

**UNIVERSIDAD DEL VALLE DE  
GUATEMALA**

**Facultad de Ingeniería**



**Efecto de la energía mecánica de extrusión en harina de  
maíz residual, como fundamento para determinar las  
condiciones operativas en la elaboración de una base  
para atol instantáneo**

Trabajo de graduación presentado por Francisco Maximiliano  
Estrada Martínez, para optar al grado académico de Maestría en  
Tecnología de Alimentos y Gestión

**Guatemala**

**2016**



**Efecto de la energía mecánica de extrusión en  
harina de maíz residual, como fundamento para  
determinar las condiciones operativas en la elaboración  
de una base para atol instantáneo**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE  
DE GUATEMALA**

**Facultad de Ingeniería**

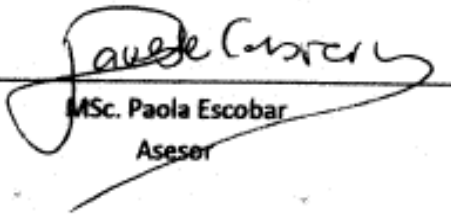
**Efecto de la energía mecánica de extrusión en  
harina de maíz residual, como fundamento para  
determinar las condiciones operativas en la elaboración  
de una base para atol instantáneo**

Trabajo de graduación presentado por Francisco Maximiliano  
Estrada Martínez, para optar al grado académico de Maestría en  
Tecnología de Alimentos y Gestión

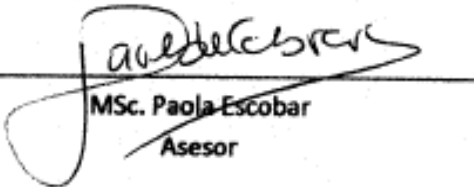
**Guatemala**

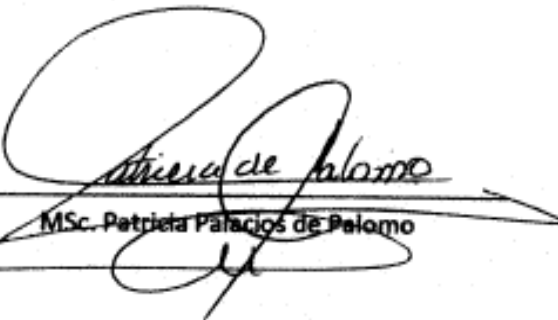
**2016**

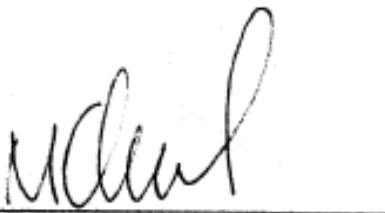
Vo. Bo.:

(f)   
MSc. Paola Escobar  
Asesor

Tribunal Examinador:

(f)   
MSc. Paola Escobar  
Asesor

(f)   
MSc. Patricia Palacios de Palomo

(f)   
Dra. Merializ Gramejo

Fecha de aprobación: Guatemala 14 de Noviembre 2016.

## **PREFACIO**

El presente trabajo fue elaborado con el fin de aportar a la industria de alimentos las condiciones operativas de extrusión basadas en energías mecánicas, que permitan obtener una base para atoles instantáneos a partir de harinas de maíz residuales.

El tiempo de uso del extrusor en planta de producción de alimentos, así como el espacio en laboratorios de análisis fueron ciertas limitantes que durante este año se presentaron para la elaboración de este trabajo de graduación.

Agradezco a la Ing. Paola Escobar, Ing. Adolfo Villatoro y al Ing. José Miguel Guerra por el conocimiento y apoyo otorgado a mi persona para la realización de distintas etapas de este trabajo.

## ÍNDICE

Prefacio .....	v
Lista de cuadros .....	vii
Lista de gráficos .....	viii
Resumen.....	ix
I.    Introducción.....	1
II.   Antecedentes .....	2
III.  Marco teórico.....	4
A. Extrusión de cereales .....	4
1. Almidón .....	6
2. Gelatinización del almidón .....	6
B. Extrusión de cereales .....	7
1. Energía mecánica de extrusión .....	9
2. Índice de absorción y solubilidad en agua .....	10
3. Bebida de cereal.....	11
C. Atol "Una tradición" .....	12
IV.   Justificación.....	13
V.    Objetivos .....	15
VI.   Metodología.....	16
A.    Materiales.....	16
B.    Equipos .....	16
C.    Procedimiento .....	16
VII.  Resultados y discusión de resultados .....	20
VIII. Conclusiones.....	27
IX.   Recomendaciones.....	28
X.    Anexos .....	29
XI.   Referencias .....	30

## Lista de cuadros

<b>Cuadro 1</b> Caracterización de materia prima .....	21
<b>Cuadro 2</b> Condiciones de extrusión .....	21
<b>Cuadro 3</b> Caracterización de harina pre cocida molida .....	22
<b>Cuadro 4</b> Porcentaje de absorción y solubilidad en agua .....	23
<b>Cuadro 5</b> Tiempo de solubilidad .....	25

## Lista de figuras

<b>Figura 1</b> Composición del grano de maíz.....	5
<b>Figura 2</b> Grados del maíz.....	5
<b>Figura 3</b> Proceso de extrusión.....	8
<b>Figura 4</b> Harina de maíz para extrusión .....	17
<b>Figura 5</b> Índice de absorción y solubilidad .....	24
<b>Figura 6</b> Interacción de la materia prima, variables de proceso y características de producto de extrusión .....	29
<b>Figura 7</b> Resumen de procedimiento .....	29

## RESUMEN

La extrusión de alimentos es un proceso continuo de cocción, donde los ingredientes crudos se someten a diferentes transiciones, como la gelatinización y dextrinización de los almidones presentes, desnaturalización de las proteínas y la formación de complejos entre los lípidos y amilosa. Estas transformaciones durante el proceso de extrusión se ven afectadas por diferentes condiciones operativas, de las cuales se pueden mencionar la configuración del tornillo, la velocidad del tornillo, tasa del alimentador, tasa de flujo del agua y perfil de temperatura, entre otras. Durante este proceso la interpretación de las transformaciones que sufre el almidón de maíz son complejas, por lo que contar con un análisis de los efectos producidos sobre la materia prima permite interpretar este fenómeno y poder seleccionar las condiciones operativas que permitan obtener las características finales necesarias para elaborar una base para formulaciones de bebidas de cereal en polvo instantáneas.

El presente estudio se enfocó en la evaluación de la energía mecánica específica (SME por sus siglas en inglés), la cual describe la energía del sistema por unidad de masa. El control de esta energía es una herramienta favorable para la modificación del tratamiento termo-mecánico en la extrusión y la modificación de las características del producto deseado, mediante cambios en las propiedades de la harina de maíz, de las cuales se utilizaron las fracciones residuales del proceso de desgerminado y clasificación de sémolas por granulometría. La evaluación se realizó por medio de la respuesta al índice de absorción y solubilidad en agua.

Finalmente se buscó determinar la relación entre la energía mecánica específica e índice de absorción y solubilidad en agua, con la intención de

establecer las condiciones operativas correctas que permitieran obtener una harina pre cocida que sirva como base para la elaboración de formulaciones de atoles en polvo instantáneos. Para el presente estudio, se define atol como una bebida a base de cereales con moderada viscosidad y servido generalmente caliente. Se determinó que la energía mecánica específica requerida para alcanzar una máxima solubilidad (parámetro de instantaneidad) y una absorción alta (parámetro de viscosidad) es de 143.2Wh/Kg.

