



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
MAESTRÍA EN CIENCIA DE LOS ALIMENTOS

“Efecto de la micronización sobre las propiedades fisicoquímicas, funcionales y fisiológicas del bagazo de chayotextle (*sechium edule*) para su posible aplicación en la industria alimentaria”.

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIA DE LOS
ALIMENTOS

PRESENTA:

ING. ISABEL CARBAJAL BLANCO

DIRECTOR:

Dr. JUAN PABLO HERNÁNDEZ URIBE

ASESORES:

Dr. APOLONIO VARGAS TORRES

Dra. HEIDI MARÍA PALMA RODRÍGUEZ

Dr. ALEJANDRO APARICIO SAGUILÁN

Tulancingo de Bravo, Hidalgo. Octubre de 2020



COORDINACION DE INVESTIGACION Y POSGRADO DEL ICAP

Actas de la reunión del Comité de Tesis de Maestría en Ciencia de los Alimentos
Apertura:

La reunión ordinaria para evaluar los avances de la tesis intitulada: “Efecto de la micronización sobre las propiedades fisicoquímicas, funcionales y fisiológicas del bagazo de chayotextle (*Sechium edule*) para su posible aplicación en la industria alimentaria”, que desarrolla la estudiante Isabel Carbajal Blanco

Asistentes:

Dr. Juan Pablo Hernández Uribe

Dr. Apolonio Vargas Torres

Dra. Heidi Maria Palma Rodríguez

Dr. Alejandro Aparicio Saguilan

A. Revisión de Trabajo de Tesis

Observaciones:

El comité revisó con antelación el trabajo de tesis en extenso propuesto por la estudiante, comunicando a la estudiante, Isabel Carbajal Blanco, oportunamente las correcciones, adiciones y/o modificaciones que debería considerar para mejorar su trabajo y poder continuar con el proceso de obtención de grado. La estudiante atendió de forma conveniente las sugerencias del comité.

B. Acuerdos

En esta fecha, se comunica atentamente que el comité conformado por los profesores firmantes, otorgamos nuestra autorización para que la estudiante imprima su trabajo final de tesis, y continúe con los trámites necesarios para la obtención del grado de maestría respectivo.

ATENTAMENTE

“AMOR, ORDEN Y PROGRESO”

Tulancingo de Bravo, Hidalgo a 19 de octubre de 2020

Dr. Juan Pablo Hernández Uribe

Dr. Apolonio Vargas Torres

Dra. Heidi Maria Palma Rodríguez

Dr. Alejandro Aparicio Saguilan



AGRADECIMIENTOS

Agradezco especialmente a mi director de tesis el Dr. Juan Pablo Hernández Uribe, por su apoyo y orientación incondicional durante este proceso de aprendizaje.

A la Universidad del Papaloapan (UNPA) campus Tuxtepec, en especial agradezco enormemente al Dr. Alejandro Aparicio Saguilán, por su colaboración en la segunda etapa del proyecto y las facilidades brindadas durante la estancia.

Al equipo de trabajo, principalmente a la Dra. Heidi María Palma Rodríguez, al Dr. Apolonio Vargas Torres y al Dr. Ricardo Omar Navarro Cortez, por el apoyo, consejos y sabias sugerencias, además de hacerme sentir como en casa.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por las becas otorgadas, para la realización de mis estudios de posgrado y la realización de una estancia académica.

Al Instituto de Ciencias Agropecuarias de la UAEH, por brindarme la formación académica y profesores de excelencia.

A mis compañeros de posgrado, en especial a esas amistades que día a día hicieron que esta experiencia se volviera muy especial en toda momento y hacerme sentir en familia. A mi amiga Mylen por sus consejos y brindarme su hogar durante esta etapa.

Finalmente, agradezco infinitamente a mi familia por sus palabras de aliento y el estar siempre presentes cuando más los necesite, especial mención merecen mis padres quienes por segunda ocasión me brindaron la oportunidad de crecer profesionalmente.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	i
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
ÍNDICE DE TABLAS	vi
RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1 Residuos/subproductos agroindustriales	3
2.1.1 Fuentes principales.....	4
2.1.2 Composición.....	4
2.1.3 Problemática generada.....	5
2.1.4 Criterios de selección con fines de aprovechamiento	5
2.2 Residuos/subproductos derivados de vegetales.....	6
2.2.1 Aprovechamiento	6
2.2.2 Residuos/subproductos después de la extracción de almidón.....	7
2.2.2.1 Principales fuentes de obtención de almidón	8
2.2.2.2 Chayotextle (Sechium edule).....	9
2.2.3 Bagazos a partir del aislamiento del almidón	9
2.2.4 Aplicaciones en alimentos.....	10
2.3 Tratamiento y valorización de subproductos/residuos agroindustriales	11
2.3.1 Micronización	12
2.3.1.1. Molino de bolas	12
2.3.1.1.1. Molino de bolas planetario.....	13
2.3.2 Cambios producidos en las propiedades y funcionalidades fisicoquímicas.....	14
3. JUSTIFICACIÓN	15
4. OBJETIVOS	16
4.1 General	16
4.2 Específicos.....	16

5 MATERIALES Y MÉTODOS.....	17
5.1 Estrategia experimental.....	17
5.2 Materia prima	18
5.3 Obtención del bagazo.....	18
5.4 Micronización del bagazo	19
5.5 Propiedades fisicoquímicas.....	20
5.5.1 Microscopía electrónica de barrido.....	20
5.5.2 Parámetros de color	20
5.5.3 Almidón total.....	20
5.5.4 Almidón resistente	21
5.5.5 Fibra cruda	22
5.5.6 Distribución del tamaño de partícula	23
5.5.7 Difracción de rayos X	23
5.5.8 Perfil de viscosidad	23
5.6 Propiedades funcionales.....	24
5.6.1 Capacidad de Retención de Agua	24
5.6.2 Capacidad de Adsorción de Aceite	25
5.6.3 Índice de solubilidad en agua.....	25
5.6.4 Perfil de hinchamiento.....	26
5.7 Propiedades fisiológicas	26
5.7.1 Capacidad de Adsorción de Glucosa.....	26
5.8 Análisis estadístico	27
6. RESULTADOS Y DISCUSIONES	28
6.1 Propiedades fisicoquímicas.....	28
6.1.1 Microscopía electrónica de barrido.....	28
6.1.2 Parámetros de color	34
6.1.3 Almidón total, Almidón resistente y Fibra cruda.....	36
6.1.4 Distribución del tamaño de partícula	38
6.1.5 Difracción de rayos X	44
6.1.6 Perfil de viscosidad	49
6.2 Propiedades funcionales.....	53
6.2.1 Capacidad de retención de agua	53

6.2.2 Capacidad de Adsorción de Aceite	55
6. 2.3 Solubilidad de agua.....	57
6.2.4 Perfil de hinchamiento.....	59
6.3 Propiedades fisiológicas	61
6.3.1 Capacidad de adsorción de glucosa.....	61
7. CONCLUSIONES.....	63
8. BIBLIOGRAFÍA	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación esquemática de un molino de bolas planetario. Izquierda, vista tridimensional; medio y derecho, definición del radio de la jarra R_j y la distancia entre el eje de rotación (velocidad angular ω) y la revolución (velocidad angular) R_p	13
Figura 2. Diagrama de flujo del trabajo experimental.....	17
Figura 3. Tubérculos de chayotextle (<i>Sechium edule</i>).....	18
Figura 4. Molino planetario de bolas.....	19
Figura 5. Micrografías del bagazo de chayotextle sin modificar.....	28
Figura 6. Micrografías del bagazo de chayotextle micronizado con nitruro de silicio a diferentes tiempos de molienda.....	31
Figura 7. Micrografías del bagazo de chayotextle micronizado con acero inoxidable a diferentes tiempos de molienda.....	32
Figura 8. Micrografías del bagazo de chayotextle micronizado con carburo de tungsteno a diferentes tiempos de molienda.....	33
Figura 9. Distribución del tamaño de partícula (μm) del bagazo de chayotextle sin modificar y micronizado con nitruro de silicio a diferentes tiempos de molienda.....	41
Figura 10. Distribución del tamaño de partícula (μm) del bagazo micronizado con acero inoxidable a diferentes tiempos de molienda y el bagazo sin modificar.....	42
Figura 11. Distribución del tamaño de partícula (μm) del bagazo micronizado con carburo de tungsteno a diferentes tiempos de molienda y el bagazo sin modificar.....	43
Figura 12. Difracción de rayos X del bagazo micronizado con nitruro de silicio a diferentes tiempos de molienda y el bagazo sin modificar.....	46
Figura 13. Difracción de rayos X del bagazo micronizado con acero inoxidable a diferentes tiempos de molienda y el bagazo sin modificar.....	47

Figura 14. Difracción de rayos X del bagazo micronizado con carburo de tungsteno a diferentes tiempos de molienda y el bagazo sin modificar.....	48
Figura 15. Perfil de viscosidad del bagazo micronizado con nitruro de silicio a diferentes tiempos de molienda y el bagazo sin modificar.....	50
Figura 16. Perfil de viscosidad del bagazo micronizado con acero inoxidable a diferentes tiempos de molienda y el bagazo sin modificar.....	51
Figura 17. Perfil de viscosidad del bagazo micronizado con carburo de tungsteno a diferentes tiempos de molienda y el bagazo sin modificar.....	52
Figura 18. Capacidad de Retención de Agua de los bagazos micronizados con diferentes materiales y tiempos de molienda y el bagazo sin modificar.....	54
Figura 19. Capacidad de Adsorción de Aceite de los bagazos micronizados con diferentes materiales y tiempos de molienda y el bagazo sin modificar.....	56
Figura 20. Solubilidad de agua de los bagazos micronizados con diferentes materiales y tiempos de molienda y el bagazo sin modificar.....	58
Figura 21. Perfil de hinchamiento de los bagazos micronizados con diferentes materiales y tiempos de molienda y el bagazo sin modificar.....	60
Figura 22. Capacidad de adsorción de glucosa a diferentes concentraciones de los bagazos micronizados con diferentes materiales y tiempos de molienda y el bagazo sin modificar.....	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Condiciones de la micronización.....	19
Tabla 2. Parámetros de color de las muestras de bagazo de chayotextle.....	35
Tabla 3. Contenido de almidón total, almidón resistente y fibra cruda del bagazo sin modificar.....	36
Tabla 4. Contenido de fibra cruda en las muestras de bagazo de chayotextle.....	38
Tabla 5. Porcentajes de cristalinidad de los bagazos micronizados con diferentes materiales y tiempos de molienda y el bagazo sin modificar.....	44

RESUMEN

En la actualidad la industria alimentaria genera una gran cantidad de residuos agroindustriales en estado líquido y/o sólido según dependiendo el área destinada. La industria del almidón genera estos dos tipos de residuos durante la extracción del polímero en molienda húmeda, los cuales van en aumento debido a la gran demanda existente del almidón como materia prima en diversas industrias (textil, química, farmacéutica, alimentaria, entre otras). Los residuos sólidos mejor conocidos como bagazos son residuos agroindustriales en estado sólido, son de bajo valor comercial y generalmente son destinados a la alimentación animal y/o suelen ser desechados al medio ambiente sin haber recibido un tratamiento adecuado, para disminuir su contaminación. Sin embargo, en los últimos años el análisis de residuos agroindustriales ha ganado mucho interés debido a la composición que presentan, dependiendo de la fuente botánica, más aún cuando estos residuos son modificados ampliando la diversificación de sus aplicaciones en la industria alimentaria. Por lo cual el objetivo de este estudio fue modificar por micronización y caracterizar, los bagazos generados durante el aislamiento del almidón de chayotextle. La micronización se realizó en un molino planetario de bolas, con materiales de molienda (Nitruro de silicio, Acero inoxidable y Carburo de tungsteno) de distintas densidades, a 600 rpm y diferentes tiempos de molienda (10, 30 y 50 minutos). El proceso de micronización generó cambios en la estructura del bagazo de modo que modificó tanto las propiedades fisicoquímicas (fibra cruda, patrones de rayos X, cristalinidad, perfil de viscosidad) como las propiedades funcionales (solubilidad de agua, factor de hinchamiento, capacidad de retención de agua y capacidad de absorción de aceite), mientras que la capacidad de absorción de glucosa no se vio afectada por tal modificación. Por lo que, la micronización proporciona un valor agregado a estos bagazos, diversificando sus aplicaciones de acuerdo a las necesidades de la industria de los alimentos.

ABSTRACT

The food industry generates a large amount of agro-industrial waste in a liquid and solid state depending on the area allocated. The starch industry generates these two types of waste during the extraction of the polymer, which is increasing due to the high existing demand for starch as a raw material in various industries (textile, chemical, pharmaceutical, food, among others). The solid wastes better known as bagasse are agro-industrial wastes in solid state, are of low commercial value and are generally destined for animal feed and / or are usually discarded into the environment without having received adequate treatment to reduce their contamination. However, in recent years the analysis of agro-industrial residues has gained a lot of interest due to the composition they present, depending on the botanical source, especially when these residues are modified, expanding the diversification of their applications in the food industry. Therefore, the objective of this study was to modify by micronization and characterize the bagasse generated during the isolation of the chayotextle starch. Micronization was performed in a planetary ball mill, with grinding materials (Silicon Nitride, Stainless Steel and Tungsten Carbide) of different densities, at 600 rpm and different grinding times (10, 30 and 50 minutes). The micronization process generated changes in the structure of the bagasse so that it generated changes both in the physicochemical properties (crude fiber, X-ray patterns, crystallinity, viscosity profile) and in the functional properties (water solubility, swelling factor, water retention capacity and oil absorption capacity), statistically significant ($p < 0.05$), while glucose absorption capacity was not affected by such modification. Therefore, micronization provides added value to these bagasse, diversifying its applications according to the needs of the food industry.

1. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, se ha visto un gran interés en la búsqueda de fuentes no convencionales para la obtención de almidón, principalmente dentro de la industria alimentaria debido a la gran variedad de aplicaciones que tiene en diferentes alimentos. Las fuentes principales para la obtención del almidón han sido algunos cereales (maíz, trigo, arroz) y tubérculos (papa, ñame, yuca), sin embargo, en la búsqueda de nuevas fuentes alternativas del almidón se han estudiado almidones obtenidos de otras fuentes tales como leguminosas (chícharo, frijol, habas), frutos en su estado inmaduro (mango y plátano) y algunos otros tubérculos que suelen ser característicos de ciertas regiones como la Oca (*Oxalis tuberosa*) y el Chayotextle (*Sechium edule*) (Vieira et al., 2018; Ogunsona et al., 2018; Bemiller & Huber, 2012).

La especie *Sechium edule*, es una planta trepadora nativa de México y América Central, de tallos verdes, hojas tiernas, que produce frutos de diferentes tamaños y formas, además de raíces tuberizadas popularmente conocidas en México como “chayotextle”, todos ellos comestibles. La importancia del chayotextle radica en su alto contenido de almidón (73%), el cual cuenta con una pureza mayor al 98% y buenas propiedades fisicoquímicas para la industria, teniendo una producción nacional superior a las 100,000.00 toneladas al año, razón por la cual ha sido considerado como una buena fuente alternativa de almidón (Jiménez-Hernández, Salazar-Montoya, & Ramos-Ramírez, 2007).

