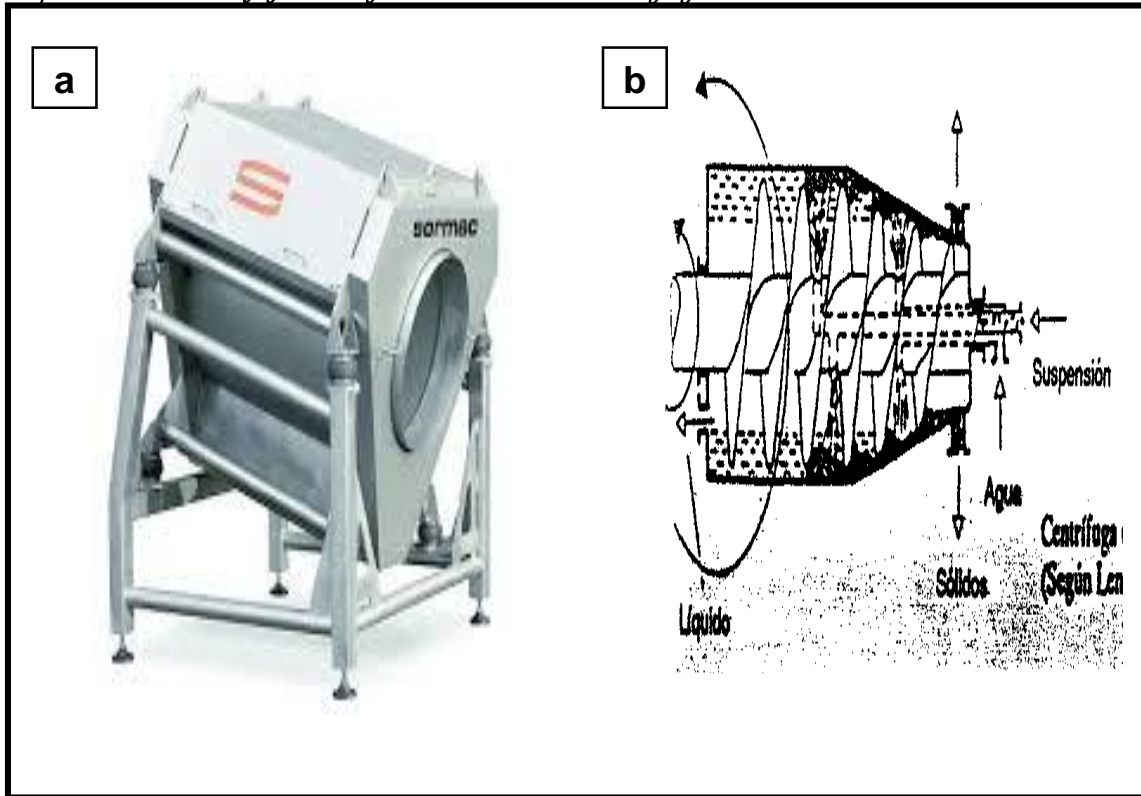
Tiene como ventaja de que en estas centrífugas las pérdidas del líquido a centrifugar y la proporción de líquido eliminado con los sólidos, se reducen mucho (Zeki-Berk, 2009).

- **Clasificación por la eliminación de sólidos**

- a) *Centrífuga de tazón de cinta continua*

En esta centrífuga la velocidad de rotación del tazón de sólidos puede superar hasta 25 rpm, ello hace que los sólidos sean transportados hacia un extremo de la centrífuga, mientras que la fracción líquida se desplaza hacia el extremo opuesto de mayor diámetro. En la Figura 1.12 a se presenta la centrífuga de tazón con cinta continua y en Figura 1.12 b se presenta el esquema interno de la centrífuga de tazón.





Fuente: Zeki-Berk, (2009)

**Figura 1.12 a) Centrífuga de boquilla, b) corte transversal de la centrífuga de boquilla**

Los sólidos separados en estas centrífugas contienen menos fase líquida que los de otras centrífugas. En algunas de estas centrífugas el tazón y el tornillo, están montados verticalmente y la alimentación se efectúa por la parte superior de la carcasa que cubre al tazón (Zeki-Berk, 2009).

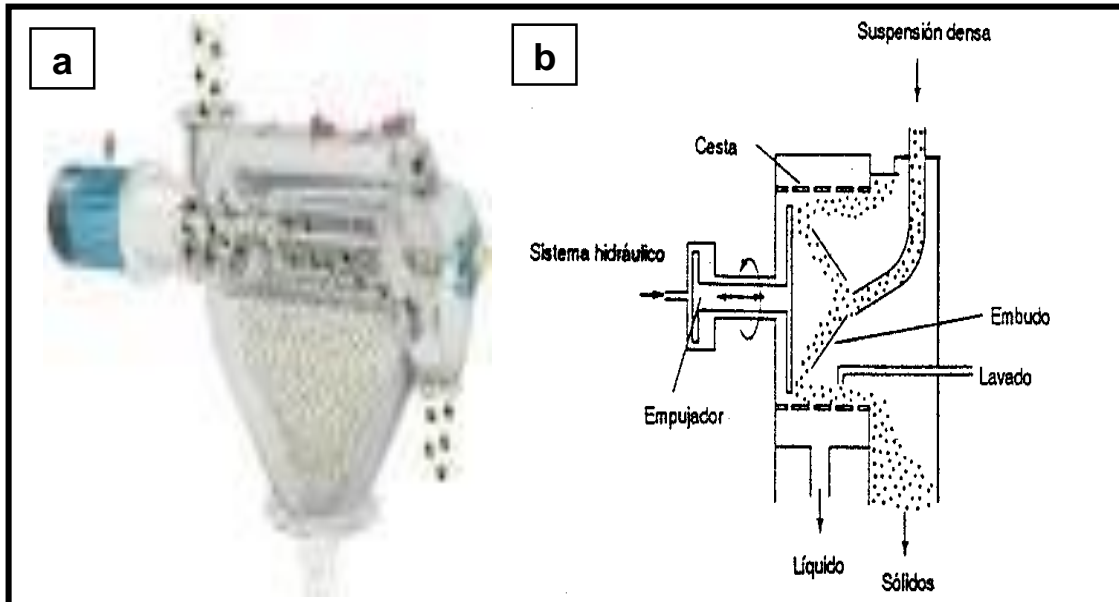
*b) Centrífuga de cinta transportadora de vaivén*

Se utilizan para recuperar sólidos frágiles (ejemplo: cristales). La alimentación se efectúa a través de un cesto rotatorio de 0.3-1.2 m de diámetro mediante un embudo que rueda a la misma velocidad, este dispositivo permite la aceleración gradual del líquido en su entrada, hasta alcanzar la velocidad de rotación del tazón, con lo que se reduce así la fuerza de cillaza generada. En la Figura 1.13 a

## Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote



se presenta la centrífuga de cinta transportadora de vaivén y en la Figura 1.13 b un corte transversal de la misma.



Fuente: Zeki-Berk, (2009).

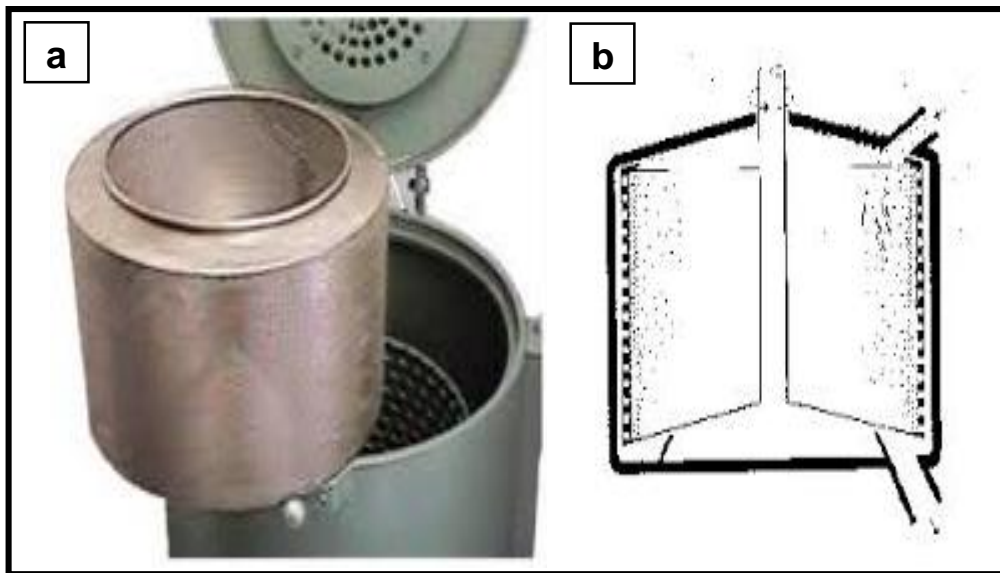
**Figura 1.13 a) Centrífuga de cinta transportadora de vaivén, b) corte transversal de la centrífuga transportadora de vaivén**

El líquido atraviesa las perforaciones de la pared del tazón y cuando la capa de pasta alcanza 5-7.5 cm, es empujada hacia delante unos centímetros mediante un vástago dotado de un movimiento de vaivén.

Poseen la ventaja de que su capacidad de filtración es mayor y de que su consumo es menor y más uniforme (Zeki-Berk, 2009).

### c) Centrífuga de cesto

También llamada centrífuga filtradora. Consiste en un cesto metálico perforado, cubierto por un medio de filtración que rueda a una velocidad de hasta 2,000 rpm. En la Figura 1.14 a se presenta una centrífuga de cesto o canasto y en la Figura 1.14 b un esquema de la misma.



*Fuente: Zeki-Berk, (2009).*

**Figura 1.14 a) Centrífuga de cinta transportadora de vaivén, b) corte transversal de la centrífuga transportadora de vaivén**

La separación se efectúa mediante ciclos controlados automáticamente que duran de 5-30 min dependiendo del material a filtrar.

La separación se produce en tres etapas. En la primera el líquido a filtrar entra lentamente en el tazón en rotación, en la segunda se incrementa la velocidad de rotación y se inicia la separación y en la tercera, en la que la velocidad de rotación se reduce considerablemente, la pasta se elimina por la parte de los orificios y estos se pueden retirar a merced de una cuchilla.

Este tipo de centrífugas son de recuperación de proteínas de animales y vegetales, separación del café, el cacao y las pastas de té y para el deslodado de los aceites (Zeki-Berk, 2009).

### **1.6.6 Características del equipo utilizado en la centrifugación de nejayote.**

La centrífuga de tazón y discos fue utilizada para la separación de sólidos de nejayote. En este tipo de centrífuga una cámara cilíndrica, ancha y relativamente plana gira a velocidad moderada en una montura estacionaria. La cámara es en



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

general accionada desde el fondo. La alimentación se añade corrientemente por la parte superior de la cámara a través de un tubo situado centralmente desde arriba. La cámara contiene cierto número de conos metálicos o discos en este caso 77, colocados muy próximos entre sí, que se conocen por disco que gira con la cámara y están situados uno encima de otro con una separación fija entre ellos, los discos tienen uno o más juegos de agujeros coincidentes que forman canales o tuberías por donde fluye el producto alimentado.

Bajo la acción de la fuerza centrífuga la fase densa se desplaza hacia la pared de la cámara y circula hacia abajo por la parte inferior de los discos, mientras que la fase ligera se desplaza hacia el centro y fluye sobre las caras de los discos. De esta manera los líquidos son separados en capas delgadas, la distancia que cualquier gota de un líquido ha de desplazarse para ser atrapada y extraída en la corriente de salida apropiada es muy pequeña. Tiene lugar un cizallamiento considerable en la interface líquido-líquido entre las corrientes del líquido en contracorriente que puede facilitar la ruptura de cierta clase de emulsiones y mejorar la separación. La eficiencia de separación de una centrífuga de cámara de las mismas dimensiones, pero sin discos girando a velocidad semejante. Los líquidos separados se extraen por medio de un sistema de vertedero y aquí también se puede utilizar discos de gravedad diferente en la salida de la fase densa para controlar la posición de la fase neutra. Algunos aparatos están provistos de medios para introducir la alimentación cerca de la zona neutra sustituyendo los discos del fondo del bloque por agujeros en el radio adecuado. Los diámetros del tazón varían desde 20 cm a 100 cm y la separación entre discos es del orden de 0.05 – 0.12 cm. Un tazón típico de 30 cm de diámetro girando a 6,400 rpm desarrolla una fuerza equivalente a 7,000 veces la de la gravedad. Existen cámaras especiales “herméticas” que permiten trabajar a presiones de 7 kg/cm<sup>2</sup> sobre la atmosférica. Estos equipos son útiles cuando la formación de espuma es un problema, tal como las bebidas carbonatadas, o productos con alta

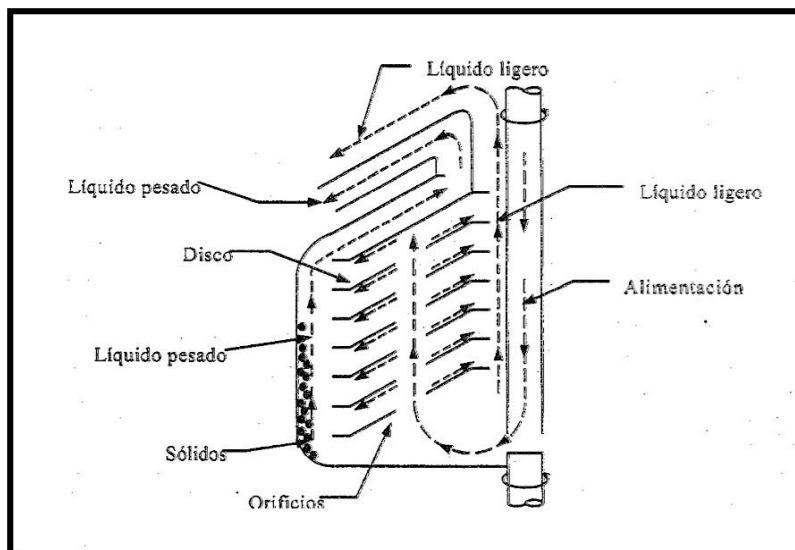


## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

concentración de calcio, uno de ellos es el nejayote o líquido residual de la nixtamalización (Perry y Chilton, 1998).

En la Figura 1.15 se muestran las partes por donde circulan los líquidos entre los discos. Este equipo se utiliza con frecuencia en las separaciones líquido-líquido. La alimentación penetra por el centro hasta el compartimiento por el fondo y se desplaza hacia arriba a través de orificios de alimentación espaciados verticalmente, llenando los espacios entre los discos. Los orificios dividen al conjunto vertical en una sección interior, en la que está presente la mayor parte del líquido ligero, y una sección externa, donde predomina el líquido pesado. Esta línea divisoria es similar a la interfaz de una centrífuga tubular.

El líquido pesado fluye por debajo de la superficie inferior de un disco hasta la periferia del tazón. El líquido ligero fluye sobre la superficie y hacia la salida de la zona interior. Cualquier cantidad pequeña de sólidos pesados que puede existir se desplaza hacia la pared exterior. Se requiere limpieza periódica para extraer los sólidos depositados, de otra manera el tazón se llena de sólidos y la parte baja de la estructura del eje de los discos acumula los sólidos (Zeki-Berk, 2009).