## I. Introducción

El ritmo de vida en la actualidad, hace que el tiempo sea cada vez más escaso. El tiempo, en el que se tarda en comprar, preparar y consumir un producto, supone una razón de peso en la toma de decisiones de compra de los consumidores. Para corresponder a esta demanda, el alimento instantáneo es uno de los productos procesados que requieren muy poco esfuerzo antes de consumir. Hoy en día, el proceso de extrusión ofrece numerosas ventajas de procesamiento con respecto a los métodos de procesamiento convencionales, utilizándose ampliamente en la industria de cereales. La textura porosa de los productos extruidos muestra buenas características instantáneas, como resultado de la gelatinización y dextrinización de los almidones.

En el uso del extrusor como método de fabricación, cada cambio en un parámetro de procesamiento puede promover cambios en las características físicas y químicas del almidón y las dextrinas. Estas diferencias pueden generar cambios en el grado de gelatinización, el índice de solubilidad en agua y el índice de absorción de agua.

El trabajo consistió en la determinación de los parámetros de extrusión de harina de maíz residual del proceso de desgerminado y clasificación de sémolas, mediante la cuantificación de la energía mecánica específica y evaluación de sus efectos en la solubilidad y absorción en agua, para la determinación de las condiciones operativas en la elaboración de una base de maíz pre cocida para ser utilizada en formulaciones de atoles instantáneos, determinando que para alcanzar una máxima solubilidad (parámetro de instantaneidad) y una absorción alta (parámetro de viscosidad) se requiere una energía mecánica específica mínima de 143.2Wh/Kg

## II. Antecedentes

A. La influencia de la energía mecánica específica sobre la viscosidad de la harina de maíz durante la extrusión de doble tornillo.

Chang, Martínez, Park y Kokini en 1999 publicaron en la revista *Journal of Chemical Engineering* su estudio sobre la viscosidad en procesos de extrusión. Se concluyó que un aumento de la velocidad del tornillo causa un aumento en energía mecánica específica SME, la cual dio lugar a un daño estructural del almidón resultante en una menor viscosidad. Así mismo un aumento en las condiciones de temperatura disminuye la viscosidad. (Chang, Martinez-Bustos, Park, & Kokini, 1999)

B. Propiedades fisicoquímicas de dextrinas producidas por proceso de extrusión.

Sarifundin y Assiry en 2014 publicaron en la revista *Journal of the Saudi Society of Agricultural Science* su estudio sobre la dextrinización de almidón de maíz utilizando un extrusor de doble tornillo. El efecto lo evaluaron mediante la utilización de diferentes condiciones operativas del extrusor (cinco diferentes velocidades de tornillo y tres diferentes temperaturas) y los métodos de sólidos solubles totales, absorción de agua, índice de solubilidad en agua y diferencia de color. Los resultados revelaron que a un aumento en la velocidad y temperatura de extrusión, el índice de absorción disminuye y el índice de solubilidad y color aumenta. (Sarifundin & Assiry, 2014)

C. Efecto de las condiciones de Extrusión en las propiedades físicas y funcionales de bebidas instantáneas con *Morus Alba* o comúnmente morera.

Charunuch y Tangkanakul en 2008 evaluaron obtener una bebida instantánea de cereal mezclada con hojas de morera por proceso de extrusión, para la cual investigaron las interacciones de las condiciones de funcionamiento en diferentes velocidades del tornillo (300, 350 y 400 rpm), el contenido de morera (5, 10 y 15%) y humedad (15, 17 y 19%); en las propiedades física y antioxidantes del producto. Concluyeron que la condición óptima de funcionamiento debe estar a 350rpm de velocidad del tornillo, 10% de contenido de morera y 17% de humedad de alimentación para obtener un producto terminado de alta actividad antioxidante y compuestos fenólicos totales, con buenas características de color, fácil de disolver en agua caliente, palatabilidad y aceptabilidad. (Charunuch & Tangkanakul, 2008)

D. Propiedades físicas y funcionales de una bebida instantánea en polvo hecho de dos diferentes variedades de mijo perla.

Obilama, Odhav y Jideani en 2014 publicaron en la revista *Journal of food and Nutrition Research* su estudio sobre el efecto de malteado, extrusión y una combinación de ambos procesos en las propiedades físicas y funcionales de harinas de Mijo Perla para bebidas instantáneas en polvo. Se determinó que los procesos afectan significativamente el color y que el proceso de extrusión y malteado reduce el pico de viscosidad significativamente. (Obilana, Odhav, & Jideani, 2014)

### III. Marco teórico

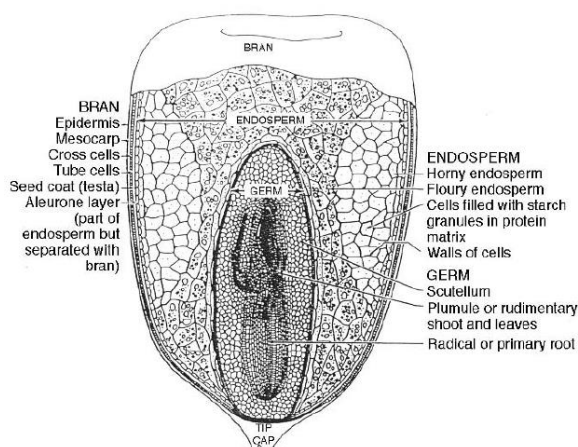
#### A. Maíz

El maíz (*Zea mays* L.) pertenece a la familia de las gramíneas, tribu maideas, y se cree que se originó en los trópicos de América Latina, especialmente los géneros *Zea*, *Tripsacum* y *Euchlaena*, cuya importancia reside en su relación fitogenética con el género *Zea*. (Flores, 2010)

El grano de maíz tradicional está compuesto por un 70 a 75% de almidón, 8 a 10% de proteína y 4 a 5% de aceite, contenidos en tres estructuras: el germen (embrión), el endospermo y el pericarpio. El germen se localiza cerca del extremo inferior del grano y contiene proteína, hierro, niacina, tiamina, riboflavina y grasa, constituyendo el 10 al 12% del peso seco y contiene el 83% de los lípidos y el 18% de la proteína del grano. El endospermo es la parte de reserva del grano, constituye el 80% del peso seco y contiene el 87% del almidón y el 8% de las proteínas del grano. El pericarpio consiste en una serie de capas que cubren y protegen al endospermo y al germen, constituye el 5 al 6% del peso seco e incluye todos los tejidos de cobertura exterior, con un 87 % de fibras vegetales y algunas vitaminas del complejo B, proteína y hierro. (Alvarez, 2006)

Generalmente en la mayoría de los usos alimenticios se elimina la cáscara o salvado de los cereales con lo que se pierde una parte de su valor nutricional. Los alimentos elaborados a partir de cereales que conservan la cascarilla, se conocen como integrales. Los cereales integrales son una buena fuente de fibra, vitaminas y minerales, especialmente de folatos, vitamina E y selenio, que los ha sido asociados con la disminución de los riesgos de padecer cáncer de colon. La fibra soluble ayuda a reducir el colesterol de la sangre y de allí que ayuda a reducir el riesgo de enfermedades del corazón. La fibra insoluble evita el estreñimiento. (Instituto de Nutrición de Centro América y Panama INCAP/OPS)

**Figura 1: Composición del grano de maíz**



(Guy, 2001)

Los granos de maíz se pueden clasificar de acuerdo a su peso, cantidad de granos dañados o rotos y materiales extraños. Este se compone principalmente de más del 50% de granos enteros de maíz dentados (*Zea mays L.*) y menor o igual al 10% de otros granos. Sobre la base del color, el maíz se divide en tres clases: maíz amarillo, maíz blanco y maíz mixto. Cada clase está dividida en 5 grados de acuerdo al departamento de agricultura de los Estados Unidos. El procesamiento de maíz de baja calidad hace que el procesamiento sea más difícil de controlar y el producto final tenga una menor calidad. La clasificación apropiada del maíz a ser usado para el procesamiento es un paso inicial para los propósitos del control de calidad.