Sin embargo, la extracción industrial del almidón genera residuos sólidos denominados bagazos y su acumulación genera un impacto ambiental severo cuando no hay un tratamiento adecuado. Uno de los métodos de molienda que se comienza a incorporar rápidamente a las tecnologías aplicadas en alimentos, es la micronización, debido a que posee ventajas en comparación con los métodos tradicionales de molienda, ya que se pueden controlar ciertas variables durante la molienda (tiempo, velocidad y material), provocando la variación en algunas propiedades, además de ser un proceso de bajo costo y amigable con el medio ambiente (Helkar, Sahoo & Patil (2016); Oliveira et al., (2016)).

Es por ello que en este estudio se evaluó el efecto de micronización sobre las propiedades fisicoquímicas, funcionales, y fisiológicas del bagazo de chayotextle obtenido como residuo de la extracción del almidón. Proporcionando información para la utilización de este residuo agroindustrial en la producción de alimentos para el consumo humano.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Residuos/subproductos agroindustriales

La agroindustria está definida como una actividad económica que combina el proceso productivo agrícola con el industrial para generar alimentos o materias primas semi elaboradas destinadas al mercado. También se dice que constituye una parte del sector industrial que se dedica a producir y/o transformar, almacenar y comercializar productos provenientes del campo. Entre los productos que se industrializan están: frutas, verduras, raíces, semillas, hojas, tubérculos y vainas; algunos se comercializan en fresco y otros son transformados en néctares, jugos, mermeladas, ensaladas, harinas, aceites, vinos, concentrados en polvo y conservas, por mencionar algunos. La tendencia mundial es el notable crecimiento en la generación de residuos, derivado del incremento en la generación de productos comercializables (Saval, 2012). Por lo tanto, en base al marco de referencia anterior, se puede entonces decir que los residuos agroindustriales son materiales en estado sólido o líquido que se generan a partir del consumo directo de productos primarios o de su industrialización, y que ya no son de utilidad para el proceso que los generó, pero que son susceptibles de aprovechamiento o transformación para generar otro producto con valor económico, de interés comercial y/o social (Saval, 2012).

Con cierta frecuencia al hablar sobre el tema utilizamos en forma indistinta los términos: subproductos, residuos y desechos, sin importar que existe una diferencia conceptual entre ellos. Un “subproducto” es un producto secundario, bien conocido, generalmente útil, comercializable y por lo tanto con valor agregado, que resulta de un proceso industrial. El término “residuos”, se aplica a aquellos que pueden tener o no un valor comercial, porque son poco comunes o porque se generan en bajas cantidades, sin embargo, algunos de sus constituyentes aún en baja proporción, le pueden conferir algún interés para su utilización. Desde este punto de vista, los términos “subproducto” y “residuo” podrían utilizarse como sinónimos, no así el término “desecho”, que está referido a aquellos materiales que no tienen algún valor comercial, ni poseen atributos de interés para ser utilizados en algún proceso, por lo que se consideran como basura y se les debe dar una disposición final (Saval, 2012).

Valdez-Vázquez, Acevedo-Benítez, & Hernández-Santiago et al., (2010), publicaron datos oficiales del 2006 que establecen que en México se produjeron 75.73 millones de toneladas de materia seca proveniente de 20 cultivos, de los cuales 60.13 millones de toneladas corresponden a

residuos primarios, obtenidos al momento de la cosecha, entre los que están: hojas y tallos del maíz, tallos y vaina de sorgo, puntas y hojas de caña de azúcar, paja de trigo, paja de cebada y de frijol, así como cáscara de algodón. El resto, 15.60 millones de toneladas corresponden a residuos secundarios obtenidos del procesamiento post-cosecha, entre los que están: bagazo de caña de azúcar, mazorcas y olotes, bagazo de maguey o agave, así como pulpa de café (Saval, 2012).

2.1.1 Fuentes principales

Anualmente en todo el mundo se generan una gran cantidad de residuos/subproductos agroindustriales a partir de diversas fuentes, en donde aproximadamente el 38% se generan durante el procesamiento de los alimentos (Helkar, Sahoo & Patil, 2016). Las fuentes principales de los residuos/subproductos alimenticios son:

- **Derivados de animales:** cadáveres, pieles, pezuñas, cabezas, plumas, estiércol, vísceras, huesos, sangre;
- **Derivados del procesamiento de lácteos:** suero, cuajada y lodos de leche del proceso de separación.
- **Derivados de vegetales:** cáscaras, tallos, semillas, conchas, salvado, residuos de recortes después de la extracción de aceite, almidón, jugo y/o azúcares.

2.1.2 Composición

En general, la composición de los residuos/subproductos agroindustriales es muy variada, dependen de la materia prima y del proceso que los generó, no obstante, comparten una característica principal que es el contenido de materia orgánica, constituida por diferentes porcentajes de celulosa, lignina, hemicelulosa y pectina (Saval, 2012). Los residuos/subproductos agroindustriales son una rica fuente de nutrientes, materia orgánica e inorgánica (Sarup, Kaur, & Kennedy, 2019), además diversos compuestos tales como polisacáridos, proteínas, grasas, fibras, compuestos de sabor, fitoquímicos y compuestos bioactivos que son beneficiosos para la salud (Helkar et al., 2016). Varios autores han reportado la caracterización de diversos residuos/subproductos agroindustriales, los cuales presentan una excelente composición fisicoquímica.

2.1.3 Problemática generada

El desarrollo de la industrialización trae consigo ventajas indiscutibles como el aumento en la calidad de vida de las poblaciones, pero a la vez la convierte en una sociedad de consumo para la cual la industria debe ofrecer nuevos productos haciendo más complejos sus procesos, generando cada vez mayores cantidades de residuos/subproductos, que la llevan a ser el blanco de muchas críticas y a adquirir una imagen de contornos no muy positivos (Cury et al., 2017).

La eliminación de los residuos/subproductos agroindustriales al medio ambiente se ha convertido en un inconveniente para el ecosistema, debido a su pobre estabilidad biológica, alta concentración de compuestos orgánicos, alta actividad de agua, baja estabilidad oxidativa y óptima actividad enzimática (Helkar et al., 2016). Esta problemática se debe a que no existe una clara conciencia ambiental para su manejo, además de que falta capacidad tecnológica y recursos económicos para darles un destino final, así como una legislación específica para promover la gestión de este tipo de residuos, que asegure un buen manejo desde su generación hasta su disposición final. Aún en nuestros días, esta problemática prevalece a nivel mundial (Saval, 2012). Sin embargo, la gestión adecuada de estos residuos/subproductos juega un papel vital en el crecimiento de las industrias alimentarias, debido a que se consideran una fuente prometedora de componentes potencialmente valiosos (Helkar et al., 2016).

Algunos datos que sirven para tener una idea del volumen de residuos/subproductos que generan diferentes tipos de industrias son los siguientes: la industria de la cerveza solamente utiliza el 8% de los componentes del grano, el resto 92%, es un subproducto; la industria del aceite de palma utiliza el 9%, el 91% restante se considera como residuo; la industria del café utiliza el 9.5%, el 90.5% es un subproducto y la industria del papel utiliza menos del 30%, (Saval, 2012).

2.1.4 Criterios de selección con fines de aprovechamiento

Al paso de los años, se han definido criterios de selección de residuos/subproductos para ser aprovechados con fines biotecnológicos, algunos de ellos son:

- Que el principal componente del residuo/subproducto pueda ser utilizado como sustrato para la producción fermentativa de insumos de procesos industriales, o bien, que el material pueda ser sometido a extracciones para recuperar alguno de sus componentes que tenga un mercado demandante.

- Que el residuo/subproducto esté disponible localmente y en las cantidades necesarias para asegurar la fabricación de un producto de interés.
- Que no tenga otras aplicaciones o usos que compitan con el proceso que se pretende promover. Que no requiera pre tratamiento, y en caso de requerirlo, que éste sea sencillo y económico.
- Que la disponibilidad del residuos/subproductos permita planificar el proceso para el cual se va a utilizar.
- Que sea estable, es decir, que no se descomponga fácilmente bajo las condiciones ambientales del sitio donde se genera.

Con el marco de referencia anterior, se resumen ejemplos de los diferentes usos que se le han dado a diversos tipos de residuos/subproductos agroindustriales, con base en la siguiente clasificación:

- Como sustrato para la producción fermentativa de metabolitos de interés.
- Como sustrato para la generación de bioenergéticos.
- Como mejoradores o acondicionadores de suelo obtenidos mediante composteo.
- Como suplemento alimenticio para animales.

Por otro lado, cuando los residuos/subproductos no son reutilizados y se abandonan en el lugar donde se generaron, se convierten en contaminantes de suelos y aguas subterráneas (Saval, 2012).

2.2 Residuos/subproductos derivados de vegetales

2.2.1 Aprovechamiento

Desde hace varias décadas los residuos/subproductos agroindustriales han sido un foco de atención para varios investigadores a nivel mundial, debido a que parte de sus constituyentes pueden ser materia prima para generar diversos productos de interés, esta situación sigue prevaleciendo en la actualidad y se prevé que continuará en el futuro (Saval, 2012).

Las pocas alternativas, desde el punto de vista económico, social y nutricional, que en la actualidad se presentan para el aprovechamiento de los residuos/subproductos agroindustriales, aunado a la falta de conciencia en la protección del medio ambiente provocan que estos sean mal manejados y se conviertan en fuentes de contaminación de los recursos naturales; suelo, agua y aire. Por ello, surge la necesidad de convertir estos residuos/subproductos en productos útiles y de mayor valor agregado, que además de solucionar un problema, genere ingresos económicos adicionales; de ahí la importancia del estudio de alternativas tecnológicas tendientes al aprovechamiento de los residuos/subproductos agroindustriales (Cury et al., 2017).

Los subproductos/residuos tienen funcionalmente propiedades tales como una mayor retención y unión del agua, gelificación y espesamiento. Lo que podría promover el crecimiento técnico y científico para la utilización de residuos/subproductos y hacer ingredientes alimentarios funcionales y productos alimenticios funcionales para aumentar los ingresos y lograr un crecimiento económico sostenible y estable de las industrias alimentarias (Helkar et al., 2016).

Al buscar una oportunidad de aprovechamiento de estos residuos/subproductos, se hace necesaria su caracterización para conocer su composición, la calidad de sus componentes y la cantidad que se genera, con esto se pueden definir las tecnologías más apropiadas para su aprovechamiento y posterior tratamiento. En la búsqueda de oportunidades de aprovechamiento de residuos/subproductos este aspecto deberá ser considerado, con un enfoque de responsabilidad ambiental (Saval, 2012).

2.2.2 Residuos/subproductos después de la extracción de almidón

La búsqueda de nuevos alimentos funcionales es uno de los desafíos más importantes en la ciencia y tecnología de los alimentos. Usando la ciencia y la innovación para hacer subproductos alimenticios valiosos y aumentar la rentabilidad (Helkar et al., 2016).

En el caso de la industria de alimentos que demanda almidones, el procesamiento de productos agrícolas para la extracción de almidón a nivel industrial genera una gran cantidad de residuos sólidos que se conocen como residuos de almidón o bagazos, los cuales contienen un alto contenido orgánico que necesita tratamiento previo antes de su eliminación en el medio ambiente (Sarup et al., 2019).

2.2.2.1 Principales fuentes de obtención de almidón

Los cereales (maíz, trigo, arroz) son el principal producto agrícola utilizado para la obtención del almidón, en los cuales se ha reportado un contenido de almidón del 30 al 80%. La producción mundial del almidón total se estima en 48.5 millones de toneladas. De esta producción, la principal fuente de obtención de almidón es el maíz (39.4 millones de toneladas) que es utilizado como principal producto base para la elaboración de productos alimenticios y farmacéuticos. La segunda fuente de obtención de almidón es el de trigo (4.1 millones de toneladas) seguido del almidón de papa que se llega a producir 2.6 millones de toneladas de almidón, el resto se llega a obtener de otras fuentes como el arroz, yuca y sorgo (2.5 millones de toneladas de almidón) (Guilbot y Mercier, 1985; Comisión Europea, 2000).

Actualmente se continúan explorando fuentes alternativas de almidón por dos razones principales, en primer lugar porque se tiene la necesidad de satisfacer la demanda de los diferentes tipos de industrias, que emplean el almidón como materia prima y/o ingrediente, y en segundo lugar se buscan almidones que presenten propiedades funcionales diferentes o mejores a los almidones convencionales. Adicionalmente, se han analizado diferentes fuentes alternativas de almidón, al igual que el aprovechamiento integral de las nuevas fuentes o bien de los residuos que pueden generarse. Dentro de las nuevas fuentes se podrían considerar, están los tubérculos y raíces.

Las raíces y tubérculos son productos agrícolas que corresponden al segundo lugar de doce grandes grupos de los alimentos establecidos en la base de datos de composición de alimentos FAO/INFOODS para la biodiversidad (Charrondiére et al., 2013). Los cultivos de raíces y tubérculos se pueden dividir en los siguientes grupos principales: tubérculos, incluyendo papa (*Solanum tuberosum*) y ñame (*Dioscorea spp.*); raíces, como la yuca (*Manihot esculenta Crantz*) y la batata (*Ipomoea batatas*); aroides comestibles, incluyendo taro (*Colocasia esculenta*) y cocoyam (*Xanthosoma sagittifolium*). Estos cultivos son importantes fuentes de calorías, particularmente en comparación con otras fuentes de alimentos, que comúnmente se convierten en harinas para su conservación. Estas harinas se utilizan como ingredientes y/o auxiliares tecnológicos en la industria alimentaria, debido a que su componente principal es el almidón; principal carbohidrato presente en este grupo de alimentos, que varía del 73.7% al 84.9% del peso seco de la raíz dependiendo de la fuente botánica. (Zaidul, Absar, Kim, & Suzuki, 2008). Otra fuente alternativa que se ha estudiado es la raíz tuberizada del chayote (*Sechium edule*), conocida como chayotextle

(Jiménez-Hernández, Salazar-Montoya & Ramos-Ramírez, 2007), (Hernandez-Uribe, Agama-Acevedo, Gonzalez-Soto, Bello-Pérez, & Vargas-Torres, 2011).

2.2.2.2 Chayotextle (*Sechium edule*)

Sechium edule, es una planta nativa de cucurbitáceas de México y América Central, que produce frutos (chayote) de diferentes tamaños y formas, tallos verdes, hojas tiernas (generalmente conocidas como “quelites”) y las partes tuberosas de las raíces popularmente conocidas en México como “chayotextle”, todos ellos comestibles (Vieira, 2018). Botánicamente, dicha planta crece a partir de una sola raíz gruesa, que produce raíces tuberosas adventicias, los tallos son de varios metros de largo, ligeramente comprimidos y surcados longitudinalmente. Puede crecer con relativa facilidad debido a su adaptabilidad a una amplia gama de condiciones climáticas (temperaturas de menos de 13°C dañan la fruta, mientras que aquellas por encima de 28°C favorecen el crecimiento excesivo y la caída de flores y frutas inmaduras), resistente a la mayoría de las enfermedades y plagas, causada principalmente por hongos (*Ascochyta phaseolorum* y varias especies de *Fusarium*, *Macrophomina* y *Colletotrichum*) y, a veces, por nematodos (*Meloidogyne incognita* y *Helicotylenchus sp.*) e insectos (*Empoasca solana*) (Vieira, Pinho, Ferreira, & Delerue-Matos, 2019).