*Fuente: Zeki-Berk (2009)*

**Figura 1.15 Diagrama esquemático de una centrífuga de tazón con discos**



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

Las mezclas introducidas al equipo se someten a la acción de una fuerza centrífuga por efecto del rápido giro en un sistema de referencia en rotación.

Esta fuerza inercial es cientos de veces e incluso miles mayores a la aceleración de la gravedad, la cual causa la sedimentación de las suspensiones utilizadas en la centrífuga (Zeki-Berk, 2009).

El nejayote o desecho líquido de la nixtamalización, tiene una concentración de sólidos menor al 5 %, se encuentra entre 2 y 4 % de sólidos totales y generalmente los tamaños de partícula se encuentran cerca de 250 micrones. Estas son condiciones adecuadas para efectuar separaciones en este tipo de equipo y obtener clarificados con alta pureza.

### **1. 7 La Demanda Química y Bioquímica de oxígeno**

#### **1.7.1 Demanda Química de Oxígeno (D.Q.O.)**

Se define como D.Q.O. de un líquido es la cantidad de oxígeno que los microorganismos, especialmente bacterias (aeróbicas o anaerobias facultativas: *Pseudomonas*, *Escherichia*, *Aerobacter*, *Bacillus*), hongos y plancton, consumen durante la degradación de las sustancias orgánicas contenidas en la muestra. Se expresa en mg/L. Es un parámetro indispensable cuando se necesita determinar el estado o la calidad del agua de ríos, lagos, lagunas o efluentes. Cuanto mayor cantidad de materia orgánica contiene la muestra, más oxígeno necesitan sus microorganismos para oxidarla (degradarla). Es decir, es la cantidad de oxígeno que necesitan los microorganismos para degradar la materia orgánica biodegradable existente en un agua residual. Es por tanto una medida del componente orgánico que puede ser degradado mediante procesos biológicos. (Sawyer y McCarty, 1996).



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

### **1.7.2 La Demanda Química de Oxígeno (DQO<sub>5</sub>)**

Es un parámetro que mide la cantidad de oxígeno consumido al degradar la materia orgánica de una muestra líquida. Es la materia susceptible de ser consumida u oxidada por medios biológicos que contiene una muestra líquida, disuelta o en suspensión.

La diferencia es que los gramos o miligramos de oxígeno se refieren, en el caso de la D.B.O., a los requeridos por la degradación biológica de la materia orgánica; mientras que en el caso de la D.Q.O. representan los necesarios para la degradación química de la materia orgánica (Sawyer y McCarty, 1996).



## **CAPÍTULO II METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

Para resolver el problema en este trabajo: La separación de sólidos de las aguas de nejayote tendrán baja turbidez, alta pureza con una baja cantidad de sólidos. Se plantearon un objetivo general y cuatro objetivos particulares.

### **OBJETIVO GENERAL:**

Evaluar la interacción entre las variables, velocidad de giro y uso de tornillo de gravedad para optimizar condiciones en la operación de centrifugación de nejayote mediante una centrífuga de discos, obteniendo la mejor eficiencia de separación en el clarificado, mayor rendimiento, con la menor concentración de sólidos totales, menor turbidez.

### **Objetivos particulares:**

**Objetivo 1:** Evaluar la influencia de la velocidad de giro en el tiempo de residencia, concentración de sólidos totales, volumen de clarificado obtenido, gasto de energía y turbidez en la operación de centrifugación de nejayote mediante una centrífuga de discos, obteniendo las condiciones óptimas de un clarificado con la mayor eficiencia de separación de fases y el mayor rendimiento.

**Objetivo 2:** Establecer la influencia del uso de tornillo de gravedad en la eficiencia de separación y el rendimiento de aguas residuales de nejayote mediante la evaluación de la turbidez, el gasto de energía y la concentración de sólidos de clarificados obtenidos en una centrífuga de discos, estableciendo las condiciones óptimas de separación.

**Objetivo 3:** Identificar la morfología superficial de la suspensión de nejayote, y clarificado obtenido a condiciones óptimas mediante micrografías tomadas en un microscopio electrónico de barrido al alto vacío (ME-BAV), comparándolas con la morfología y componentes del nejayote sin centrifugar y del clarificado obtenido a las mejores condiciones de operación.





## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

**Objetivo 4:** Determinar la concentración de calcio de la suspensión de nejayote, y clarificado obtenido a condiciones óptimas, mediante espectroscopía de absorción atómica, para compararla con el nejayote sin centrifugar.

**Objetivo 5:** Determinar la Demanda Bioquímica de Oxígeno de la suspensión de nejayote, mediante pruebas químicas, para compararla con el aumento en la Demanda Química de Oxígeno de este componente en las aguas de nejayote centrifugadas a condiciones óptimas de proceso.

En la Figura 2.1 se presenta el cuadro metodológico. Este tiene la función de proyectar el trabajo conjunto desarrollado en esta tesis. El cual también se presenta como una guía de la forma en que se ejecutaron cada una de las actividades. A su vez muestra los niveles en los que se trabajaron cada una de las variables de estudio, relaciones existentes entre ellas y las actividades necesarias para el cumplimiento de los objetivos.

En el cuadro también se describen las evaluaciones que se hicieron a los centrifugados con diferentes instrumentos, dentro de los que se destaca el turbidímetro y el potenciómetro.

Así mismo se menciona el análisis estadístico mediante un factorial  $3^2$  y posteriormente un análisis de superficie de respuesta para obtener las condiciones óptimas de centrifugación de nejayote. Adicionalmente, se presentan los métodos de evaluación utilizados para cada una de las corridas experimentales a diferentes condiciones de proceso.

Indica además las pruebas de morfología mediante microscopía electrónica de barrido trabajado al alto vacío, para evidenciar las sales de calcio presentes y la determinación de calcio en el clarificado obtenido a condiciones óptimas por espectroscopía de absorción atómica para comprobar la concentración en cada uno de los clarificados.

# Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote

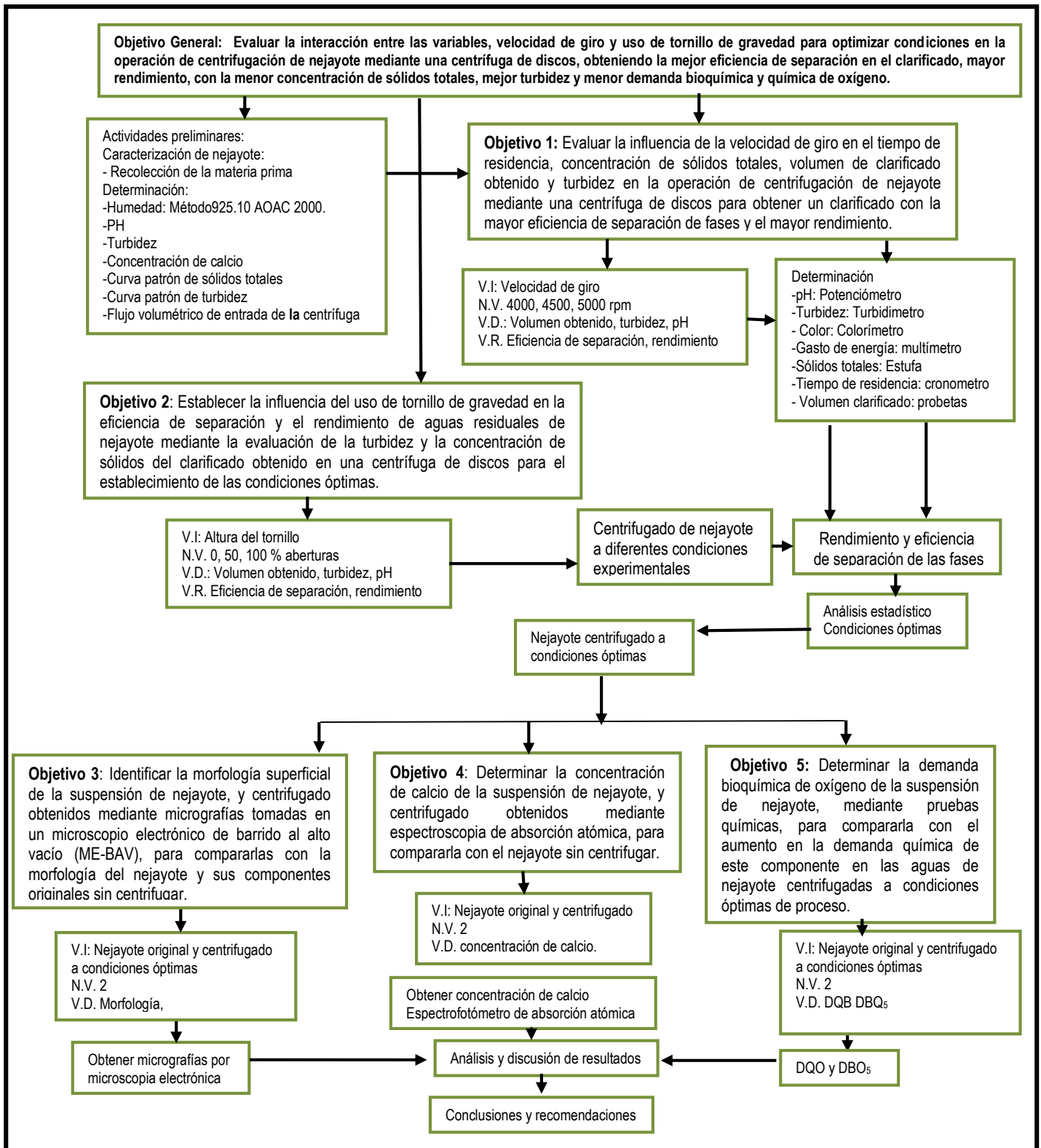


Figura 2.1 Cuadro metodológico



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

### **2 Descripción de actividades preliminares:**

Las actividades experimentales desarrolladas en el trabajo se muestran en el cuadro metodológico, en resumen. Posteriormente, se describen a detalle en texto. El cuadro metodológico mostrado en la Figura 2.1 es una guía para la ejecución de la parte experimental. Las actividades preliminares que se realizaron fueron la caracterización al nejayote sin centrifugar.

#### **2.1 Determinación de contenido de Humedad Método de estufa (AOAC, método 925.10) para obtener sólidos totales.**

El nejayote fue recolectado en un molino de nixtamal, que trabaja con maíz Sinaloa y que utiliza para el proceso de nixtamalización 92 °C en la cocción de los granos de maíz y 12 horas de reposo. Se realizó la determinación de humedad por el método 925.10 (AOAC 2000).

La prueba proporciona información sobre la cantidad de agua presente en el nejayote. Sin embargo, por diferencia de pesos fue posible obtener la concentración de sólidos totales en el nejayote. Se utilizaron tres charolas de aluminio que previamente fueron puestas a peso constante y pesadas en una balanza analítica marca OHAUS modelo E11140. El método se basa en la determinación gravimétrica de la pérdida de masa de la muestra hasta masa constante en estufa por convección.

Para llevar a cabo la prueba se colocan charolas de aluminio durante una hora en la estufa de convección Marca BG Didacta Italia modelo E102 a la temperatura de secado del producto a 90 °C hasta que estuvieran a peso constante. Utilizando pinzas, se trasladaron las charolas a un desecador y se dejaron enfriar durante 30 a 45 min, Figura 2.2 a. Posteriormente, se pesaron las charolas con una aproximación de 0.1 mg y se registró como ( $m_1$ ). Enseguida se colocaron en la charola 5 g de nejayote previamente homogenizado, registrando como ( $m_2$ ),



## Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote

Figura 2.2 b y se introdujeron en la estufa a la temperatura y tiempo recomendado (92 °C por 5 horas). Estas charolas permanecieron en la estufa hasta que ya no cambio su peso. Posteriormente, se dejaron enfriar en desecador y se pesaron para realizar los cálculos correspondientes.

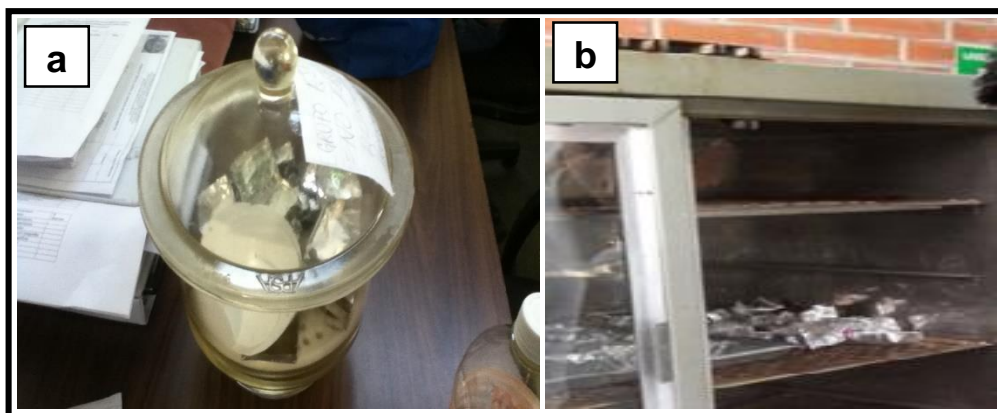


Figura 2.2 a) Charolas de aluminio a peso constante, b) charolas con nejayote

Por último, se repite el procedimiento de secado a la muestra por una hora adicional, hasta que las variaciones entre dos pesadas sucesivas no excedan de 5 mg (peso constante) y esta se registra como ( $m_3$ ). Para determinar la humedad se utilizó la ecuación 2.1, donde la humedad del producto expresada en porcentaje es

$$\% \text{ Humedad} = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} (100)$$

(ec. 2.1)

Donde:

$m_1$  = masa de la charola vacía, (g).

$m_2$  = masa de la charola con muestra antes del secado, (g).

$m_3$  = masa de la charola con la muestra desecada, (g).



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

El contenido de sólidos totales se obtiene mediante la diferencia del total 100 %, menos la humedad.

$$\% \text{ Contenido de sólidos totales} = 100 - \% \text{ Humedad} \quad (\text{ec } 2.2)$$

La Figura 2.3 muestra las actividades para conocer el contenido de sólidos totales de nejayote en solución.

Se realizaron diferentes diluciones de nejayote Figura 2.3 a, para determinar el contenido de sólidos totales de cada una de ellas y elaborar una curva patrón. Posteriormente, las diluciones se colocaron en las charolas Figura 2.3 b y se introdujeron a la estufa Figura 2.3 c.

