



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

Utilización de la molienda criogénica para la preservación del
contenido de grasa y el cumplimiento del rendimiento para
malla 10 de la nuez pecanera (*Carya illinoensis*)

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO EN ALIMENTOS

PRESENTA:

ORLANDO GONZÁLEZ CHÁVEZ

ASESOR: I.A. LAURA MARGARITA
CORTAZAR FIGUEROA

COASESOR: Dr. JOSÉ LUIS ARJONA ROMÁN

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO, 2017



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

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

ASUNTO: VOTO APROBATORIO

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.

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

Utilización de la molinera criogénica para la preservación del contenido de grasa y el cumplimiento del rendimiento para malla 10 de la nuez pecanera (Carya illicnesis).

Que presenta el pasante: Orlando González Chávez

Con número de cuenta: 405094569 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 28 de Marzo de 2017.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Dra. Rosalía Meléndez Pérez	
VOCAL	Dr. Antonio Trejo Lugo	
SECRETARIO	I.A. Laura Margarita Cortazar Figueroa	
1er. SUPLENTE	I.A. Miriam Edith Fuentes Romero	
2do. SUPLENTE	I.A. Maritza Rocandio Pineda	

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

Agradezco a Dios por darme la oportunidad de día con día realizar mis sueños.

A mis padres por enseñarme a perseguir mis ideales, por su amor incansable y su apoyo total.

A mi hermana por todas las aventuras y sus consejos, a John por sus pláticas y ocurrencias y a esas dos personitas (Mauro y Darío) por hacerme el tío más feliz.

A Abigail por tomarme de la mano y no soltarme en los momentos más difíciles.

A Marco, Yoli, Luisito, Ivonne, por hacer este camino menos largo.

A Juan, Aldo, Sergio, Chava, Marco, Lili, Wendy, Ilse, Ana, Miriam por 14 años de amistad.

A Celso por la formación brindada, a Arturo por el apoyo y los ceniceros a tope y a Víctor por su música.

Gracias profesora Cortazar por su apoyo y por no abandonarme nunca y al Doctor Arjona por sus consejos.

Todo gran comienzo tiene su encanto

Índice

Índice de figuras	6
Índice de Tablas	8
Resumen	9
Introducción	11
Capítulo 1. Antecedentes	16
1.1 Nuez Pecanera	16
1.1.1 Origen	16
1.1.2 Fisiología.....	17
1.1.3 Aporte Nutricional	19
1.1.4 Importancia comercial	23
1.1.5 Características de la nuez molida	26
1.1.6 Ácidos grasos en la nuez	28
1.2 Molienda criogénica	31
1.2.1 Generalidades de molienda	31
1.2.2 Fuerzas utilizadas en la reducción de tamaño	34
1.2.3 Equipos para criomolienda.....	39
1.2.4 Sistemas de inyección en nitrógeno líquido	40
1.2.5 Análisis granulométrico	47
1.2.6 Antiaglomerantes	50
1.2.7 Molienda criogénica.....	51
1.2.8 Aplicaciones de la molienda criogénica en alimentos.....	53
1.2.9 Ventajas de la molienda criogénica.....	55

1.2.10 Nitrógeno líquido	56
Capítulo 2. Metodología experimental	60
2.1 Problema	60
2.2 Hipótesis.....	60
2.3 Objetivo General	62
2.4 Materiales y métodos	63
2.4.1 Materiales	63
2.4.2 Métodos.....	65
2.4.3 Análisis estadístico.....	71
Capítulo 3. Resultados	72
3.1 Diámetro inicial de partícula.....	72
3.2 Cuantificación de grasa antes de la molienda	72
3.3 Cuantificación de grasa después de la molienda.....	73
3.4 Análisis Granulométrico	79
Conclusiones	89
Bibliografía	93

Índice de figuras

Figura 1. Nuez pecanera con cáscara.....	18
Figura 2. Nuez pecanera	19
Figura 3. Molino Cryomil	39
Figura 4. Tolva de dosificación para molienda criogénica	41
Figura 5. Tornillo criogénico para molienda criogénica	42
Figura 6. Especies molidas con nitrógeno líquido	56
Figura 7. Molino criogénico utilizado en la experimentación (IKA A11 Basic).....	61
Figura 8. Elementos molientes	64
Figura 9. Instrumento Ro-Tap utilizado en el análisis granulométrico	65
Figura 10. Muestra de nuez en el molino criogénico	69
Figura 11. Gráfico comparativo del contenido de grasa antes y después de la molienda.....	74
Figura 12. Gráficas del contenido de grasa análisis estadístico	75
Figura 13. Gráfico diferencial comparativo.....	81

Figura 14. Distribución en el juego de tamices de una muestra de nuez molida con cuchilla.....	82
Figura 15. Gráfico acumulativo con procedimiento para obtener el rendimiento	83
Figura 16. Gráfica de interacción para el rendimiento de malla #10.....	86
Figura 17. Gráfica de efectos para el rendimiento de malla #10	87

Índice de Tablas

Tabla 1. Composición química de la nuez pecanera.....	22
Tabla 2. Granulometría de la nuez	27
Tabla 3. Fuerzas de Trituración	34
Tabla 4. Aplicaciones en alimentos del nitrógeno líquido.....	58
Tabla 5. Cuadro de variables para realizar la molienda criogénica	68
Tabla 6. Resultados diámetro inicial de partícula.....	72
Tabla 7. Porcentaje de grasa calculado antes de la molienda	73
Tabla 8. Porcentajes preservados de grasa para cada condición de molienda	78
Tabla 9. Porcentaje de material que pasa por la abertura del tamiz de 0.063in	85

Resumen

Se realizó la molienda de nuez pecanera (*Carya Illionesis*) mediante un método de molienda criogénica, sumergiéndola en nitrógeno líquido, comparando el contenido de grasa antes y después de la molienda y la distribución de tamaños obtenidos.

Se llevó a cabo en un molino IKA A11 Basic el cual cuenta con dos diferentes fuerzas de aplicación, las cuales fueron impacto y cizalla. Se controló el tiempo de inmersión de la nuez pecanera en el nitrógeno líquido utilizando 1 minuto y 1.5 minutos y el tiempo de molienda, 5 y 10 segundos.

Se hicieron 3 repeticiones para cada condición de molienda establecida en un diseño factorial 3^2 .

Para hacer la comparación del contenido de grasa a la nuez, se le cuantificó la cantidad de grasa por medio de método soxhlet, antes y después de la molienda.

A los productos obtenidos de la molienda se les realizó un análisis granulométrico para determinar el tamaño de partícula y el rendimiento para la malla establecido por la norma.

El mayor porcentaje de contenido de grasa preservado en la nuez después de la molienda fue de 41%, el cual se obtuvo con una fuerza de cizalla, al menor tiempo de molienda (5 segundos) y de acuerdo a las interacciones mostradas por el diseño estadístico, se pudo observar que el tiempo de inmersión en nitrógeno líquido no tiene influencia significativa con las otras variables.

Para el análisis granulométrico, se cumplió con el requisito de la norma NMX-FF-093-SCFI-2011 para nuez pecanera que indica que el porcentaje que debe de pasar por una malla #10 (1.6mm) es de 70%; en todas las repeticiones el rendimiento para la malla #10 está por arriba del 85%.

Se puede concluir que la operación de molienda criogénica es muy eficiente para la preservación del contenido de grasa de la nuez y así conservar los atributos de calidad en la misma al realizar la molienda con fuerzas de cizalla.

Introducción

La reducción de tamaño es una operación unitaria en las que las partículas de sólidos se pueden cortar o romper en piezas más pequeñas. En los procesos industriales la reducción de tamaño de sólidos se lleva a cabo por distintos métodos y con fines diferentes (McCabe, 1991).

Muchos materiales sólidos se presentan con dimensiones demasiado grandes para su uso por lo cual se deben reducir. En la industria del procesamiento de alimentos, gran número de productos alimenticios se someten a una reducción de tamaño (Geankoplis, 1998).

Durante la reducción, las partículas del alimento se someten a un stress (provocado por la aplicación de fuerzas mecánicas) y se crea una tensión interna que provoca la deformación de las partículas. Cuando el stress, en una determinada zona, supera los límites de elasticidad del producto a moler, este experimenta deformación permanente, se rompe en pequeños fragmentos generándose nuevas superficies y liberando energía en forma de calor y sonido (Colina, 2008).

La cantidad de energía absorbida por un alimento antes de su límite de ruptura, está determinada por su grado de

dureza y su tendencia a la rotura y estas a su vez dependen de su estructura. Los alimentos más duros absorben mayor cantidad de energía y por ello requieren, para lograr su ruptura, un aporte energético mayor. El grado de reducción de tamaño, la energía gastada y la cantidad de calor generado dependen tanto del tipo y magnitud de las fuerzas de reducción de tamaño (Colina, 2008).

En algunos casos el calor generado por el motor del molino minimiza las características del material a moler, provocando el apelmazamiento del material en el molino, la evaporación de componentes volátiles como las grasas y aceites esenciales. Así como también la permanencia por más tiempo del material en el molino, lo que genera elevados costos de energía (Messer (b), 2009).

En ocasiones, durante la molienda de alimentos, ésta debe realizarse en frío. Existe una alternativa de molienda, molienda en frío que se conoce como molienda criogénica, que consiste en sumergir o rociar el material a moler con algún líquido criogénico, para congelarlo y posteriormente molerlo, comúnmente nitrógeno líquido, de este modo, es posible conseguir polvos más finos y conservar todos los aromas.

Un ejemplo de ello es la molienda criogénica de especias, donde se obtiene un producto de gran calidad y de gran aroma (Messer (b), 2009). La función del nitrógeno líquido es hacer friable al material lo cual conlleva que sus componentes volátiles y las características organolépticas como color, sabor y olor se conserven.

El principio de la molienda criogénica es que los materiales se congelan mediante nitrógeno líquido o dióxido de carbono a muy baja temperatura. A través de este procedimiento, se pueden conseguir granos particularmente finos, a la vez que no se alcanzan temperaturas elevadas que puedan dañar la calidad del producto (Messer (b), 2009).

La nuez pecanera posee un alto contenido de grasa, dicho contenido de grasa lo hace un material blando y muy poco friable; considerando que el principal objetivo de la molienda de especias es obtener un tamaño de partícula más pequeño con una buena calidad del producto en términos de sabor y color, la molienda de la nuez se torna complicada. En el proceso normal de molienda, el calor se genera cuando la energía se utiliza para fracturar una partícula en un tamaño más pequeño. Este calor generado usualmente es

perjudicial para el producto y produce cierta pérdida de sabor y calidad. La grasa en las especias generalmente plantea problemas adicionales y es una consideración importante en la molienda (Singh, K. & Goswani).

El objetivo de aplicar a la nuez la técnica de molienda criogénica, es solidificar la grasa y que al momento de la molienda esta sufra daño mínimo, se conserve en su mayoría dicho contenido para preservar ácidos grasos esenciales que son necesarios para diversas funciones del organismo, y se obtengan el tamaño de partícula establecido por la norma.

El presente trabajo tiene como objetivo informar de los resultados obtenidos al realizar una molienda criogénica de nuez pecanera para preservar el contenido de grasa de la nuez y cumplir con el tamaño de partícula especificado por la norma NMX-FF-093-SCFI-2011, al variar la fuerza de aplicación (impacto o cizalla), el tiempo de inmersión en nitrógeno líquido (1 y 1.5 minutos) y el tiempo de molienda (5 y 10 segundos).

Para dicha experimentación se utilizó un molino IKA A11 Basic para realizar la molienda criogénica de nuez pecanera y nitrógeno líquido para la inmersión. Para determinar el contenido de grasa de la nuez, antes y después de la molienda, se usó la técnica de Soxhlet.

Para determinar la distribución de tamaño del material se realizó la técnica de tamizado, de la cual se obtuvieron los gráficos acumulativos y diferenciales.