**Figura 2: Grados del maíz**

Grado	Peso Especifico Mínimo Por Bushel (libras)	Límites máximos de -		
		Granos Dañados		Maíz quebrado Y Material Extraño (porcentaje)
		Calor (parcial o total) (porcentaje)	Total (porcentaje)	
U.S. No. 1	56.0	0.1	3.0	2.0
U.S. No. 2	54.0	0.2	5.0	3.0
U.S. No. 3	52.0	0.5	7.0	4.0
U.S. No. 4	49.0	1.0	10.0	5.0
U.S. No. 5	46.0	3.0	15.0	7.0

(Lijewski, 2006)

**1. Almidón:** Estructuralmente está conformado por dos polisacáridos químicamente diferenciados: la amilosa y la amilopectina. El primero consiste en un polímero de cadena lineal de unidades de glucosa unidas por enlaces alfa (1-4), la cual le permite generar una estructura tridimensional helicoidal. Esta molécula es insoluble en agua, pero tiene la capacidad de formar micelas hidratadas por su capacidad para enlazar moléculas vecinas por puentes de hidrogeno. La amilopectina consiste en un polímero ramificado de alto peso molecular, conformado por unidades de glucosa, conformado por 94-96% por enlaces alfa (1-4) y en un 4-6% con enlaces alfa (1-6), estando estas ramificaciones localizadas aproximadamente a cada 15-25 unidades de glucosa. Este polisacárido es parcialmente soluble en agua caliente. (Hernández, 2008)

En términos generales, los almidones están conformados aproximadamente por 17-27% de amilosa, y el resto de amilopectina. La concentración relativa de estos dos polímeros está regida por factores genéticos típicos de cada cereal. Tanto la amilosa como la amilopectina influyen de manera determinante en las propiedades sensoriales y reológicas de los alimentos, principalmente mediante su capacidad de hidratación y gelatinización. (Badui, 2006)

**2. Gelatinización del almidón:** Los gránulos de almidón se encuentran en un sistema polimérico semicristalino, donde esta cristalinidad varía de 15-45%, la cual se debe a las cadenas cortas lineales de la amilopectina, las cuales forman una doble hélice organizada. Durante la gelatinización, el orden molecular dentro de los gránulos es destruido gradual e irreversiblemente, siendo la temperatura de gelatinización característica de cada tipo de almidón y depende principalmente de la transición vítrea de la fracción amorfa del almidón.

Durante el proceso de gelatinización ocurren una cierta cantidad de eventos: El orden molecular, y por lo tanto la birrefringencia, se pierde; los gránulos pierden

su cristalinidad, absorben gran cantidad de agua, lo cual provoca el hinchamiento y aumento de volumen. Se solubilizan algunas moléculas, particularmente la amilosa, que se difunde hacia el agua y, si el calentamiento continúa, se rompen y se observa una solubilización parcial, siendo todo este proceso endotérmico. La pasta de almidón obtenida después del proceso de gelatinización no es estable, ya que durante el almacenamiento se presentan modificaciones estructurales que, en conjunto, reciben el nombre de retrogradación. (Hernández, 2008)

## **B. Extrusión de cereales:**

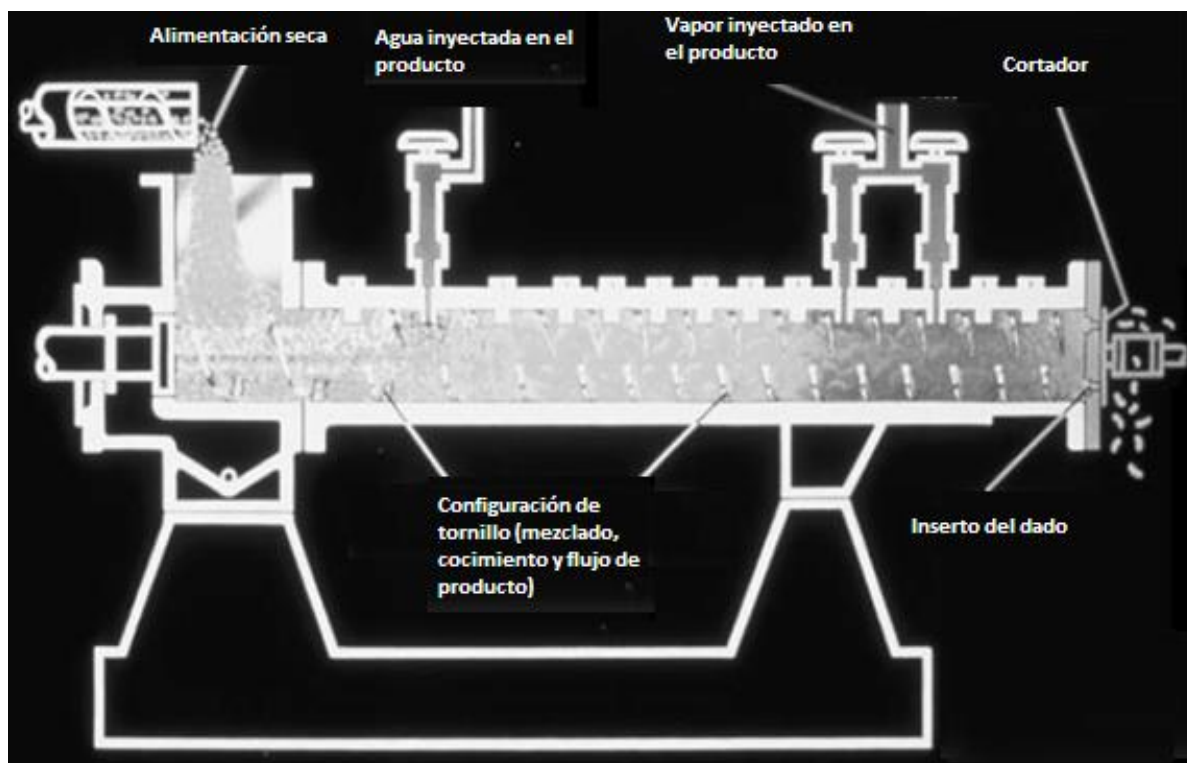
La extrusión es un proceso en donde los ingredientes son forzados a fluir en condiciones severas de mezclado, calentamiento, presión y corte a través de un tornillo o tornillos. El tornillo consiste típicamente en un eje sobre el cual se deslizan varios elementos. En los extrusores de doble husillo, cada tornillo también se compone de componentes modulares.

La cocción por extrusión es una forma especializada de procesamiento. Es un proceso de humedad relativamente baja comparado con el procesamiento convencional de horneado. Los niveles normales de humedad utilizados están en el intervalo de 10-40% sobre una base de peso húmedo. A pesar de estas bajas humedades, las materias primas se transforman en un fluido y se somete a una serie de operaciones para mezclar y transformar los ingredientes nativos en nuevas formas funcionales. Bajo estas condiciones de proceso, las características físicas de las materias primas, tales como el tamaño de partícula, la dureza y las características de fricción de los polvos y la lubricidad y capacidad de plastificación de los fluidos, son más importantes que en otros procesos de fabricación de alimentos.