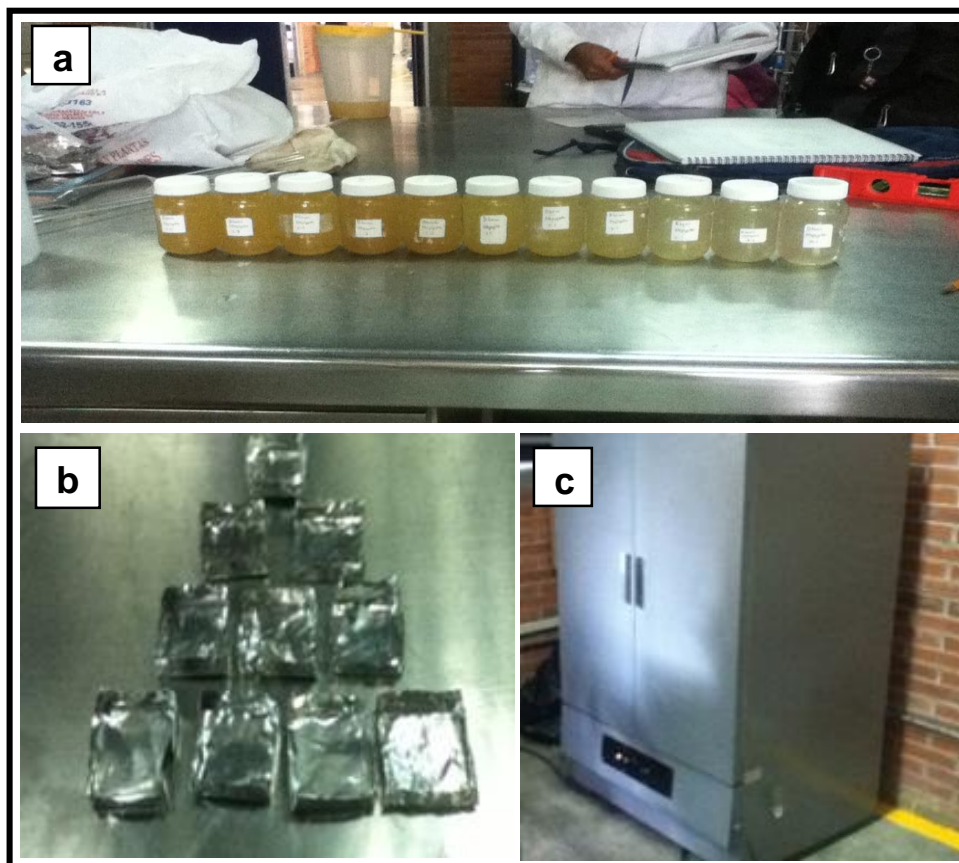


Figura 2.3 a) diluciones de nejayote, b) Charolas para la determinación de humedad, c) estufa de convección

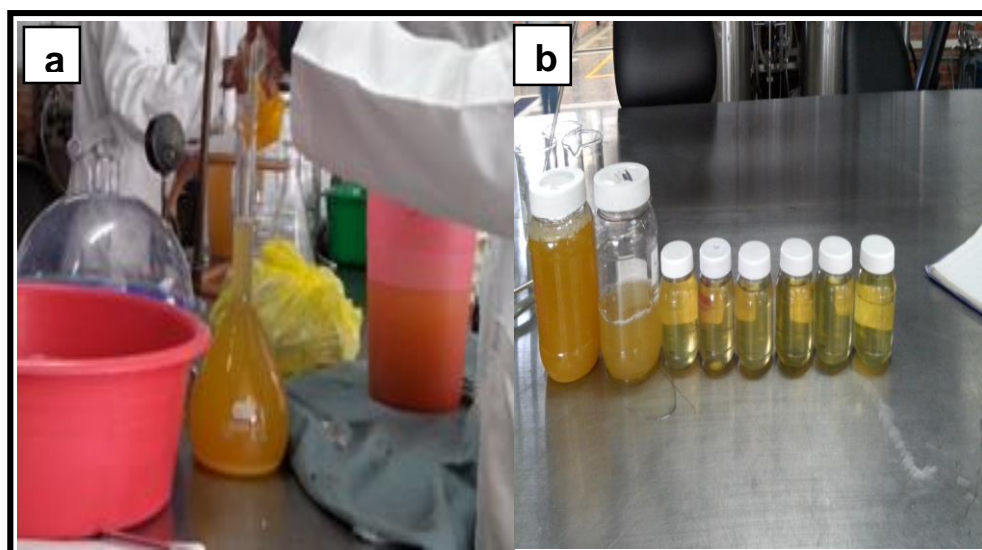


## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

Se siguió el mismo procedimiento para obtener los sólidos totales y en base a estos datos se elaboró una curva patrón que sirvió para encontrar los sólidos totales de todas las muestras centrifugadas o clarificados obtenidos. Las diluciones fueron: de  $1/2$ ,  $1/4$ ,  $1/8$ ,  $1/16$ ,  $1/32$ ,  $1/64$ . Se prepararon con 1 litro de nejayote, un matraz de bola y diferentes pipetas volumétricas, como se puede ver en la Figura 2.4 a y Figura 2.4 b.

Una vez colocado dentro del matraz de bola de 100 mL, se agregó agua potable (el agua potable previamente se almacenó en un tanque de 40 litros para todas las determinaciones). Se aforó y se tomaron 5 g en tres charolas para deshidratar. Se obtuvo la humedad y finalmente los sólidos totales. Los datos fueron vaciados a una tabla y se calculó la desviación estándar de las tres repeticiones realizadas por cada dilución obtenida.

Los resultados de sólidos totales se utilizaron para elaborar una curva patrón, donde se graficaron concentración de sólidos totales vs diluciones.



**Figura 2.4 a) Matraz de bola con nejayote, b) Diluciones de nejayote**





## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

### **2.2 Turbidez de nejayote**

La turbidez es la expresión de la propiedad óptica de la muestra que causa que los rayos de luz sean dispersados y absorbidos en lugar de ser transmitidos en línea recta a través de la muestra. Se utilizó el método 1889-88a ASTM, American Society for Testing and Materials.

Para llevar a cabo la técnica fue necesario diluir el nejayote debido a que el equipo utilizado es de una escala hasta de 40 NTU. Para lo cual se prepararon las diluciones del producto para que el equipo pueda dar las lecturas, en un matraz volumétrico de 100 mL, se mezclan 5 mL de la suspensión de nejayote y se aforan con agua potable en un matraz de bola. Este procedimiento se realizó por triplicado y se tomaron las lecturas en un Turbidímetro marca Hanna Instruments-modelo LP 2000 con 10 mL de la suspensión.



**Figura 2.5 Determinación de turbidez del nejayote y de nejayote diluido**

Se realizó la medición de turbidez a las diferentes diluciones realizadas para la determinación de sólidos totales en un turbidímetro. Primero se realizó la lectura al



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

agua potable, para 10 mL de agua con el fin de conocer el valor de turbidez. Posteriormente, se tomó lectura a todas las diluciones: 1/2 ,1/4, 1/8, 1/16, 1/32, 1/64.

Se conectó el equipo, luego se agitó la muestra problema y se llenó la cubeta del turbidímetro con 10 mL como muestra la Figura 2.5. El equipo se encendió y se tomó la lectura en la pantalla del equipo. Con las lecturas de turbidez de soluciones a diferentes concentraciones se elaboró la curva patrón turbidez vs concentración, graficando en el eje de las x la concentración y en el de las y la turbidez.

### **2.3. Actividades para el objetivo 1 y 2**

Para llevar a cabo el cumplimiento de los objetivos 1 y 2, se procedió a realizar corridas experimentales en la centrífuga de discos a diferentes condiciones. Se trabajaron como variables independientes, la velocidad de giro y el uso de los tornillos de gravedad. La velocidad de giro es la variable más importante debido a que implica diferente fuerza aplicada al nejayote para separar las partículas sólidas con mayor eficiencia.

En la tabla 2.1 se registran las condiciones experimentales a las cuales se centrifugo el nejayote, previamente seleccionadas y ubicadas para realizar un diseño factorial 3x2. Para posteriormente realizar uno de superficie de respuesta que pudiera proporcionar condiciones óptimas de separación.





**Tabla 2.1 Condiciones experimentales de la centrifugación de nejayote**

Corrida	Volumen (L)	Vel. de giro (rpm)	Uso de tornillo de gravedad
1	4	4000	100 %
2	4	4000	100 %
3	4	4500	100 %
4	4	4500	100 %
5	4	5000	100 %
6	4	5000	100 %
7	4	4000	50 %
8	4	4000	50 %
9	4	4500	50 %
10	4	4500	50 %
11	4	5000	50 %
12	4	5000	50 %
13	4	4000	0 %
14	4	4000	0 %
15	4	4500	0 %
16	4	4500	0 %
17	4	5000	0 %
18	4	5000	0 %

Una vez armada la centrífuga se inició la operación a las condiciones de trabajo seleccionadas. La velocidad de alimentación fue constante de 200 mL/s y se reguló mediante la válvula de alimentación. La restricción a la salida de la fase ligera la provoca el tornillo de gravedad, al quitarlo salió mayor volumen, es decir el tiempo de residencia fue menor dentro de la centrífuga. La velocidad de giro fue controlada con el panel de control del equipo ubicado en la parte delantera. En la Figura 2.6 a se muestra la centrífuga de discos utilizada, la suspensión (nejayote) se colocó en el tanque de alimentación, se introdujo la pópela y se mezcló la



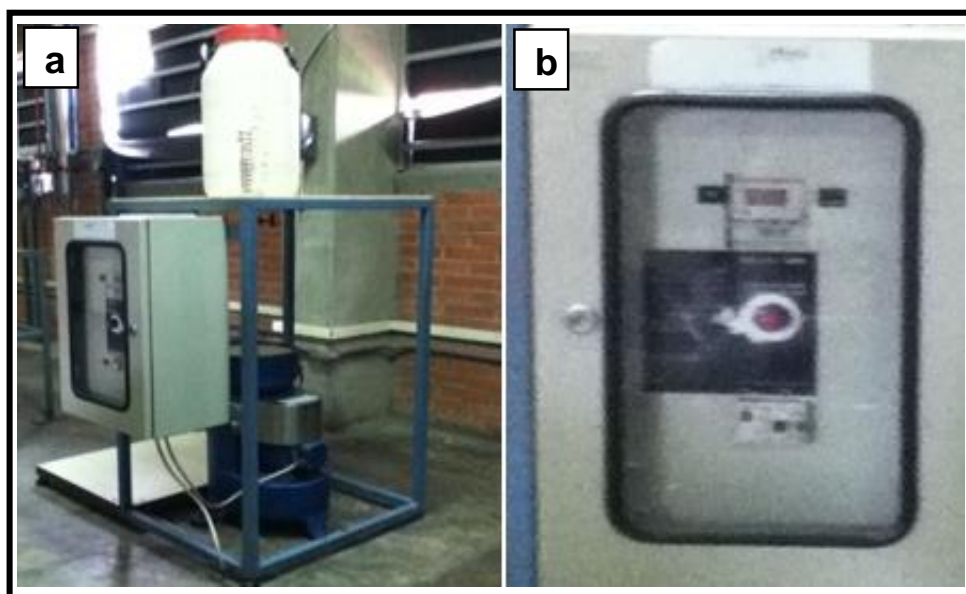
## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

suspensión a 350 rpm. En la Figura 2.6 b se muestra el panel de control del equipo. Dicho panel es encendido mediante el botón rojo y se sube la velocidad poco a poco, el panel de control proyecta en la pantalla digital los valores en Hertz. Estos a su vez se convierten a rpm mediante la ecuación 2.3:

$$\text{Hertz} \times 160 = \text{rpm}$$

(ec. 2.3)

Una vez alcanzada la velocidad de trabajo seleccionada se abre la válvula de alimentación de la suspensión.



**Figura 2.6 a) Centrífuga de discos, b) panel de control de la centrífuga**

En las tolvas de salida se colocan dos recipientes para recoger la fase pesada y la fase ligera. La cantidad alimentada fueron cuatro litros de nejayote y el volumen recolectado fue diferente para las distintas condiciones experimentales.

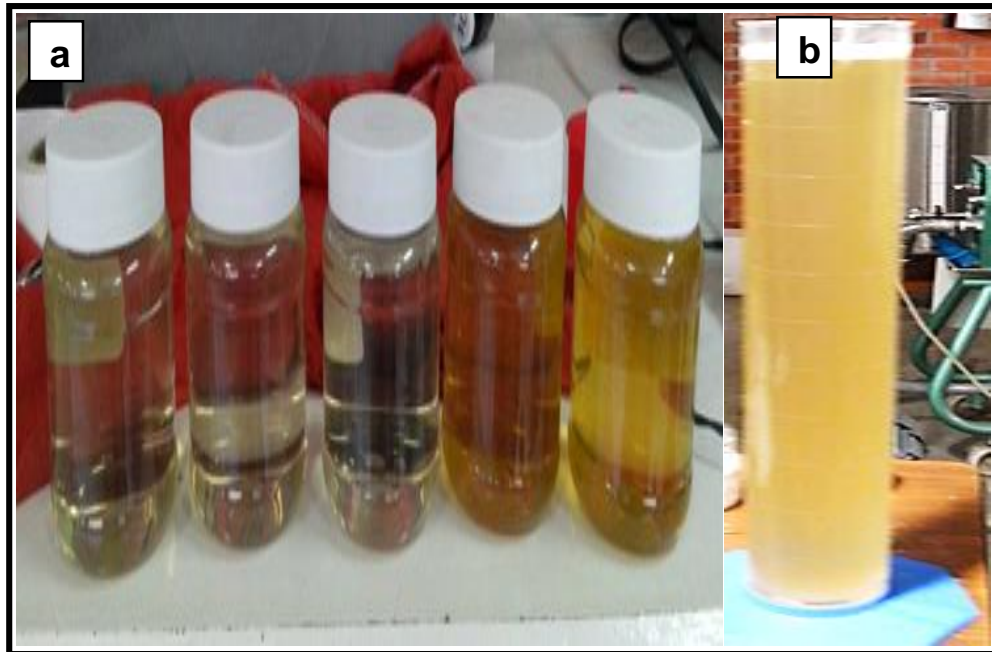
### **2.3.1 Obtención de volumen clarificado**

De cada corrida experimental se recolectó el volumen de clarificado proveniente de la tolva de fase ligera en un recipiente graduado en litros, ya que deja de salir



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

dicho clarificado se cuantifica el volumen total obtenido como se aprecia en la Figura 2.7 para ser utilizado en todas las pruebas.



**Figura 2.7 Volumen de clarificado obtenido**

### **2.3.2 Tiempo de residencia**

Para la medición del tiempo de residencia, con la ayuda de un cronómetro digital inicia desde que entra la primera gota de nejayote a la centrífuga de discos y se detiene hasta que salga la primera gota de clarificado obtenido. Ese tiempo es registrado y corresponde al periodo en que se mantiene el nejayote dentro del equipo utilizado.

### **2.3.3 Rendimiento**

El rendimiento se determinó mediante la ecuación que relaciona el volumen inicial a centrifugar con el volumen de clarificado obtenido, ecuación 2.3.