Capítulo 1. Antecedentes

1.1 Nuez Pecanera

1.1.1 Origen

En el mundo se producen más de 40 tipos de nueces, dentro de los que se destacan los siguientes:

- Almendra (*Prunus Amigdalus*)
- Avellana (*Corylus Avellana*)
- Macadamia (*Macadamia SSP*)
- Nuez encarcelada o pecanera (*Carya Illionesis*)
- Nuez de castilla (*Junglans Regia*)
- Nuez mantequilla (*Junglans Cinerea*)
- Pistacho (*Pistachia Vera L.*)

El nogal pecanero del cual se obtiene la nuez encarcelada o pecanera pertenece a la familia *Jungladaceae* que comprenden plantas arbóreas que producen una drupa, en la cual, durante la fase de maduración, el pericarpio y el mesocarpio se secan y el endocarpio (cáscara) y la semilla, son consideradas como la nuez.

Los géneros más importantes de esta familia son *Junglans* y *Carya* destacando para el primero, el nogal de castilla y para el segundo, el nogal pecanero (Díeguez y col, 2011).

El nogal pecanero es un árbol que puede superar los 30 metros de altura, muy vigoroso y longevo, el cual inicia su vida productiva entre los 6 a 10 años de edad y continúa produciendo en niveles óptimos y comerciales durante poco más de 50 años, aún y cuando con un buen manejo técnico se puede alargar su vida productiva hasta 100 años.

1.1.2 Fisiología

La nuez es la fruta del nogal y se considera una drupa (fruto carnoso que contiene una sola semilla), la cual consta de pericarpio, mesocarpio y semilla. El pericarpio y el mesocarpio es una estructura segmentada en 4 partes que al deshidratarse se abre dejando libre al endocarpio y a la semilla.

La cáscara externa de la drupa o nuez, se le conoce como ruezno y tiene un espesor de entre 3 y 4 milímetros. En sus etapas tempranas de desarrollo, el ruezno es de color verde

y va volviéndose de color marrón a medida que va alcanzando la madurez, momento en el que el ruezno se abre en cuatro para liberar al fruto (Figura 1), mientras tanto la cáscara interna del fruto es de color café oscuro y con un espesor que varía entre 2 y 3 milímetros (Díeguez y col, 2011).



Figura 1. Nuez pecanera con cáscara (Díeguez y col, 2011).

El principal fruto del nogal pecanero, la nuez, llamada también “kernel” o “fruto comestible”, es bilobulada con dos surcos longitudinales por lóbulo, los lóbulos están separados por un tabique o endoesqueleto (Figura 2).



Figura 2. Nuez pecanera (Díeguez y col, 2011).

1.1.3 Aporte Nutricional

La nuez pecanera se comercializa con cáscara y sin cáscara, en mitades, pedacería (pedazos, granillo y gránulos) así como polvo de nuez; se consume en estado fresco o bien se procesa para la elaboración de botanas, dulces, pasteles, nieves y paletas, entre otros. Por otra parte, se elaboran subproductos como aceite de nuez, y carbón activado, este último a partir de su cáscara; la madera del árbol es empleada para la elaboración de muebles finos.

Las nueces, incluso otras especies, como avellanas, pistaches, nuez de castilla, almendra, etc., son una fuente rica en compuestos bioactivos o fitoquímicos, que presentan acción nutracéutica, entre los cuales se pueden

destacar carotenoides (pigmentos de las frutas), tocoferoles (vitamina E), fitoesteroles, fitoestrógenos, ácidos fenólicos, flavonoides, lignanos, proantocianidinas, entre otros (Díeguez y col, 2011).

Entre los beneficios que aportan estos compuestos, podemos destacar que inhiben el daño oxidativo de los componentes celulares, como los ácidos grasos insaturados que se encuentran en las membranas celulares o del ADN (ácido desoxirribonucleico, que contiene la información genética en las células).

También conviene destacar que el contenido de fibra total es, en promedio, de 8% (mayor, en comparación con los cereales), y su aporte es significativo en cuanto a minerales como hierro, zinc, selenio, manganeso y magnesio, que algunas oleaginosas comerciales contienen en menor proporción o no los contienen (es el caso de: cacahuete, soya, cártamo, olivo, entre otras). Por lo tanto, la nuez viene a ser uno de los alimentos con mayor concentrado de nutrientes disponibles. El principal nutrimento es el aceite (ácidos grasos o lípidos); además, podemos resaltar su contenido de proteínas y carbohidratos. Sin embargo, el contenido de ácidos grasos saturados en la nuez pecanera

es menor, en comparación con otras oleaginosas comerciales similares, como almendras y avellanas, y no se ha reportado que contenga ácidos grasos tipo trans (no metabolizables); en cambio, es rica en ácidos grasos poliinsaturados como el linolénico, el linoleico y tocoferoles (vitamina E) (Tabla 1).

Al igual que ocurre con algunos aminoácidos, el linoleico y el linolénico están considerados como ácidos grasos indispensables, por lo que se requiere un consumo continuo; se recomienda que representen de 1 a 2% de los lípidos totales ingeridos. Forman parte constitutiva de la membrana de diferentes tejidos celulares, son precursores del ácido araquidónico necesario para darle rigidez a la mitocondria y son empleados en la síntesis de las hormonas prostaglandinas. Contribuyen al mantenimiento de la piel, del pelo y del sistema reproductivo, así como en la regulación del metabolismo del colesterol; ayudan a la absorción de nutrimentos, a la regulación de la contracción muscular y de la presión arterial, y fortalecen el crecimiento de las células sanas (Badui, 2006).

Tabla 1. Composición química de la nuez pecanera

Tipo de nutriente	Unidad	Valor/100G ¹
Proteínas	g	9.0
Humedad	g	4.0
Lípidos totales	g	71.0
Minerales	g	1.4
Fibra total	g	8.0
Fibra soluble	g	0.7
Fibra insoluble	g	7.3
Carbohidratos	g	13.86
Valor calórico	kcal	691.0
Ácidos grasos monoinsaturados	g	66.0
C 18:1 linoleico	g	66.0
Ácidos grasos poliinsaturados	g	25.0
C 18:2 linoleico	g	23.4
C 18:3 linolénico	g	1.2
C 20:1 gadoleico	g	0.4
Ácidos grasos saturados	g	9.0
C 16:0 palmítico	g	5.9
C 18:0 esteárico	g	3.1
Ácido ascórbico	mg	1.10
Tiamina	mg	0.66
Riboflavina	mg	0.13
Niacina	mg	1.17
Ácido pantoténico	mg	0.86
Piridoxina	mg	0.21
Ácido fólico	mg	22.0
Vitamina E	mg	1.60
Vitamina A	UI	560
Vitamina K	µg	3.50

Calcio	mg	70
Magnesio	mg	121
Potasio	mg	410
Fósforo	mg	277
Boro	mg	1.2
Cobre	mg	1.0
Hierro	mg	2.5
Manganeso	mg	7.8
Sodio	mg	0
Zinc	mg	4.53
Aluminio	mg	2.1
Selenio	µg	3.8

Fuente: Díeguez y col, 2011

1.1.4 Importancia comercial

En el contexto internacional, si bien se cultiva el nogal con fines económicos en más de 45 países, la nación que ha liderado la producción de nueces es China. Su inserción en el contexto mundial se basó en la colocación de nuez pelada en el mercado a bajo precio. A esto se agrega la incorporación de tecnología de cultivo, cosecha y acondicionado que le ha permitido obtener mayor cantidad de producto de mejor calidad, en tamaño y color. Entre los años 2000 y 2013 ha sido el mayor productor y fue secundado por Estados Unidos, que sólo en el año 2001 se ubicó en el primer puesto. Irán, Turquía y Ucrania

acompañan a los mayores productores mundiales. Durante el año 2013 se produjeron 1.662.130 toneladas de nuez pecanera a nivel mundial. China aportó el 30%, mientras que Estados Unidos participó con el 19% (Fuentes, 2013).

En el contexto nacional, la nuez pecanera es un cultivo de importancia comercial implementado en México desde los años cuarenta y cincuenta.

El cultivo de nuez pecanera en México es una actividad en amplio crecimiento, sobre todo en estados del norte, debido a la amplia adaptación climática y edafológica, así como por las condiciones de mercado y atractiva rentabilidad que presenta, al canalizarse a Estados Unidos de América (Sanjuan 2016).

La producción de nuez pecanera en México en el año 2015 fue de aproximadamente 118 mil toneladas, de las cuales 79,934 toneladas se producen en el estado de Chihuahua seguido de Sonora con una producción de 15,028 toneladas, Coahuila con 12,509 toneladas, Durango con 7,142 toneladas y Nuevo León con 3,353 en ese mismo año. Este cultivo es el primer generador de divisas de los cultivos perennes de Chihuahua (Alderete et col, 2015).

El cultivo de nuez en esta región del país es uno de los mayores generadores de ingresos, como la manzana, la leche y la producción de carne (Chihuahua, 2013).

El 60% de la producción de nuez del estado de Chihuahua se exporta al mercado de la Unión Americana. Ocho mil toneladas se destinaron al mercado del Lejano Oriente. El valor de la producción de la nuez pecanera en 2013 fue de 2,922 millones de pesos; en la producción de este cultivo se emplean de 20 a 40 jornales por hectárea, generando alrededor de 5,000 empleos indirectos en el campo (SAGARPA, 2013).

A pesar de que México tiene una alta producción anual de nuez, el mercado interno se caracteriza por un bajo consumo, de tal forma que impera una sobreoferta del fruto respecto a la demanda interna (Orona et col, 2015). Esta situación conlleva a la comercialización de los excedentes productivos en los mercados internacionales, específicamente en Estados Unidos y Canadá. Este escenario, permite advertir que la diversidad de mercados hacia los cuales se dirigen las exportaciones continúa

siendo reducida. Sin embargo, es evidente que los rendimientos, el volumen y la calidad de las nueces que se producen en México poseen las características exigidas por los mercados internacionales, si bien la concentración de sus ventas en pocos mercados las hace más vulnerables. En este contexto resulta evidente que existe la necesidad de identificar nuevos mercados potenciales, con el fin de diversificar las alternativas existentes, mejorar las condiciones de negociación y obtener mayores ventajas económicas para los productores (Agronegocios, 2012).

1.1.5 Características de la nuez molida

En todas las categorías, tipo y presentación comercial, sin perjuicio de las disposiciones especiales establecidas para cada una de las tolerancias admitidas, las nueces pecaneras deben cumplir con las especificaciones de granulometría que se indican en la Tabla 2. A partir de la cual se determinaron las características granulométricas del producto final, las cuales fueron que deberá pasar por malla 10, con un rendimiento de malla del 70%, de acuerdo a las especificaciones de la nuez como granillo.

Tabla 2. Granulometría de la nuez

Nuez mediana		
Porcentaje retenido por malla	Mínimo	Máximo
Malla # 4 (4.75 mm)	83%	94%
Malla # 10 (1.68 mm)	5%	15%
Pasa por malla # 10 (1.68 mm)	-----	1%
Piezas mayores a 15 mm	1%	-----
Nuez mediana-pequeña		
Porcentaje retenido por malla	Mínimo	Máximo
Malla # 4 (4.75 mm)	60%	70%
Malla # 10 (1.68 mm)	30%	40%
Pasa por malla # 10 (1.68 mm)	4%	-----
Nuez pequeña		
Porcentaje retenido por malla	Mínimo	Máximo
Malla # 4 (4.75 mm)	-----	2%
Malla # 10 (1.68 mm)	85%	100%

Pasa por malla # 14 (1.40 mm)	-----	5%
Granillo		
Porcentaje retenido por malla	Mínimo	Máximo
Malla # 10 (1.68 mm)	70%	100%
Pasa por malla # 14 (1.40 mm)	-----	15%

Fuente (NMX-FF-093-SCFI-2011)

1.1.6 Ácidos grasos en la nuez

En el caso de la nuez, debido a su alto contenido en aceites grasos principalmente el linoleico y el linolénico al momento de la criomolienda las cadenas de dichos ácidos, al enfriarse, se alinean y forman una estructura compacta llamada cristal; este proceso implica la remoción de calor y, por lo tanto, la reducción de la dinámica de las moléculas, con lo que se provoca que se acerquen unas a otras.