Una segunda característica que distingue la cocción por extrusión de otros procesos alimenticios es el uso de temperaturas muy altas, generalmente en el rango de 100-180°C. En este, el vapor de agua está contenido en el extrusor a

alta presión. El uso de altas temperaturas reduce el tiempo de procesamiento y permite una transformación completa de la materia prima a su forma funcional en períodos pequeños de 30-120 segundos. (Guy, 2001)

**Figura 3: Proceso de extrusión**



(Guy, 2001)

En la cocción por extrusión, los gránulos de almidón se someten no sólo al proceso de gelatinización sino también al proceso de fusión. La conversión o grado de cocción involucra la pérdida de la integridad de los gránulos de almidón, la pérdida de regiones ordenadas en cada gránulo, una reducción en el peso molecular del biopolímero, y la formación de complejos amilosa-lípido. (Guy, 2001) La intensidad de estas transformaciones dependerá de las condiciones de extrusión y afectará a las propiedades finales del producto. (Darío & González, 2012) . Los materiales fibrosos que se encuentran en una receta de cocción por extrusión, como lo son la hemi-celulosa, celulosa y la

lignina derivada de las cáscaras y salvado de granos y semillas, tienden a permanecer firme y estable durante el procesamiento y no se reducen en tamaño durante la extrusión. (Guy, 2001)

Estas transformaciones pueden ser evaluadas a través de distintas características, tales como almidón dañado o susceptibilidad enzimática ( $\alpha$ -amilasa), absorción de agua, solubilidad en agua, respuesta amilográfica, calorimetría diferencial de barrido, difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido a bajo vacío, etc. (Darío & González, 2012)

En relación al proceso de cocción por extrusión, la solubilidad es la propiedad que permite interpretar con mayor claridad los cambios producidos cuando el grado de cocción alcanzado es suficientemente alto, esto es, cuando la destrucción de la estructura granular es grande y no se observa la presencia de gránulos con estructura cristalina. En cambio, la absorción de agua, el almidón dañado y la respuesta amilográfica son más adecuados en los casos en que el grado de cocción es relativamente bajo, esto es, cuando la destrucción de la estructura granular es baja y todavía se observa estructura nativa. (Darío & González, 2012)

El tamaño y la forma de los gránulos de almidón física pueden afectar ciertos procedimientos de extrusión. Pequeños gránulos de almidón tienen distancias más cortas para que el calor pueda viajar y elevar su temperatura hasta el punto de fusión crítico, por lo tanto se vuelven suaves con mayor rapidez en el extrusor. (Guy, 2001)

**1. Energía mecánica de extrusión.** La dextrinización es el mecanismo predominante de la fragmentación de almidón durante la baja humedad y alta energía mecánica de extrusión, la cual se define químicamente como la hidrólisis parcial. (Lai, L.S., 1991)

Para caracterizar mejor la energía mecánica, la energía mecánica específica (SME) se define como

$$\text{SME} = \text{Md } w / m$$

Donde

- SME = energía mecánica específica ( $W \cdot h / \text{kg}$ )
- Md = torque ( $N \cdot m$ )
- w = velocidad de rotación del tornillo ( $s^{-1}$ )
- m = caudal másico ( $\text{kg} / h$ ).

Para valores SME hasta  $200 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$  o  $720 \text{ KJ}$ , la disminución en el peso molecular promedio puede ser descrita como una función exponencial, siendo esto la fragmentación debido a un aumento constante en SME. Tanto la energía mecánica y térmica transferida al almidón de la masa durante la extrusión afecta la composición, principalmente en los enlaces de valencia y los enlaces de hidrógeno entre polímeros vecinos en la estructura del almidón. Estos cambios estructurales aumentan la susceptibilidad de almidón para la acción enzimática, la reducción de los enlaces de hidrógeno, y el aumento de grupos hidroxilos libres. La fragmentación del almidón durante la extrusión depende de las condiciones de funcionamiento del extrusor, tales como velocidad del tornillo, la temperatura y contenido de humedad, así como el tipo de almidón usado. (Lai, L.S., 1991)

**2. Índice de absorción y solubilidad en agua.** Cuando se calienta una suspensión acuosa de almidón, los gránulos se hinchan por una absorción progresiva e irreversible de agua aumentando su tamaño. La determinación de estos índices se mide aprovechando la capacidad de absorción del agua del

gránulo de almidón y la exudación de fracciones de almidón a medida que se incrementa la temperatura de las suspensiones.

La caracterización estructural del almidón durante la extrusión indica el efecto de las variables del proceso tales como la velocidad del tornillo y la temperatura sobre las propiedades funcionales de los productos extruidos, como su índice de absorción de agua y su índice de solubilidad en agua. El índice de absorción refleja la capacidad de cualquier material alimenticio para absorber el agua después de la exposición a un determinado tratamiento. En el caso del almidón, puede ser un indicador de sus propiedades funcionales, específicamente la estabilidad de los compuestos poliméricos de almidón contra el agua. Además, esta puede usarse como una medida de la cantidad de gránulos de almidón intactos y completamente gelatinizados. (Sarifundin & Assiry, 2014)

Los gránulos fragmentados pueden perder la capacidad de unión de agua, donde esta actividad depende de la disponibilidad de grupos hidrófilos y de la capacidad de formación de gel de las macromoléculas. Por lo tanto, se dice que las cadenas de almidón más largas se fragmentan en cadenas de dextrinas más cortas. Las cadenas más cortas de dextrinas tienen una solubilidad más alta que las cadenas más largas de almidón. Las condiciones de extrusión pueden provocar una dextrinización extensiva del almidón, dando como resultado una formación incrementada de productos solubles en agua. (Sarifundin & Assiry, 2014)

Los almidones de buena calidad se caracterizan por una alta viscosidad de la pasta, baja solubilidad, alta absorción de agua y un alto poder de hinchamiento.

Alta solubilidad, baja absorción de agua y bajo poder de hinchamiento indican un almidón de baja calidad, el cual al enfriarse produce pastas delgadas y de poca estabilidad cuando se enfrían. (Aristizábal & Sánchez, 2007)

**3. Bebidas de cereal.** En Guatemala se consume atoles, que son bebidas a base de cereales sometidas a un proceso de cocción, la mayoría de las ocasiones dulces, donde al final del proceso, generan una moderada viscosidad y son servidos generalmente calientes. Existen diferentes tipos de atol a base de maíz (atol blanco, de elote, etc.), maíz con texturizado de soya, trigo, cebada, haba, avena, etc. En la actualidad se encuentran fórmulas de rápida cocción enriquecidas con vitaminas y minerales.

### **C. Atol “una tradición”**

La producción de maíz se utiliza en gran proporción como alimento humano básico. En Mesoamérica (México, Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua, Costa Rica), se usan las mazorcas tiernas o elotes para consumir cocidas, guisadas o para hacer atoles, pan y tamalitos. El grano sazón para hacer masa y a partir de esta se hacen tamales, tortillas, atoles, sopas, etc.

En los días lluviosos, cuando el viento enfría el ambiente, un atol es la bebida tradicional en Guatemala. Los atoles son parte de la tradición culinaria propia de los fines de semana, para muchos, y alimentos básicos, de todos los días, para otros. Entre los muchos atoles conocidos en Guatemala se encuentran el atol blanco, el de maíz de salpor, el mosh (avena), arroz en leche, atolillo (de maíz amarillo), el pinol, el llamado shuco (de maíz negro) y el de plátano. Algunos de estos, por tener como base los cereales, son generalmente una buena opción para el desayuno. (Mendizabal, 2013)

## IV. Justificación

En la actualidad, las personas guatemaltecas no cuentan con suficiente tiempo para preparar una comida completa a partir de productos crudos, por lo que la necesidad de alimentos de mayor conveniencia ha tomado mayor auge. En Guatemala el tomar una taza de atol en el desayuno ha sido una tradición que ha sido trasladada de generación en generación. En la actualidad el atol todavía forma parte del paisaje cultural que todos los habitantes de este país comparten, aunque ha perdido la relevancia que tenía anteriormente, haciendo que se adopten propuestas que el mundo globalizado presenta, cambiando esta tradicional bebida por otros alimentos, como comidas listas para comer, generalmente de menor contenido nutricional.