La planta de chayote produce la raíz tuberizada después del primer año de crecimiento y puede producir hasta 5 Kg de tubérculos que contienen más del 65% de almidón (b/s) después de 2 años de crecimiento. En comparación con las frutas de chayote, hay poca información sobre la composición y los usos nutricionales del tubérculo.

Durante el procesamiento de todas las fuentes de extracción de almidón se generan subproductos que podrían ser utilizados como materias prima para obtener ingredientes de valor agregado.

2.2.3 Bagazos a partir del aislamiento del almidón

Un ejemplo claro de subproductos generados es el procesamiento de las raíces de yuca para la extracción de almidón lo cual genera una gran cantidad de bagazo (Sarup et al., 2019); por cada tonelada (1,000 Kg) de raíces procesadas, se generan aproximadamente 928.6 kilogramos de bagazo (Pimentel & Klososki, 2016). Dicho bagazo cuenta con un alto contenido orgánico que necesita tratamiento previo antes de su eliminación en el medio ambiente.

El bagazo de yuca se ha considerado como un residuo de bajo valor comercial, sin embargo, se sabe que es una fuente de fibra de buena calidad, debido a que está compuesto del material fibroso de la raíz (aproximadamente 16%) y parte del almidón que no pudo extraerse en el procesamiento (aproximadamente 73%), presentando un contenido de humedad más alto que la propia materia prima (aproximadamente el 85%), por lo cual ha sido objeto de investigaciones que tienen como objetivo el desarrollo de tecnologías para su uso en la obtención de productos de valor agregado que podrían usarse como ingredientes para productos alimenticios con alto contenido de fibra (Fiorda, Soares & Júnior, 2013). La composición del bagazo de yuca consiste en almidón (63%), fibra cruda (10.8%), carbohidratos (2.66%), azúcares reductores (1.45%), proteína cruda (0.88%) y lípidos (0.11%) (Sarup et al., 2019).

Algunas limitaciones para su uso es el alto contenido de humedad (85%), que hace que este producto sea rápidamente fermentable por microorganismos. Por lo tanto, para reducir este riesgo, es necesario procesarlo inmediatamente después de su obtención, mediante secado artificial (Vilhalva et al., 2011).

El bagazo de yuca presenta mayor valor nutricional, en comparación al almidón, con altos contenidos de fibra dietética total soluble e insoluble y mayores niveles de proteínas, cenizas y lípidos. Cuenta con propiedades tecnológicas deseables, (así como mayores tasas de absorción y solubilidad en agua), considerándose como un ingrediente alternativo para la industria alimentaria, principalmente en alimentos dietéticos y ligeros, y para pacientes con enfermedad celíaca (Fiorda et al., 2013). Souza, Jonathan, Marta, Saad, & Schols, (2018) reportaron diferencias en la composición para el mismo tipo de subproducto (bagazo de yuca) de diferentes proveedores. Estos se componían principalmente de almidón, con una alta variabilidad entre los subproductos probados de 45 a 77.5% de almidón (los experimentos in vitro indicaron un contenido aproximado de 12% de almidón resistente).

2.2.4 Aplicaciones en alimentos

Las barras de cereales se introdujeron a mediados de la década de 1980 como una alternativa de confitería "saludable", cuando los consumidores estaban más interesados en la salud y las dietas (Cardoso et al., 2015). En los últimos años el uso de subproductos industriales en la elaboración de galletas y barras de cereal ha ganado gran interés, debido a los beneficios obtenidos en el

producto final. Diversos autores han utilizado distintos subproductos industriales en el área de los alimentos, algunos de ellos son: Pimentel y Klososki, (2016), elaboraron barras de cereal adicionadas con harina de bagazo de yuca, y reportaron que la adición de este bagazo mejoró la composición química de las barras, además de obtener buenas características sensoriales; Mauro, da Silva y Freitas, (2010), utilizaron harinas de tallos de col rizada y tallos de espinacas para la elaboración de galletas, las cuales presentaron una menor tasa de densidad calórica y grasa, y una mayor tasa de humedad y fibra dietética insoluble, en comparación de una galleta elaborada con harina comercial de trigo; Otro subproducto utilizado para elaborar barras de cereal es obtenido de la maracuyá (*Passiflora edulis*) el cual confirió estabilidad higroscópica, contenido considerable de polifenoles, proteínas, lípidos y fibras dietéticas, al producto final (Silva et al., 2009).

2.3 Tratamiento y valorización de subproductos/residuos agroindustriales

A pesar de que se ha demostrado la utilización de residuos en la elaboración de diversos productos, también es cierto que para el mejor aprovechamiento, algunas veces se ha recurrido a modificar la materia prima. Dentro de la industria de las harinas y almidones, las modificaciones más recurrentes suelen ser las modificaciones químicas o físicas (Roa, Santagapita, Buera, & Tolaba, 2014). No obstante, en las últimas décadas se han ido desarrollando nuevas tecnologías en el área de los alimentos, basadas en la reducción del tamaño de partículas de micras a nanómetros, que al compararse con los métodos tradicionales de trituración, en este sentido la micro y la nanotecnología poseen muchas ventajas, debido a que son tecnologías de rápido desarrollo que implican reducir el tamaño de partícula mediante métodos mecánicos o hidrodinámicos para superar la cohesión interna y provocar la rotura de los materiales. Para materiales sólidos en partículas, se utilizan principalmente el molino por chorro, el molino de bolas y el molino coloidal. Para materiales líquidos, principalmente se utilizan las tecnologías de homogeneización a alta presión, homogeneización ultrasónica y microfluidización (Chen et al., 2018).

2.3.1 Micronización

Las técnicas de micronización se están desarrollando rápidamente en la tecnología aplicada a los alimentos, debido a la reducción del tamaño de las partículas, mejorando significativamente las características fisicoquímicas y funcionales de los materiales alimenticios, lo que resulta en la mejora de la calidad de los alimentos (Chen et al., 2018).

La micronización posee ventajas en comparación con los métodos tradicionales de molienda que conducen a la ruptura de la matriz de fibra y al colapso de los poros, la micronización da lugar a un tamaño de partícula más pequeño, lo que significa un área de superficie más grande, produciendo mejor absorción de agua, alta solubilidad, liberación de sabor y una sensación en la boca suave (Chen et al., 2018).

2.3.1.1. Molino de bolas

El molino de bolas es el equipo más utilizado para la micronización, que puede mejorar las características del material sin producir materiales peligrosos, se ha utilizado para modificar la estructura y el comportamiento de harinas y almidones (Palavecino, Penci, & Ribotta, 2019), (Wen et al., 2017). Es un método mecánico de bajo costo y respetuoso con el medio ambiente para triturar materiales sólidos, donde la trituración de los gránulos se debe a la fuerza de fresado intensiva, junto con la acción de presión y fricción de la bola (Zhang et al., 2010). Al seleccionar las condiciones de operación adecuadas, el molino de bolas puede proporcionar propiedades tecnológicas especiales que podrían aplicarse en las industrias alimentarias o farmacéuticas (Roa et al., 2014).

Un molino de bolas como su nombre lo indica, utiliza bolas de diferentes materiales en movimiento como medios de molienda. Hay tres tipos de molinos de bolas (molino de bolas convencional, molino de desgaste y molino planetario), llamados así de acuerdo con el modo de movimiento de las bolas. Los molinos de bolas convencionales utilizan únicamente la gravedad natural para ejercer fuerza sobre las partículas, mientras que los molinos planetarios más avanzados emplean la gravedad artificial para aplicar fuerza utilizando un campo de fuerza centrífuga. Los molinos planetarios generan un campo no uniforme de aceleración centrípeta dentro del recipiente de molienda, lo que resulta en una energía de mayor impacto (Kim et al., 2013).

La modificación física de los materiales alimenticios mediante molienda con bolas ha ganado atención debido a la capacidad para cambiar la funcionalidad, dicha funcionalidad modificada puede atribuirse a la alteración de la conformación estructural de la muestra (Roa et al., 2014).

2.3.1.1.1. Molino de bolas planetario

El molino de bolas planetario es un dispositivo versátil para una molienda eficiente. Por lo general, se compone de dos o más recipientes, girando a una velocidad angular ω alrededor de su eje (Figura 1), instalado en un disco que gira a velocidad angular. La molienda se produce por impacto entre los medios de molienda (bolas y frascos), impulsados por fuerzas centrífugas y de coriolis, con partículas de material que generalmente cubren las bolas y/o las superficies de los frascos (Broseghini et al., 2016).

Broseghini et al., (2016) desarrollaron un modelo numérico dinámico-mecánico de un molino de bolas planetario para estudiar la dependencia de la eficiencia del proceso en los parámetros de fresado como el tamaño y número de bolas, la geometría de la jarra y la velocidad de las piezas giratorias, en donde la eficiencia máxima del proceso de molienda se observó con el movimiento de la bola más desordenado, que se obtiene dentro de un rango bien definido de relaciones de velocidad de la jarra a la placa.

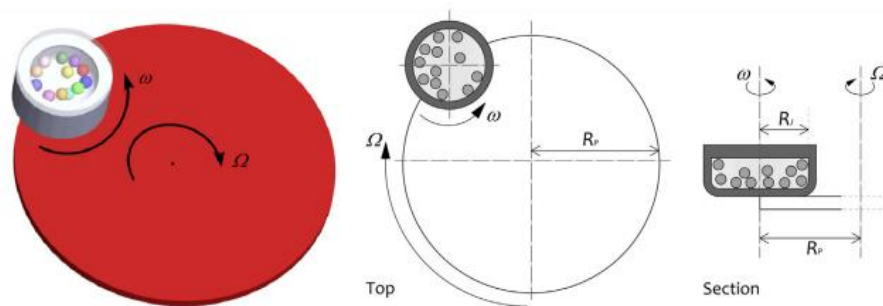


Figura 1. Representación esquemática de un molino de bolas planetario. Izquierda, vista tridimensional; medio y derecho, definición del radio de la jarra R_j y la distancia entre el eje de rotación (velocidad angular ω) y la revolución (velocidad angular) R_p .

2.3.2 Cambios producidos en las propiedades y funcionalidades fisicoquímicas

Particularmente, los procesos de micronización se han utilizado para generar cambios en la estructura de las partículas de modo que producen cambios significativos en las propiedades fisicoquímicas, funcionales y fisiológicas, empleando diversas condiciones de molienda (tiempo, velocidad y materiales de molienda). La modificación del tamaño de partícula y la estructura geométrica, influye en las propiedades de hidratación (capacidad de retención de agua, capacidad de retención de aceite, índice de solubilidad de agua y capacidad de hinchamiento) de residuos de comino (Sowbhagya, Suma, Mahadevamma, & Tharanathan, 2007), en fibras dietéticas insolubles de melocotón y avena (Chen, Gao, Yang, & Gao, 2013), salvado de trigo (Wang, Sun, Zhou, & Chen, 2012), mejora la actividad antioxidante en polvos de orujo de uva roja (Zhao et al., 2015), reducción de la cristalinidad de fracciones enriquecidas con almidón de amaranto (Roa et al., 2014) y modificación de parámetros térmicos y el comportamiento reológico del almidón de amaranto (Palavecino et al., 2019).

Algunos otros estudios en los cuales se han evaluado diversas condiciones de molienda fueron reportadas por Wen et al., 2017, quienes investigaron el efecto del tiempo sobre la solubilidad, viscosidad y propiedades estructurales del almidón de tapioca, cambiaron significativamente. Lee, Kwon, Kim, & Choi, 2017, evaluaron diferentes tipos de bolas de molienda (alúmina, circonia y acero) y diferentes tiempos de molienda sobre el rastrojo de maíz, reportando diversos cambios significativos en las propiedades fisicoquímicas; (Ramadhan & Foster, 2018), utilizaron diferentes velocidades y tiempos de molienda (800 rpm/15min y 200 rpm/240min), sobre la harina de salvado de avena, en donde el aumento del tiempo de molienda disminuyó gradualmente los cambios de entalpía de las propiedades de fusión de los complejos de amilosa-lípidos después del calentamiento.

3. JUSTIFICACIÓN

La obtención de almidón a partir de distintas fuentes de obtención, para cubrir la demanda del sector industrial, genera residuos o bagazos, los cuales algunas veces son desechados al medio ambiente, debido al bajo valor comercial, esto sin antes considerar su composición, que podría ser aprovechada para el desarrollo de nuevos productos para la industria alimentaria. Un claro ejemplo es que los bagazos suelen ser ricos en carbohidratos no digeribles como la fibra dietética, que en la última década ha atraído el interés de científicos y tecnólogos en alimentos, debido a los diversos efectos benéficos que se le han atribuido. Por lo tanto, los bagazos o residuos generados a partir de la industria del almidón podrían ser utilizados en la industria alimentaria, para la generación de materias primas o bien la elaboración de nuevos productos, además de contribuir a un sistema alimentario sostenible.

Debido a lo anterior, en este trabajo se propuso la micronización del bagazo de chayotextle, obtenido a partir del aislamiento del almidón, con la finalidad de proporcionar un valor agregado al bagazo y que pudiera tener alguna aplicación para la industria

4. OBJETIVOS

4.1 General

Evaluar el efecto de la modificación, del bagazo de Chayotextle (*Sechium edule*), por micronización sobre sus propiedades fisicoquímicas, funcionales y fisiológicas, para su posible aplicación en alimentos.

4.2 Específicos

- Determinar las propiedades fisicoquímicas del bagazo de chayotextle (*Sechium edule*) modificado, a través de microscopía electrónica de barrido, parámetros de color, almidón total y resistente, difracción de rayos X, perfil de viscosidad, fibra cruda, morfología y tamaño de partícula.
- Evaluar las propiedades funcionales del bagazo modificado de Chayotextle (*Sechium edule*), a través del perfil de hinchamiento, solubilidad de agua, capacidad de retención de agua y capacidad de absorción de aceite.
- Caracterizar las propiedades fisiológicas del bagazo modificado de Chayotextle (*Sechium edule*), a través de la capacidad de adsorción de glucosa.

5 MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Estrategia experimental

En la Figura 2 se muestra el diagrama experimental que se siguió para el desarrollo del trabajo de tesis. En el cual se observa que a partir de la materia prima de Chayotextle se obtiene el bagazo, que posteriormente es modificado mediante micronización, para finalmente realizársele una caracterización fisicoquímica, funcional y fisiológica.