La creación de los cristales es un proceso dinámico ya que éstos cambian de patrón cristalográfico hasta llegar a un estado termodinámicamente más estable; a la propiedad de un compuesto para cristalizar en distintas formas,

manteniendo su composición química, se le llama polimorfismo.

El cristal tiene un tamaño y forma determinados que se reflejan en su textura y en su punto de fusión; su formación está influida por el calentamiento y enfriamiento a que se someten las grasas y la temperatura final que se alcanza.

Si una grasa es enfriada rápidamente, se forman cristales pequeños, transparentes, tersos, suaves, de forma de aguja y frágiles. El tamaño del cristal y su orientación determinan la textura, la tersura, la sensación oral y las propiedades funcionales de la grasa; el orden cristalino interno de los ácidos grasos define el punto de fusión, el cual aumenta con el tamaño del ácido graso que contenga, sin importar el polimorfo de que se trate.

Estos aceites grasos contenidos en la nuez, sufren transformaciones químicas, conocidas comúnmente como rancidez, que además de reducir su valor nutritivo, producen compuestos volátiles que imparten olores y sabores desagradables; estas transformaciones se han dividido en dos grupos: la lipólisis o rancidez hidrolítica y la autoxidación o rancidez oxidativa. Esta última, es el deterioro más común de las grasas y aceites y se refiere a la

oxidación de los ácidos grasos insaturados, pero también se presenta con otros compuestos de interés biológico, como la vitamina A y los carotenoides. La oxidación ocurre cuando un átomo cede un electrón a otro átomo distinto mediante el proceso de la reducción. En muchos tejidos, los lípidos están protegidos de la oxidación por la separación física del oxígeno y de los promotores (p. ej., la lipoxidasa), como ocurre en las nueces y los cacahuates, ya que una vez rota dicha barrera, la oxidación procede rápidamente (Badui, 2006).

Se ha demostrado que la molienda criogénica de especias, mejora la calidad del sabor de los polvos dando una mejor calidad cuando se compara con una molienda convencional.

Las especias como pimienta blanca, nuez, comino, orégano y canela, molidas criogénicamente retienen más de los componentes volátiles que las especies molidas convencionalmente (Sowbhagya, 2006).

Por lo que la molienda criogénica tiene dos principales objetivos, cristalizar la grasa para obtener un producto más frágil y así facilitar la molienda obteniendo un producto más fino; y evitar la oxidación de la nuez preservando el contenido de ácidos grasos para obtener un producto de mayor calidad comercial.

1.2 Molienda criogénica

1.2.1 Generalidades de molienda

En la reducción de tamaño de los sólidos, los materiales de alimentación se pulverizan a tamaños más pequeños por medio de una acción mecánica, es decir, los materiales se fracturan. El primer paso del proceso consiste en que las partículas de la alimentación se deformen y desarrollen tensiones por acción de la maquinaria de reducción de tamaño.

Este trabajo para crear esfuerzos en las partículas se almacena temporalmente en el sólido como energía de tensión. A medida que se aplica más fuerza a las partículas, esa energía excede un nivel y el material se fractura en trozos más pequeños (Geankoplis, 1998).

Cuando el material se fractura, se producen nuevas áreas superficiales. Cada nueva unidad de superficie requiere determinada cantidad de energía. Parte de la energía añadida se utiliza en la creación de estas nuevas superficies, pero gran parte aparece en forma de calor. La energía requerida para la fractura está en función del tipo de

material, del tamaño, de su dureza y de otros factores (McCabe, 1991).

En la industrialización de los alimentos suele ser una necesidad frecuente desmenuzar los sólidos mediante la aplicación de fuerzas mecánicas.

Las razones para esta reducción de tamaño son diversas:

- La reducción de tamaño puede facilitar la extracción de un constituyente deseado, contenido en una estructura compuesta, como sucede, por ejemplo, en la obtención de harina a partir de granos de trigo o jarabe a partir de la caña de azúcar.
- Modificar u obtener determinadas propiedades que dependen del tamaño de la partícula (color).
- La reducción a un tamaño definido puede ser una necesidad específica del producto, como sucede, por ejemplo, en la elaboración del azúcar para helados, en la preparación de especias y en el refinado del chocolate (Ibarz, 2005).

- Una disminución del tamaño de la partícula de una masa dada del producto conduce a un aumento en la superficie del sólido, aumento en superficie que sirve de ayuda en muchos procesos, por ejemplo:
 - i. El tiempo de secado de los sólidos húmedos se reduce mucho, aumentado su área superficial.
 - ii. La velocidad de extracción de un soluto deseado crece al aumentar el área de contacto entre el sólido y el disolvente.
 - iii. El tiempo necesario para ciertas operaciones, (horneo, escaldado, etc.) se puede reducir cortando o troceando las sustancias sometidas al proceso.
 - iv. El mezclado íntimo, es más fácil con las partículas de tamaño pequeño, lo que constituye una consideración importante en la elaboración de sopas empaquetadas, mezclas dulces, etc.

- Dar a determinados productos su forma final, uniforme, de más fácil empaque y transporte y de mejor presentación comercial.

1.2.2 Fuerzas utilizadas en la reducción de tamaño

En general, se distinguen tres clases de fuerzas (Tabla 3), estando en cualquier operación de trituración, más de una. La siguiente tabla muestra los tipos de fuerzas que predominan en algunos molinos de uso frecuente en la industria de los alimentos.

Tabla 3. Fuerzas de Trituración

Fuerza	Principio	Equipo
Compresión	Compresión	Rodillos Trituradores
Impacto	Impacto	Molino de Martillos
Cizalla	Corte	Molino de Discos

Fuente (Brennan, et al., 1980)

Los sólidos pueden romperse en una o más de las siguientes maneras para reducir su tamaño: compresión, impacto,

desgaste o corte. En general, el impacto da productos gruesos, medios o finos. Sin embargo, los fundamentos de la forma del producto y de los requerimientos de energía son comunes a la mayoría de las máquinas que emplean cualquiera de los principios anteriores para la trituración (Indira, 2005).

Las fuerzas de impacto se pueden considerar como fuerzas para uso general, empleándoseles para la molienda fina, media y gruesa de una gran variedad de productos alimenticios. Las fuerzas de corte o cizalla se utilizan extensamente en aparatos para la trituración de sustancias blandas no abrasivas en los tamaños más pequeños.

Los molinos de rodillos constan de un par de cilindros con un claro entre ellos que es regulable de acuerdo al tamaño de partícula deseado, pueden ser lisos, rugosos, estriados y hasta dentados. Cada rodillo puede girar a diferente velocidad y esta generaría cizalla para el producto.

Los equipos de martillos constan de un eje rotor donde se acoplan los elementos molientes con diferente diseño. Es así que pueden ser obtusos, de cuchillas, dentados, etcétera. También pueden estar fijos, móviles o pivoteados.

Los productos de partida pasan a la zona de acción, donde los martillos los empujan contra el plato de ruptura.

La reducción del tamaño es producida principalmente por fuerzas de impacto, aunque si las condiciones de alimentación son obturantes, las fuerzas de frotamiento pueden también tomar parte en la reducción de tamaño (Brennan, et al., 1980).

Con frecuencia se sustituyen los martillos por cortadoras o por barras como en los molinos de barras. Los molinos de martillos se pueden considerar como molinos para uso general, ya que son capaces de triturar sólidos cristalinos duros, productos fibrosos, sustancias vegetales, productos untuosos, etc. Se utilizan extensamente en la industria de los alimentos para moler pimienta y especias, leche deshidratada, azúcares, etc (Fellows, 1994).

Los molinos gravitatorios se utilizan mucho en numerosas industrias para lograr una molienda fina y se clasifican en:

- a) Molino de Bolas. En este molino se utilizan a la vez fuerzas de impacto y de cizalla para la reducción de tamaño. El aparato está formado por un cilindro giratorio horizontal que se mueve a baja velocidad

con cierto número de bolas de acero o piedras duras. A medida que gira el cilindro las piedras se elevan por las paredes del cilindro y caen sobre los productos a triturar que están llenando el espacio libre entre las bolas que lo impactan. Las bolas resbalan a su vez entre sí, produciendo el cizallamiento de la materia prima. Esta combinación de fuerzas de impacto y cizalla produce una reducción de tamaño muy efectiva.

- b) Molinos de Barras. En ellos se reemplazan las bolas por barras de acero. Las fuerzas de impacto y fricción juegan todavía su papel, pero el efecto de las de impacto es menos pronunciado. Se recomienda utilizar molinos de barras con sustancias untuosas con las que las bolas pueden quedar adheridas a la masa de la carga, haciéndose inefectivas.

Los equipos de disco son ejemplo de molinos que utilizan a la fuerza de cizalla como principio de operación, pueden ser de uno o dos discos y pueden estar en posición horizontal o vertical, giran a altas velocidades y poseen pequeños

dientes filosos que en combinación con la velocidad hacen muy eficaz la molienda para materiales blandos o fibrosos (Brennan, et al., 1980).

Molino Cryomill

Este molino es diseñado especialmente para la molienda criogénica (Figura 3).

El molino CryoMill efectúa movimientos de vibración horizontales. Las bolas que se encuentran en su interior se mueven por inercia chocando con gran energía contra el material que se encuentra en las concavidades a ambos extremos del recipiente.

El recipiente de molienda es enfriado continuamente con nitrógeno líquido por el sistema de refrigeración antes y durante el proceso de molienda. El sistema de refrigeración automático asegura que la molienda comience sólo hasta que la muestra está completamente congelada, reduciendo el consumo de nitrógeno líquido. La muestra es fragilizada y los componentes volátiles se conservan.

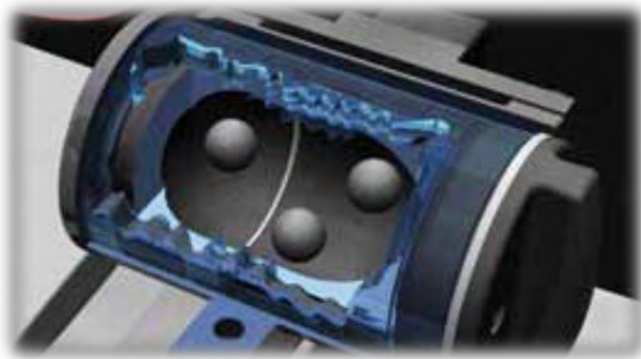


Figura 3. Molino Cryomil (Werecool, 2010)

1.2.3 Equipos para criomolienda

Para la molienda criogénica se puede utilizar cualquier tipo de molino, pero por la finura de partícula que se obtiene y por el tipo de material que ingresa se usan comúnmente fuerzas de impacto por lo que se utilizan en su mayoría: molinos de bolas, molinos de martillos y algunos equipos diseñados por diversas empresas para la molienda criogénica, como el visto anteriormente.

1.2.4 Sistemas de inyección en nitrógeno líquido

Los sistemas para realizar la aplicación del nitrógeno líquido al alimento antes de aplicar la molienda se pueden realizar mediante dos mecanismos:

Tolva de dosificación: Mediante esta técnica, el nitrógeno líquido es inyectado directamente hacia el molino, mientras una tolva de dosificación regula el producto a moler de acuerdo a la relación del nitrógeno con el producto.

Una válvula de regulación transporta la cantidad idónea de producto al molino. El aporte frigorífico del nitrógeno líquido permite absorber todo el calor que se genera con la molturación, al tiempo que regula la temperatura óptima de trabajo, tanto en el molino como en el producto. Una vez molido, el producto pasa por el tamizador o clasificador de partículas, el producto clasificado pasa a la tolva, mientras que el rechazo vuelve a pasar por el molino de forma automática hasta alcanzar la finura adecuada (Linde, 2009). El nitrógeno recircula en continuo dentro del molino creando una atmósfera fría y seca. La baja temperatura y el ambiente seco evitan el apelmazamiento del producto y su adherencia al molino (Figura 4). El gas excedente, cargado

de partículas muy finas del producto, pasa a través de un filtro de mangas que retiene esas partículas y libera el gas limpio a la atmósfera. Esta instalación funciona de manera continua y el producto conserva todos sus aromas y aceites esenciales.