Como atol se conoce al producto resultante de la cocción de harinas de cereales, por ejemplo de maíz, en agua con algunas especies aromáticas y otros saborizantes, en proporciones tales que al final de la cocción el resultado tenga una moderada viscosidad. En la actualidad existen algunos atoles que son de fácil cocimiento, llevando este procedimiento al menos 5 minutos en ebullición, así mismo existen otros de mayor precio por su composición, que reducen el tiempo a no más de un par de minutos.

La agencia de inteligencia de mercado líder en el mundo MINTEL, identificó entre las tendencias claves que tendrán impacto en el mercado global de alimentos y bebidas 2017: “la tradición”, “sostenibilidad y reducción de desperdicios”, “el tiempo es la esencia” y el “equilibrio de la balanza”. Haciendo énfasis en que los consumidores buscarán nuevos productos cuyos sabores y formulaciones se basen en la tradición y los elaborados de antaño, el estigma asociado a productos imperfectos iniciara a desvanecerse y productos harán uso de ingredientes que de otro modo se desperdiciarían, la búsqueda de productos instantáneos se incrementará, tomando en cuenta que el tiempo es un recurso

cada vez máspreciado y finalmente los supermercados y empresas llevaran innovaciones en la alimentación para que esta sea más accesible a los consumidores con economías más deprimidas.

Por lo que en función de un alimento tradicional, la conveniencia y un menor costo, se visualiza una oportunidad de desarrollar una base para atol (práctica y económica), la cual pueda ser utilizada en formulaciones instantáneas, utilizando la tecnología de extrusión y conociendo los cambios fisicoquímicos que se logran a través de controlar la energía mecánica

En cuanto a la sostenibilidad y reducción de desperdicios, este trabajo propone la utilización de la fracción del grano de maíz correspondiente a la fracción residual del desgerminado, incluyendo el salvado (fracción comúnmente no utilizadas en extrusión por su contenido de grasa y fibra) y la fracción residual de clasificación de sémolas por granulometría, el cual permitirá mejorar el porcentaje de utilización del grano de maíz, reducción de desperdicios y mantener las vitaminas del complejo B, hierro y proteína presentes en estas fracciones. El germen se caracteriza también por su alto contenido de grasa mientras que el salvado contiene una cantidad alta de fibra. Con lo que se busca obtener como resultado una base para bebida instantánea lista para el consumidor en no más de 30 segundos para ser consumida tanto caliente como fría, la cual no necesitaría de cocimiento y los consumidores ahorrarían energía y tiempo; sin perder las características sensoriales de un atol tradicional a un precio competitivo.

## V. Objetivos

### A. Generales:

Determinar la energía mecánica específica de extrusión requerida para la obtención de una base para formulaciones de bebidas de cereal de maíz instantáneas.

### B. Específicos:

- Utilizar la fracción del grano de maíz correspondiente al residuo del proceso de desgerminado y de clasificación de sémolas por granulometría del grano de maíz.
- Determinar la relación entre la energía mecánica de extrusión y el tiempo de solubilización de la base de cereal de maíz.
- Determinar la relación entre la energía mecánica de extrusión y el índice de solubilidad y absorción del agua.

## VI. Metodología

### A. Materiales:

- Harina cruda de maíz residual (fracción de residuo del desgerminado y de clasificación de sémolas)
- Tubos de centrifuga plásticos VWR de 50ml
- Vasos de precipitado PIREX de 50ml y 2000ml

### B. Equipos:

- Extrusor Bulher de doble Tornillo.
- Molino FOSS KN 195 Knifetec
- Vortex Mixer Digital VWR
- Balanza analítica Mettler Toledo
- Estufa eléctrica CORNING
- Centrifuga Clay Adams, DYNAC
- Horno L-C OVEN, Barnstead-Line
- Termo balanza OHAUS MB45

### C. Procedimiento:

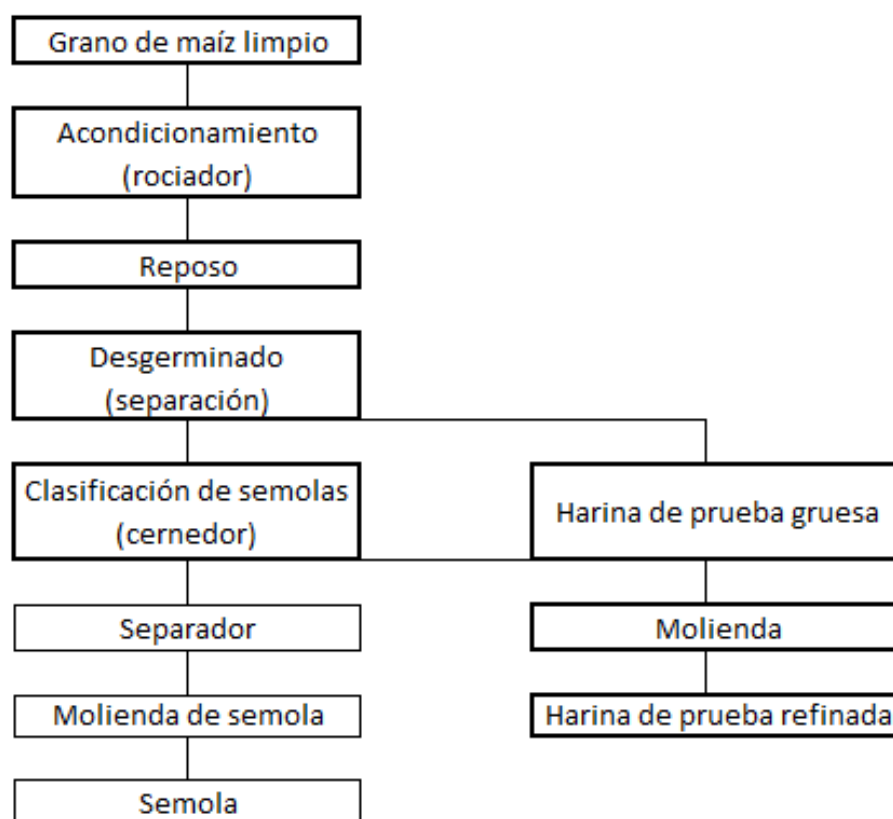
**1. Extrusión de harina.** Se utilizó como materia prima harina cruda de maíz obtenida del proceso de residuo de desgerminación y clasificación de sémolas con las siguientes características:

- Humedad: 15% máx (AOAC M. 14.003 13<sup>a</sup> 1980)
- Grasa: 5.5-7% (por extracción con éter, AACC 30-26 8<sup>a</sup>. ed 1983)

- Proteína: 5-7% (por determinación de  $\text{NH}_4^+$  (AOAC 2.057 13<sup>a</sup>. 1980)
- Granulometría:

RETENIDO 45	RETENIDO 60	RETENIDO 70	PASA 70
35-38%	5-8%	3-6%	50-55%

**Figura 4: Harina de maíz para extrusión**



Se procedió a extruir en extrusor Buhler de doble tornillo con molde para expandido directo, utilizando como objetivo las siguientes Energías Mecánicas Específicas: 130, 140, 150, 160 y 170  $\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$

**2. Molienda.** Los productos extruidos se procedieron a moler utilizando molino FOSS KN 195 Knifetec, con el objetivo de alcanzar una granulometría de:

RETENIDO 70	PASA 70
10-20%	80-90%

### 3. Análisis de índice de absorción y solubilidad.

- a. Se pesaron tubos de centrifuga 50ml secos.
- b. Se pesaron en los tubos 2.5g de harina extruida (bs) y se agregaron exactamente 25ml de agua destilada precalentada a 30C, los cuales se agitaron utilizando el equipo Vortex Mixer Digital VWR a 1500rpm por 3 minutos.
- c. Se centrifugaron las muestras utilizando Centrífuga Clay Adams, DYNAC a 3000G durante 10 minutos.
- d. Se decantó el sobrenadante inmediatamente después de centrifugar (máximo un minuto después).
- e. El sobrenadante se colocó en un vaso de precipitado de 50ml. (previamente pesado).
- f. Se secó el sobrenadante en un horno durante 24 horas a 100C.
- g. Se pesaron los tubos de centrifuga con el gel.
- h. Se pesaron los vasos de precipitado con los insolubles.