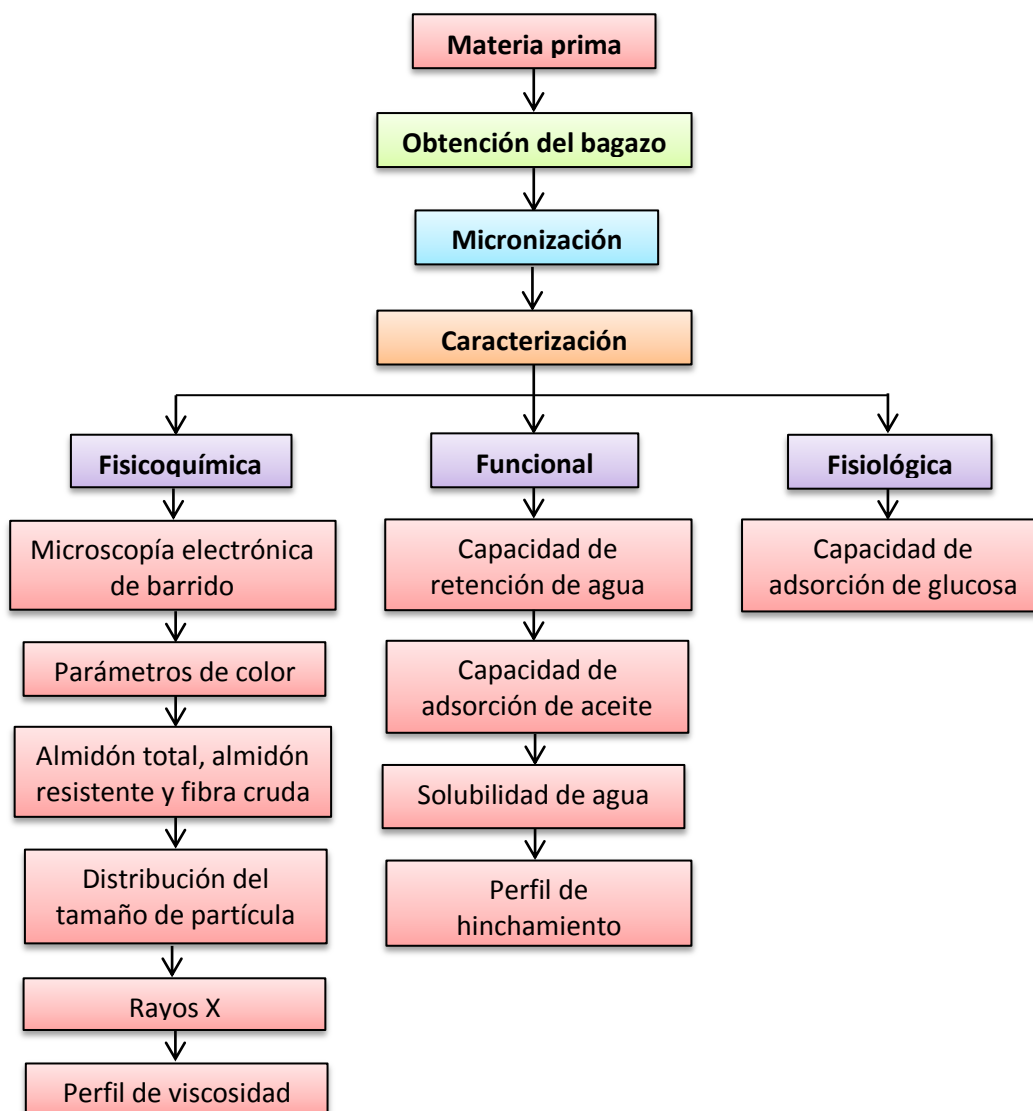


Figura 2. Diagrama de flujo del trabajo experimental.

5.2 Materia prima

Para el presente estudio se utilizó el chayotextle (*Sechium edule*) (Figura 3), el cual fue adquirido en el mercado central del municipio de Tulancingo de Bravo y Acaxochitlán en el estado de Hidalgo.



Figura 3. Tubérculos de chayotextle (*Sechium edule*).

5.3 Obtención del bagazo

La obtención del bagazo se realizó siguiendo la metodología reportada por Hernández-Uribe et al., (2011) con ligeras modificaciones, la cual consiste en la obtención del almidón.

Los tubérculos fueron lavados con agua y jabón, posteriormente se rebanaron en trozos pequeños, para poderlos moler con agua, (proporción 1:2 p/v) en una licuadora a baja velocidad durante 2 min la dispersión obtenida se tamizó en malla 100 U. S., los residuos se lavaron con agua hasta que el líquido de salida no contenía aparentemente almidón. El bagazo retenido en la malla se volvió a moler en la licuadora para una homogenización completa. La suspensión obtenida se tamizó y se lavó exhaustivamente a través de una malla 100 U.S., hasta que el agua de lavado salió transparente. Después el bagazo, fue secado en un horno de convección a 40°C por 24 horas. Posteriormente al secado, el bagazo fue pulverizado en un molino UDY (Cyclone Sample Mill U. S. Patente 3, 754, 751) y tamizado en una malla 100 U. S. la muestra obtenida se almacenó en bolsas herméticas a temperatura ambiente, para su posterior micronización.

5.4 Micronización del bagazo

La micronización del bagazo se realizó en un molino planetario de bolas Pulverisette 7 premium line marca Fritsch (Figura 4). Las condiciones de micronización (Tabla1) se llevaron a cabo bajo un diseño factorial 3x3, donde se evaluó el tiempo de molienda (10, 30 y 50 min) y el material de molienda [nitruro de silicio (3.1 g/cm^3), acero inoxidable (7.9 g/cm^3) y carburo de tungsteno (15.63 g/cm^3)]. En todos los casos se utilizaron 15 bolas de 10 mm de diámetro en dos tazones de 80 mL, 9 g de muestra y una velocidad de molienda fija de 600 rpm, la molienda se realizó en ciclos de 5 min de molienda y 5 min de enfriamiento para evitar el calentamiento de los tazones.



Figura 4. Molino planetario de bolas.

Tabla 1. Condiciones de la micronización.

Tratamiento	Velocidad (rpm)	Tiempo (min)	Material
1	600	10	Nitruro de silicio
2		30	Nitruro de silicio
3		50	Nitruro de silicio
4		10	Acero inoxidable
5		30	Acero inoxidable
6		50	Acero inoxidable
7		10	Carburo de tungsteno
8		30	Carburo de tungsteno
9		50	Carburo de tungsteno

5.5 Propiedades fisicoquímicas

5.5.1 Microscopía electrónica de barrido

La morfología de las partículas constituyentes del bagazo se obtuvo mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) de acuerdo al procedimiento reportado por Chen et al., (2013). Se utilizó un microscopio Hitachi S-4800 FEG (Tokio, Japón). Las muestras se recubrieron con aleación de oro y paladio durante 50 s antes de la prueba. Las imágenes se obtuvieron a un voltaje de aceleración de 5.0 kV con varios aumentos (400, 700 y 1000X).

5.5.2 Parámetros de color

El color de las muestras micronizadas fue determinada utilizando un colorímetro Minolta (CM-508D, Japan), al cual una vez calibrado previamente con un mosaico blanco se le colocó la muestra homogéneamente contra la fuente de luz; registrando los valores de las coordenadas de luminosidad (L^*), rojo-verde (a^*), y amarillo azul (b^*) según el espacio de color CIE Lab. El coeficiente de luminosidad L^* representa la claridad o la oscuridad de la muestra (0 = negro y 100 = blanco), y a^* y b^* son para las dimensiones del oponente de color: a^* es una medida de enrojecimiento (+) a verdor (-), es decir con un valor a^* positivo más alto indica una tonalidad más roja en la muestra, mientras que el valor b^* es una medida de amarillez (+) a azul (-), con un valor b^* positivo más alto indica una tonalidad más amarilla (Ma et al., 2011).

5.5.3 Almidón total

El contenido de almidón total (AT) se determinó sobre almidón nativo y almidones modificados de maíz. Se utilizó un kit de ensayo de almidón total (α -A / AMG) de Megazyme (Wicklow, Irlanda). El ensayo se realizó de acuerdo con las instrucciones del fabricante (Megazyme, 2019). Se pesaron 100 mg de muestra en un tubo de vidrio (16 x 120 mm) y se agregaron 0.2 mL de etanol acuoso (80% v/v) para humedecer la muestra y ayudar a la dispersión, inmediatamente se agregaron 3 mL de α -amilasa termoestable a cada tubo y se incubaron en un baño de agua hirviendo durante 6 minutos (agitando el tubo vigorosamente después de 2, 4 y 6 minutos). Posteriormente, los tubos se colocaron en un baño a 50 °C y se agregaron 0.1 mL de amiloglucosidasa (330 U), durante 30 min. Finalizada la incubación, el contenido de cada tubo fue transferido a un matraz aforado de 100 mL, ajustando el volumen con agua destilada. Se centrifugaron alícuotas a 3,000 rpm durante

10 min. Se tomaron 0,1 mL de la solución diluida centrifugada en el fondo de tubo de ensayo de vidrio (16 x 100 mm), se agregaron 3.0 mL de reactivo GOPOD a cada tubo (incluidos los controles de D-glucosa y los blancos de reactivos), para proceder a una última incubación a 50 °C durante 20 min. Finalmente se registraron las absorbancias de cada muestra a 510 nm contra el blanco de reactivo. El porcentaje de almidón se determinó utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Almidón total (\%)} = (\Delta A) \left(\frac{F}{W} \right) (FV)(0.9)$$

Donde:

ΔA = Absorbancia de las muestras

F= (100 (µg de D-glucosa) / absorbancia glucosa)

FV= Volumen final (100 mL)

W= peso en base seca (100 mg)

5.5.4 Almidón resistente

El contenido de almidón resistente (AR) se determinó usando un kit de Megazyme (Wicklow, Irlanda). El ensayo se realizó de acuerdo con las instrucciones del fabricante. El contenido de almidón resistente se calculó en función de la porción del almidón que no se hidrolizó, mientras que la porción hidrolizada del almidón se consideró almidón no resistente (solubilizado) (Megazyme, 2019). Las muestras se incubaron con α -amilasa pancreática y amiloglucosidasa (AMG) durante 16 horas a 37 °C en un baño de agitación horizontal (200 choques/min), para finalizar la incubación se realizaron tres lavados con etanol al 95% y 50%, los lavados se realizaron a 6000 rpm durante 10 min.

Una vez finalizado los lavados, se agregaron 2 mL de KOH 2 M durante 20 minutos para hidrolizar el almidón resistente, posteriormente se agregaron 8 mL de búfer acetato de sodio 1.2 M (pH de 3.8) y 100µL de amiloglucosidasa de 3300 U/mL con agitación continua en un baño de agua a 50 °C durante 30 minutos. Una vez finalizada la incubación, se transfirió el contenido a matraces volumétricos de 100 mL donde se aforó con agua destilada para finalmente centrifugar una alícuota a 6000 rpm durante 20 minutos; de la cual se tomaron 50 µL y se le adicionaron 1.5 mL de

reactivo GOPOD para incubarse 20 minutos a 50 °C. Se midió la absorbancia a 510 nm contra el blanco. El contenido de almidón resistente (contenido >10% de almidón resistente), se calculó con la siguiente ecuación:

$$\text{Almidón resistente (\%)} = (\Delta E) \left(\frac{F}{W} \right) (90)$$

Donde:

ΔE = absorbancia (reacción) lectura contra el reactivo en blanco.

F= Conversión de absorbancia a microgramos (la observancia obtenida por 100 μ g de D-glucosa en la reacción GOPOD es determinada, y F = 100 (μ g de D-glucosa) dividida por la absorbancia GOPOD para estos 100 μ g de glucosa.

W = peso seco de la muestra analizada.

5.5.5 Fibra cruda

La evaluación de fibra cruda del bagazo, se llevó a cabo siguiendo la metodología basada en el método estándar de la AOAC 962.09 (1990). Se colocaron 2 gramos de muestra desgrasada y seca, en un vaso Berzelius de 600 mL y se agregaron 150 mL de ácido sulfúrico (0.255 N). Se llevó a cabo el calentamiento de cada vaso en el digester de fibra, rotando periódicamente los vasos para evitar que los sólidos se pegaran en el vaso. Una vez iniciada la ebullición se cuantifico el tiempo por 30 minutos exactamente, se filtró con lino español y el residuo se lavó con agua caliente hasta un pH neutro (para acelerar los lavados y obtener el pH neutro al final de los lavados con agua caliente, se agregó un aproximado de 25 mL de hidróxido de sodio). Después de los lavados los filtros fueron exprimidos con la intención de eliminar la mayor cantidad de líquidos en el residuo. Posteriormente se llevó a cabo una segunda hidrólisis alcalina con hidróxido de sodio (0.313 N), agregando 150 ml a cada vaso con el residuo resultante de la primera hidrolisis ácida con ácido sulfúrico. Nuevamente cada vaso fue colocado en el digester de fibra durante 30 min de ebullición exactamente. Una vez finalizada la hidrolisis, se filtraron y agregaron 25 mL de ácido sulfúrico, tres porciones de 50 mL de agua caliente y por ultimo 25 mL de alcohol etílico. Nuevamente los filtros (lino español) fueron exprimidos para eliminar la mayor cantidad liquida y se procedió con la

obtención de los residuos en el filtro. Los residuos fueron depositados en crisoles de 50 mL previamente llevados a peso constante para determinar el valor de minerales, llevándose a un horno de convección a 100°C por 24 h Posteriormente al secado, los crisoles se enfriaron en un desecador y se registró su peso. A continuación se procedió a calcinar a 600°C por 30 min, los crisoles se dejaron enfriar en desecador durante una hora y se registró el peso correspondiente. El cálculo de fibra cruda se realizó mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Fibra cruda (\%)} = \left(\frac{\text{Peso del crisol con muestra seca} - \text{Peso del crisol con muestra calcinada}}{\text{Peso de la muestra}} \right) (100)$$

5.5.6 Distribución del tamaño de partícula

La distribución del tamaño de partícula se determinó, siguiendo la metodología descrita por Chen et al., (2013) mediante un analizador de tamaño de partículas (Mastersizer 2000, Malvern Instruments, Worcestershire, Reino Unido), basado en el método de difracción láser. El análisis del tamaño de partícula de cada muestra se realizó con 3450 barridos y se analizó con el índice de refracción de referencia de fibra dietética insoluble (1.520) y agua (1.330).

5.5.7 Difracción de rayos X

Los patrones de difracción de rayos X se evaluaron siguiendo la metodología descrita por Urzúa-Valenzuela, 2018, con ligeras modificaciones. Se utilizó un difractómetro Bruker AXS D8 Advance, con una corriente de 30 mA, un voltaje de 40 kV y una radiación de CuK α con una longitud de onda de 1.542 Å. Las condiciones de medición fueron de 5 a 60° en el ángulo 2 θ con un intervalo de 0.05°, con una velocidad de barrido de 60 s/°.

5.5.8 Perfil de viscosidad

El perfil de viscosidad de las muestras se determinó mediante un viscosímetro RVA; (marca Perten Instruments, modelo RVA 4500). Se pesó (3.33 g base seca) la muestra directamente en el porta muestra del RVA y se añadió agua destilada hasta obtener un peso total de la muestra de 28 g. La

suspensión se homogeneizó manualmente utilizando la paleta de plástico para evitar la formación de grumos antes de la ejecución del programa en el RVA. Se estableció un ciclo programado de calentamiento y enfriamiento durante 13 min, donde las muestras se mantuvieron a 25°C durante 1 min, se calentaron a 90°C en 4.42 min, se mantuvieron a 90°C durante 2.30 min antes de enfriarse a 25°C durante 3.48 min, y se mantuvieron a 25°C durante 2 min. La velocidad de agitación se fijó a 960 rpm durante los primeros 10 s para garantizar la uniformidad de la dispersión, y luego a 160 rpm durante el resto de la medición. Se utilizó un gráfico de viscosidad en unidades cP (centipoise) en función del tiempo para determinar la viscosidad máxima, la viscosidad mínima y la viscosidad final.