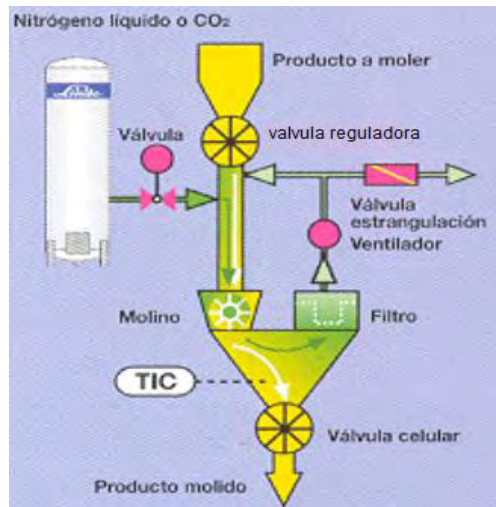


Figura 4. Tolva de dosificación para molienda criogénica (Linde, 2009).

Tornillo criogénico: En este equipo de molienda criogénica, el material a pulverizar es conducido a través de un tornillo transportador hasta un tornillo sinfín criogénico en donde es rociado con nitrógeno líquido para congelarlo. De esta manera tanto el producto como el nitrógeno líquido

llegan juntos al molino, asegurando así que el proceso de molienda se mantiene también enfriado dentro del molino (Figura 5).

Mediante un sistema especial de control de temperatura junto con una válvula de regulación se regula la cantidad de nitrógeno líquido que se precisa para conseguir la temperatura deseada (Messer (a), 2009).

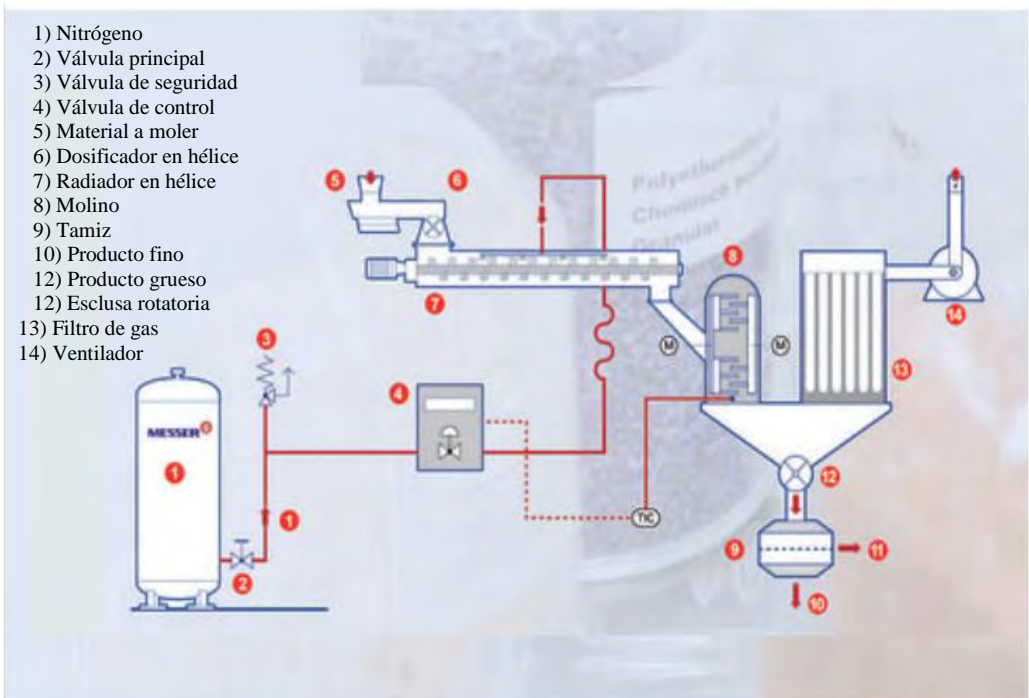


Figura 5. Tornillo criogénico para molienda criogénica

(Messer (a), 2009)

En un proceso de reducción de tamaño las partículas obtenidas variarían ampliamente de tamaño y es con frecuencia necesario clasificarlas en grupos que cubren un determinado intervalo de dimensiones.

La especificación de un producto suele requerir que no contenga partículas mayores de (o menores de, según el proceso) un cierto tamaño, dependiendo de la fuerza que se utilice y del equipo. Cuando un alimento se somete a un stress la tensión interna que en el alimento se crea, primero se absorbe dando lugar a la deformación de los tejidos. En muchos casos esta tensión supera un determinado nivel crítico denominado “límite del stress elástico” (Brennan, et al., 1980).

A medida que el tamaño de las partículas disminuye debe, por tanto, incrementarse considerablemente el aporte de energía. Por ello es importante determinar previamente la adecuada distribución de tamaños de partícula en el producto para evitar un despilfarro de tiempo y de energía reduciendo el tamaño de las partículas más de lo necesario.

Para la fragmentación de alimentos friables y cristalinos se requiere fuerza de compresión, para los alimentos fibrosos,

una combinación de fuerzas de impacto y de cizalla y para la fragmentación a pequeño tamaño de partícula de los alimentos blandos se precisan fuerzas de cizalla. Se considera que los alimentos se fragmentan a niveles inferiores de tensión si la fuerza se aplica durante un tiempo mayor; por tanto, el grado de reducción de tamaño, la energía gastada y la cantidad de calor generado, dependen, tanto de la magnitud de las fuerzas como del tiempo de aplicación (Brennan, et al., 1980).

El objetivo primordial de un proceso de reducción de tamaño económico es obtener la reducción de tamaño deseada al costo mínimo. Los costos de adquisición, operación y mantenimiento juegan un papel importante en la rentabilidad del proceso por lo que estos gastos, para las diferentes alternativas posibles, se deben considerar cuidadosamente antes de seleccionar cualquier sistema de trituración particular (Fellows, 1994).

Algunas de las propiedades que pueden ser de importancia en la molienda de los alimentos son:

- La cantidad de energía absorbida por el alimento antes de romperse se halla determinada por su grado de dureza que depende a su vez de su estructura.

- Los alimentos más duros absorben mayor cantidad de energía y en consecuencia requieren, para conseguir su rotura, un aporte energético mayor y los tiempos de residencia en la “zona de acción” han de ser mayores, lo que puede requerir: una producción más pequeña para un molino dado, o un molino de mayor capacidad para una determinada producción.
- Como las sustancias duras son casi siempre abrasivas se puede producir un desgaste pronunciado de las superficies de trabajo. Tales superficies deben ser de materiales duros y resistentes al desgaste.

Conocer la estructura mecánica de los productos de partida puede indicar la clase de fuerza que con más probabilidad efectuará la trituración. Si los productos son frágiles o poseen estructura cristalina, la fractura puede ocurrir a lo largo de los planos de unión, siendo las partículas mayores las que se romperán más fácilmente. En tales casos se utiliza la trituración con fuerzas de compresión.

Muchos productos alimenticios tienen una estructura fibrosa, no pudiéndoseles desintegrar por fuerzas de compresión o impacto, por lo que es necesario desgarrarlas o cortarlas (Geankoplis, 1998).

La presencia de agua puede facilitar o complicar el proceso de trituración. Para la mayoría de las sustancias, un contenido de humedad mayor de 2% o 3% puede producir el bloqueo del molino (Fellows, 1994).

En presencia de humedad puede tener lugar también una aglomeración de los productos, que es indeseable si lo que se requiere es un producto alimenticio fino que fluya libremente.

Ciertos productos alimenticios como el cacao, nueces, semillas oleaginosas, con un alto contenido en grasa y aceites, exigen trabajar a temperaturas muy bajas que transformen el producto en uno altamente friable. De no ser así el equipo no podría funcionar debido al empastamiento del material.

Debido también al contenido de grasa y aceites, algunos materiales tienden a adherirse o aglomerarse al molino o al elemento moliente, ocasionando taponamientos y deterioro

del material y viéndose afectada la capacidad de producción y la eficiencia de la molienda (Helman, 1982).

1.2.5 Análisis granulométrico

El producto resultante de una molienda no es uniforme en tamaño, por el contrario, presenta una distribución amplia que depende de la mayor o menor homogeneidad de la alimentación y del tipo de equipo utilizado. Para determinar la distribución de tamaño de los materiales de salida se realiza un tamizado, este método es el más sencillo y difundido.

Consiste en hacer pasar una muestra pesada del material a través de una serie de tamices, apilados unos encima de otros mediante calces adecuados en sus bordes, ordenados de tal manera que sus orificios vayan disminuyendo de manera progresiva hacia abajo, en donde terminan en un plato sólido.

Una adecuada agitación facilita la caída por gravedad del sólido a través de las mallas hasta alcanzar un tamiz, suficientemente pequeño que lo retiene. Cada fracción se considera formada por partículas de igual dimensión por lo

que se les asigna el tamaño de la media entre la abertura del tamiz que dejó pasar y la de aquel que quedó retenido (Helman, 1982).

Los tamices utilizados se construyen de telas tejidas con alambres metálicos. Las aberturas de la malla metálica son cuadradas y el tamaño se determina indicando la longitud del lado del cuadrado, para los tamices grandes, o bien el número de aberturas por unidad de longitud para los tamices más finos. Sus bordes permiten que los tamices calcen muy bien, pudiéndoseles encimar formando una pila que se cierra por arriba mediante una tapa y por debajo de un plato sólido (Helman, 1982). La agitación, que facilita el pasaje a través de los orificios, se hace a mano, o lo que es mejor, colocando una pila de tamices encima de una plataforma, que es agitada por medio de un agitador especial (Ro-Tap).

Para realizar el procedimiento de tamizado se carga en el tamiz superior la muestra pesada del sólido, se tapa y se aseguran los tamices. Se procede a agitar la pila de tamices durante un tiempo prudencial. La fracción retenida en cada tamiz se designa con la denominación del tamiz superior que la dejó pasar y a la de aquel que la retuvo.

Al análisis de los resultados se reconoce como análisis granulométrico, el cual suele presentarse en un cuadro en el que se indica para cada fracción, denominación de acuerdo al juego de tamices utilizado, diámetro medio asignado a las partículas de cada fracción, fracciones en peso de la muestra original que pasaron y que se retuvieron para cada tamiz (Helman, 1982).

Para visualizar aún más la distribución de tamaños, los valores obtenidos se grafican para obtener dos tipos de gráficos: diferencial y acumulativo. En los diagramas diferenciales se indican fracciones retenidas por cada uno de los tamices, en función de las aberturas medias de estos. Los diagramas acumulativos se representan en abscisas las aberturas de malla y en ordenadas las fracciones en peso, del total, que pasan a través del tamiz, esta representación se puede realizar también para los materiales retenidos en vez de para el material que ha pasado (Helman, 1982).

El rendimiento es la cantidad de producto del total de la muestra que cumple con las características requeridas para un determinado proceso. En el caso de la experimentación, se requiere un rendimiento del 70%.

Para la determinación del rendimiento utilizamos los gráficos acumulativos obtenidos del análisis granulométrico.

1.2.6 Antiaglomerantes

Existe un gran número de alimentos deshidratados: huevo, azúcar, sal, harinas, vegetales, quesos, sopas y muchos otros, así como varias especias molidas y diversos aditivos, como sales de curación, saborizantes y colorantes, que, si no se manejan en forma adecuada, tienden a crear aglomerados mediante la unión de muchas partículas pequeñas. Dicha aglomeración se puede presentar por someter el polvo a una alta presión, por la liberación de un líquido propio, como grasa o agua, que sirve de agente ligante; por atracciones electrostáticas como consecuencia de frotamientos; por reacciones químicas entre los constituyentes; y por la adsorción de la humedad del aire. Cuando los alimentos secos se humedecen, se provoca una disolución de las sales y de los azúcares superficiales alrededor de las partículas, facilitando su aglomeración; posteriormente, si llega a existir un aumento de temperatura o este producto apelmazado se almacena en una atmósfera de baja humedad, se induce la deshidratación y las sales y

los azúcares se solidifican y crean una unión más rígida entre las partículas aglomeradas. Por lo anterior, es importante utilizar los antiaglomerantes para evitar el apelmazamiento de los productos en polvo; en esta categoría destacan el dióxido de silicio, y todos sus derivados; el silicato de aluminio; el silicoaluminato de sodio; los estearatos de calcio, y de magnesio; los almidones; el fosfato tricálcico y carbonato de magnesio. Este grupo de aditivos tienen la función de evitar la adherencia o la aglomeración de las partículas de un producto en polvo, y así ayudar a que éstas fluyan fácilmente; por esta razón, a los antiaglomerantes también se les conoce como antiapelmazantes, auxiliares de flujo y lubricantes (Badui, 2006).