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

$$R = \left[ 1 - \left( \frac{V_i - V_f}{V_i} \right) \right] [100]$$

(ec. 2.3)

Donde:

$V_i$  = Volumen inicial a centrifugar (L)

$V_f$  = Volumen de clarificado obtenido de la operación de centrifugación (L)

$R$  = Rendimiento (%)

### **2.3.4 Eficiencia de separación de fases**

Dicha eficiencia se calcula mediante la ecuación 2.4, que relaciona el contenido de sólidos totales del clarificado con el contenido de sólidos totales del nejayote.

$$E = \left( \frac{C_i - C_f}{C_i} \right) (100)$$

(ec. 2.4)

Donde:

$C_i$  = Contenido de sólidos totales del nejayote (%)

$C_f$  = Contenido de sólidos totales en el clarificado (%)

$E$  = Eficiencia de separación de fases (%)

### **2.4 Actividades para el Objetivo 3**

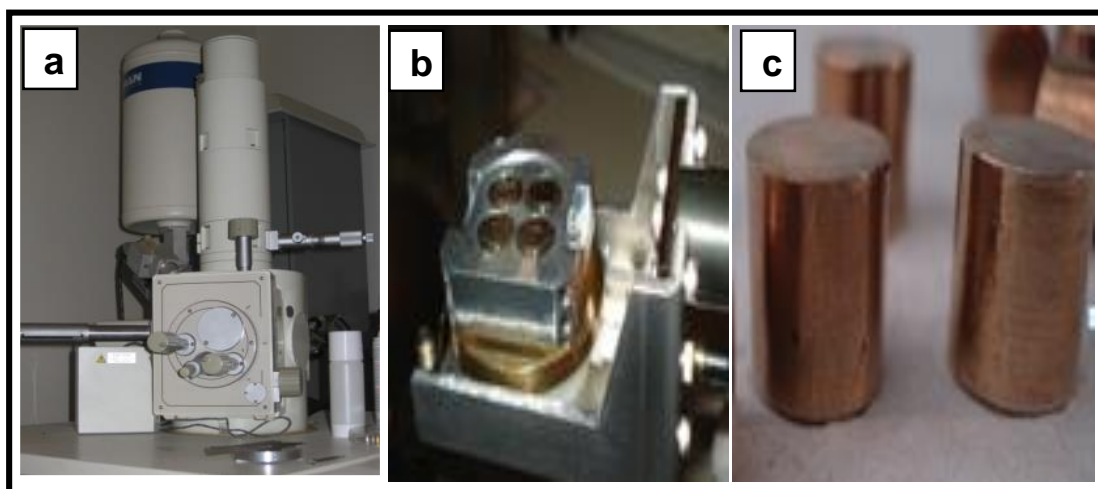
#### ***Morfología por Microscopía electrónica de barrido al alto vacío (MEB-AV)***

Se caracterizó el nejayote para identificar los componentes presentes en el nejayote por microscopía electrónica de barrido al alto vacío. Los portamuestras de bronce se limpiaron para retirar impurezas. Una gota de nejayote o de clarificado se colocó en el portamuestra de bronce adheridas con cinta de carbón electro conductiva, con el fin de que la emisión de electrones fuese continua



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

dentro del microscopio, se introdujeron en el microscopio electrónico de barrido a alto vacío (JEOL, modelo JSU-5600 AV) con la finalidad de obtener las micrografías, Figura 2.8 a. Las muestras se colocaron en porta, como se observa en la Figura 2.8 b, con el fin de que la emisión de electrones fuera continua dentro del microscopio (Arenas, 1999). A las muestras se les dio, un baño de oro para su deshidratación y se colocaron en un porta muestras de aluminio para cuatro unidades, como se observa en la Figura 2.8 c. Finalmente, fueron observadas a diferentes aumentos.



**Figura 2.8 Técnica de microscopía. a) Microscopio electrónico, b) porta muestras de bronce, c) porta muestras de aluminio**

Con esta técnica se podrá evidenciar la cantidad de sólidos presentes y la morfología de estos en cada una de las corridas experimentales.

### **2.5 Actividades para el objetivo 4**

Se determinó la concentración de calcio en la muestra original de nejayote y de la muestra centrifugada a condiciones óptimas, mediante un espectrofotómetro de absorción atómica de doble haz (Analyst 300, Perkin Elmer, USA) equipado con

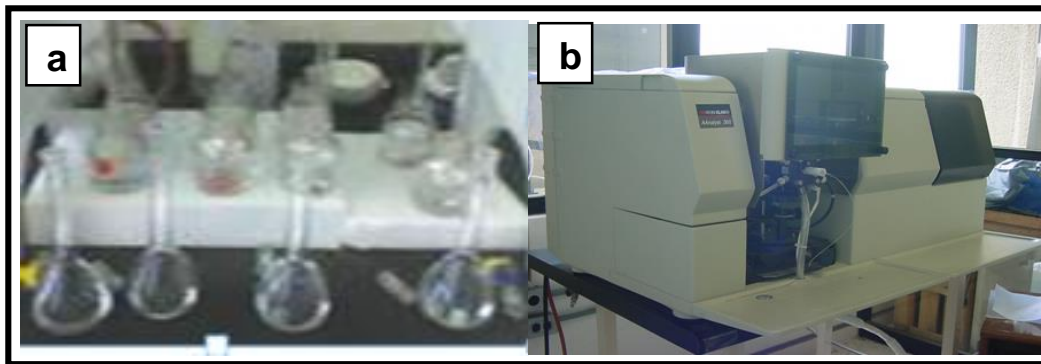


## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

una lámpara de deuterio de cátodo hueco con corrector de fondo. Las determinaciones se realizaron por triplicado para todas las unidades experimentales de acuerdo a la metodología de la AOAC, (2000). Se pesaron en una balanza analítica Marca Ohaus, 0.25 g de cada muestra los vasos de teflón (CEM, modelo, PFA-LV), agregando 10 mL de ácido nítrico dentro de una campana de extracción hasta que la muestra dejó de hacer burbujas y fue transparente. Se taparon sellándolas herméticamente. A fin de continuar con la digestión. Posteriormente, se colocaron los vasos de teflón dentro del carrusel y se introdujeron al horno de microondas (CEM, modelo MDS 81D), el cual se programó a tres rampas de calentamiento: la primera, de temperatura ambiente hasta 130 °C en 4:30 min, la segunda de 130 °C, hasta 150 °C en 4.0 min y la última de 150 a 175 °C en 4.0 min, manteniendo una isoterma a la temperatura constante durante 15 minutos. Por último, las muestras se dejaron enfriar, se filtraron y se les adicionó 1mL de óxido de lantano como se observa en la Figura 2.9 a, se aforaron a 100 mL con agua tridestilada.

Así mismo se preparó la curva con el estándar de calcio para calibrar y leer. Se colocó la lámpara de cátodo hueco para leer el calcio en el equipo, la lectura se realizó con las muestras previamente diluidas, y se colocaron en un vaso de precipitado para introducir al nebulizador.

Las muestras se leyeron en un equipo de espectroscopía de absorción atómica de flama utilizando como gases aire-acetileno para producir la flama, se eligió una longitud de onda de 422.7 nm característica del calcio como se aprecia en la Figura 2.9 b. Las muestras que no entraron en la concentración de la curva de calibración se diluyeron para conocer el valor de su concentración y posteriormente se multiplicó por la dilución realizada.



**Figura 2.9 Determinación de calcio en muestras, a) filtración de muestras y adición de óxido de lantano, b) espectrofotómetro de absorción atómica**

## 2.6 Actividades para el Objetivo 5

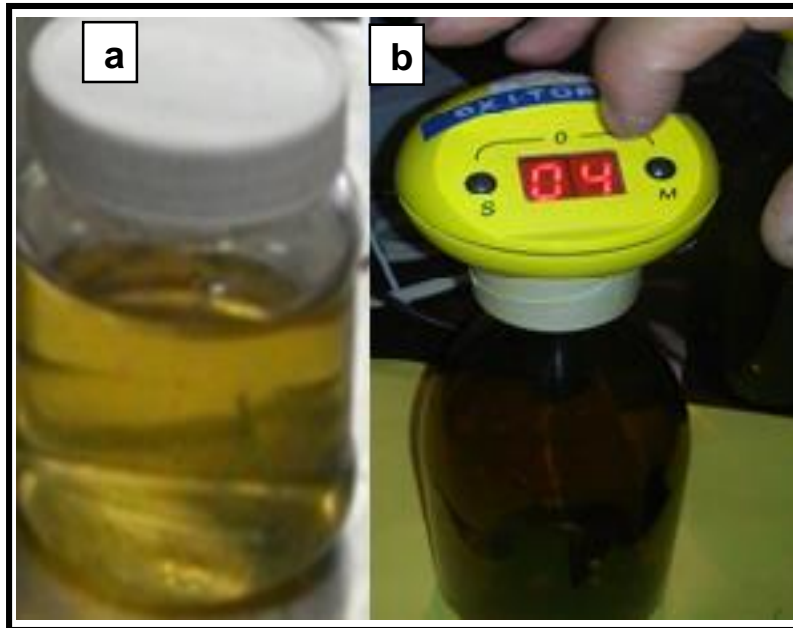
En los frascos ámbar de 500 mL, se colocó una alícuota de 300 mL. Se hizo reaccionar con NaOH, por un tiempo determinado. Los resultados se dieron por lectura directa. Los resultados se expresan en mg O<sub>2</sub>/L por lectura directa.

La demanda bioquímica es una estimación de la cantidad de oxígeno que requiere una población microbiana heterogénea para oxidar la materia orgánica de una muestra de agua en un período de 5 días. El método se basa en medir el oxígeno consumido por una población microbiana en condiciones en las que se ha inhibido los procesos fotosintéticos de producción de oxígeno en condiciones que favorecen el desarrollo de los microorganismos.

La Figura 2.10 muestra el nejayote utilizado y los frascos ámbar en el que se colocó cada una de las muestras utilizadas para las dos pruebas.

El objeto del ensayo consiste en medir la cantidad de oxígeno diatómico disuelto en un medio de incubación al comienzo y al final de un período de cinco días, durante el cual la muestra se mantiene al abrigo del aire, a 20 °C y en la oscuridad, para inhibir la eventual formación de oxígeno.





**Figura 2.10 Pruebas para realizar la demanda bioquímica y química de oxígeno**

Botellas de incubación para la DBO, de 250 a 300 mL de capacidad. Se lavaron y se enjuagaron varias veces, para evitar la entrada de aire en la botella se mantuvieron en incubadora a baño maría controlada termostáticamente a 20 °C. Dichas muestras se colocan en oscuridad para eliminar el proceso; excluir cualquier fuente luminosa para eliminar el proceso de producción fotosintética de OD.

Previamente se prepararon los siguientes reactivos:

1. Solución tampón de fosfato: Disolver 8,5 g de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , 21,75 g de  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ , 33,4 g de  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , y 1,7 g de  $\text{NH}_4\text{Cl}$  en aproximadamente 500 mL de agua destilada y diluir a 1 L. El pH debe ser 7,2 sin posteriores ajustes. Si se presenta alguna señal de crecimiento biológico, descartar este o cualquiera de los otros reactivos.
2. Solución de sulfato de magnesio: Disolver 22,5 g de  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  en agua destilada y diluir a 1 L.





## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

3. Solución de cloruro de calcio: Disolver 27,5 g de  $\text{CaCl}_2$  en agua destilada y diluir a 1L.
4. Solución de cloruro férrico: Disolver 0,25g de  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  en agua destilada, diluir a 1L
5. Soluciones ácida y alcalina, 1 N, para neutralización de muestras cáusticas o ácidas.
  - a) *Ácido*. A un volumen apropiado de agua destilada agregar muy lentamente y mientras se agita, 28 mL de ácido sulfúrico concentrado; diluir a 1 L.
  - b) *Álcali*. Disolver 40 g de hidróxido de sodio en agua destilada y diluir a 1 L.
6. Solución de sulfito de sodio: Disolver 1,575 g de  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  en 1000 mL de agua destilada. Esta solución no es estable y se debe preparar diariamente.
7. Inhibidor de nitrificación: 2-cloro-6-(triclorometil) piridina.
8. Solución de glucosa-ácido glutámico: Secar a 103 °C por 1 h glucosa y ácido glutámico grado reactivo. Disolver 150 mg de glucosa y 150 mg de ácido glutámico en agua destilada y diluir a 1 L. Preparar inmediatamente antes de su uso.

Solución de cloruro de amonio: Disolver 1,15 g de  $\text{NH}_4\text{Cl}$  en 500 mL de agua destilada, ajustar el pH a 7,2 con solución de  $\text{NaOH}$ , y diluir a 1 L. La solución contiene 0,3 mg de N/mL.

Los reactivos ya preparados fueron proporcionados por el laboratorio de aguas residuales de Ingeniería Química, así como los inóculos.



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

Cálculos:

1-Cuando el agua de dilución no ha sido inoculada:

$$\text{DBO}_5, \text{ mg/L} = (D1-D2)/P$$

2-Cuando el agua de dilución ha sido inoculada:

$$\text{DBO}_5, \text{ mg/l} = \{(D1-D2)-(B1-B2)*f\}/P$$

*Donde:*

$D_1$  = OD de la muestra diluida inmediatamente después de la preparación, mg/L,

$D_2$  = OD de la muestra diluida después de 5 d de incubación a 20 °C, (mg/L)

$P$  = fracción volumétrica decimal de la muestra empleada,

$B_1$  = OD del control de semilla antes de la incubación, (mg/L)

$B_2$  = OD del control de semilla después de la incubación, (mg/L).

3- *Contenido de la semilla:*

$f$  = proporción de semilla en la muestra diluida a la semilla en el control de semilla

= (% de semilla en la muestra diluida) / (% de semilla en el control de semilla).

4- Si el material inoculante se agrega directamente a la muestra o a las botellas de control:



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

$f = (\text{volumen de semilla en la muestra diluida}) / (\text{volumen de semilla en el control de semilla})$

5- Si se ha inhibido la nitrificación, reportar los resultados como DBO<sub>5</sub>.

6- Los resultados obtenidos para las diferentes diluciones pueden ser promediados si se cumple con los requisitos de valores de OD residual de mínimo 1 mg/L y un consumo de OD de por lo menos 2 mg/L. Este promedio se puede hacer si no hay evidencia de toxicidad en las muestras menos diluidas o de alguna alteración detectable.

En estos cálculos no se hace corrección por el OD consumido por el blanco de agua de dilución durante la incubación. Esta corrección no es necesaria si el agua de dilución cumple el criterio de blanco estipulado en el procedimiento. Si el agua de dilución no cumple este criterio, la corrección es difícil y los resultados serán cuestionables (ASTM, 1994) (Sawyer y McCarty 1996).



### CAPÍTULO III DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3 Resultados de actividades preliminares.

##### 3.1 Resultados de determinación de contenido de sólidos totales en el nejayote

Los resultados de sólidos totales se presentan en la Tabla 3.1

**Tabla 3.1 Resultados del contenido de sólidos totales de Nejayote**

Caja (muestra)	Charola vacía (g)	Charola c/muestra (g)	Charola c/muestra seca (g)	Humedad (%)	Sólidos totales (%)	$\bar{x}$
1	1.37	7.64	1.50	97.926	2.073	
2	1.41	8.01	1.54	98.030	1.969	2.016
3	1.37	7.85	1.50	97.993	2.006	

La cantidad de sólidos totales en el nejayote sin centrifugar fue del 2.016 %.