5.6 Propiedades funcionales

5.6.1 Capacidad de Retención de Agua

La capacidad de retención de agua (CRA) se determinó de acuerdo con la metodología reportada por (Ma & Mu, 2016) con ligeras modificaciones. Se hidrataron 0.5 g de muestra en 15 mL de agua destilada a temperatura ambiente durante 18 h y se centrifugaron a 6000 rpm durante 20 min. Se registró el peso del residuo hidratado, para calcular CRA mediante la siguiente ecuación, expresada como g de agua contenida por g de muestra:

$$CRA \left(\frac{g}{g} \right) = \frac{(mf - md)}{md}$$

Donde:

mf: peso del residuo fresco (g).

md: peso del residuo seco (g).

5.6.2 Capacidad de Adsorción de Aceite

La Capacidad de Adsorción de Aceite (CAA) se determinó mediante el método descrito por (Ma & Mu, 2016), con ligeras modificaciones. Se mezcló 0.500 g de muestra con 15 mL de aceite de oliva durante 18 horas a temperatura ambiente, posteriormente se realizó una centrifugación 6000 rpm durante 20 min. La CAA se calculó a partir de la cantidad de aceite de oliva retenido por la muestra y se expresó como g de aceite contenido por g de muestra final:

$$CAA \left(\frac{g}{g}\right) = (mr - md) \left(\frac{100}{md}\right)$$

Donde:

mr: peso del residuo, que contenía el aceite (g).

md: peso original de FD (g).

5.6.3 Índice de solubilidad en agua

La solubilidad del bagazo micronizado se realizó por triplicado, utilizando la metodología reportada por Chen et al., (2013) con ligeras modificaciones. Se hidrataron 0.5 g muestra en 15 mL de agua destilada a temperatura ambiente durante 18 h. Posteriormente se realizó una centrifugación a 6000 rpm durante 20 min, el sobrenadante se decantó en charolas de aluminio previamente pesadas y secadas en una estufa a 105 °C durante 24 horas, se registró el peso para determinar el porcentaje de solubilidad de las muestras. La solubilidad (%) se calculó como:

$$\text{Solubilidad (\%)} = \frac{\text{Peso (g) sobrenadante después del secado}}{\text{Peso (g) de FDI}} \times 100$$

5.6.4 Perfil de hinchamiento

El perfil de hinchamiento (PH) del bagazo micronizado se realizó por triplicado, mediante la metodología reportada descrita por (Ma & Mu, 2016) con ligeras modificaciones. Se pesaron 0.5 g de muestra y se tomó lectura de su volumen inicial, posteriormente se hidrato con 15 mL de agua destilada en un tubo de ensayo graduado a temperatura ambiente durante 18 h. Después de 18 h, se tomó la lectura del volumen final alcanzado por la muestra. La capacidad de hinchamiento se expresa en mililitros de agua por gramo de fibra, y se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\text{PH} \left(\frac{\text{mL}}{\text{g}} \right) = \frac{V_1 - V_0}{W_0}$$

Donde:

V_1 : volumen de la muestra hidratada.

V_0 : volumen de la muestra antes de la hidratación.

W_0 : peso de la muestra antes de la hidratación.

5.7 Propiedades fisiológicas

5.7.1 Capacidad de Adsorción de Glucosa

El método para determinar la capacidad de adsorción de glucosa (CAG) fue el de (Ma & Mu, 2016) con ligeras modificaciones. Brevemente, se mezcló 0.5 g de muestra con 50 mL de diferentes concentraciones de glucosa (50, 100 y 200 mmol/L) y se incubó a 37°C durante 6 h. Posteriormente, la muestra se centrifugó a 6000 rpm durante 20 min. Después de que la adsorción de glucosa alcanzará el equilibrio, la cantidad de glucosa retenida por el bagazo se determinó midiendo el contenido de glucosa en el sobrenadante usando un espectrofotómetro (510 nm) y un kit de ensayo de glucosa. La glucosa adsorbida se expresó como mmol de glucosa retenida por g de muestra:

$$CAG = (C_i - C_s) \times \frac{V_i}{W_s}$$

Donde:

C_i ; es la concentración de glucosa de la solución original (mmol/L).

C_s ; es el contenido de glucosa sobrenadante cuando la adsorción alcanzó el equilibrio (mmol/L).

W_s ; es el peso de la muestra (g).

V_i ; es el volumen del sobrenadante (mL).

5.8 Análisis estadístico

Cada experimento se llevó a cabo por triplicado. Los datos se expresaron como media \pm desviación estándar (DE). Los resultados obtenidos en cada experimento fueron analizados con SigmaPlot 12.5 Las diferencias obtenidas se evaluaron mediante análisis de varianza (ANOVA) aplicando un test *post hoc* Tukey con un 95% de nivel de confianza, $P < 0.05$ se consideró estadísticamente significativo.

6. RESULTADOS Y DISCUSIONES

6.1 Propiedades fisicoquímicas

6.1.1 Microscopía electrónica de barrido

En la Figura 5 se muestran las micrografías del bagazo de chayotextle sin modificar (BSM), tomadas mediante MEB, donde se observan gránulos de almidón de chayotextle, la forma de estos gránulos es predominantemente esféricas. Sin embargo, también se observan formas poligonales y/u ovaladas, similares a las reportadas por (Hernández-Uribe et al, 2011), correspondientes a gránulos de almidón del chayotextle. En la Figura 5a se muestra la micrografía del bagazo de chayotextle a una magnitud de 400x, observando así un panorama general de las partículas de las que está conformada el bagazo de chayotextle, la Figura 5b muestra un acercamiento de las partículas a una magnitud de 700x, mientras que la Figura 5c corresponde a la micrografía del bagazo de chayotextle a una magnitud de 1000x, en la cual se aprecia mejor, tanto la forma como la superficie de las partículas que conforman al bagazo de chayotextle.

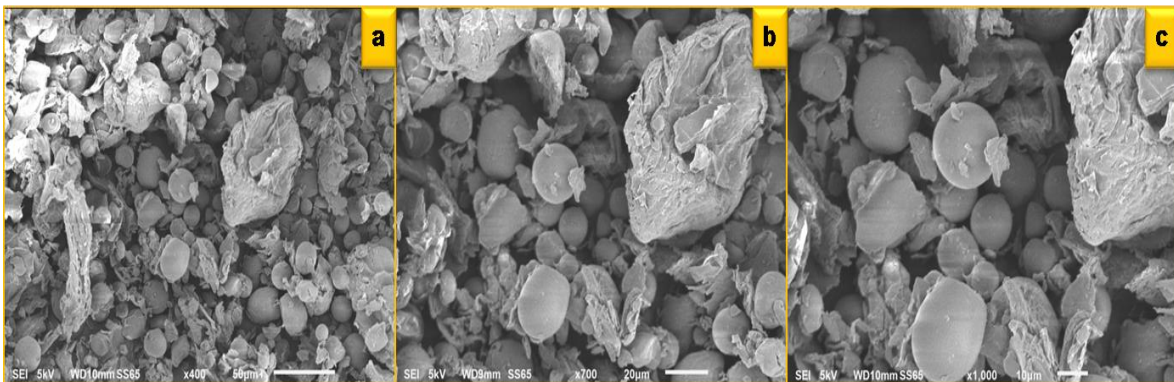


Figura 5. Micrografías del bagazo de chayotextle sin modificar, tomadas a distintas magnitudes a = 400X; b = 700X y c = 1,000X.

A demás de los gránulos de almidón, las otras partículas que se observan se asocian directamente con la fibra del chayotextle, debido a que son los componentes mayoritarios de losa bagazos (Jasko et al., 2011), estas estructuras presentan una superficie irregular y en algunos casos se presentan algunos huecos, los cuales podrían ser responsables de la alta incidencia de poros permeables en las fibras, lo que provoca una alta adsorción de agua, caracterizando a las fibras como estructuras altamente higroscópica (Fiorda et al., 2013).

Las micrografías del bagazo de chayotextle micronizado con nitruro de silicio a diferentes tiempos de molienda, se muestran en la Figura 6, donde se aprecia de manera general, que tanto el proceso de micronización, como el tiempo de molienda, no afectaron la estructura física de los gránulos del almidón, sin embargo, se observa que con el tiempo de molienda las partículas de fibra, que usualmente son más grandes que los gránulos de almidón, se vieron afectadas y presentaron una reducción de tamaño, esto puede atribuirse a que la densidad de las bolas de nitruro (3.1 g/cm^3) es la más baja que se utilizó durante la micronización, indicando con esto que el material utilizado y las condiciones de molienda, fueron suficientes para afectar únicamente a las partículas de fibra y no a los gránulos de almidón. En la muestra BMN-10 se puede observar que los gránulos de almidón se encuentran incrustados o rodeados por una matriz polimérica, la cual puede considerarse como compuestos de fibra, en los que se incrustan microfibrillas de celulosa en una matriz de carbohidratos complejos y ligninas (Ralet, Buffet, Capron, & Guillon, 2016). Urzúa-Valenzuela, (2018) reporto daños en los gránulos de mayor tamaño de almidón de papa, utilizando nitruro de silicio a partir de los 2.5 min de molienda, mientras que los gránulos de menor tamaño parecen incrustarse a los de mayor tamaño. Al aumentar los tiempos de molienda (20 min) la superficie de los gránulos es totalmente dañada. A diferencia del bagazo de chayotextle, donde los gránulos de almidón se encuentran envueltos (protegidos) por la matriz polimérica, el impacto de las bolas de nitruro es directo sobre los gránulos del almidón de papa.

En la Figura 7 se muestran las micrografías del bagazo de chayotextle micronizado con acero inoxidable (BMA, densidad = 7.9 g/cm^3 , donde se aprecia que a los 10 min de molienda (Figura 7 BMA-10), la estructura física de las partículas que conforman al bagazo fue afectada, debido a que se aprecia que la mayoría de los gránulos de almidón se encuentran fracturados, al igual que las partículas de fibra. También se puede apreciar que conforme se aumentó el tiempo de molienda (Figura 7 BMA-30 y BMA-50) se perdió la estructura inicial de las partículas y se generó la formación de aglomerados. Urzúa-Valenzuela, (2018) reporto que conforme aumentan los

tiempos de molienda con acero inoxidable en muestras de papa deshidrata, las partículas presentes en la muestra (almidón y matriz polimérica) comienzan a presentar daños en su estructura granular y con una alta tendencia a aglomerarse. Morales-Toledo, (2018) reporto el mismo comportamiento a los 20 min, en gránulos de almidón de malanga isleña y de almidón de taro.

Por su parte, la Figura 8 muestra las micrográficas del bagazo de chayotextle micronizado con carburo de tungsteno (BMT, densidad = 15.63 g/cm^3). Se observa que a los 10 min de molienda, la estructura de las partículas fue mayormente afectada, si se compara con la muestra micronizada con acero inoxidable (Figura 7 BMA-10). También se puede apreciar que conforme se aumentó el tiempo de molienda (Figura BMT-30 y BMT-50), el daño que sufrió la estructura física de las partículas, también fue en aumento. Por otra parte, a los 30 min de molienda con carburo de tungsteno, el daño observado en las partículas del bagazo, se asemeja al de la muestra micronizada por 50 min con acero inoxidable. Mientras que a los 50 min de molienda se aprecia una mayor aglomeración de la muestra de BMT. Urzúa-Valenzuela, (2018) reporto que a los 10 min de molienda en muestras de papa deshidratada, los gránulos de almidón se encontraban descubiertos de la matriz polimérica, pudiéndose observar restos sobre la superficie. Mientras que a los 20 min se aprecia como los gránulos se encuentran afectados por la molienda, tendiendo a aglomerarse. Dicho comportamiento también fue reportado por (Morales-Toledo, 2018), quien reporto la perdida de la estructura fibrosa en muestras de raquis de plátano macho a los 8 min de molienda.

Se ha reportado que al aumentar los tiempos de molienda, durante la micronización con distintos materiales de molienda, se provocan cambios morfológicos en las partículas. En donde las partículas se reducen a fragmentos finos mediante la trituración, pero por otro lado, estos fragmentos finos comienzan a compactarse y formar aglomerados después de alcanzar el tiempo de molienda predeterminado, debido al impacto de las bolas de molienda (Lee, Kwon, Kim, & Choi, 2017). La tendencia a aglomerarse se ha considerado que puede deberse a diferentes causas entre ellos la energía proporcionada o la humedad de las muestras. La energía proporcionada genera que los gránulos sean afectados y tiendan a conglomerarse por estabilidad, mientras que por otro lado la humedad de la fuente botánica sea otro motivo que aumente la aglomeración, debido al incremento en las interacciones por fuerzas de Van der Waals (Urzúa-Valenzuela, 2018). Por lo tanto, el daño que se observó en las partículas del bagazo de chayotextle, debido a las condiciones

de micronización, se atribuye a las condiciones de micronización utilizadas, es decir, tanto al material utilizado, como al tiempo de molienda empleado.

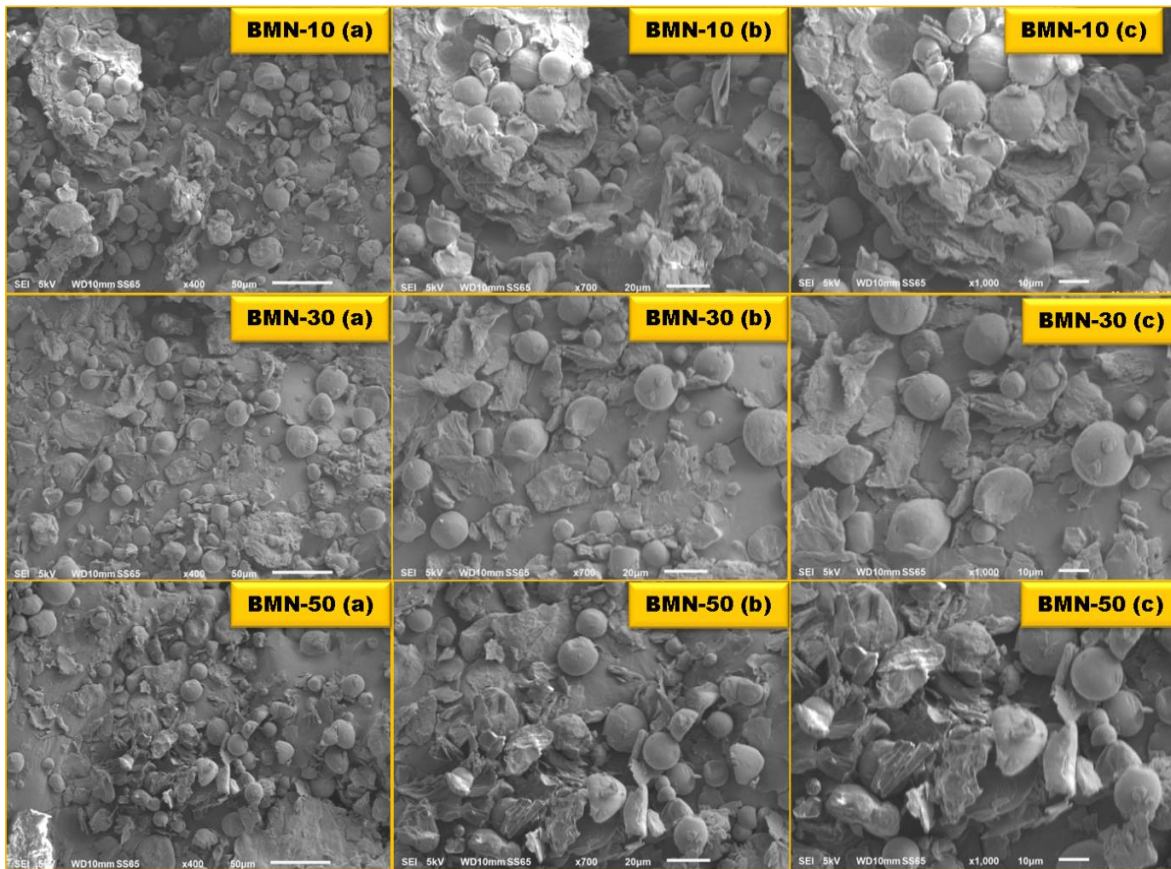


Figura 6. Micrografías del bagazo de chayotextle micronizado con nitruro de silicio a diferentes tiempos de molienda. Tomadas a diferentes magnitudes a = 400X; b = 700X y c = 1,000X. BMN = Bagazo Micronizado con Nitruro de silicio.