1.2.7 Molienda criogénica

Muchos materiales solo se pueden usar de manera eficiente en forma de polvo; sin embargo, a menudo dan problemas al triturarlos, pues tienden a fundirse porque son sensibles a la temperatura o poseen gran dureza y elasticidad, tal es el caso de materiales termoplásticos.

En algunos casos, la molturación de determinados productos es imposible realizarse con sistemas convencionales debido a la tenacidad y elasticidad del producto.

En general los productos se molturan mejor cuanto más baja es la temperatura. Un cambio de temperatura modifica la estructura del producto en función de su coeficiente de dilatación térmica, disminuyendo su elasticidad debido al congelamiento súbito del agua, y su tenacidad a la rotura (Linde, 2009).

A través de este procedimiento, se pueden conseguir granos particularmente finos y a la vez se mantiene la calidad del producto, además de que hay un importante incremento en la capacidad del molino.

En cuanto a las especias, como por ejemplo la nuez moscada, la pimienta, el jengibre, el cardamomo o el clavo, pueden perder su aroma y sabor debido a las altas temperaturas generadas por la energía aplicada para el molido (Messer (b), 2009).

En la molienda criogénica, los materiales se enfrían y fragilizan mediante nitrógeno o dióxido de carbono líquidos a muy baja temperatura, como ya se ha visto.

A través de este procedimiento, se pueden conseguir granos particularmente finos y a la vez se mantiene la calidad del producto, además de que hay un importante incremento en la capacidad del molino (Mohd-Habib & Boland, 2011).

El frío que aportan los gases criogénicos como el nitrógeno líquido, que es el más utilizado en la molienda criogénica es de -196°C , dejando, si es necesario, los materiales frágiles y quebradizos (Trembley, 2010).

1.2.8 Aplicaciones de la molienda criogénica en alimentos

Son variadas las aplicaciones que tiene la molienda criogénica en alimentos, destacando principalmente las siguientes:

- Es conveniente en aquellas especias que con el calor de la molturación tradicional pierden parte de sus aromas y aceites esenciales, se conservan con la molturación criogénica.

- En productos para panificación como nueces, avellanas, cacao, café, que debido al calor de la molturación tradicional pierden sus compuestos volátiles y se ven afectadas principalmente en su contenido de grasa (Messer (b), 2009).
- En productos cárnicos, se regulan las temperaturas de trituración y amasado, lo que permite tener un producto de salida de mejor calidad.
- Menores costos de operación en cuanto a energía ya que el producto permanece menos tiempo en el molino (Linde, 2009).
- Las altas temperaturas generadas por la acción del motor del molino se ven disminuidas, lo cual evita que haya una obturación (taponamiento) del molino.
- En el reciclado de productos o restos de producción de materiales combinados.

1.2.9 Ventajas de la molienda criogénica

1. La principal ventaja de esta tecnología es que, por el enfriamiento del material a temperaturas criogénicas con nitrógeno líquido, este se vuelve más frágil y puede romperse con más facilidad en partículas pequeñas usando menos energía, lo que tiene en consecuencia el aumento de la productividad.
2. Enfriando el proceso de molienda utilizando líquidos criogénicos se evita que la temperatura aumente en los productos sensibles al calor, debido a la energía liberada desde el motor del molino y, por lo tanto, se evita la fusión y pegado de estos.
3. No hay daños térmicos gracias al control de la temperatura de molienda.
4. Se disminuyen los rechazos tanto por gruesos como por fino, debido a que se tiene un tamaño de partícula constante.

En la Figura 6 se presentan algunos productos en donde se puede utilizar la molienda criogénica



Figura 6. Especies molidas con nitrógeno líquido

(Linde, 2009)

1.2.10 Nitrógeno líquido

El líquido utilizado en la mayoría de los procesos es el nitrógeno líquido, debido a su bajo coste y una temperatura de ebullición de -196°C , que permite regular a voluntad el nivel térmico óptimo para la molienda de cada producto (INFRASAL, 2009).

Entre los objetivos de la molienda de un producto están el conseguir una granulometría determinada de acuerdo con la utilización del polvo y, sobre todo, que la granulometría obtenida sea constante.

Igualmente puede tratarse de la molienda de productos sensibles a la oxidación, inflamables, etc., o productos que casi pueden considerarse como no aptos para la molienda. La utilización de nitrógeno líquido permite que estos objetivos se lleven a cabo de manera óptima y, además, ofrecer un aumento de la cantidad de polvo obtenido.

El nitrógeno líquido ofrece una serie de beneficios únicos a los procesos de reducción de tamaño:

- Aumento de la gama de productos de molienda.
- Granulometría constante y homogénea.
- Ya que el nitrógeno no es combustible, puede ayudar a que las operaciones de reducción de tamaño sean más seguras.
- El nitrógeno líquido es inerte y no reacciona con otras sustancias, en condiciones normales.
- A diferencia del dióxido de carbono líquido, que forma el ácido carbónico, cuando se disuelve en la humedad inherente a los productos alimenticios, el nitrógeno no afecta el pH de los alimentos (Gomez, 2008).

En la Tabla 4 se muestran algunas aplicaciones del nitrógeno líquido en alimentos.

**Tabla 4. Aplicaciones en alimentos del
nitrógeno líquido**

Aplicaciones	Enfriamiento	Congelación	Criomolturación
Leche/Queso	Enfriamiento de yogurt, transporte bajo temperaturas controladas.	Congelación de productos lácteos, cremas heladas.	Queso rallado y en polvo
Panadería	Enfriamiento de masas, transporte a temperaturas controladas, seguridad en cámaras frigoríficas.	Congelación de productos a base de pastas.	Aditivos de panificación como el azúcar cristal
Pastelería			
Platos cocinados			
Chocolate, café, azucarería, confitería	Mantenimiento de productos		Cacao y café, productos liofilizados
Hierbas, especias, productos secos	Enfriamiento para manutención y recorte.	Congelación de hierbas.	Especias, nuez, clavo, pimienta, mostaza.
Carnes, aves, salazones	Endurecimiento antes del prensado, transporte a	Congelación de hamburguesas, carnes troceadas,	Regulación de temperaturas en trituración y amasado

	temperaturas controladas	platos cocinados	
Aceites y cuerpos grasos	Endurecimiento de gelatina	Cristalización en lentejas	Soja
Frutas, hortalizas, zumos de frutas	Transporte en tuberías y atmosfera controlada, seguridad de cámaras frigoríficas	Congelación de frutas y hortalizas, congelación de zumos de frutas granulados	

Fuente (Gómez, 2008).

Capítulo 2. Metodología experimental

2.1 Problema

Preservar el contenido de grasa de la nuez y cumplir con el tamaño de partícula especificado en la norma NMX-FF-093-SCFI-2011 al realizar una molienda criogénica a diferentes condiciones (tiempo de inmersión, tiempo de molienda y diferentes fuerzas de aplicación).

2.2 Hipótesis

En un proceso de molienda convencional, debido a las altas temperaturas, los materiales a moler suelen perder algún componente de importancia como la grasa y esto repercute en el sabor, aroma y en la calidad final del producto, además de generar problemas operacionales como el apelmazamiento del material y la obturación del molino.

Con un sistema de molienda criogénica dichos compuestos, que le proporcionan al producto su sabor y aroma característico, se conservan debido a la súbita congelación del material que se lleva a cabo con nitrógeno líquido a -196°C , evitando los problemas anteriores (Messer (b), 2009).

En el caso de la nuez, que tiene un contenido de grasa del 62.5%, al ser sometida a un proceso de congelación rápida, se vuelve más frágil y quebradiza debido que hay un congelamiento de los componentes, el nitrógeno lleva al material a una temperatura de transición vítrea formando un estado cristalino y generando friabilidad, haciendo más fácil su desintegración (Sceni, 2007). Es así que el tiempo de inmersión del material en nitrógeno líquido también determinará el grado de friabilidad del material, entonces a un mayor tiempo de inmersión de la nuez en nitrógeno líquido el producto se hará más duro haciendo su desintegración más fácil y rápida y preservando en su mayoría el contenido de grasa.

Por otro lado, se sabe que los molinos de martillos de impacto son recomendables para productos duros o friables, mientras que los molinos de cuchilla son recomendables para productos blandos. Por lo que, por lo antes explicado, gracias a la friabilidad del material se espera que el elemento moliente de impacto nos ayudará a conseguir un producto que cumpla los requisitos de la norma NMX-FF-093-SCFI-2011, que establece que el producto deberá pasar la malla de 1.6mm (malla #10).

2.3 Objetivo General

Evaluar el efecto de la operación de molienda criogénica en los atributos de calidad de la nuez (*Carya illionensis*), al variar el tipo de fuerza de aplicación (impacto o cizalla), el tiempo de inmersión en nitrógeno líquido y el tiempo de molienda.

V.I: Tipo de fuerza de aplicación, tiempo de inmersión del material en el nitrógeno líquido, tiempo de molienda.

V.R: Contenido de grasa de la nuez, distribución de tamaño, rendimiento para la malla 10.

2.4 Materiales y métodos

2.4.1 Materiales

Se utilizaron dos kilogramos de nuez pecanera, la cual se almacenó en una bolsa cerrada de plástico, en un ambiente seco. Se utilizó nitrógeno líquido para sumergir las muestras de nuez con la ayuda de una bayoneta utilizando guantes de carnaza para evitar quemaduras en la piel por el nitrógeno líquido. La molienda se realizó en un molino criogénico modelo **IKA A11 Basic** (Figura 7), con capacidad de 50 gramos los cuales se colocaron en un recipiente; el molino se acopla al recipiente y se acciona al pulsar el botón de encendido. El molino cuenta con dos elementos molientes: impacto y cizalla (Figura 8), los cuales se cambiaron de acuerdo a las condiciones que se establecieron en el diseño experimental. Después de cada molienda se quitaron los restos de la molienda con una brocha y se limpió el recipiente con algodón y alcohol para realizar la siguiente repetición.



Figura 7. Molino criogénico utilizado en la experimentación (IKA A11 Basic)

Cizalla



Impacto



Figura 8. Elementos molientes

Después de la molienda con nitrógeno líquido, se realizó el análisis granulométrico utilizando la técnica de tamizado. Para esto se usó una serie de tamices USA con los siguientes números de malla: 10, 14, 20, 30, 35 y 50, que se colocaron en el agitador mecánico Ro-Tap durante 10 min (Figura 9).



Figura 9. Instrumento Ro-Tap utilizado en el análisis granulométrico

2.4.2 Métodos

2.4.2.1 Determinación del diámetro inicial de partícula

El tamaño inicial de partícula se puede definir considerando un diámetro equivalente que promedie tanto la longitud como el diámetro (Cortazar et al., 2008). Y se puede obtener a partir de la siguiente ecuación:

$$De = \frac{4b+2a}{2a+2b} \dots\dots\dots 1$$

Dónde:

D_e = Diámetro equivalente

b = mitad de la longitud (mm)

a = mitad del diámetro (mm)

A partir de una muestra total de 1250 gramos, la cual se separó en cuartos de 250 gramos, se realizó la medición del diámetro equivalente con un vernier digital, a una muestra de 250 gramos (200 nueces) y se calculó el diámetro equivalente con la ecuación 1.

2.4.2.2 Cuantificación de grasa

Método Soxhlet

Este método consiste en una extracción semicontinua con un disolvente orgánico (hexano), en el cual el hexano se calienta, se volatiliza y condensa goteando sobre la muestra la cual queda sumergida en el disolvente; posteriormente éste es sifoneado al matraz de calentamiento para empezar de nuevo el proceso (Horwitz, 2000). El contenido de grasa se cuantifica por diferencia de peso.