### 4. Cálculos e interpretación de los resultados:

$$a. \text{ índice de absorción de agua} = \frac{\text{Peso del gel (g)}}{\text{Peso muestra (g)bs}}$$

$$b. \text{ índice de solubilidad en agua} = \frac{\text{Peso soluble (g)}}{\text{Peso muestra (g)bs}}$$

$$c. \text{ Poder de hinchamiento}(PH) = \frac{\text{Peso del gel (g)}}{\text{Peso muestra(g)} - \text{Peso solubles (g)}}$$

## 5. Evaluación de instantaneidad:

- a. Pesar 75g de Harina en un vaso de precipitado de 2000ml
- b. Agregar 1000ml de agua y determinar el tiempo hasta la disolución de la harina.

## VII. Discusión y resultados

El trabajo consistió en la determinación de los parámetros de extrusión de harina de maíz residual del proceso de desgerminado y clasificación de sémolas, mediante la cuantificación de la energía mecánica específica y evaluación de sus efectos en la solubilidad y absorción en agua, para la determinación de las condiciones operativas en la elaboración de una base de maíz pre cocida para ser utilizada en formulaciones de atoles instantáneos.

Inicialmente se caracterizó la materia prima utilizada (Cuadro No. 1 “caracterización de materia prima”), ya que la cocción por extrusión es una forma especializada de procesamiento de los alimentos a bajas concentraciones de agua y altas temperaturas, donde la materia prima se transforma en un fluido deformable y posteriormente estos ingredientes nativos en formas funcionales, siendo la gelatinización y la dextrinización los predominantes mecanismos de modificación que afectan las macromoléculas de almidón.

Por lo que las características físicas de los materiales, tales como el tamaño de partícula, humedad y grasa son variables que afectan los resultados. La humedad tiende a actuar como un plastificante y con un incremento de esta se puede reducir la disipación de la energía mecánica; la granulometría afecta ya que las partículas de almidón y proteínas se cortan mecánicamente por el sistema del tornillo del extrusor y tienden a cambiar su forma física; y la grasa tiende a lubricar tanto las partículas que interactúan en la harina, como las partículas que rozan contra la superficie metálica de los tornillos, generando una disminución en la energía mecánica y por tanto reduciendo el grado de cocimiento. El efecto lubricante de las grasas es más alto que el de los plastificantes, en términos de sus concentraciones activas.

**Cuadro 1****CARACTERIZACIÓN DE MATERIA PRIMA**

<b>HARINA CRUDA DE PRUEBA REFINADA</b>							
<b>Muestra</b>	<b>% Grasa</b>	<b>Retenido 45</b>	<b>Retenido 60</b>	<b>Retenido 70</b>	<b>Pasa 70</b>	<b>% Fibra</b>	<b>% Humedad</b>
Harina Cruda	5.8	35.45	6	3.85	54.7	4.79	15

En el Cuadro 2, "Condiciones de extrusión", se puede observar los parámetros y energías mecánicas específicas obtenidas, conociendo que la energía mecánica específica es definida como  $SME = Md w / m$ , siendo Md el torque (N\*m), w velocidad de rotación del tornillo ( $s^{-1}$ ) y m el caudal másico (Kg/h). Esto puede confirmarse en los resultados, ya que el comportamiento durante las pruebas demuestran que la energía mecánica específica es directamente proporcional a la velocidad del tornillo (rpm) e inversamente proporcional al caudal másico (Kg/h). Se puede observar que en los resultados existe una variación de este comportamiento en el valor de SME 177.8Wh/Kg, esto pudo deberse a que la energía térmica en este punto fue inferior. Teóricamente el comportamiento de la energía térmica y la energía mecánica específica tienen un comportamiento inversamente proporcional.

**Cuadro 2****CONDICIONES DE EXTRUSIÓN**

<b>PARÁMETROS DE EXTRUSIÓN</b>							
<b>SME Wh/Kg</b>	<b>Rpm</b>	<b>kW</b>	<b>Capacidad Kg/h</b>	<b>Torque %</b>	<b>Agua Kg/h</b>	<b>Temperatura C</b>	<b>Bar</b>
177.8	221	113.8	640.1	56	67.4	A 116 B 152.6 C 131.1	58.5
161	225	91.8	570.5	45	61	A 121.2 B 182.1 C 139.9	52.2
152.4	215	101.4	665.3	52	66.4	A 123.2 B 192.4 C 151	60.7

### Continuación Cuadro 2

SME Wh/Kg	PARÁMETROS DE EXTRUSIÓN						
	Rpm	kW	Capacidad Kg/h	Torque %	Agua Kg/h	Temperatura C	Bar
143.2	180	114	796.2	70	79.4	A 116 B 179.2 C 157.3	76.3
134.8	168	131.4	975	86	92.4	A 107 B 164.6 C 158.4	92.1

Así mismo, en el Cuadro No. 2, se observa que un incremento de agua reduce la energía mecánica, ya que esta actúa como plastificante al reducir las interacciones de los polímeros, transformándolo de un estado sólido a un fluido deformable dentro del extrusor; lo cual facilita el desplazamiento de las harinas por el tornillo del extrusor.

### Cuadro 3

#### CARACTERIZACIÓN DE HARINA PRECOCIDA MOLIDA

SME Wh/Kg	HUMEDAD		GRANULOMETRÍA	
	PRUEBA	HUMEDAD (125C - 8MIN)	RETENIDO 70	PASA 70
177.8	1	3.45%	17.26	82.74
161	2	3.98%	16.22	83.78
152.4	3	4.08%	14.85	85.15
143.2	4	4.99%	18.97	80.47
134.8	5	5.00%	18.52	81.48

En el Cuadro No. 3 se registran las características de humedad y granulometría resultantes de la molienda para la elaboración de la harina precocida. Se observa que las granulometrías alcanzadas son similares en todas

las pruebas de energías mecánicas, de modo que los resultados sean comparables (retenido malla 70: 10-20% y pasa malla 70: 80-90%). Se observa también que al tener un mayor tratamiento de cocimiento mecánico, menor es la humedad presente en el producto final y que la relación en el valor de SME 177.8Wh/Kg se mantiene, ya que la energía térmica en este caso fue menor, como se planteó en el Cuadro No. 2, lo cual genera un mayor grado de cocimiento por un aumento de la energía mecánica y por tanto un mayor pérdida en la humedad del producto.