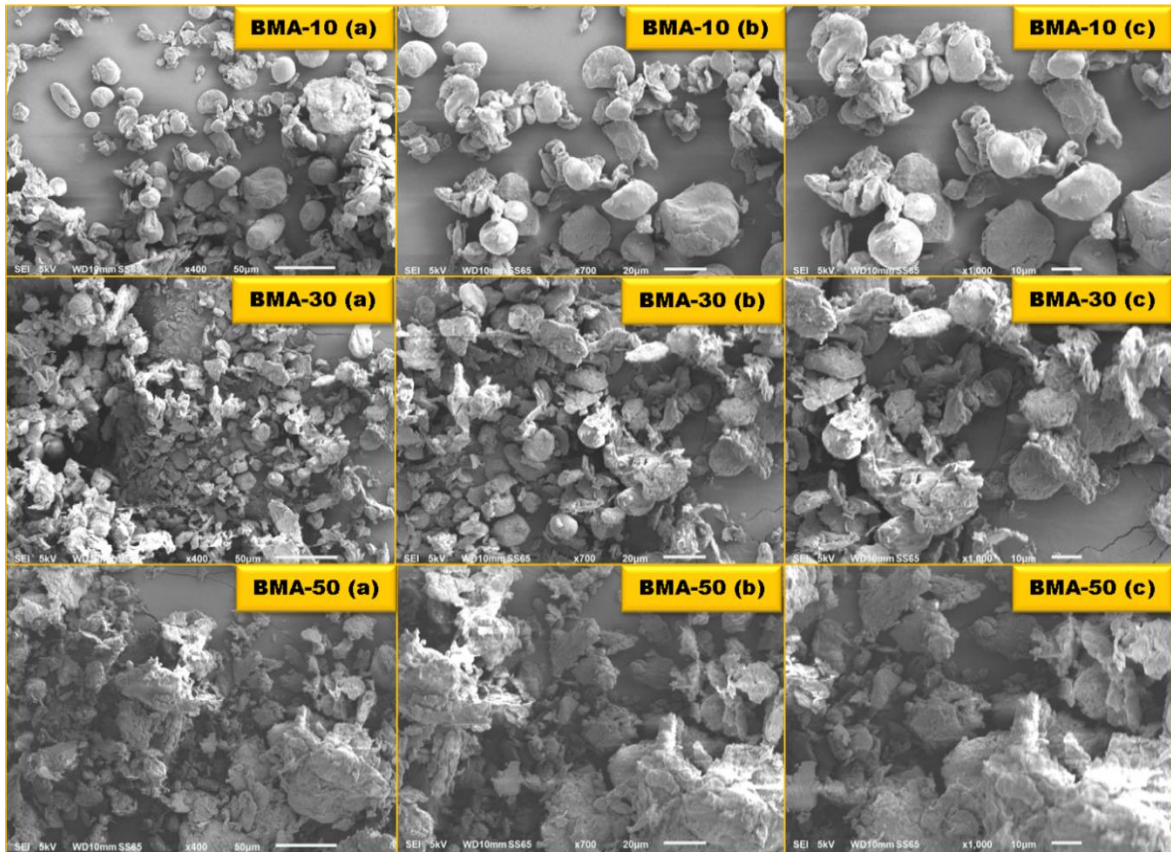


Figura 7. Micrografías del bagazo de chayotextle micronizado con acero inoxidable a diferentes tiempos de molienda. Tomadas a diferentes magnitudes a = 400X; b = 700X y c = 1,000X. BMA = Bagazo Micronizado con Acero inoxidable.

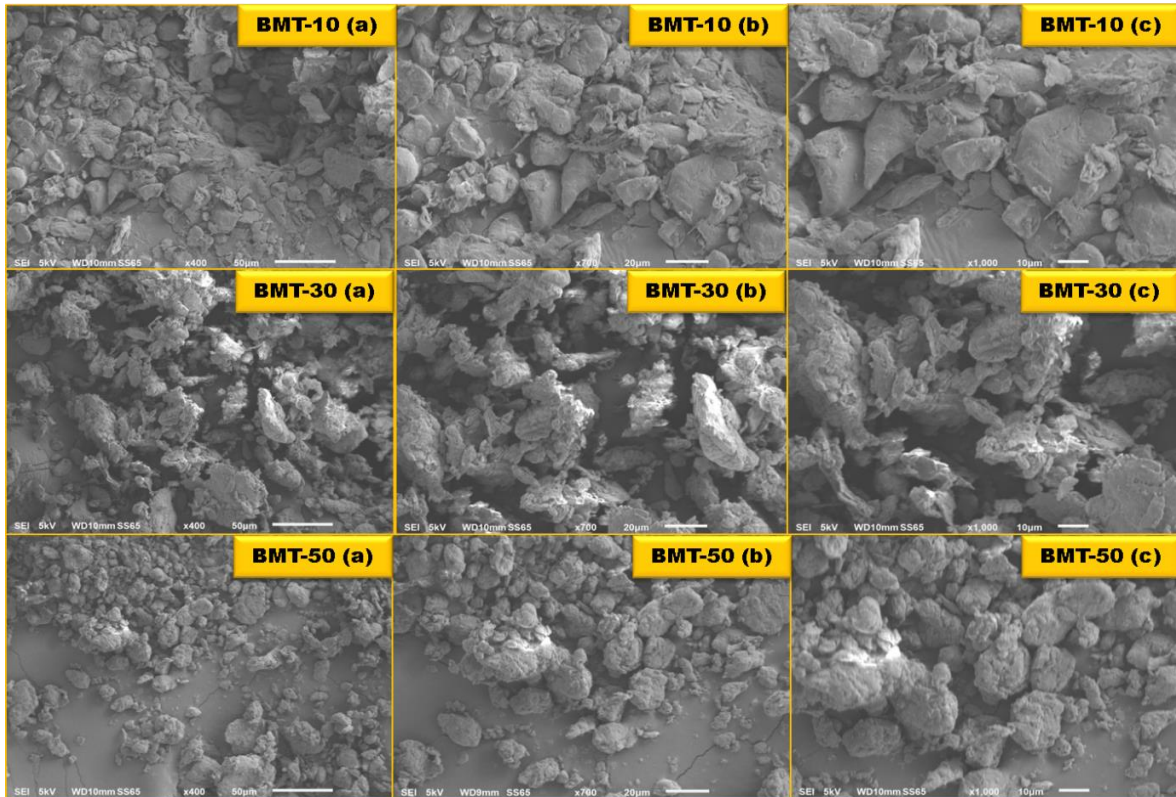


Figura 8. Micrografías del bagazo de chayotextle micronizado con carburo de tungsteno a diferentes tiempos de molienda. Tomadas a diferentes magnitudes a = 400X; b = 700X y c = 1,000X. BMT = Bagazo Micronizado con Tungsteno.

6.1.2 Parámetros de color

Los parámetros de color obtenidos para los diferentes bagazos se muestran en la Tabla 2, donde se muestra que el BSM presentó un valor de 77.52 para el parámetro de luminosidad (L^* , donde $L^*=0$ coordenada negro y $L^*=100$ coordenada blanco), indicando con esto, una tendencia hacia un color claro. Para las muestras micronizadas los valores de L^* oscilaron entre 72 y 82 con lo cual se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre las muestras analizadas, sin embargo, estos valores indican que las muestras conservaron una tendencia hacia el color claro. Montiel-Gutiérrez (2016) reportó una luminosidad de 84.43 para harina de chayotextle, mientras que Wani et al., (2013) reportaron un valor promedio de 81.55 para harinas de diversos cultivares de frijol indio.

En cuanto al parámetro a^* (coordenadas verde-rojo) de color, se observa que el BSM presentó un valor de 1.08, que es superior al valor (0.16) reportado por Montiel-Gutiérrez (2016), para harina de chayotextle. Por su parte las muestras de BMN y el BMT presentaron diferencias estadísticas significativas comparadas entre si y comparadas contra el BSM, sin embargo, con respecto al tiempo de molienda las muestras de bagazo micronizadas no presentaron diferencias estadísticas significativas a los 10 y 30 min de molienda, mientras que a los 50 min si presentaron diferencias estadísticas. Valores similares fueron reportados para harinas de diversos cultivares de frijol indio, con un valor de a^* de 1.4. En cuanto a las coordenadas amarillo-azul (b^*), el BSM presentó un valor de 13.74, el cual es superior a los reportados para harina de chayotextle (11.72) y para diversos cultivares de frijol indio (9.07). Las muestras micronizadas presentaron diferencias estadísticas significativas, con respecto al BSM y también presentaron diferencias en cuanto al tiempo de molienda, aunque todas las muestras mantuvieron una tonalidad amarillenta, esto puede ser bueno debido a que Ma et al., (2011) reportaron que tonalidades doradas o marrón son ventajosas para la incorporación en ciertos alimentos como galletas y bocadillos extruidos.

Tabla 2. Parámetros de color de las muestras de bagazo de chayotextle

L*				
BSM	Tiempo	BMN	BMA	BMT
77.52±0.10^A	10	74.24±0.02 ^{B,a}	80.50±0.29 ^{C,a}	73.70±0.37 ^{D,a}
	30	77.56±0.55 ^{A,b}	79.11±0.16 ^{B,b}	78.72±0.09 ^{C,b}
	50	81.37±0.04 ^{B,c}	76.72±0.09 ^{C,c}	72.47±0.16 ^{D,c}
a*				
1.08±0.02^A	10	1.44±0.05 ^{B,a}	1.13±0.04 ^{A,a}	1.71±0.05 ^{C,a}
	30	1.49±0.04 ^{B,a}	1.00±0.01 ^{A,a}	0.78±0.05 ^{C,a}
	50	1.27±0.06 ^{D,b}	0.82±0.03 ^{B,b}	1.18±0.19 ^{AD,b}
b*				
13.74±0.13^A	10	13.73±0.21 ^{A,a}	13.07±0.12 ^{B,a}	12.39±0.05 ^{C,a}
	30	14.16±0.06 ^{BD,b}	14.06±0.21 ^{BC,b}	14.41±0.07 ^{D,b}
	50	13.25±0.11 ^{B,c}	13.03±0.04 ^{C,a}	14.65±0.03 ^{D,b}

Media ± desviación estándar, de tres repeticiones. Las letras mayúsculas en la misma línea indican las diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) de las muestras micronizadas con diferente material. Letras minúsculas en la misma columna indican las diferencias de cada muestra respecto al tiempo de molienda. BSM= Bagazo Sin Modificar; BMN= Bagazo Micronizado con Nitruro; BMA= Bagazo Micronizado con Acero; BMT= Bagazo Micronizado con Tungsteno.

6.1.3 Almidón total, Almidón resistente y Fibra cruda

En la Tabla 3 se muestra el contenido de almidón total (AT), almidón resistente (AR) y fibra cruda del BSM, el cual presenta un contenido de AT de 47.66%, valor similar a lo reportado para bagazos de yuca. Souza et al., (2018) indicaron que los bagazos de yuca estaban compuestos principalmente de almidón, reportando valores entre 45% y 77.5% de almidón. Por su parte, Farias et al., (2014) reportaron contenidos de almidón de 42.70 y 46.90% de dos muestras diferentes de bagazos de yuca provenientes de dos distintos estados. Sin embargo, también se ha reportado un contenido de 24.50% en el contenido de almidón para bagazos de yuca (Fiorda et al., 2013), el cual es menor al reportado en este estudio. Por lo tanto, estas diferencias podrían estar relacionadas con la tecnología de procesamiento industrial utilizada en el aislamiento del almidón, debido a que el bagazo es el subproducto obtenido de la industria almidonera de yuca.

Tabla 3 Contenido de almidón total, almidón resistente y fibra cruda del bagazo sin modificar.

BSM		
AT (%)	AR (%)	Fibra cruda (%)
47.66±2.89	15.75±0.82	15.06±0.16

Los valores son la media \pm desviación estándar, de tres repeticiones. BSM= Bagazo Sin Modificar; AT= Almidón Total; AR= Almidón Resistente.

El contenido de AR que se determinó en el BSM fue de 15.75±0.82%, que corresponde a la fracción de almidón que es capaz de resistir a la digestión y se mantiene íntegro a lo largo del tracto gastrointestinal. Una de las ventajas de este tipo de almidón, es que permite ser utilizado como un ingrediente que refuerza las características tecnológicas de los alimentos, además de otorgar beneficios fisiológicos asociados a la salud (Villarreal et al., 2018). El contenido de AR es superior al reportado por Souza et al., (2018), en el bagazo de yuca con un 12% de almidón resistente. El almidón resistente se subdivide en cinco categorías en base a la naturaleza del almidón y su localización en los alimentos, en el bagazo de chayotextle se encuentra el almidón resistente Tipo

2 (AR2), el cual está representado por gránulos de almidón resistentes a la digestión enzimática, debido a la estructura compacta, la cual limita la accesibilidad de las enzimas digestivas. Este tipo de AR también se puede encontrar en alimentos crudos tales como papas y plátanos verdes (Villarroel et al., 2018).

El contenido de fibra cruda fue de 15.06%, siendo la mayor parte de su composición la celulosa, con porciones variables de hemicelulosa y lignina, como compuestos principales de las fibras insolubles de las fibras dietéticas. En la actualidad, la fibra dietética es un área importante de investigación en todo el mundo. Su importancia para la salud se está definiendo gradualmente y supone un reto para la industria de la alimentación y la agricultura por la oportunidad que supone de cambiar los hábitos alimentarios y formular nuevos tipos de alimentos (Fernandez-Bañarez y Gassull-Duró, 1999).