Procedimiento:

Se llevó el matraz a peso constante. Se registró el peso del matraz vacío una vez que fue llevado a peso constante. Se pesaron 2 gramos de muestra y se envolvieron haciendo un paquete con el papel filtro. La extracción se realizó durante 4 horas cuidando que el matraz no se quedara sin disolvente. Una vez terminada la extracción se extrajo el cartucho y se colocó el matraz en la estufa para eliminar el exceso de disolvente. Se registró el peso del matraz con grasa y a partir de la siguiente ecuación se obtuvo el contenido de grasa.

$$\%Grasa = \frac{m_2 - m_1}{m} \times 100 \dots\dots\dots 2$$

Dónde:

m= peso de la muestra (g)

m₁= peso del matraz vacío (g)

m₂= peso del matraz con grasa (g)

2.4.2.3 Molienda criogénica

En esta actividad se utilizó el molino descrito en materiales (Figura 6), utilizando los siguientes niveles de variación:

Elemento moliente – impacto, cizalla

Tiempo de inmersión en nitrógeno líquido – 1 minuto y 1.5 minutos

Tiempo de molienda – 5 segundos y 10 segundos

La molienda se hizo de acuerdo a un diseño factorial 3^2 .

La molienda se realizó por triplicado, quedando el cuadro de variables como sigue:

Tabla 5. Cuadro de variables para realizar la molienda criogénica

Impacto		
Tiempo de inmersión en nitrógeno líquido	Tiempo de molienda	
1 minuto	5 segundos	10 segundos
1.5 minutos		
Cizalla		
Tiempo de inmersión en nitrógeno líquido	Tiempo de molienda	
1 minuto	5 segundos	10 segundos
1.5 minutos		

Para realizar la molienda criogénica se pesaron 35 gramos de nuez. De acuerdo a las variables que se utilizaron para la molienda en turno, se sumergió la nuez 1 minuto o 1.5 minutos en nitrógeno líquido con la ayuda de una bayoneta. Inmediatamente se colocó la nuez en el recipiente del molino. De acuerdo a las variables que se utilizaron, la molienda se realizó con diferentes fuerzas de aplicación (impacto y cizalla), con un tiempo de molienda de 5 o 10 segundos. Las muestras de nuez molidas, se usaron para determinar posteriormente el contenido de grasa y realizar la prueba de tamizado. En la Figura 10 se muestra la nuez molida dentro del molino



Figura 10. Muestra de nuez en el molino criogénico

2.4.2.4 Análisis granulométrico

Análisis por tamizado

Para el análisis granulométrico se realizó un tamizado de las muestras de nuez después de la molienda criogénica. Se utilizó carbonato de magnesio como antiaglomerante (5%) ya que, debido al contenido de grasa de la nuez, esta formó aglomerados lo que hacía que la mayoría del material se quedará en el primer tamiz.

Procedimiento:

Para este procedimiento, se juntó el material molido de las tres repeticiones para obtener 100 gramos de muestra, los cuales fueron pesados después de la molienda criogénica. Se pesó cada tamiz de la serie seleccionada para el análisis (10, 14, 20, 30, 35 y 50). Se colocaron los 100 gramos de nuez después de la molienda criogénica en primer tamiz y se acopló todo el juego de tamices seleccionado, para ser sometido a vibración en el ROTAP durante 10 minutos. Se pesaron los tamices después de ser sometidos a vibración. Se registraron los datos obtenidos para su análisis y completar el tratamiento del análisis granulométrico.

Los gráficos diferenciales y acumulativos que se realizaron con los datos obtenidos sirvieron para determinar la homogeneidad de las partículas en el caso de los diferenciales, a partir del análisis de las curvas de las campanas obtenidas en el gráfico. Los gráficos acumulativos se utilizaron para determinar el rendimiento para la malla #10, esto se hizo interpolando en el gráfico el diámetro de la malla #10 con el porcentaje del material que pasa y comparándolo con el establecido por la norma, que es de un 70%.

2.4.3 Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se utilizó el software MINITAB 15 para realizar un diseño factorial 32. Tres factores (tipo de elemento moliente, tiempo de inmersión en nitrógeno líquido y tiempo de molienda) a dos niveles de variación (impacto y cizalla, 1 minuto y 1.5 minutos, y 5 y 10 segundos).

Capítulo 3. Resultados

3.1 Diámetro inicial de partícula

Técnica. Diámetro equivalente

Tabla 6. Resultados diámetro inicial de partícula

Media	1.38 mm
S	0.03813
C.V (%)	2.76

Como se puede observar en la tabla 6 el tamaño inicial se consideró de $1.38\text{mm} \pm 0.0381$; el porcentaje de variación tiene un porcentaje del 2.76%, indicando así, que el diámetro equivalente de la nuez es homogéneo.

3.2 Cuantificación de grasa antes de la molienda

Técnica Soxhlet

Este contenido inicial de grasa se comparó con el contenido de grasa de la nuez después de la molienda, y así determinar si el contenido de grasa se preserva en su totalidad o en un porcentaje aceptable.

Tabla 7. Porcentaje de grasa calculado antes de la molienda

Muestra	% de grasa
1	46.82
2	47.34
3	46.11
Media	46.75
Desviación Estándar	0.6174
C.V (%)	1.3206

3.3 Cuantificación de grasa después de la molienda

Técnica Soxhlet

En la Figura 11 se muestra el contenido de grasa de la nuez sin moler, y el contenido de grasa de la nuez después de la molienda a diferentes condiciones.

Como se ha visto, al ser el objetivo de la molienda obtener un tamaño de partícula más pequeño con una buena calidad del producto en términos de sabor y color, el calor generado en la molienda normal representa un reto para la molienda de productos con alto contenido de grasa ya que el calor que

se genera puede ser perjudicial para el producto y producir cierta pérdida de sabor y calidad (Singh, K. & Goswani).

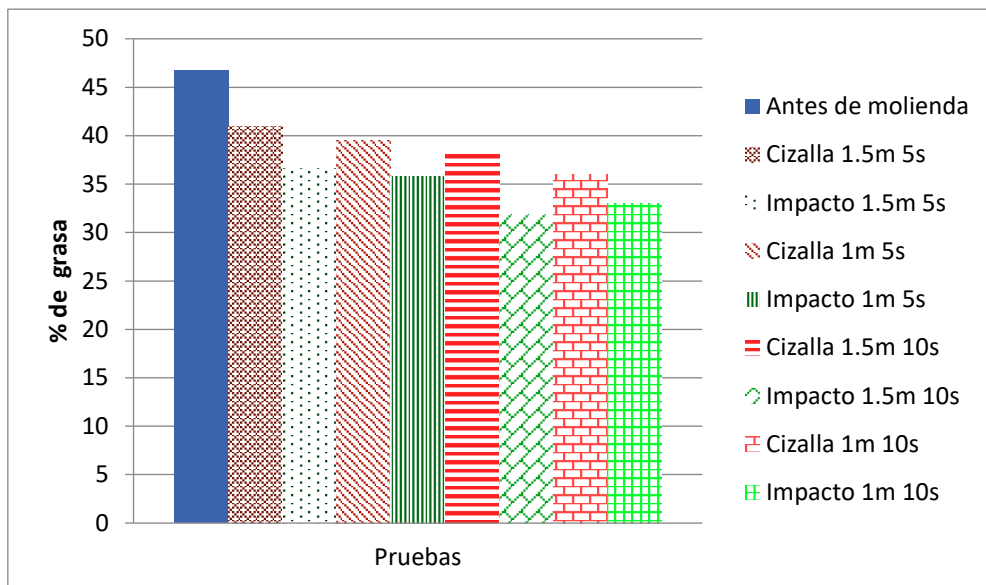


Figura 11. Gráfico comparativo del contenido de grasa antes y después de la molienda

Bajo esta perspectiva, el análisis de la Figura 11, muestra que las condiciones de molienda criogénica que preservan más el contenido de grasa de la nuez, fueron 1.5 minutos de inmersión en nitrógeno líquido y 5 segundos de molienda, mientras que la condición más desfavorable para preservar el contenido de grasa de la nuez, son 1.5 minutos de inmersión en nitrógeno líquido y 10 segundos de molienda.

El prolongar el tiempo de molienda fue desfavorable para el contenido de grasa. Respecto al elemento moliente se puede ver una diferencia en cuanto al uso de una fuerza de impacto o cizalla, los valores más altos de porcentaje de conservación de grasa fueron obtenidos al usar cizalla. En la Figura 12, se muestra el gráfico estadístico de los efectos medios de estas variables (tiempo de inmersión, tiempo de molienda y tipo de elemento moliente) con respecto al contenido de grasa, resultado del análisis factorial.

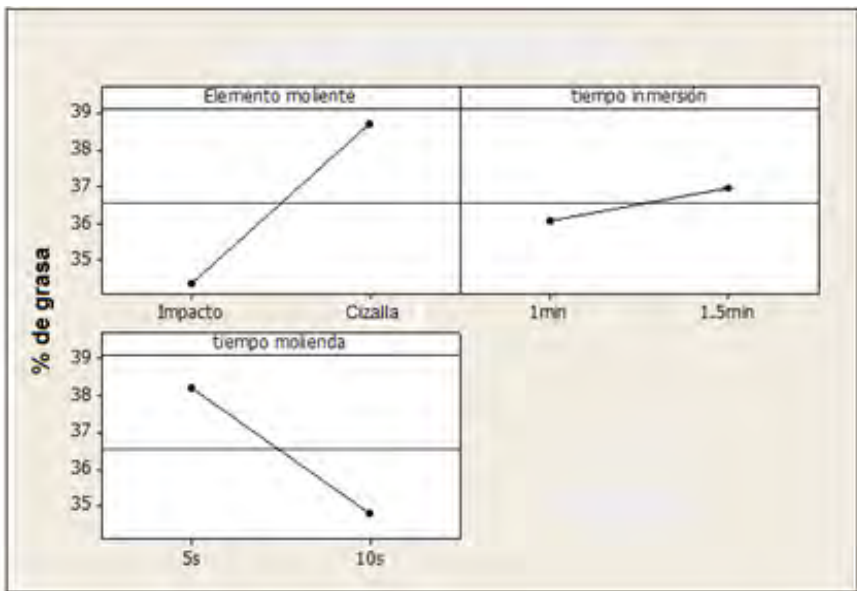


Figura 12. Gráficas del contenido de grasa análisis estadístico

Las variables de molienda que más influyen en la preservación del contenido de grasa de la nuez son: el tipo de elemento moliente y el tiempo de molienda. A un mayor tiempo de molienda, el calor generado por el motor comienza a deteriorar el material, en este caso, ocasionar la licuación de la grasa de la nuez, incluso llegando a provocar la obturación del molino.

En las nueces se produce una pérdida de grasa en la molienda, que se acelera si se permite que la temperatura aumente; es por eso que, a un menor tiempo de molienda, el calor generado por el motor es mínimo y la nuez, no ven afectadas sus propiedades.

En cuanto al tiempo de inmersión en nitrógeno líquido prácticamente no tiene efecto sobre el contenido de grasa ya que el congelamiento de la nuez al sumergirla en el nitrógeno líquido es muy rápido y por esta razón no hay mucha diferencia en esta variable en cuanto a la preservación del contenido de grasa.

Si bien el contenido de grasa de la nuez no se ve afectada por el tiempo que permanece la muestra en nitrógeno líquido, si se ve afectada en cuanto a su conservación ya que

el nitrógeno líquido en la molienda criogénica tiene dos propósitos, enfriar la materia prima y el molino y así manejar temperaturas óptimas de funcionamiento y eliminar el calor liberado durante la molienda (Manohar & Sridhar,2000), conservando en su mayoría el contenido de grasa que cuantificamos al inicio de la experimentación que fue de un 46%, y se evita la fusión del producto en el molino. La Tabla 8 muestra el porcentaje preservado de molienda para cada condición, viendo, como ya se había mencionado, la condición donde se preserva más el contenido de grasa.