#### Cuadro 4

##### PORCENTAJE DE ABSORCIÓN Y SOLUBILIDAD EN AGUA

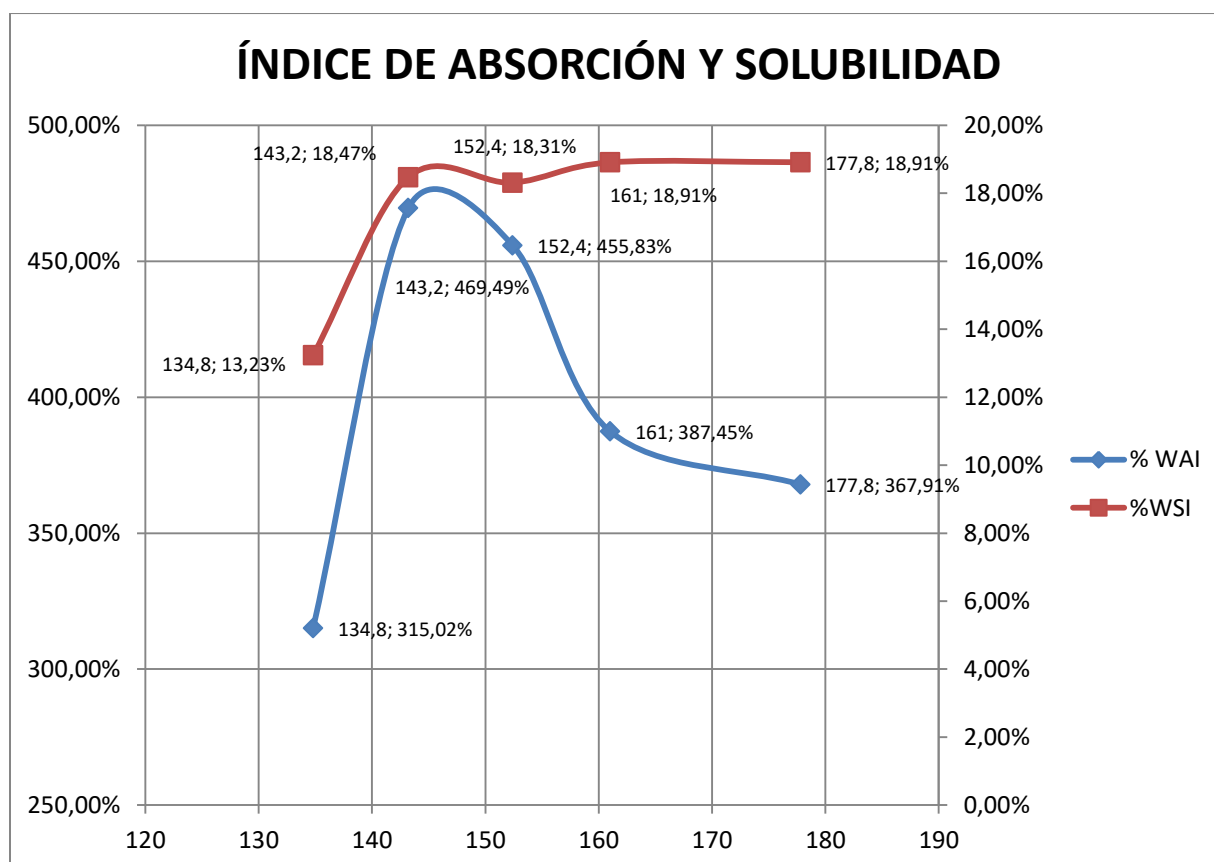
	<b>ABSORCIÓN Y SOLUBILIDAD EN AGUA</b>		
<b>SME</b>	<b>% WAI</b>	<b>%WSI</b>	<b>Poder de hinchamiento</b>
177.8	367.91%	18.91%	4.54
161	387.45%	18.91%	4.80
152.4	455.83%	18.31%	5.58
143.2	469.49%	18.47%	5.76
134.8	315.02%	13.23%	3.64

El SME, energía mecánica específica, es un parámetro clave en el proceso de extrusión para correlacionar las condiciones de operación (velocidad del tornillo, contenido de humedad, configuración de tornillo, etc) y la conversión del producto (índice de absorción, índice de solubilidad e índice de hinchamiento). Estos cambios fueron evaluados en harinas con alto contenido de fibra y grasa (harina residual del desgerminado y clasificación de sémolas) en un rango de valores de 134.8Wh/Kg hasta valores de 177.8Wh/Kg. Se observa en el Cuadro No. 4 y Gráfico No 1 una relación general entre el %WAI, %WSI y el poder de

hinchamiento. La cantidad de gránulos de almidón hinchados aumentó con el aumento en el SME; pero los gránulos no sufrieron un daño representativo cuando los valores de SME se mantienen por debajo de 143.2Wh/Kg, lo cual se puede observar con un incremento en los valores de WAI debido a una proporción creciente de los gránulos de almidón gelatinizados; la solubilidad también aumenta como se puede observar en el índice de %WSI, debido a la degradación por hidrolisis de las moléculas de amilosa y amilopectina para producir componentes de menor peso molecular.

**Figura 5**

**ÍNDICE DE ABSORCIÓN Y SOLUBILIDAD**



La relación WAI y WSI alcanza un valor máximo a un nivel intermedio de 143.2Wh/K, en donde se encuentra un máximo de gránulos de almidones dañados y no dañados de manera simultánea. Con un incremento por encima de 143.2Wh/Kg, los gránulos de almidón fueron totalmente dañados, por lo que el índice de absorción disminuye y el índice de solubilidad aumenta. Este fenómeno de degradación de macromoléculas de almidón se conoce con el término de dextrinización, donde las dextrinas formadas pueden variar tanto en tamaño como ramificaciones en su estructura molecular, generando estructuras más sencillas y fácilmente degradables.

Durante la prueba de solubilidad y absorción se logró observar una pequeña formación de aglomerados en la parte superior de la mezcla, lo cual puede estar directamente relacionado con el contenido graso de la harina utilizada. Esto es considerado ya que las grasas se caracterizan por ser compuestos apolares generalmente de elevado peso molecular, con un número elevado de átomos de carbono e hidrogeno, lo cual les confiere una insolubilidad en agua y alta solubilidad en solventes apolares. Para mejorar la solubilidad y por ende mejorar las condiciones finales en formulaciones para atoles instantáneos, se pueden utilizar aditivos emulsionantes que permitan la formación de una mezcla uniforme de las dos fases inmiscibles, así como aditivos estabilizantes que permita una dispersión uniforme de estas dos secciones.

### Cuadro 5

Tiempo de solubilidad

<b>SME</b>	<b>Tiempo (segundos)</b>
177.8	28
161	28
152.4	29
143.2	29
134.8	55

En la Tabla número 5 se puede observar que a energías mecánicas superiores a 143.2 se alcanzan solubilidades a tiempos iguales o inferiores a 30 segundos.

Con los resultados obtenidos se puede determinar que los parámetros necesarios para mantener una viscosidad y absorción propia de los atoles y una buena solubilidad, son valores de energía mecánica de 143.2 Wh/Kg. Esto garantiza que exista simultáneamente una buena solubilidad de las partículas de cereal y una buena absorción para dar textura a la bebida.

## VIII. Conclusiones

1. A energías mecánicas de 143.2Wh/Kg, se puede obtener una harina pre cocida con alto nivel de solubilidad y una alta absorción de agua, para evaluación en formulaciones finales de atoles.
2. Es factible obtener harinas pre cocidas para formulaciones finales de atoles utilizando la fracción residual del grano de maíz.
3. Al incrementar la energía mecánica específica se disminuye el tiempo de solubilización de la harina.
4. La solubilidad y absorción de agua son directamente proporcionales al incremento de la energía mecánica, hasta un valor de 143.2Wh/Kg.
5. A energías mecánicas superiores a 143.2Wh/Kg, el índice de absorción tiene un comportamiento inverso a la energía mecánica y al índice de solubilidad.

## **IX. Recomendaciones**

Evaluar la harina pre cocida en formulaciones finales de atoles, de modo que el contenido de grasa presente de la harina no afecte la instantaneidad de la mezcla. Durante las formulaciones se pueden utilizar aditivos emulsificantes que pueda reducir la no afinidad de las grasas apolares con el agua, mediante su actividad tensoactiva. Así mismo se puede evaluar en otros medios, como puede ser leche.