En cuanto a las muestras micronizadas el contenido de fibra disminuyó conforme aumentó el tiempo de molienda (Tabla 4). Donde se puede apreciar que los valores en el contenido de fibra del BMN no presentaron diferencias estadísticamente significativas con respecto al tiempo de molienda, esto puede ser debido a que las condiciones de micronización, aparentemente no afectaron a los gránulos de almidón ni a la fibra, como puede apreciarse en la Figura 6, mientras que los BMA y BMT si presentaron diferencias estadísticamente significativas conforme se incrementó el tiempo de molienda. Debido a que la mayor parte de la composición de la fibra cruda está integrada por fibras insolubles, probablemente la disminución de los porcentajes se deban a la redistribución de las fracciones de la fibra es decir de la fracción insoluble a fracciones solubles, provocada por la micronización (Wen, Niu, Zhang, Zhao, & Xiong, 2017), esto podría corroborarse con lo observado en las Figuras 7 y 8 donde, las condiciones de micronización afectaron la estructura de las partículas que conforman al bagazo de chayotextle.

Tabla 4. Contenido de fibra cruda en las muestras de bagazo de chayotextle.

Fibra cruda				
BSM	Tiempo	BMN	BMA	BMT
15.06±0.16 ^A	10	14.61±0.36 ^{AC,a}	14.78±0.10 ^{BC,a}	13.55±0.14 ^{D,a}
	30	15.10±0.14 ^{A,a}	12.35±0.38 ^{B,b}	12.25±0.12 ^{B,b}
	50	14.48±0.25 ^{B,a}	10.97±0.15 ^{C,c}	8.92±0.39 ^{D,c}

Media ± desviación estándar, de tres repeticiones. Las letras mayúsculas en la misma línea indican las diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) de las muestras micronizadas con diferente material. Letras minúsculas en la misma columna indican las diferencias de cada muestra respecto al tiempo de molienda. BSM= Bagazo Sin Modificar; BMN= Bagazo Micronizado con Nitruro; BMA= Bagazo Micronizado con Acero; BMT= Bagazo Micronizado con Tungsteno.

6.1.4 Distribución del tamaño de partícula

Las distribuciones del tamaño de partícula de los bagazos micronizados con nitruro de silicio, acero inoxidable y carburo de tungsteno obtenidas a diferentes tiempos de molienda, se muestran en la Figura 9, 10 y 11 (respectivamente). Donde se observa que el BSM presento una distribución multimodal con cinco poblaciones, la primera tuvo un tamaño promedio aproximado de 30 μm , la segunda población presento un valor de 42 μm , la tercera de 50 μm , la cuarta población de 55 μm y una última presento un tamaño promedio de 62 μm , siendo la tercera y cuarta población las fracciones que exhibieron una mayor cantidad de tamaños de partículas.

En la Figura 9 se muestra las distribuciones correspondientes a la muestra de BMN a diferentes tiempos de molienda, en la cual se puede observar una distribución bimodal a los 10 min de molienda, la primera población presento un tamaño de 50 μm y la segunda presento un mayor volumen con un tamaño de 67 μm . Sin embargo, a los 30 y 50 min de molienda, se obtuvieron distribuciones monomodales con un tamaño a próximamente de 50 μm , presentando un volumen máximo a los 50 min de molienda. Esto podría confirmar lo que se observa en la Figura 6, donde las condiciones de micronización aparentemente solo homogenizaron el tamaño de las partículas de las muestras BMN-30 y BMN-50 y que en realidad no afectaron en si la estructura física de los componentes mayoritarios del bagazo. La importancia de obtener harinas con una alta

homogenización de granulometría es que promueve una mejor calidad sensorial de textura, sabor y apariencia visual al producto final (Dussán-Sarria, Hurtado-Hurtado, & Camacho-Tamayo, 2019).

En lo que respecta a la micronización con acero inoxidable y carburo de tungsteno las distribuciones del tamaño de partícula se presentan en las Figuras 10 y 11, respectivamente. Donde se aprecia que las condiciones utilizadas afectaron el tamaño de las partículas, ya que conforme se aumentó el tiempo de molienda, se presentó una distribución monomodal. Además, se pueden observar ligeros desplazamientos hacia la derecha a medida que se incrementan los tiempos de molienda en la micronización. Cuando la micronización fue realizada con acero inoxidable y principalmente con carburo de tungsteno, los tamaños de partículas fueron mayores, (dentro de un rango de 60 – 70 μm) a los tamaños obtenidos con las muestras BMN-30 y BMN-50 (50 μm), estos aumentos en el tamaño de las partículas podría deberse a la aglomeración de las partículas y se corrobora con las micrografías obtenidas por MEB. Tal como fue reportado por Lee et al., (2017), donde mencionan que a mayores tiempos de molienda los fragmentos finos comienzan a compactarse y formar aglomerados.

Liu, Ma, Yu, Shi, & Xue, (2011), evaluaron el efecto de la micronización con cerámica a 500 rpm y diferentes tiempos (60, 120 y 180 min), sobre almidón de maíz. Encontraron que los almidones nativos y micronizados mostraban una distribución monomodal, sin embargo, conforme aumentaban los tiempos de molienda la distribución del tamaño de partícula aumentó de 13.81 μm (para el almidón no micronizado) a 18.86, 19.83 y 19.23 μm respectivamente. Lo cual indica la formación de aglomerados en el almidón y fue corroborado con las micrografías obtenidas de MEB.

En la mayoría de las investigaciones en donde se evalúa el efecto de la micronización sobre la reducción del tamaño de partícula, se han reportado disminuciones de esta propiedad. Uno de estos estudios fue realizado por Loubes & Tolaba, (2014) quienes reportaron una reducción en el tamaño de partícula en harinas de arroz, las harinas micronizadas con óxido de zirconio a 550 rpm por 15 min de molienda, presentaron una distribución monomodal con un tamaño de partícula de 322.23 μm , posteriormente a la micronización las harinas presentaron una distribución bimodal con valores de 20 y con un máximo de 209 μm , en el tamaño de las partículas.

Otro estudio fue el de (Huang, Chen, & Wang, 2010) quienes utilizaron ágata como material de molienda para la micronización en cáscaras de batata, a 600 rpm aplicando diferentes tiempos de

molienda (2,4, 6, 8 y 10 h). Los resultados en las muestras micronizadas mostraron dos picos antes de la micronización (distribución bimodal), con dimensiones características en el rango de 10-20 y 50-150 μm , mientras que las harinas micronizadas presentaron una distribución monomodal con valores en el rango de 5 a 15 μm , aumentando el % del volumen conforme incrementaban los tiempos de molienda. Un tercer reporte fue realizado por (Roa-Acosta, 2015) quien evaluó la micronización a 350 rpm con diferentes tiempos de molienda (5, 19, 33 y 45 minutos) del grano de amaranto, las distribuciones presentaron un comportamiento monomodal y los tamaños de las partículas disminuyeron conforme aumento el tiempo de molienda, de 700 μm cuando el tiempo de molienda fue de 5 min a 150 μm cuando se alcanzaron los 45 min.

Otros estudios evalúan los efectos producidos por diferentes métodos de reducción de tamaño. Tal es el caso de (Daou & Zhang, 2012) quienes evaluaron los efectos de diferentes tratamientos físicos sobre el tamaño de partícula de fibras dietéticas de salvado de arroz desgrasado. Estos tratamiento físicos fueron: micronización, ultrasonido, microondas y extrusión. Considerando el 50% del volumen de las fibras no tratadas y tratadas, la micronización redujo en gran medida el tamaño de partícula de las fibras a 24 μm , seguido del tratamiento con microondas que fue de 58 μm , tratamiento con ultrasonido fue de 61 μm y por último el tratamiento por extrusión con 87 μm . las fibras no tratadas mostraron el tamaño de partícula más alto de 133 μm . Sin embargo, las fibras tratadas con ultrasonido mostraron partículas más pequeñas de 195 μm , seguido de micronización con 403 μm y microondas a 475 μm , cuando se midió el 95% del volumen de las fibras tratadas y no tratadas. Mientras que las fibras no tratadas y extruidas tenían casi el mismo tamaño (685 vs 700 respectivamente).

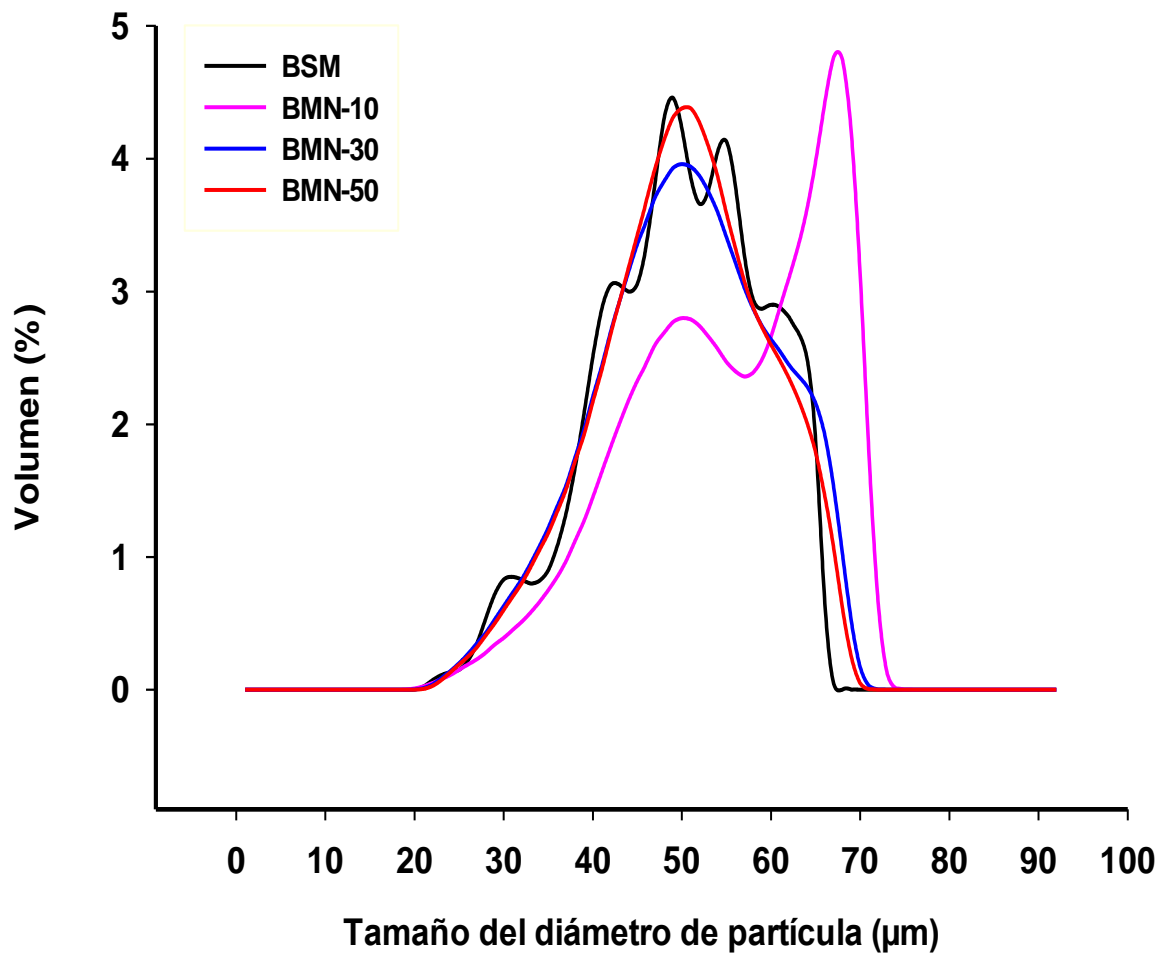


Figura 9. Distribución del tamaño de partícula (μm) del bagazo de chayotextle sin modificar y micronizado con nitruro de silicio a diferentes tiempos de molienda. BSM= Bagazo Sin Modificar; BMN-10 = Bagazo Micronizado con Nitruro a 10 min; BMN = Bagazo Micronizado con Nitruro a 30 min; BMN-50 = Bagazo Micronizado con Nitruro a 50 min.

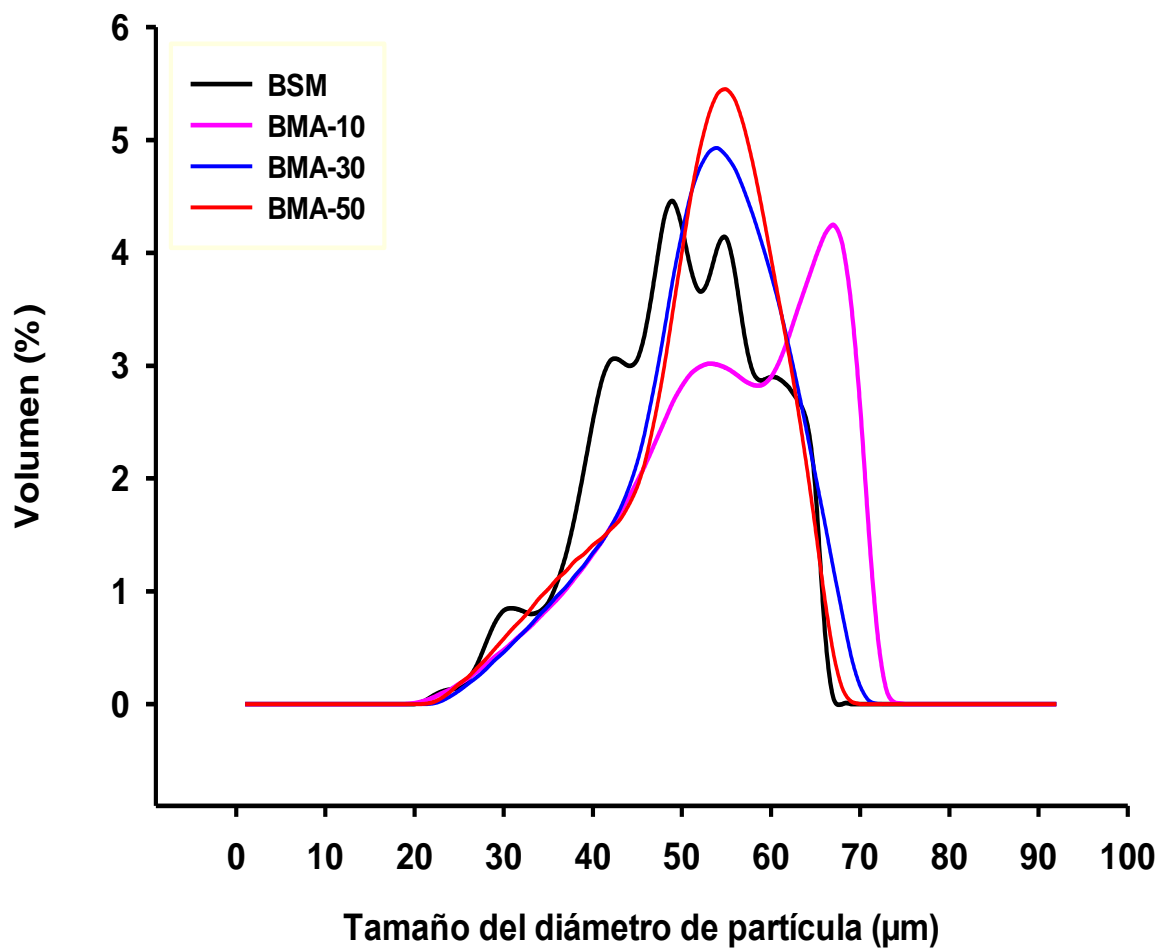


Figura 10. Distribución del tamaño de partícula (μm) del bagazo micronizado con acero inoxidable a diferentes tiempos de molienda y el bagazo sin modificar. BSM= Bagazo Sin Modificar; BMA-10 = Bagazo Micronizado con Acero a 10 min; BMA = Bagazo Micronizado con Acero a 30 min; BMA-50 = Bagazo Micronizado con Acero a 50 min.