Al conservarse en su mayoría el contenido de grasa, a pesar de que no se determinaron específicamente, si se puede asegurar la presencia de ácidos grasos esenciales, los cuales promueven la producción de lipoproteínas de alta densidad o colesterol-HDL (high density lipoproteins), llamado colesterol “bueno” y así evitar riesgos de enfermedades cardiovasculares (Badui 2006).

**Tabla 8. Porcentajes preservados de grasa para cada
condición de molienda**

Prueba	Porcentaje de grasa preservado (%)
Impacto 1 minuto de inmersión 5 segundos de molienda	35.83
Cizalla 1 minuto de inmersión 5 segundos de molienda	39.50
Impacto 1.5 minutos de inmersión 5 segundos de molienda	36.66
Cizalla 1.5 minutos de inmersión 5 segundos de molienda	41
Impacto 1 minuto de inmersión 10 segundos de molienda	33
Cizalla 1 minuto de inmersión 10 segundos de molienda	36
Impacto 1.5 minutos de inmersión 10 segundos de molienda	31.83
Cizalla 1.5 minutos de inmersión 5 segundos de molienda	38.33

3.4 Análisis Granulométrico

Después de realizar el tamizado para cada prueba con los diferentes niveles de variación, se analizaron los datos para desarrollar los gráficos diferenciales y acumulativos y determinar el rendimiento para la malla establecida por la norma.

La Figura 13 muestra un gráfico diferencial comparativo de todas las pruebas realizadas. En el cual se puede apreciar que, al visualizar las campanas de distribución de tamaños, estas tienden más hacia los gruesos, es decir, hay más área bajo la campana que tiende a partículas más gruesas. En general se puede ver una cierta homogeneidad en el tamizado al usar una fuerza de impacto y cizalla, ya que las curvas para los diferentes elementos molientes, son muy similares.

De acuerdo a los gráficos comparativos entre cada elemento moliente (impacto-cizalla), se puede apreciar que no hay mucha variación en cuanto a las fracciones retenidas en cada tamiz y los diámetros promedios de los tamices.

Hay una mínima variación al usar cizalla, esto es consecuencia de la inmersión de la nuez en nitrógeno

líquido, ya que esta al ser sumergida en el nitrógeno vuelve a la nuez un poco más friable, lo que provoca que al molerla con una fuerza de cizalla se desintegre de manera rápida, y tengamos un tamaño de partícula más fina. Esto se puede apreciar ya que, en cada una de las figuras, aunque la diferencia sea mínima, en la campana de la curva diferencial al usar cizalla hay más área hacia los finos que hacia los gruesos, aunque es una tendencia casi imperceptible, pero con cizalla obtenemos partículas más finas. Usando un elemento de impacto el material es molido pero las partículas más pequeñas o de mediano tamaño ya no pueden ser reducidas, en cambio al usar un elemento de corte (cuchilla), las partículas más pequeñas o de tamaño medio son molidas por el elemento de corte ya que pueden ser cizalladas.

En la Figura 14 se muestra una distribución de la nuez en la serie de tamices utilizados y se observa que la mayor cantidad de material, se encuentra en los tamices de abertura más pequeña, lo que, de acuerdo con los gráficos diferenciales, nos señala que en cuanto a cizalla se refiere, la tendencia de la molienda, es hacia los finos.

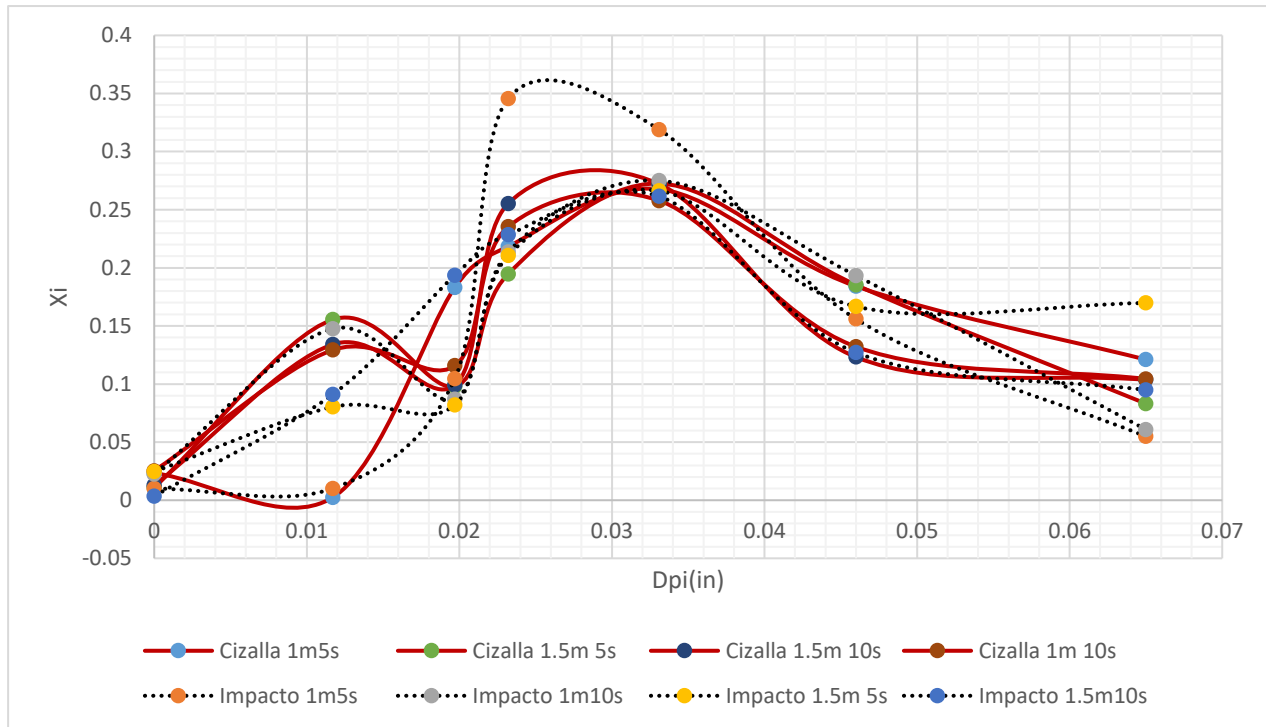


Figura 13. Gráfico diferencial comparativo

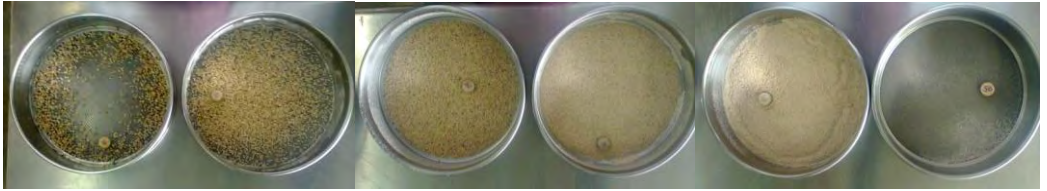


Figura 14. Distribución en el juego de tamices de una muestra de nuez molida con cuchilla

3.4.1 Gráficos Acumulativos

En la Figura 15, se muestra un gráfico acumulativo realizado después del tamizado, el cual es un ejemplo para determinar el rendimiento para la malla establecida por la norma. Representa las aberturas de malla de cada tamiz utilizado contra el porcentaje de peso que pasa y que es retenido de forma acumulada a través de cada tamiz.

Estos gráficos acumulativos se realizaron para establecer el porcentaje de material que pasa por la abertura de malla del tamiz, para determinar el rendimiento para la malla 10, que es la que indica la norma (NMX-FF-093-SCFI-2011), la cual marca que, para la nuez molida, esta debe de pasar un mínimo de 70% de peso por la malla 10 que indica una criba con abertura de 1.6mm (0.063in) (Tabla 17).

De acuerdo a las consideraciones de granulometría para la nuez, se tomó como referencia en el gráfico la abertura de 0.063in para interpolarla con la curva del material que pasa y obtener el porcentaje del material que pasa y verificarlo con la norma.

En la Tabla 17 se muestran los porcentajes del material que pasa por la malla establecida para cada condición.

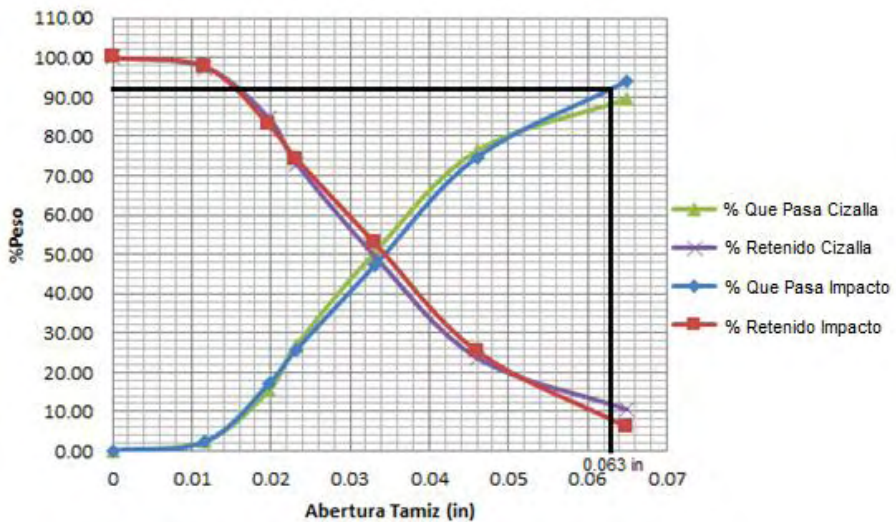


Figura 15. Gráfico acumulativo con procedimiento para obtener el rendimiento

La Tabla 9 nos muestra que para una abertura de malla de 0.063in (malla 10), el porcentaje de material que pasa, oscila entre 85 y 90%, lo que indica que el requisito granulométrico mínimo de la norma para el polvo de nuez (70% de material que pasa), se cumple a cualquier condición de operación, teniendo el mayor porcentaje de material que pasa utilizando cuchilla y en los niveles de variación: 1.5 minutos de inmersión en nitrógeno líquido y 5 segundos de molienda.

La Figura 16, muestra las interacciones con respecto al porcentaje de material que pasa y así observar que variable es la que más influye en el rendimiento.

Para el rendimiento de la malla 10, se puede observar que no hay diferencia en cuanto a impacto o cuchilla, entre el tiempo de inmersión o entre el tiempo de molienda, de acuerdo a la tabla de ANOVA del análisis estadístico no presenta diferencia significativa.

**Tabla 9. Porcentaje de material que pasa por la
abertura del tamiz de 0.063in**

Prueba	Abertura (in)	Porcentaje de material que pasa
Impacto 1m5s	0.063	89%
Cizalla 1m5s	0.063	87%
Impacto 1m10s	0.063	89%
Cizalla 1m10s	0.063	88%
Impacto 1.5m5s	0.063	89%
Cizalla 1.5m5s	0.063	90%
Impacto 1.5m10s	0.063	89%
Cizalla 1.5m10s	0.063	89%

En la figura 17 se muestran los efectos para el rendimiento para la malla 10 y se puede ver que no hay una variable de las que manejamos (tipo de elemento moliente, tiempo de inmersión y tiempo de molienda), que influya sobre el porcentaje de material que pasa por la abertura de malla del tamiz, por lo cual, el tamaño de la partícula, en las corridas que se hicieron utilizando molienda criogénica, no se ve afectada por el tipo de elemento moliente, el tiempo de

inmersión o el tiempo de molienda, debido a que las condiciones de inmersión por el congelamiento de la nuez se da a las mismas condiciones, el congelamiento es súbito y la fragmentación de la nuez ya congelada, es rápida al interior del molino.