Evaluar la relación entre diferentes configuraciones de tornillos y la energía mecánica específica.

## X. Anexos

Figura 6. Interacción de la materia prima, variables de proceso y características de producto de extrusión

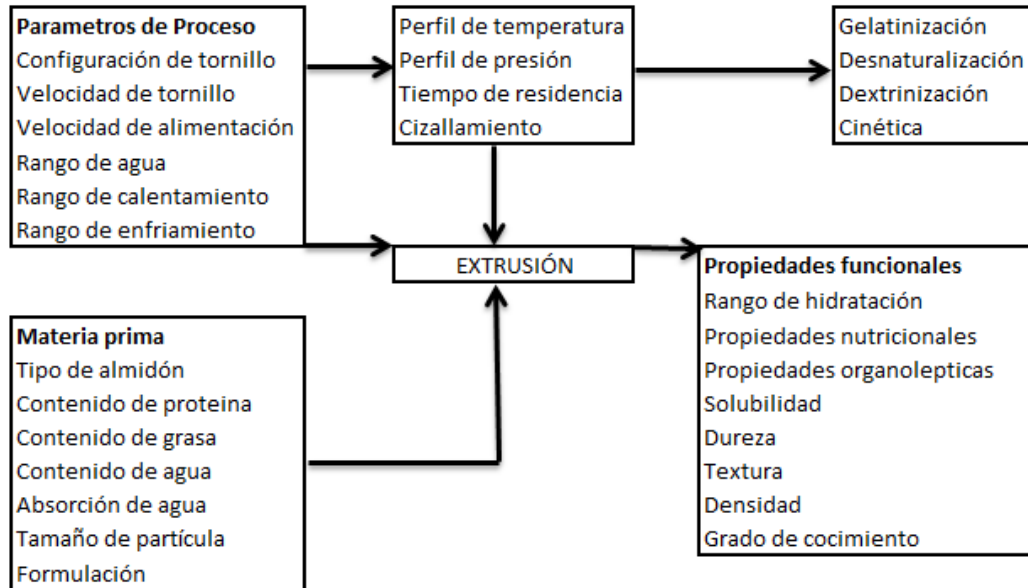
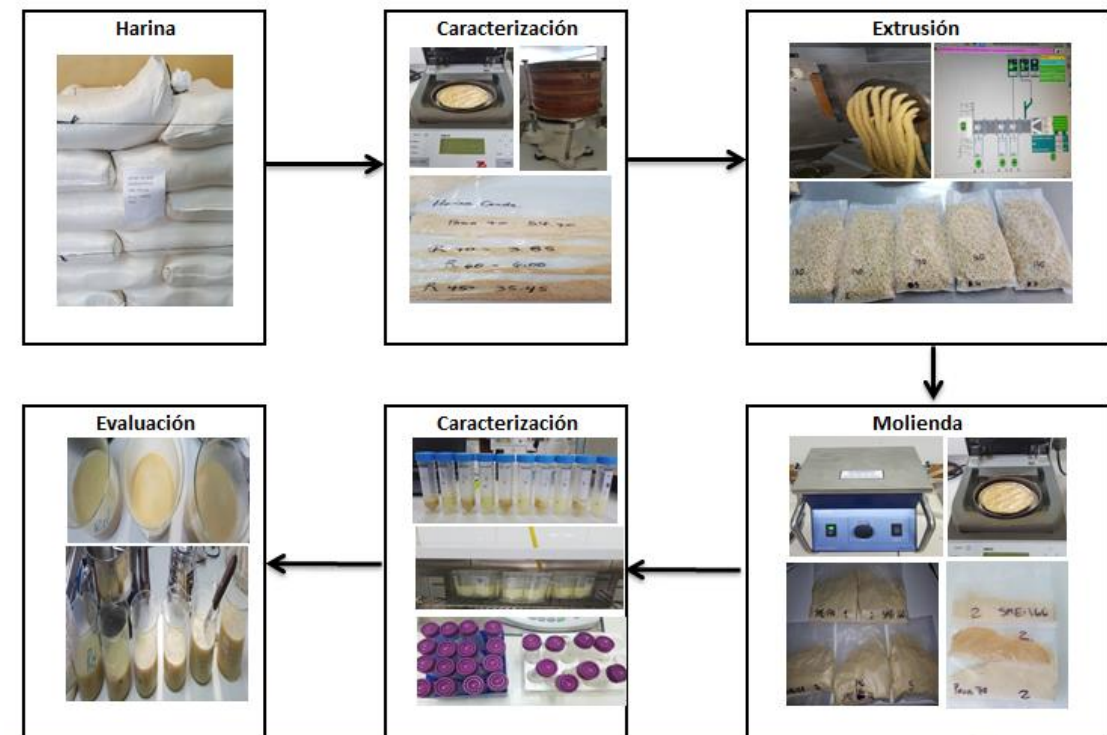


Figura 7. Resumen de procedimiento



## XI. Bibliografía

- Alvarez, A. (octubre de 2006). Aplicaciones del maíz en la tecnología alimentaria y otras industrias. *Serie de Informes Escepcionales de ILSI Argentina*, 2, 9-13.
- Aristizábal, J., & Sánchez, T. (2007). *Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación FAO.
- Badui, S. (2006). *Química de los Alimentos* (Cuarta ed.). (E. Quintanar, Ed.) México: Person Educación.
- Chang, Y., Martinez-Bustos, F., Park, T., & Kokini, J. (1999). The influence of specific mechanical energy on cornmeal viscosity measured by on-line system during twin-screw extrusion. *SciELO*, 16.
- Charunuch, C., & Tangkanakul, P. (2008). Effects of Extrusion Conditions on the Physical and Functional Properties of Instant Cereal Beverage Powders Admixed with Mulberry (*Morus alba* L.) leaves. *Food Science Technology Research*, 14(5), 421-430.
- Darío, H., & González, R. (2012). Harina de Maíz para tortillas: efecto de la dureza del endospermo y de las variables de Extrusión. *Ingeniería Química Universidad Autónoma de Yucatan*, 3-10.
- Flores, H. D. (2010). *Guía Técnica El cultivo del maíz*. El Savlador: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura en el Salvador.
- Guy, R. (2001). *Extrusion cooking (Technologies and applications)*. USA: CRC Press LLC.
- Hernández, M. (2008). Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México. *Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 28(3), 718-726.
- Instituto de Nutrición de Centro América y Panama INCAP/OPS. (s.f.). *Cereales y sus Productos (selección preparación y conservación de alimentos)*. CADENA.
- Lai, L.S. (1991). Physicochemical Changes and Rheological Properties of Starch during Extrusion. *Biotechnology Progress*, 251-266.
- Lijewski, R. (2006). *Grain Inspection Handbook. Grain Grading Procedures*. Washington, D.C.: USDA United States Department of Agriculture.
- Mendizabal, A. L. (1 de Julio de 2013). *Atoles: un deleite que alimenta: Siglo 21*. Recuperado el 06 de Marzo de 2016, de <http://www.s21.com.gt/node/306401>

- Obilana, A., Odhav, B., & Jideani, V. (2014). Functional and Physical Properties of Instant Beverage Powder made from Two Different Varieties of Pearl Millet. *Journal of Food and Nutrition Research*, 2(5), 250-257.
- Sarifundin, A., & Assiry, A. M. (2014). Some physicochemical properties of dextrin produced by extrusion process. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Science*, 13, 100-106.
- Sobota, A., Sykut-Domariska, E., & Rzedzicki, Z. (2010). Effect of extrusion-cooking process on the chemical composition of corn-wheat extrudates, with particular emphasis on dietary fibre fractions. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 60(3), 251-259.