##### 3.1.1 Resultados de Contenido de sólidos totales de nejayote en dilución

Los datos del contenido de sólidos totales se presentan en la Tabla 3.2.



Tabla 3.2 Contenido de sólidos totales de nejayote de diferentes diluciones

Dilución	Cont. Sólidos Totales (%)			$\bar{x}$	$\Sigma$	C.V.
	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>			
1/64	0.047	0.029	0.033	<b>0.036</b>	9.451E-3	26.013
1/32	0.075	0.064	0.061	<b>0.066</b>	7.371E-3	11.056
1/16	0.131	0.129	0.130	<b>0.130</b>	1E-3	0.769
1/8	0.253	0.247	0.251	<b>0.250</b>	3.055E-3	1.220
1/4	0.489	0.498	0.499	<b>0.495</b>	5.507E-3	1.111
1/2	0.973	0.995	0.998	<b>0.988</b>	0.0136	1.380
100 %	2.073	1.969	2.006	<b>2.016</b>	0.0527	2.6149

Los datos de la media se utilizaron para la construcción de la curva patrón de sólidos totales. La determinación del coeficiente de variación se realizó mediante la siguiente ecuación:

$$C.V. = \left( \frac{\sigma}{\bar{x}} \right) (100)$$

Dónde:

(ec. 3.1)

$\sigma$  = Desviación Estándar

$\bar{x}$  = Promedio de contenido de sólidos totales

### 3.1.2 Elaboración de curva patrón de sólidos totales.

En base a los datos anteriores, se graficó la curva patrón la cual representa los valores promedio de contenido de sólidos totales en función de la concentración de las diluciones, mediante una regresión lineal se obtuvo la tendencia. La Gráfica se presenta en la Figura 3.1.

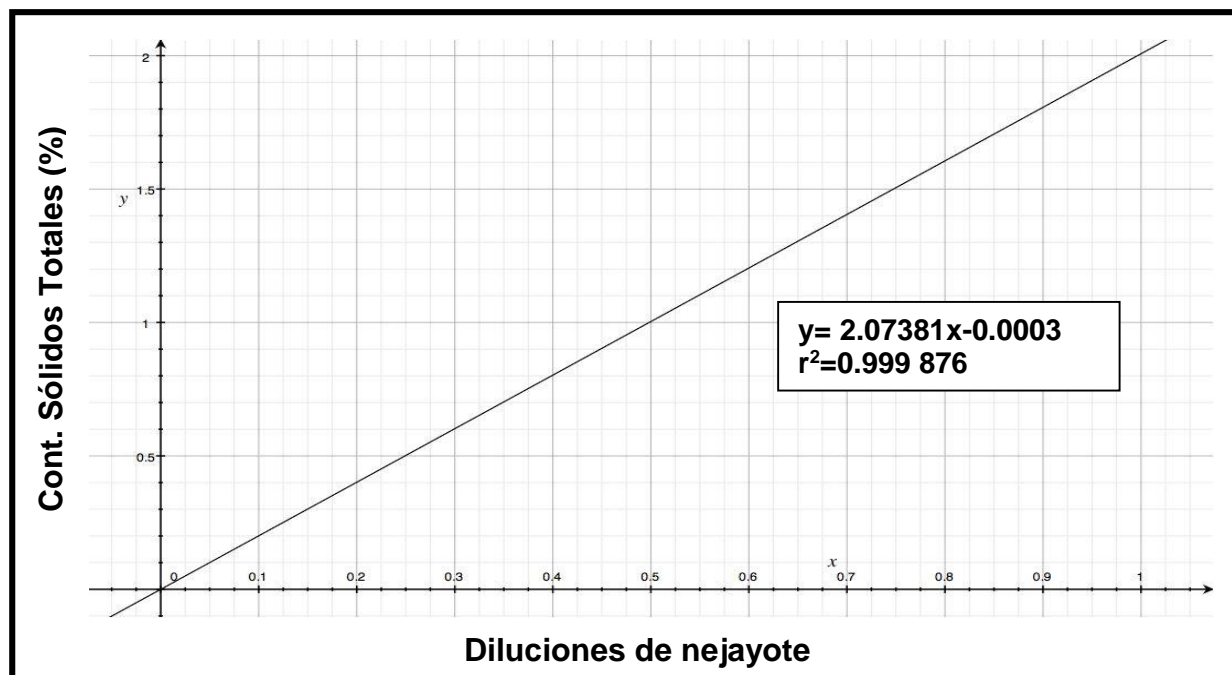


Figura. 3.1 Curva patrón contenido de sólidos totales vs diluciones de nejayote

### 3.2 Resultados de la turbidez de nejayote

Los resultados de la turbidez de nejayote se multiplicaron por 20, dado que la dilución se llevó a cabo (1:20) es decir 5mL de nejayote: 95 mL de agua potable. En la Tabla 3.3 se presentan los resultados de las tres repeticiones.

Tabla 3.3 Resultados de turbidez del nejayote sin centrifugar

Nejayote Repeticiones	Turbidez (NTU)	Turbidez (NTU) x 20	$\bar{x}$	$\sigma$	CV
1	48.156	963.12			
2	48.143	962.86	962.98	0.13	0.0001
3	48.148	962.97			



## Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote

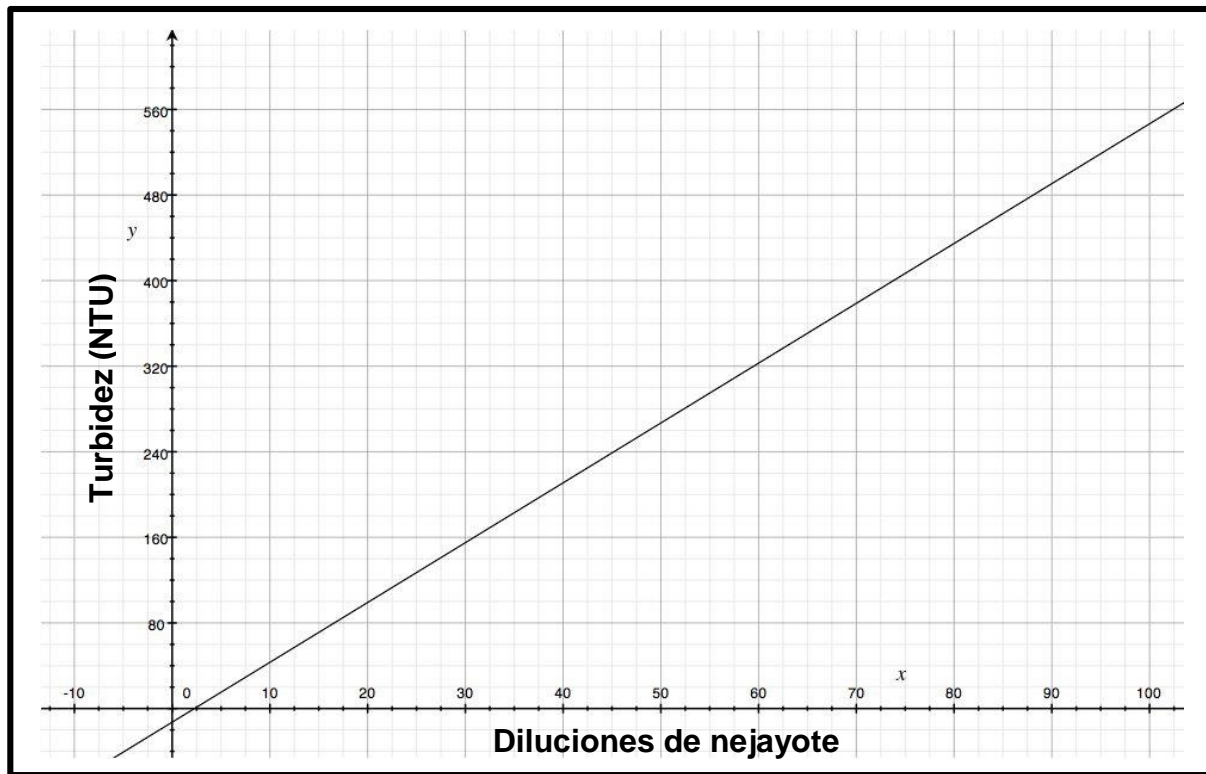
### 3.2.1 Resultados de la Turbidez en muestras diluidas de nejayote

En la Tabla 3.4 se registraron los valores de turbidez para las muestras diluidas a diferentes concentraciones: 1/2 ,1/4, 1/8, 1/16, 1/32.

**Tabla 3.4 Resultados de turbidez de muestras diluidas de nejayote**

Dilución	Turbidez (NTU)			$\bar{x}$	$\Sigma$	C.V.
	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>			
<b>1/32</b>	6.8	6.2	14.9	<b>9.3</b>	3.96	42.65
<b>1/16</b>	7.6	27.2	28.7	<b>21.16</b>	9.61	45.41
<b>1/8</b>	44.2	51.2	63.1	<b>52.83</b>	7.801	14.76
<b>1/4</b>	132	108.3	107.3	<b>115.86</b>	11.41	9.85
<b>1/2</b>	282	221.2	272.5	<b>258.56</b>	26.70	10.32
<b>100 %</b>	573.2	636.1	452.7	<b>554</b>	76.09	13.73

\* Los valores obtenidos del turbidímetro fueron multiplicados por 20, con el fin de obtener los valores de turbidez real.



**Figura. 3.2 Curva patrón turbidez vs diluciones de nejayote**

Con la construcción de estas gráficas se pueden obtener los valores de las concentraciones o contenido de sólidos totales de nejayote. Se realiza determinando la turbidez y con ese valor se encuentra la dilución en la Figura 3.2, en la gráfica de la Figura 3.1 se entra con la dilución y se encuentra la concentración de sólidos totales de cada una de las corridas experimentales realizadas a las diferentes condiciones.

### **3.3 Resultados para el objetivo 1 y 2**

Durante la etapa experimental se llevaron a cabo 18 corridas que se presentan en la tabla 3.5 en las cuales se modificaron las velocidades de giro, así como el uso del tornillo de gravedad para posteriormente evaluar su efecto en las variables propuestas anteriormente.





**Tabla 3.5. Resultados de los datos de las distintas pruebas obtenidos para los clarificados**

	Velocidad de giro (RPM)	Tornillo de gravedad	Tiempo de residencia (min)	Volumen de clarificado (L)	Corrida	Rendimiento (%)	Eficiencia (%)
1	4000	100 %	18.38	2.400	0.093	75	40.752
2	4000	100 %	18.25	2.350	0.095	73.45	40.914
3	4500	100 %	25.35	3.200	0.106	100	63.503
4	4500	100 %	27.40	2.300	0.080	71.875	63.338
5	5000	100 %	19.18	1.15	0.123	35.937	45.824
6	5000	100 %	10.41	2.700	0.068	84.375	41.079
7	4000	50 %	11.56	2.800	0.1036	87.500	3.369
8	4000	50 %	12.2	2.750	0.1022	85.937	44.353
9	4500	50 %	12.44	2.600	0.1032	81.25	100
10	4500	50 %	11.22	2.600	0.1104	81.25	90.998
11	5000	50 %	11.49	2.500	0.1254	78.125	68.083
12	5000	50 %	11.32	2.500	0.1258	78.125	55.647
13	4000	0 %	13.36	1.350	0.115	42.187	29.293
14	4000	0 %	7.08	2.650	0.066	82.812	27.495
15	4500	0 %	15.58	2.725	0.0745	85.156	33.550
16	4500	0 %	15.47	2.550	0.0745	79.687	41.244
17	5000	0 %	12.42	1.525	0.142	47.656	43.699
18	5000	0 %	18.4	2.500	0.087	78.125	48.935

La metodología de superficies de respuesta es un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas utilizadas para modelar y analizar problemas en los que una variable de interés es influenciada por otras. El objetivo es optimizar la



## Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote

variable de interés. Esto se logra al determinar las condiciones óptimas de operación del sistema.

Para llevar a cabo dicho análisis estadístico se empleó el programa Minitab 16 (Minitab, Inc.) y las variables analizadas fueron el uso de tornillo de gravedad y la velocidad de giro de la centrífuga.

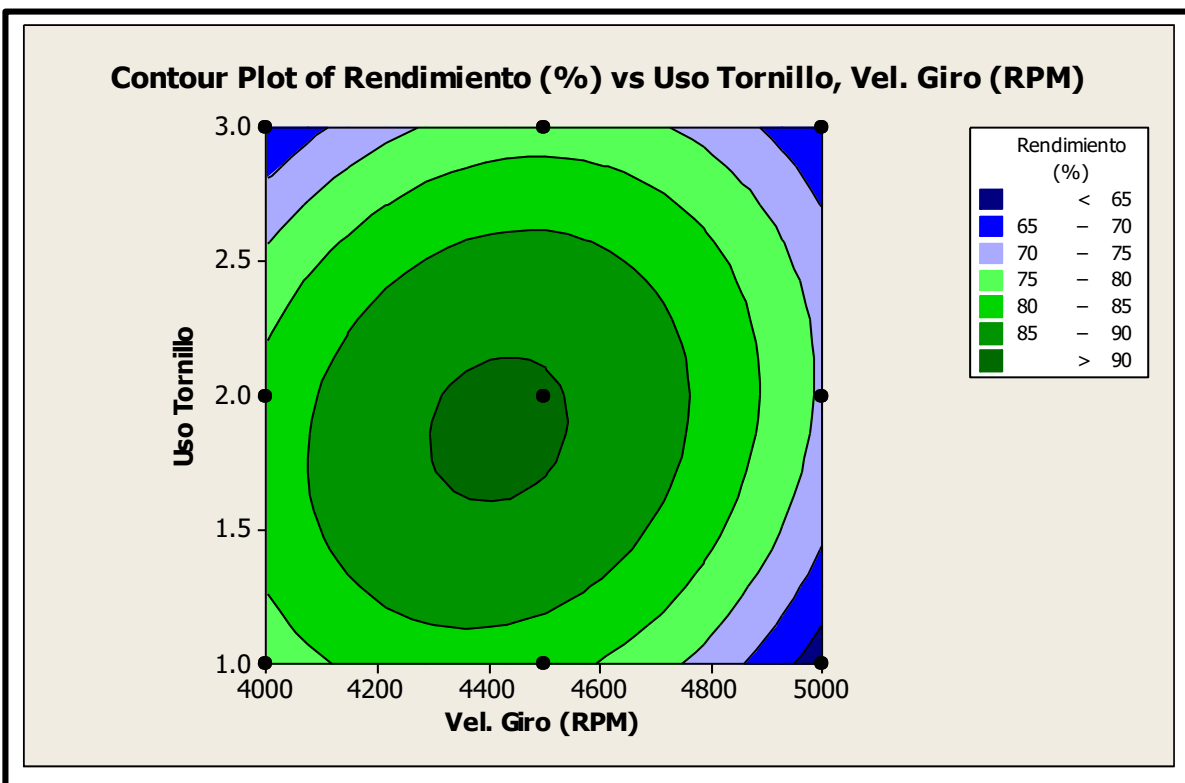


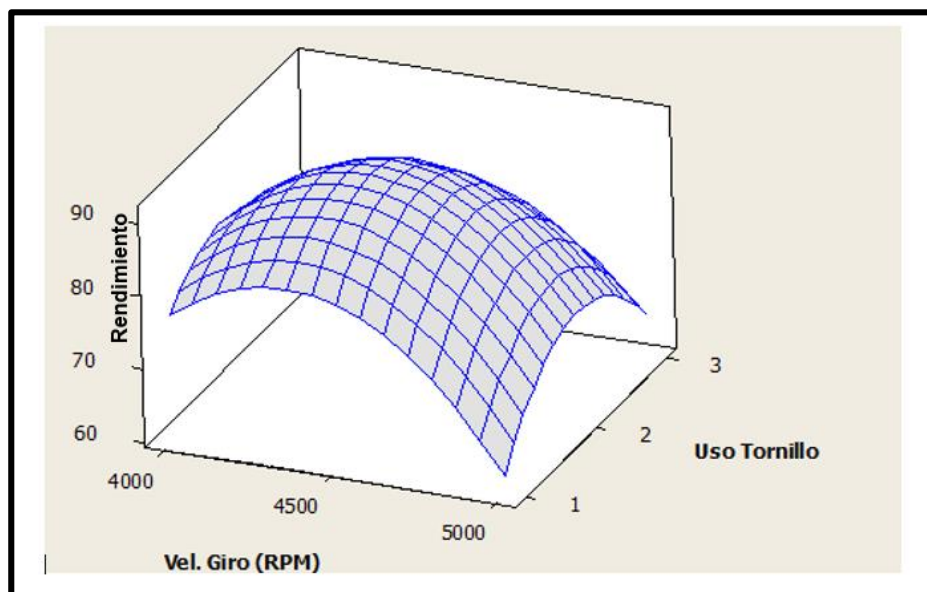
Figura 3.3 Gráfica de contorno para rendimiento

En la gráfica de la Figura 3.3 se presenta la obtención del punto óptimo para el rendimiento, de acuerdo a las condiciones que se utilizan las variables en la operación de centrifugación. De tal manera que la gráfica presenta las mejores condiciones para obtener el mayor rendimiento.