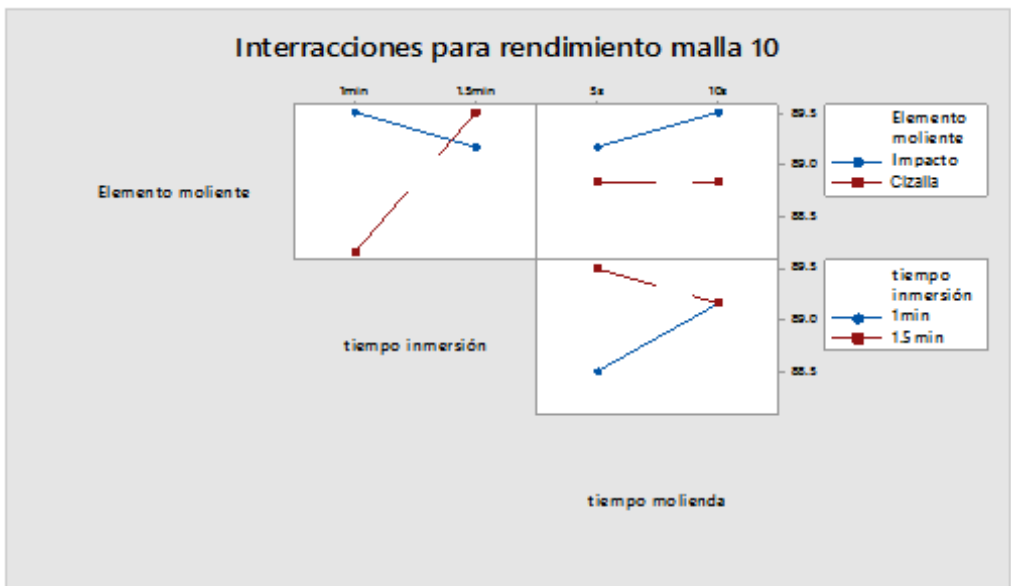


Figura 16. Gráfica de interacción para el rendimiento de malla #10

Esto nos indica que para cumplir la norma (NMX-FF-093-SCFI-2011), podemos utilizar alguna de las combinaciones de variables que utilizamos para la experimentación, tomando en cuenta cual es la que más conviene, de acuerdo a la preservación del contenido de grasa.

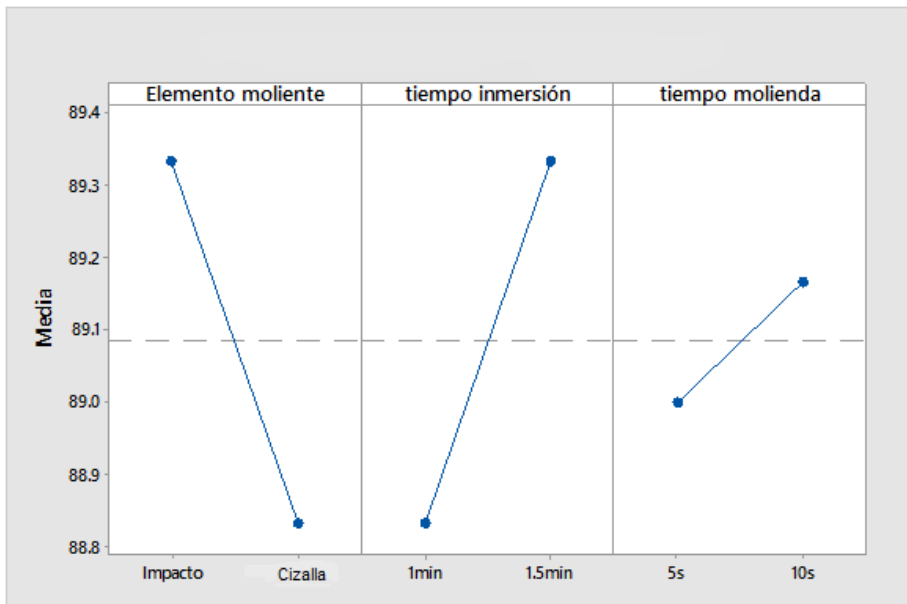


Figura 17. Gráfica de efectos para el rendimiento de malla #10

Ya que, a cualquier condición, obtenemos el rendimiento para malla 10, como lo marca la norma, esto se debe a la función que tiene el nitrógeno líquido en la molienda, la temperatura extremadamente baja en el molino solidifica los aceites y la grasa para que las especias se fragilicen, se desmenuzan fácilmente permitiendo molienda a un tamaño más fino y más consistente. De este modo se puede obtener un tamaño de partícula considerablemente menor en condiciones criogénicas (Singh & Goswani, 1998)

Conclusiones

El tamaño óptimo de la molienda para cada producto depende de su uso final y por consiguiente los métodos de molienda convencionales implican un molino de martillos, rodillos o cuchillas. Durante el molido convencional, puede producirse un aumento de temperatura de más de 90 ° C, lo que conduce a la pérdida de aceite volátil y aroma debido al calor generado, además de otras desventajas como el aglomerado y empastado en las paredes del molino que provoca el paro frecuente para limpieza y altos consumos de energía. Esto se supera mediante la molienda criogénica (Manohar & Sridhar, 2000) como fue demostrado para la molienda de nuez pecanera.

La inmersión de la nuez en nitrógeno líquido preservó el contenido de grasa; el tiempo de inmersión no tuvo influencia significativa ya que la congelación de la muestra se da de manera súbita, evitando que se llegue a una temperatura donde la grasa se licue y así no perder los atributos en el olor y sabor de la misma. Esto fue confirmado con el análisis estadístico, obteniéndose un contenido de 37% para un minuto y medio de inmersión y 36% para un minuto. Esto contrasta con los resultados de

Singh & Goswani (1998) quienes reportan un 14% de pérdida de componentes volátiles o componentes aromatizantes para la nuez durante la molienda convencional debido a un aumento de la temperatura del producto hasta un nivel en el intervalo de 42 - 95°C mismo que varía según los componentes y la humedad.

Por otro lado, el tiempo de molienda influyó en la preservación de grasa. En los experimentos en donde el tiempo de molienda fue de 10 segundos el contenido de grasa disminuyó en comparación con las corridas donde el tiempo de molienda fue de 5 segundos. En los resultados de las diferentes corridas de trabajo, independientemente del tiempo de inmersión, las condiciones que más preservaron el contenido de grasa fueron aquellas donde el tiempo de molienda fue de cinco segundos, mientras que la condición en donde se presentó la mayor preservación del contenido de grasa fue con cizalla a 1.5 minutos de inmersión y 5 segundos de molienda con un 41% de grasa con respecto al 46% de la muestra antes de la molienda. La pérdida de grasa se atribuye al calor generado por el molino que aumenta con respecto al tiempo de molienda y que ocasiona que la nuez se descongele más rápido provocando la disminución de este componente.

La norma NMX-FF-093-SCFI-2011 marca que para un producto de nuez molida se debe de cumplir con un mínimo de 70% por una malla #10 de criba 1.6mm (0.063in). Al realizar el análisis en los gráficos acumulativos se obtuvo que para todas las condiciones de molienda el porcentaje fue mayor a 85% que es superior a lo requerido por la misma.

Se tuvo un mayor porcentaje en cizalla con un minuto y medio de inmersión y cinco segundos de molienda, el porcentaje fue del 90%.

Se puede concluir que la fuerza que resultó más ventajosa fue la de cizalla en comparación con la de impacto ya que la inmersión en el nitrógeno líquido de las muestras de nuez, como se mencionó anteriormente logra que el material se haga duro y se facilite la desintegración del mismo. Con tiempos de molienda ya sea de cinco o diez segundos la nuez se moltura de manera adecuada para cumplir con los requisitos de la norma.

Se demostró que la criomolienda es de gran utilidad en productos que tengan alto contenido de grasa, haciendo fácil el proceso de molienda. Se concluye que hay una conservación del contenido de grasa incluyendo los ácidos

grasos esenciales y así ocasionando que el producto final sea de alta calidad nutrimental y produciendo un tamaño de partícula adecuado.

Bibliografía

1. Alderete y Socios. (2015). *Estudio de Mercado Estratégico de la Nuez Pecanera*. (pp. 3-7). Mexico: Comité Mexicano del Sistema Producto Nuez.
2. Badui, S.. (2006). *Química de los Alimentos*. México: Pearson Educación.
3. Brennan, J., Cowell, N., Butters, J. & Lily, A..(1980). *Las operaciones de la Ingeniería en alimentos*. España: Acribia.
4. Chihuahua, G. d..(2013). *Análisis de competitividad de la nuez*, México:
5. Colina, L..(2008). *Reducción de tamaño de alimentos*, México.
6. Cortazar Figueroa, L. M., Hernández Oliver, D. & Perez Melendez, R.. (2008). *Consumo de energía y distribución de tamaño de partícula en la molienda de canela y pimienta negra*. Revista Mexicana de Ingeniería química, 7(2), p. 8.
7. Diéguez Suárez, T., Lopez Rodríguez, G. & Ramos Ramírez, E..(2011). *La nuez*. Ciencia y desarrollo, p. 3.
8. Economía, S. d..(2011). *NMX-FF-093-SCFI-2011 Productos alimenticios no industrializados para consumo humano – Nuez Pecanera*, México: s.n.
9. Fellows, P.. (1994). *Tecnología del procesado de alimentos: Principios y prácticas*. España: Acribia.

10. Fuentes, D.. (2013, diciembre 15). *Boletín: mercado de la nuez*. Comenuetz, 6, 3-6.
11. Geankoplis, C.. (1998). *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. España: Continental.
12. Gomez, J. . (2008, enero 14). *La criogenia alimentaria*. Air Liquide, 9, pp. 1-2.
13. Helman, J..(1982). *Farmacotecnia teórica y práctica*. España: Continental.
14. Higgins, K.. (2007, noviembre 04). *Nanotecnología en Frío*. Ingeniería en Alimentos, 7, pp. 1-3.
15. Horwitz, W.. (2000). *Official methods of analysis of the AOAC*. España: Reverte.
16. Ibarz Ribas, A..(2005). *Operaciones unitarias en la industria de los alimentos*. España: Aedos.
17. Indira, T.N. & Bhattacharya, S.. (2005). *Grinding characteristics of some legumes*. Journal Of Food Engineering(pp. 1-2). India: ---.
18. Infrasal. (2009). *Manual de gases criogénicos*, El Salvador.
19. Linde, A.. (2009). *Molturación criogénica*, España.
20. Manohar, B. & Sridar, B.S.. (2000). *Size and shape characterization of conventionally and cryogenically ground turmeric (Curcuma domestica) particles*. Powder Technology(pp. 1-3). India: ---.

20. McCabe, W.. (1991]). *Operaciones unitarias en Ingeniería química*. España: McGraw-Hill.
21. Messer(a)..(febrero 15, 2009). *Ficha técnica nitrógeno líquido*. marzo 20, 2016, de Messer Sitio web: messer.com.pe
22. Messer(b)..(abril 18, 2009). *Polvos finos alto rendimiento*. Agosto 16, 2015 de Messer Sitio web: messer.com.es
23. Mohd-Habib, K. & Boland, T.. (2011, marzo 24). *Molienda criogénica: Una multitarea de Marvel*. Air Products, p. 3.
24. Orona, I., Sangerman, D., Fortis, M., Vásquez, C. & Gallegos, M.. (2013, mayo 15). *Producción y comercialización de nuez pecanera (Carya illinoensis Koch) en el norte de Coahuila, México*. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 4, (pp.3-10).
25. SAGARPA..(2013). *Nuez Mexicana*, México, (pp. 34-48)
26. Sanjuan, A.. (2016, noviembre 12). *Comercialización de la nuez en el mercado europeo*. Revista Mexicana de Agronegocios, 9, pp.1-3.
27. Sceni, P.. (2007). *Transiciones de fase*. (pp. 3-7). Argentina: Universidad Nacional de Quilmes.
28. Singh, K. & Goswami, T.. (1998). *Desing of a cryogenic grinding sistem for spices*. Journal of Food Engineering(pp. 1-2). India:.

28. Sowbhagya, H.B., Sampathu, S.R. & Krishnamurthy, N.. (2006). *Evaluation of size reduction on the yield and qualify of celery seed oil*. Journal Of Food Engineering(p. 4). India.
29. Trembley, J., 2010. *Un acercamiento a la reducción de tamaño*. Air Products, p. 5.
30. Wercool..(enero 9, 2010). *Ficha técnica molino Cryomill*. Agosto 14, 2015 de Wercool Sitio web: www.retsch.es