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

En la Figura 3.4 se presenta la gráfica del comportamiento del rendimiento con respecto a las variables independientes velocidad de giro, y uso del tornillo.



**Figura 3.4 Gráfica de superficie para rendimiento**

En este gráfico se puede apreciar de qué modo interactúan y a qué condiciones, cada una de las variables para la obtención del rendimiento; la curvatura va a definir a qué condiciones hay más interacción, lo que representa las condiciones óptimas y en cuales no se presenta.

Como se puede observar en la Figura 3.3 y Figura 3.4, el rendimiento se va incrementado al utilizar una velocidad media de giro (4500 rpm) y utilizando el tornillo de gravedad al 50 %. El uso de tornillo de gravedad está representado por valores numéricos de 1, 2 y 3; donde 1 representa que se utilizó el tornillo de gravedad, 2 representa el uso de tornillo de gravedad al 50 %, y 3 representa que no se utilizó tornillo de gravedad.

## Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote



La Figura 3.5 muestra los resultados de una gráfica de contorno para obtener las condiciones óptimas de eficiencia de separación, utilizando como variables independientes el uso del tornillo y la velocidad de giro. Estas condiciones no pertenecieron a los niveles trabajados durante la experimentación. Sin embargo, estas condiciones son las mejores de acuerdo a lo propuesto por la gráfica.

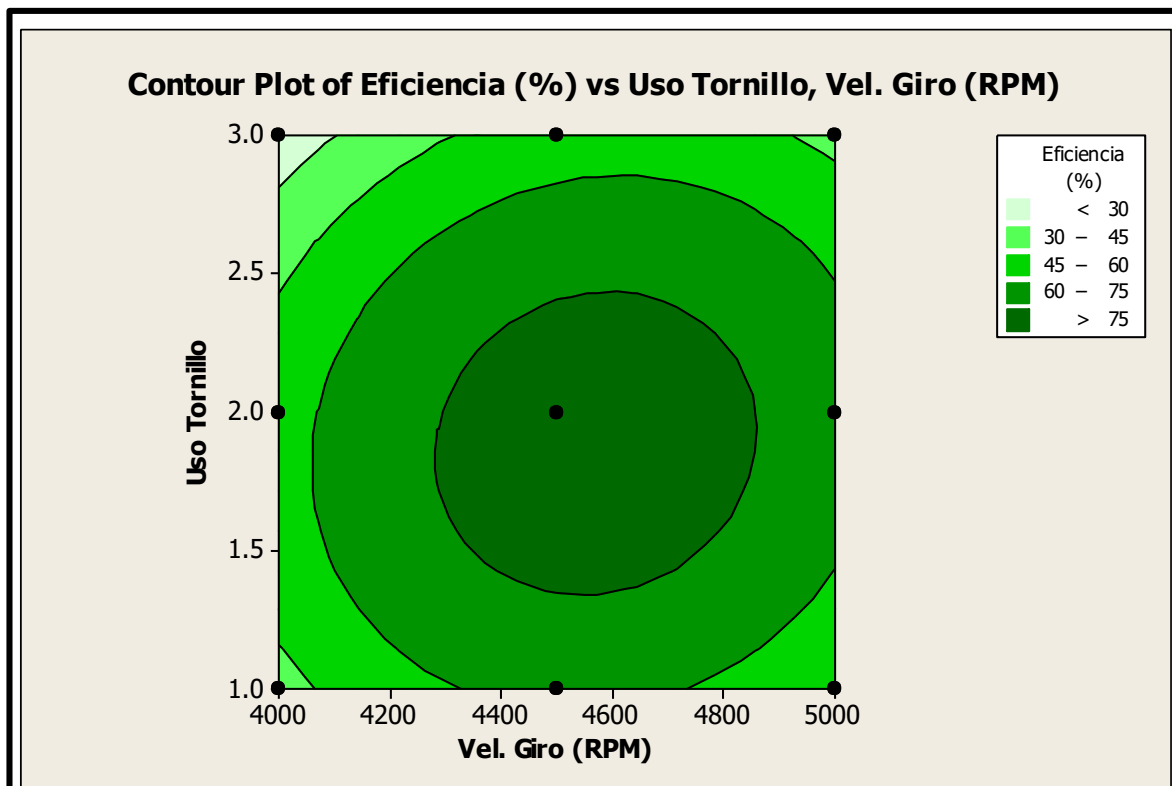


Figura 3.5 Gráfica de contorno para eficiencia

En este gráfico se puede observar las condiciones a las cuales se encuentra el punto óptimo para la obtención de una mayor eficiencia.

En la Figura 3.6 muestra los resultados de una gráfica de superficie para obtener las condiciones óptimas de eficiencia de separación, utilizando como variables independientes el uso del tornillo y la velocidad de giro. Estas condiciones no

## Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote



pertenecieron a los niveles trabajados durante la experimentación. Sin embargo, estas condiciones son las mejores de acuerdo a lo propuesto por la gráfica. Teniendo como factores al uso de tornillo de gravedad y la velocidad de giro, los cuales se trabajaron a valores altos medio y bajo.

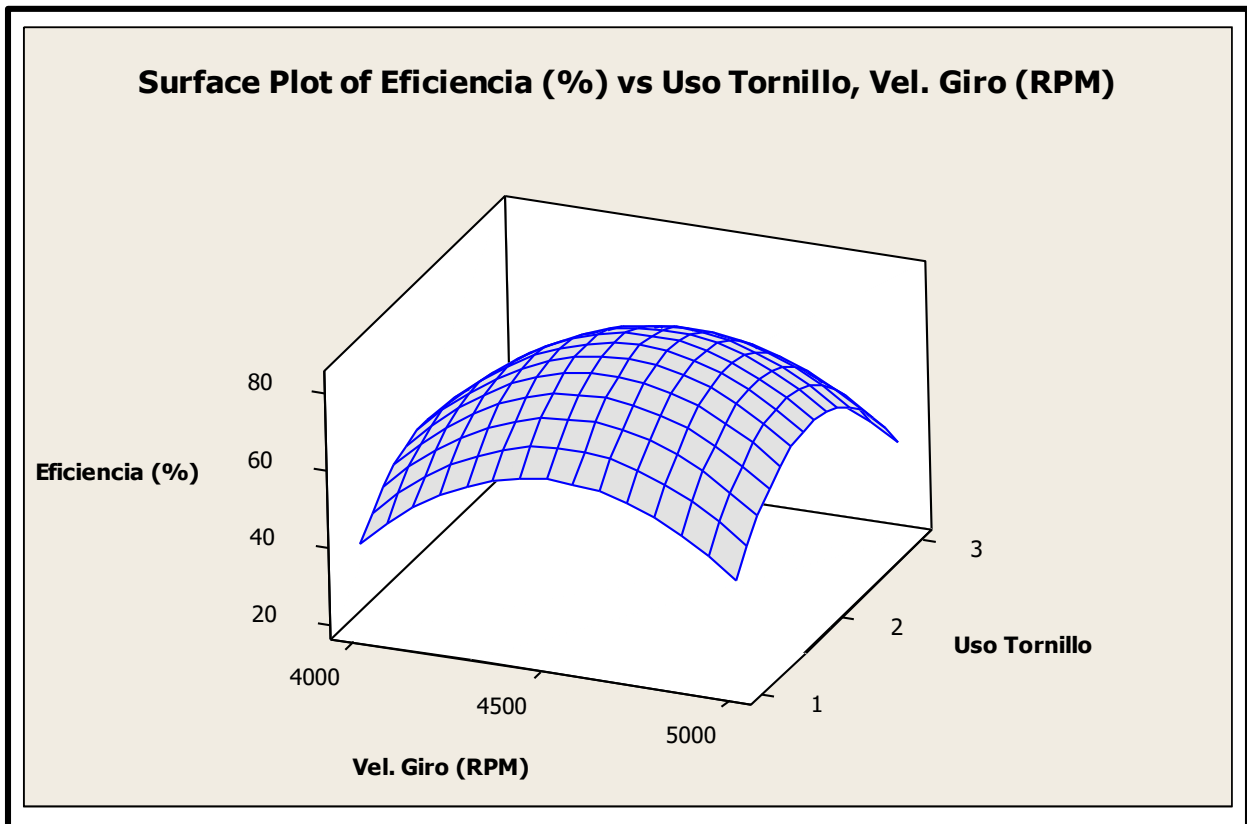


Figura 3.6 Gráfica de superficie para eficiencia

Al analizar las gráficas de contorno y de superficie, representadas en la Figura 3.5 y Figura 3.6, tomando como variable de respuesta la eficiencia de separación de fases, podemos observar que coincide con las gráficas obtenidas para el rendimiento, donde los puntos centrales nos dan las condiciones óptimas del proceso.



### *Separación centrifuga de aguas residuales de nejayote*

De manera que al realizar la optimización de respuesta en este programa estadístico se obtuvo que las condiciones óptimas son a una velocidad de giro de 4525 rpm y uso de tornillo de gravedad al 50 %, y a esas condiciones el programa arroja que el rendimiento será de 90.18 % y la eficiencia será de 81.9 %.

A estas condiciones se obtuvo la fotografía del nejayote original y el centrifugado a las condiciones óptimas. En la Figura 3.7 se presenta ambos nejayotes.



**Figura 3.7 Nejayote original y nejayote centrifugado a condiciones óptimas**

Notese la calidad del nejayote centrifugado que es transparente y que aparentemente no tiene sólidos, aunque la eficiencia de separación fue del 81.9, esto significa, que sí hay presencia de sólidos en el nejayote centrifugado. Sin embargo, el análisis estadístico hace un equilibrio con el rendimiento, que esta basado con el volumen obtenido y estas son las condiciones que recomienda



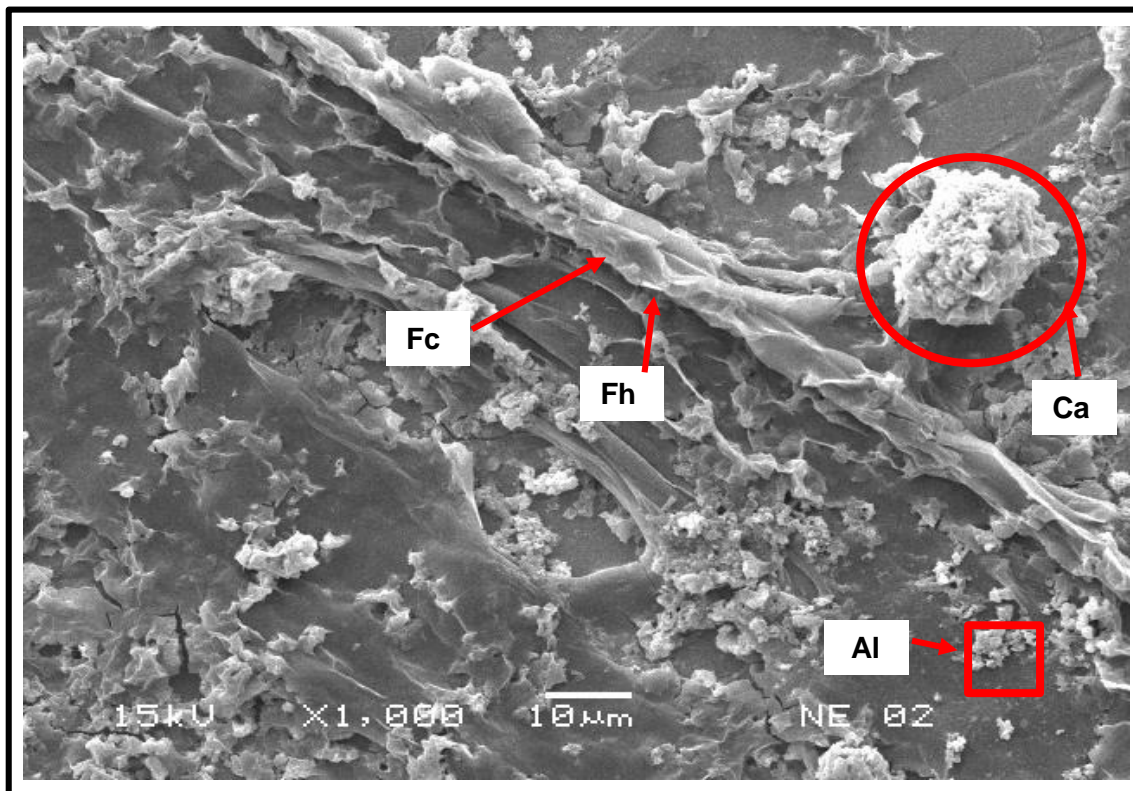
## *Separación centrifuga de aguas residuales de nejayote*

como óptimas en función de esas variables de respuesta o parámetros estudiados. Para comprobar y evidenciar esas condiciones se realizaron estudios de microscopia electronica de barrido.

### **3.4 Resultados para el Objetivo 3**

#### **Morfología del nejayote original y el centrifugado**

La Figura 3.8 presenta la micrografía del nejayote, obtenida a 1000 aumentos en un microscopio electrónico de barrido.



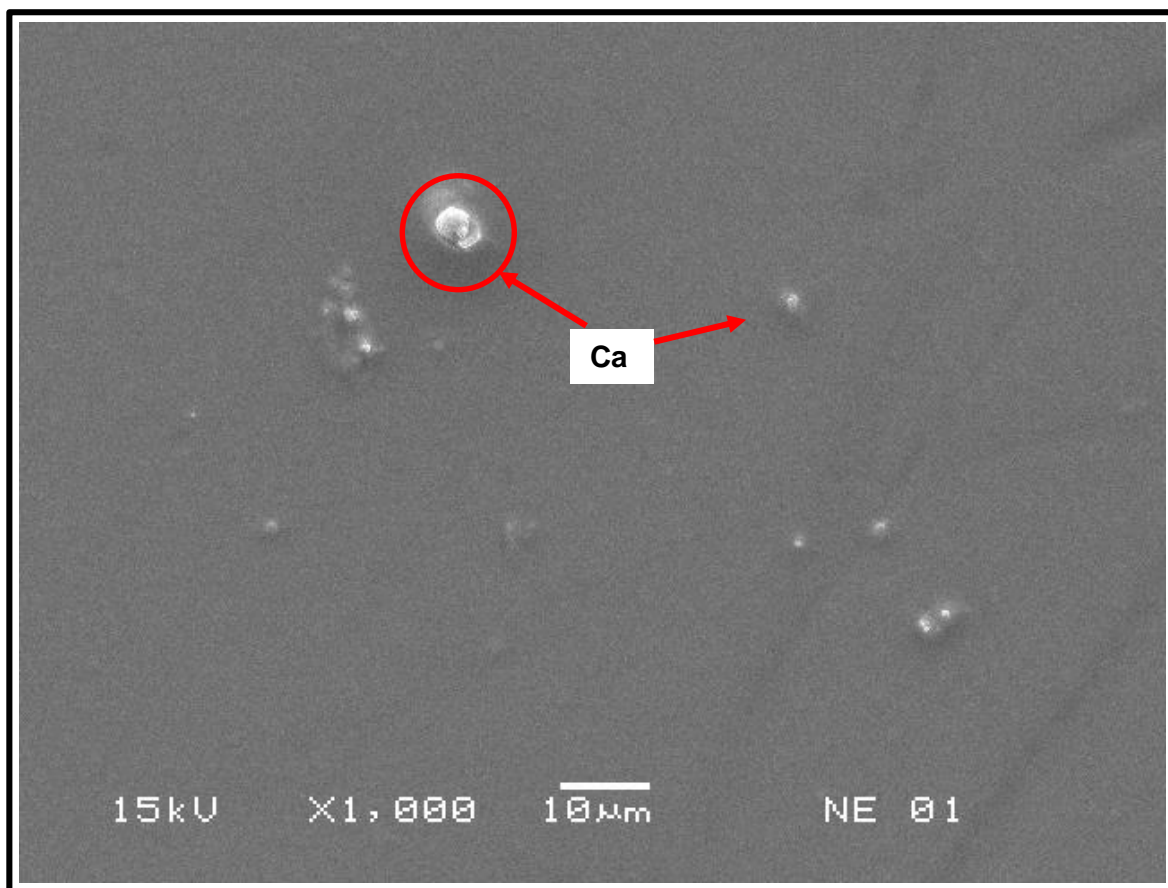
**Figura 3.8 Micrografía del nejayote a 1000 X**





### *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

La micrografía de la Figura 3.8 muestra la morfología de los diferentes componentes del que está formado el nejayote, obtenido del proceso de nixtamalización tradicional. Aquí se presentan fracciones de fibra de hemicelulosa (**fh**) y de celulosa (**fc**), aglomeración de carbonato de calcio (**Ca**) y algunas fracciones de almidón poliédrico (**Al**), tal y como lo reportó en sus micrografías Valderrama-Bravo *et al.* (2010), (2013). En el círculo se presenta una aglomeración de carbonato de calcio, en cuadrado muestra fracciones de almidón y la flecha las fibras de celulosa y hemicelulosa. Estos componentes, sobre todo el calcio presente hace que el nejayote sea un líquido altamente contaminante que requiera tratamiento como dicha agua residual para su posterior uso. En la Figura 3.9 se presenta una micrografía del nejayote que ha sido centrifugado a las condiciones óptimas.



**Figura 3.9 Micrografía de nejayote centrifugado**





## Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote

Las condiciones óptimas son uso de tornillo de gravedad al 50 %, a una velocidad de giro de 4525 rpm, por lo que el programa arroja que la eficiencia fue de 81.9 % y el rendimiento fue de 90.18 %. En la micrografía de nejayote obtenida a 1000 aumentos ya no se observan fibras de hemicelulosa y de celulosa, tampoco de gránulos de almidón. Únicamente se pueden apreciar fracciones de calcio. Esto muestra que la centrifugación elimina la mayor parte de los componentes del nejayote.

### 3.5 Resultados para el Objetivo 4

#### Concentración de calcio de la suspensión de nejayote y clarificado de nejayote a condiciones óptimas.

En la Figura 3.10 se presentan la concentración de calcio en nejayote y la de clarificado de nejayote.

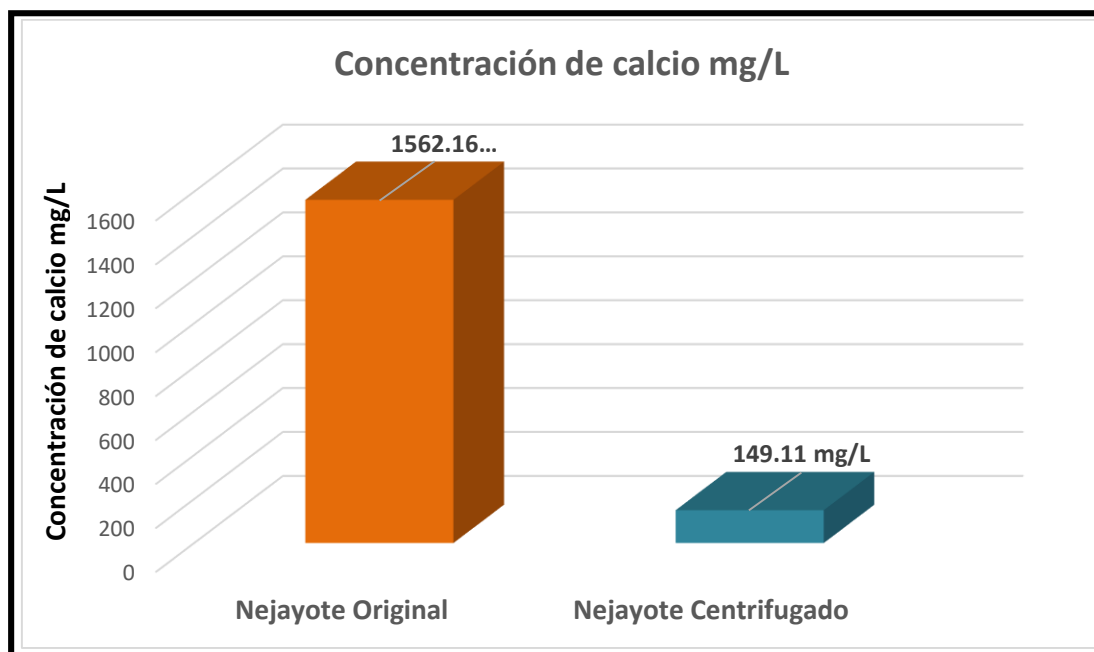


Figura 3.10 Gráfica de concentración de calcio



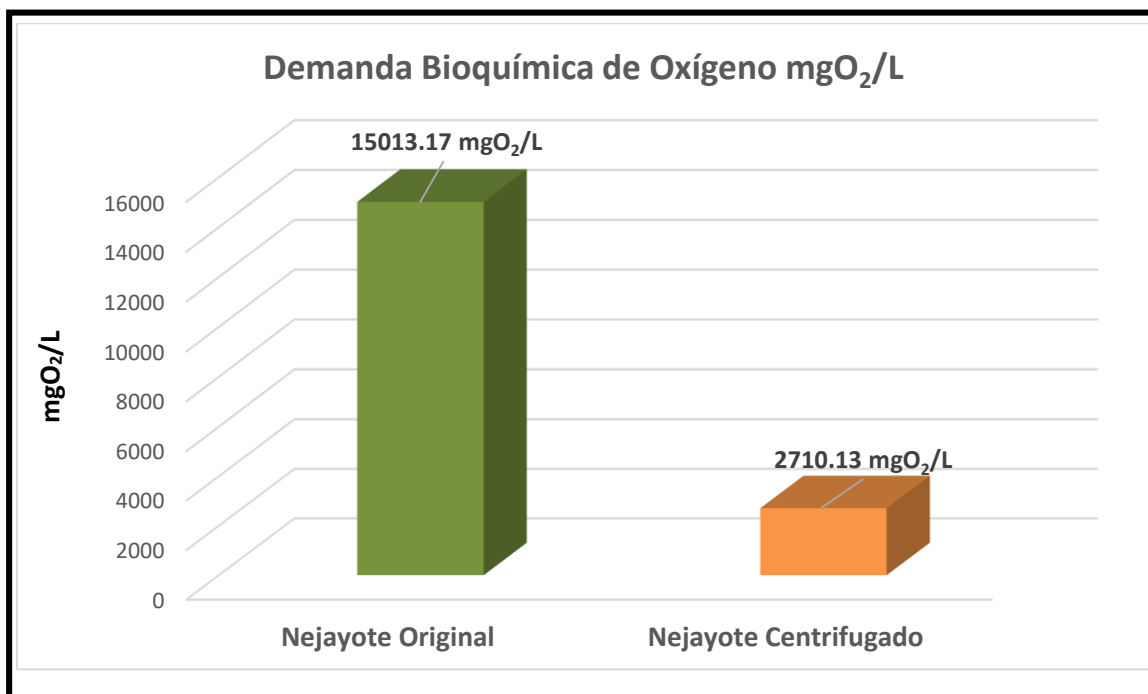
## Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote

La Figura 3.10 presenta el valor de 1562.16 mg/L para la suspensión de nejayote o nejayote original, este valor es similar al reportado por Valderrama- Bravo *et al.*, (2012), ellos presentaron  $1526.21 \pm 26.53$ . Por otro lado, el valor del nejayote centrifugado a las mejores condiciones disminuyó hasta valores de 149.11 mg/L, esto demuestra que esta operación unitaria elimina la mayor parte del calcio y se correlaciona con la técnica de microscopia, la cual evidenció que no hay presencia de los otros componentes, únicamente de calcio.

### 3.6 Resultados para el Objetivo 5

#### **Demanda Bioquímica y Química de Oxígeno de la suspensión de nejayote, comparado con el nejayote centrifugado.**

La Figura 3.11 muestra los resultados obtenidos de suspensión de nejayote original y nejayote clarificado, centrifugado a condiciones óptimas.



**Figura 3.11 Gráfica de la Demanda Bioquímica de Oxígeno**



## Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote

La Figura 3.11 presenta los valores de nejayote original y el nejayote centrifugado, el valor del original fue de 15,013.17 mgO<sub>2</sub>/L, el valor reportado por Valderrama- Bravo *et al.*, (2012) fue de 14, 218.75 mgO<sub>2</sub>/L. El resultado obtenido en este trabajo fue más alto, esto debido a que el nejayote fue obtenido de distinta tortillería. Sin embargo, después de centrifugarse el valor disminuyó a 2,710.13 mgO<sub>2</sub>/L, por lo menos cinco veces menor al valor del nejayote original y al que presentó Valderrama- Bravo *et al.*, (2012) que fue filtrado 6212.25 mgO<sub>2</sub>/L. Esto demuestra la operación de centrifugación es mucho más eficiente que la filtración para limpiar esta agua residual.

La Figura 3.12 muestra la comparación de los valores de la demanda química de la suspensión de nejayote original y del nejayote centrifugado a las condiciones óptimas.

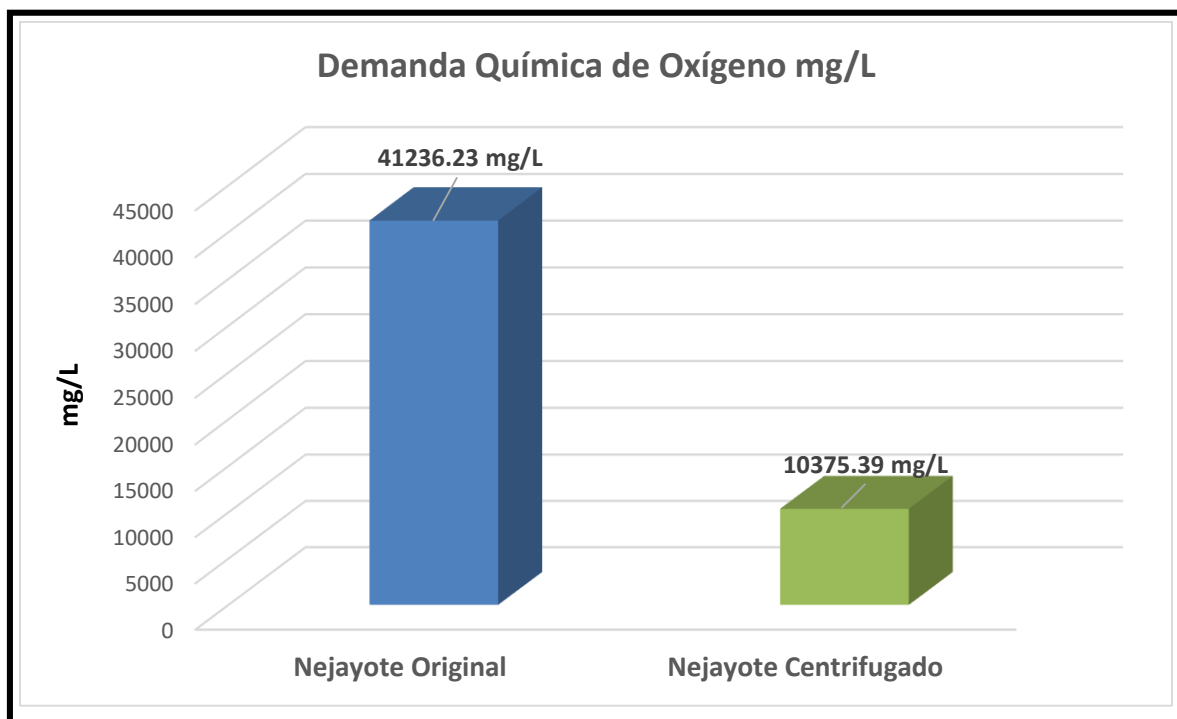


Figura 3.12 Gráfica de la Demanda Química de Oxígeno



### *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

La gráfica de la Figura 3.12 representa los valores de la Demanda Química de Oxígeno del nejayote original y del centrifugado el valor obtenido fue de 41,236.23mg/L, resultados por arriba del obtenido por Valderrama-Bravo *et al.*, (2012). Esto debido a la procedencia obtenida del nejayote. De igual modo reportaron los valores de filtración de 21,783.68 mg/L, o sea la mitad de ese valor, mientras que los obtenidos en este trabajo por centrifugación fueron de 10,375.39 mg/L, cuatro veces menor.

Estos resultados también son una evidencia de que la centrifugación es una operación unitaria que presenta mayor eficiencia de separación de los sólidos de nejayote, por lo que es una alternativa para tratar aguas residuales del desecho del proceso de nixtamalización.



## CONCLUSIONES

Al evaluar la influencia de la velocidad de giro en la centrífuga de discos, se pudo determinar que, de las condiciones trabajadas, el valor óptimo quedo en 4525 rpm, esto demuestra que las condiciones de trabajo para un agua residual de nixtamal, no deberán ser tan extremas, ya que la operación logra eliminar la mayor parte de los sólidos.

El tornillo de gravedad es determinante para obtener una buena eficiencia de separación de los sólidos presentes en el nejayote, para este tipo de aguas residuales la abertura que presentó centrifugados menos turbios y con menor cantidad de sólidos totales fue a un 50 % abierto el tornillo.

Al identificar la morfología de los componentes del nejayote se evidenció mediante las micrograffías obtenidas por microscopía electrónica, el aumento de presencia de fibras vegetales como celulosa y hemicelulosa, algunas fracciones de almidón poliédrico y esférico. Así como, aglomerados de carbonato de calcio. Sin embargo, en el nejayote centrifugado, únicamente presentó residuos de calcio.

La concentración de calcio determinada por espectrofotometría de absorción atómica demostró que al centrifugar el nejayote se perdió casi en su totalidad las sales de calcio biodisponible.

Las demandas bioquímica y química de calcio lograron disminuirse del nejayote original y del nejayote centrifugado, pero no llegar a los niveles aceptables de la norma ambiental (NOM-002-ECOL 1996). Por lo que es necesario hacer otro tratamiento muy probablemente químico para los sólidos solubles del nejayote.



## **RECOMENDACIONES**

Se recomienda emplear la operación unitaria con las aguas residuales de nejayote, no únicamente con el nejayote. Es decir, la suma de nejayote, más el primer y segundo lavado de nixtamal. Que es en realidad como se vierte a drenaje ese desperdicio contaminante.

Se recomienda hacer un tratamiento químico al nejayote centrifugado para disminuir la demanda química y bioquímica.

También es necesario trabajar con aguas residuales de otras tortillerías para conocer las diferentes características de sus aguas de desecho.

Es importante promover entre los profesionales tanto ingenieros, como tecnólogos que los desechos industriales deben ser tratados antes de verterlos a los drenajes.

Es importante hacer un análisis comparativo de varias técnicas de separación como sedimentación, filtración por torta, filtración por lechos empacados y centrifugación con las aguas residuales de nejayote de un mismo lugar.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AOAC. (2000). *Official Methods of Analysis*. (17<sup>th</sup> Ed.) Official methods 965.17 Association of Official Analytical Chemists: Gaithersburg, M. D.
- Arenas, A. J. A. (1999). *Microscopía electrónica de barrido de bajo vacío*. Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ). Ed. UNAM. México, D. F. p.13-35.
- ASTM, (1994). American Society for Testing and Materials. D888-12e1 *Standard Test Methods for Dissolved Oxygen in Water*.
- Badui, D. S. (1993) *Química de los Alimentos*. Ed. Alambra. México, D. F. pp.70-96.
- Báez-Ramírez, O.A. y Martínez-Borrego, A. (1990). *Estudio de la influencia de las condiciones de proceso sobre la calidad de harina de maíz nixtamalizado para tortillas*. Tesis profesional. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México
- Bakshi, A. S. y Singh, R. P. (1980). *Kinetics of water diffusion and starch gelatinization during rice parboiling*. *Journal Food Science*, 45:1387-1394.
- Bello, P. L. A., Osorio, D. P., Amaga, A. E., Núñez, S. C., Paredes-López, O. (2002). *Chemical, physicochemical and rheological properties of masa and nixtamalized corn flour*. *Agrociencia*, 36:319-326.
- Bressani, R. y Billeb, A. C. (2001) *Características de cocción por nixtamalización de once variedades de maíz*. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 51(1):86-94.
- Cárdenas, R. D. A. (2014) Tesis de Licenciatura. *Efecto del proceso de nixtamalización por microondas sobre el contenido de fumonisinas en las tortillas*



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

de maíz. Tesis de Licenciatura. UNAM. FES-Cuautitlán. Ingeniería en Alimentos. pp 36-40.

- Comisión Nacional del Agua (C.N.A., 2015). *Dirección y operación de plantas de tratamiento de agua*. Boletín 14. pp. 13-16. México, D.F.

- Cornejo-Villegas, M. A., Acosta-Osorio, A. A., Rojas-Molina, I., Gutiérrez-Cortez, E., Quiroga, M. A., Gaytán, M.; Herrera, G., Rodríguez M. E. (2010). *Study of the physicochemical and pasting properties of instant corn flour added with calcium and fibers from nopal powder*. *Journal of Food Engineering* 96, 401-409.

- Cornejo-Villegas, M. de los A., Gutiérrez-Cortez, E., Rojas-Molina, J.I., Del Real L. Alicia; Zambrano-Zaragoza M. de L., Martínez-Vega, V., Rodríguez-García, M. (2013). *Physicochemical, morphological, and pasting properties of nixtamalized flours from quality protein maize and its particle distribution*. *LWT – Food Science and Technology*, 53: 81-87.

- Earle, R. (1988). *Ingeniería de los Alimentos: Las operaciones básicas del procesado de los alimentos*. 2<sup>da</sup> Edición. Editorial Acribia. España.

- Fennema, O. R. (2000). *Química de los alimentos*. Ed. Acribia. Zaragoza España. 34-52.

- Fernández-Muñoz, J. L., Rodríguez, M. E., Pless, R. C., Martínez, L. I., Baños, L. (2002). *Changes in nixtamalized corn flour dependent on post cooking steeping time*. *Cereal Chemistry*. 79: 162-166.

- Fernández-Muñoz, J. L., Rojas-Molina, I., González-Dávalos, M. L., Leal, M., Valtierra, M. E., Martín-Martínez, E. Rodríguez, M. E. (2004). *Study of calcium ion*





## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

*diffusion in components of maize kernels during traditional nixtamalization process. Cereal Chemistry. 81: 65-69.*

- Fernández-Muñoz, J.L., San Martín-Martínez, E., Díaz-Góngora, J. A., Calderón, A., Alvarado-Escobar, A., Ortiz-Cárdenas, H., Leal-Pérez, M. (2006). *Steeping time and cooking temperature depended of calcium ion diffusion during microwave nixtamalization of corn. Journal of Food Engineering 76:568-572.*

- Fernández-Muñoz, J. L., Acosta-Osorio, A. A. Guintal-Santos, M. A., Zelaya-Angel, O. (2011). *Kinetics of water diffusion in corn grain during the alkaline cooking at different temperatures and calcium hydroxide concentration. Journal of Food Engineering 106, 60-64.*

- Geankoplis, C. (1998). *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias. 3<sup>ra</sup> Edición. Compañía Editorial Continental. México*

- Gómez, M. H., Waniska, R. D., Rooney, L. W. (1991). *Corn starch characterization of nixtamalized corn flour. Cereal Chemistry 68: 578-582.*

- González, R., Reguera, E., Mendoza, L., Figueroa, J. M., Sánchez-Sinencio, F. (2004). *Physicochemical changes in the hull of corn grains during their alkaline cooking. Food Chemistry 52: 3831-3837.*

- Gutiérrez, E., Rojas-Molina, J. I., Pons-Hernández, J. L., Guzman, H., Aguas-Angel, B., Arenas, J., Fernández, M .P., Palacios-Fonseca, A., Herrerra, G., Rodríguez-García, M.E. (2007). *Study of calcium ion diffusion in nixtamalized quality protein maize as a function of cooking temperature. Cereal Chemistry 84(2), 186-194.*



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

- Gutiérrez-Cortez, E., Rojas-Molina, J. I., Rojas, A., Arjona, J. L., Cornejo-Villegas, M.A., Zepeda-Benítez, Y., Velázquez-Hernández, R., Ibarra-Alvarado, C., Rodríguez-García, M. E., (2010). *Microstructural changes in the maize kernel pericarp during cooking stage in nixtamalization process. Journal of Cereal Science* 51, 81-88.
- Hallaver, 1987 corn: *Cultura y procesamiento de maíz para nixtamalización*. Ed. Diana. México, D.F. Pp 12-26-
- McCabe W., Smith J., Harriot P., (1991). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. 4ta Edición. Editorial McGraw Hill. España
- Niño-Medina, G., Carvajal-Millán, E., Lizardi, J., Rascon-Chu, A., Márquez-Escalante, J., Gardea, A., Martínez-López, A., Guerrero, V. (2009). *Maize processing waste water arabinoxylans: Gelling capability and cross-linking content. Food Chemistry* 115: 1286-1290.
- NMX-F-046-S-1980. *Harina de maíz nixtamalizado*. Norma Mexicana. Secretaria de fomento Industrial. Dirección de Normas.
- NOM-002-ECOL 1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.
- Ocegüera, H. K. (1999). *Interacción del Ca con los componentes del grano de maíz durante la nixtamalización*. Tesis de Maestría IPN. México. 27-42.
- Perry, R. H. y Chilton, C. H. (1998). *Biblioteca del ingeniero Químico*. Ed. Mc Graw Hill, México, D.F. 1719-1786.



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

- Pflugfelder, R.L., Rooney, L. W., Waniska, R. D. (1988). *Dry matter losses in commercial corn masa production*. *Cereal Chemistry* 65(2): 127-132.
  
- Pineda-Gómez, P., Rosales-Rivera, A., Rodríguez-García. M. E. (2012). *Modeling calcium and water intake in threshed corn grain during thermo-alkaline treatment*. *Journal of Food Engineering* 78, 288-295.
  
- Ramírez-Romero, G. (2009) *Temas selectos de tortilla, un enfoque multidisciplinario*. Ed, Universidad Autónoma Metropolitana. México, D.F. Pp.32-37.
  
- Rojas-Molina, I.; Gutiérrez, E.; Palacios-Fonseca, A.; Baños, L.; Pons-Hernández, J.L.; Guzmán-Maldonado, S.H.; Pineda-Gómez, P., Rodríguez, M.E. (2007). *Study of structural and thermal changes in endosperm of quality protein maize during traditional nixtamalization process: Cereal Chemistry: 84 (4): 304-312.*
  
- Rojas-Molina, I., Gutiérrez, E., Cortés-Acevedo, Falcon, A., Bressani, R., Rojas, A., Ibarra, C., Pons-Hernández J.L., Guzmán-Maldonado, S.H., Cornejo- Villegas, M. A., Rodríguez, M. E. (2008). *Analysis of quality protein changes in nixtamalized QPM flours as a function the steeping time. Cereal Chemistry, 3:409-416.*
  
- Rojas-Molina, I., Gutiérrez, E., Rojas, A., Cortés-Álvarez, M., Campos-Solís, L., Hernández-Urbiola, M., Arjona, J. L.; Cornejo, A., Rodríguez M. E. (2009). *Effect of temperature and steeping time on calcium and phosphorus content in nixtamalized corn flours obtained by traditional nixtamalization process. Cereal Chemistry. 86 (5) : 516-521.*



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

- Rooney, L. W. y Almeida-Domínguez. (1995). *Productos de maíz nixtamalizado y calidad de maíz*. Seminario sobre tecnología de la tortilla. Asociación Americana de Soya. México. D.F. 25-34.
- Rooney, L. W. y Serna-Saldívar, S. O. (1987). *Food uses of whole corn and dry-milled fractions*. Pp. 399-429. In: *Corn Chemistry and Technology*. S. A. Watson and P. E. Ramsted, eds American. *Association Cereal Chemistry*. St. Paul, MN.
- Rosentrater, K. A. (2006). *A review of corn masa processing residues: generation, properties, and potential utilization*. *Waste Manage* 26: 284-292.
- Sahai, D. S., Surjewan, I., Mua, J. P., Buendía, M. O., Rowe, M., Jackson, D. S. (2002). *Dry matter loss during nixtamalization of white corn hybrid impact of processing parameters*. *Cereal Chemistry*, 77: 254-258.
- Salinas, M. y Vázquez, C. (2003) *Calidad de maíz para las industrias molinero-tortillera y harinas nixtamalizadas*. Memoria técnica No.6, 61-65.
- Sawyer, C., McCarty, P., Parkin, S. (1996) *Chemistry for Environmental Engineering and Science*. Editorial McGraw Hill, USA.
- Serna-Saldívar, S. O., Gómez, M. H., Rooney, L. W. (1990). *Technology, chemistry and nutritional value of alkaline-cooked corn products*. *Journal of Cereal Science*, 10: 243-307.
- Salmeron-Alcocer, A., Rodríguez-Mendoza, N., Pineda- Santiago, S. Cristiani-Urbina, E. Huarez- Ramírez, C. Ruíz-Ordaz, N., Galindes-Mayer, J. (2003). *Aerobic treatment of maize procesing wasterwater (nejayote) in a single stream multistage reactor*. *Journal of Envirromental Engineering and Sience* 2. 401-406



## *Separación centrífuga de aguas residuales de nejayote*

- Trejo-González, A., Feria-Morales, A., Wild- Altamirano, C. (1982). *The role of lime in the alkaline treatment of corn for tortilla production. Modifications of proteins Food, nutritional, and pharmacological aspects.* 245-263 En: *Advances in Chemistry*. R.E. Freney y J.R. Whitaker (eds). ACS: Washington, D.C.
  
- Valderrama-Bravo, M. C., Gutiérrez-Cortez, E., Contreras-Padilla, M. Rojas-Molina, Mosquera, J. C., Rojas- Molina, A., Beristain, F., Rodríguez-García, M. E. (2012). *Constant pressure filtration of lime water (nejayote) used to cook kernels in maize processing.* *Journal of Food Engineering*, 110: 478-486.
  
- Valderrama-Bravo, M. del C. Contreras-Padilla, M. Gutiérrez-Cortez, E. Oaxaca-Luna, A., Rodríguez-García, M. E. (2013) *Physical-Mechanic treatment of nixtamalization subproduct (Nejayote)* *CyTA Journal of Food* (Vo. 11 No. S1, 75-83.
  
- Velazco-Martínez, M., Angulo, O., Vázquez-Couturier, D.L., Arroyo-Lara, A., Monroy, J. A. (1997). *Efecto de sólidos secos de nejayote en pollos de crecimiento.* *Metab Nutr* 76: 1531-1534.
  
- Zazueta, C., Ramos, G, Fernández-Muñoz, J. L., Rodríguez, M. E. Acevedo-Hernández, G., Pless, R. C. (2002). *A radioisotopic study of the entry of calcium ion into the maize kernels during nixtamalization.* *Cereal Chemistry*, 79:500-503.
  
- Zeki-Berk (2009) *Food Process Engineering and Techology. Centrifugation.* New York. pp. 228-231.