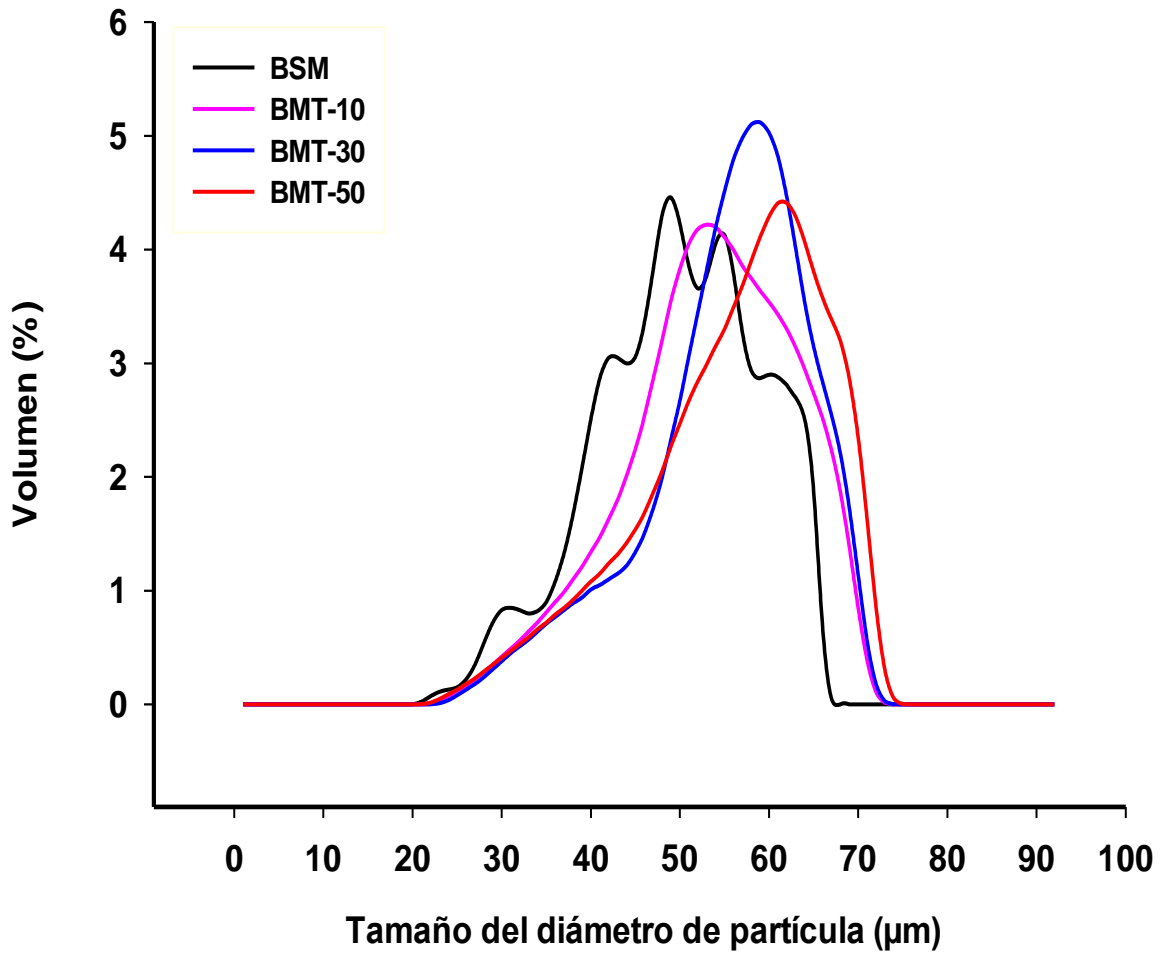


Figura 11. Distribución del tamaño de partícula (μm) del bagazo micronizado con carburo de tungsteno a diferentes tiempos de molienda y el bagazo sin modificar. BSM= Bagazo Sin Modificar; BMT-10 = Bagazo Micronizado con Tungsteno a 10 min; BMT = Bagazo Micronizado con Tungsteno a 30 minutos; BMT-50 = Bagazo Micronizado con Tungsteno a 50 min.

6.1.5 Difracción de rayos X

Actualmente la técnica de rayos X se ha convertido en una herramienta poderosa para el estudio de la cristalinidad y las estructuras de diversos polímeros a nivel molecular, además de ser una técnica no destructiva de las muestras (Xu, Shi, & Wang, 2017). Por lo que la técnica de difracción de rayos X fue usada para determinar la estructura cristalina de las muestras después de la micronización. En la Tabla 5 se muestran los porcentajes de cristalinidad de las diferentes muestras de bagazo de chayotextle, en la cual se observa de forma general una disminución de los valores de cristalinidad, al igual diferencias estadísticas significativas, en función de la densidad del material y el tiempo de molienda utilizado en cada tratamiento lo que significa una pérdida de la estructura cristalina después de cada tratamiento de micronización. Así, mientras mayor es la densidad, se genera más energía durante la micronización y por tanto mayor daño es causado a la estructura física de los bagazos (Urzúa-Valenzuela, 2018).

Tabla 5. Porcentajes de cristalinidad de los bagazos micronizados con diferentes materiales y tiempos de molienda y el bagazo sin modificar.

BSM	Tiempo	BMN	BMA	BMT
26.01±0.01^A	10	25.95±0.62 ^{A,a}	23.75±0.48 ^{B,a}	21.82±0.07 ^{C,a}
	30	25.32±0.16 ^{B,b}	22.38±0.34 ^{C,b}	19.78±0.13 ^{D,b}
	50	24.56±0.09 ^{B,c}	21.55±0.25 ^{C,c}	17.68±0.23 ^{D,c}

Media ± desviación estándar, de tres repeticiones. Las letras mayúsculas en la misma línea indican las diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) de las muestras micronizadas con diferente material. Letras minúsculas en la misma columna indican las diferencias de cada muestra respecto al tiempo de molienda. BSM= Bagazo Sin Modificar; BMN= Bagazo Micronizado con Nitruro; BMA= Bagazo Micronizado con Acero; BMT= Bagazo Micronizado con Tungsteno.

En las Figuras 12, 13 y 14 se muestran los difractogramas de los BMN, BMA y BMT, respectivamente, a diferentes tiempos de molienda. Los patrones de difracción correspondiente al BSM, muestra señales en el ángulo de 2θ en 15° , 17° , 22° , que en teoría corresponde a un patrón

de difracción tipo C (Zobel & Illinois, 1988). Sin embargo, a los 35° se alcanza a percibir un ligero pico de difracción débil, el cual podría estar indicándonos la presencia de la celulosa, debido a que la celulosa muestra un pico fuerte a 22.17° y uno débil a 34.50° (Wen et al., 2017).

En la Figura 12, correspondiente al BMN se muestra una disminución gradual de los picos de cristalinidad conforme se aumentó en tiempo de molienda, sin embargo, aún se distinguen los picos a 2θ igual a 15°, 17° y 20°. En cambio, para el BMA (Figura 13) se muestra una distorsión en los picos conforme aumentan los tiempos de molienda, pasando de una forma cristalina a una forma amorfa, provocada por la destrucción cristalina de la muestra. En los difractogramas correspondientes a los BMT (Figura 14), se puede observar que los picos han desaparecido desde el minuto 10, indicando la destrucción y el desorden de las regiones cristalinas de las muestras, presentando un estado amorfo, tal y como se aprecia en las micrografías obtenidas por MEB.

El bagazo de chayotextle contiene aproximadamente un 50% de almidón, el cual tiene una naturaleza cristalina definida y la cristalinidad se ha asignado a la estructura ordenada de las moléculas de amilopectina dentro de los gránulos (Narayana & Re, 2002). La difracción de rayos X de almidones nativos revela tres patrones distintos, A, B y C, que definen la disposición específica de empaquetamiento alomorfo de las hélices dobles de almidón (es decir, cristalitos) presentes dentro de los gránulos. El tipo específico de empaque cristalino observado en un almidón es principalmente una función de la condición de temperatura dentro de la planta durante la síntesis del almidón. En general, los almidones de tubérculos producen patrones tipo B (almidón sintetizado bajo tierra en condiciones frías), mientras que los almidones de cereales poseen una disposición cristalina tipo A (almidón sintetizado sobre el suelo en condiciones calientes y secas); los almidones de leguminosas exhiben el alomorfo C, que es una mezcla de alomorfos cristalinos A y B (BeMiller & Huber, 2012). Sin embargo, se sabe que hay excepciones, y tal vez habrá más, ya que se está aislando una amplia variedad de almidones y a menudo se caracteriza por la difracción de rayos X (Zobel & Illinois, 1988). Como se mencionó anteriormente, patrones tipo B son característicos de almidones provenientes de tubérculos, sin embargo, existen reportes sobre estas fuentes con patrones tipo A o tipo C. Tal es el caso de los almidones de batata y yuca, los cuales han sido reportados con patrones tipo A, C o un patrón mixto (Zobel & Illinois, 1988), (Narayana Re, 2002). Debido a todo lo anterior, los patrones de difracción de los bagazos de chayotextle coinciden con los patrones encontrados para almidones, ya que su componente mayoritario en el almidón.

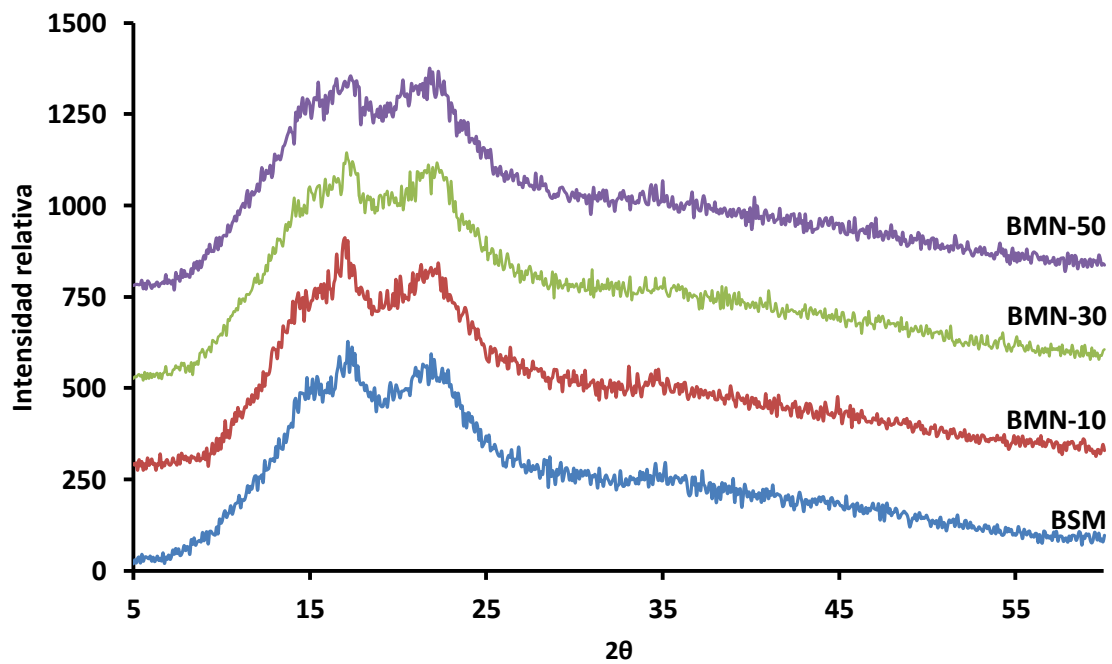


Figura 12. Difracción de rayos X del bagazo micronizado con nitruro de silicio a diferentes tiempos de molienda y el bagazo sin modificar. BSM= Bagazo Sin Modificar; BMN-10 = Bagazo Micronizado con Nitruro a 10 min; BMN = Bagazo Micronizado con Nitruro a 30 minutos; BMN-50 = Bagazo Micronizado con Nitruro a 50 min.

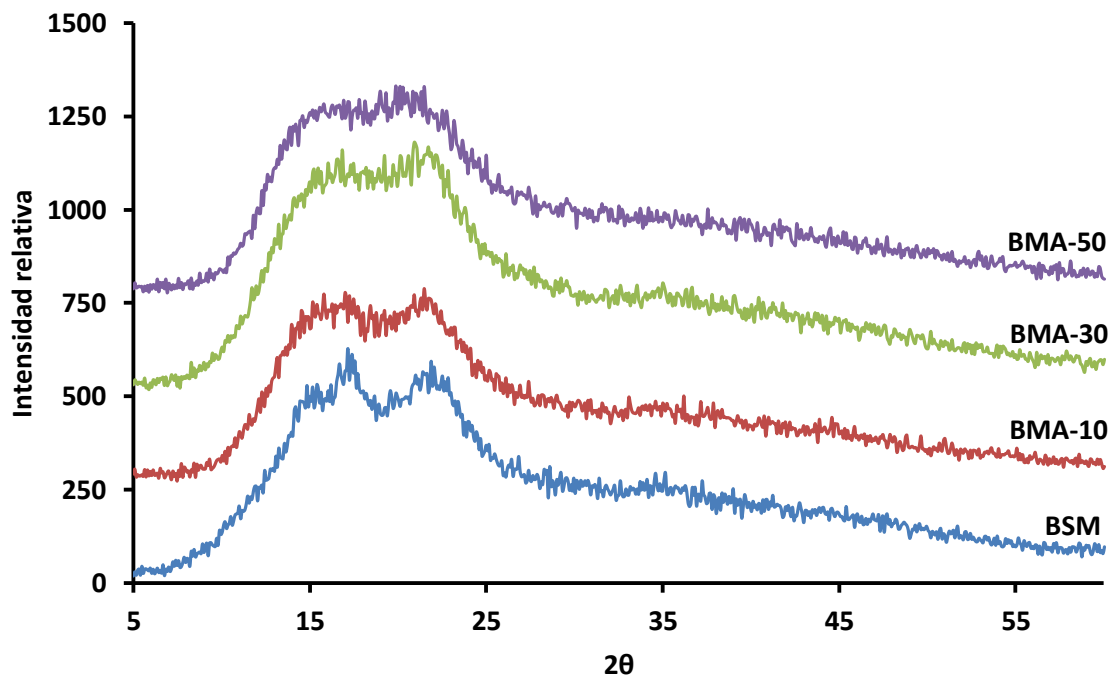


Figura 13. Difracción de rayos X del bagazo micronizado con acero inoxidable a diferentes tiempos de molienda y el bagazo sin modificar. BSM= Bagazo Sin Modificar; BMA-10 = Bagazo Micronizado con Acero a 10 min; BMA = Bagazo Micronizado con Acero a 30 minutos; BMA-50 = Bagazo Micronizado con Acero a 50 min.

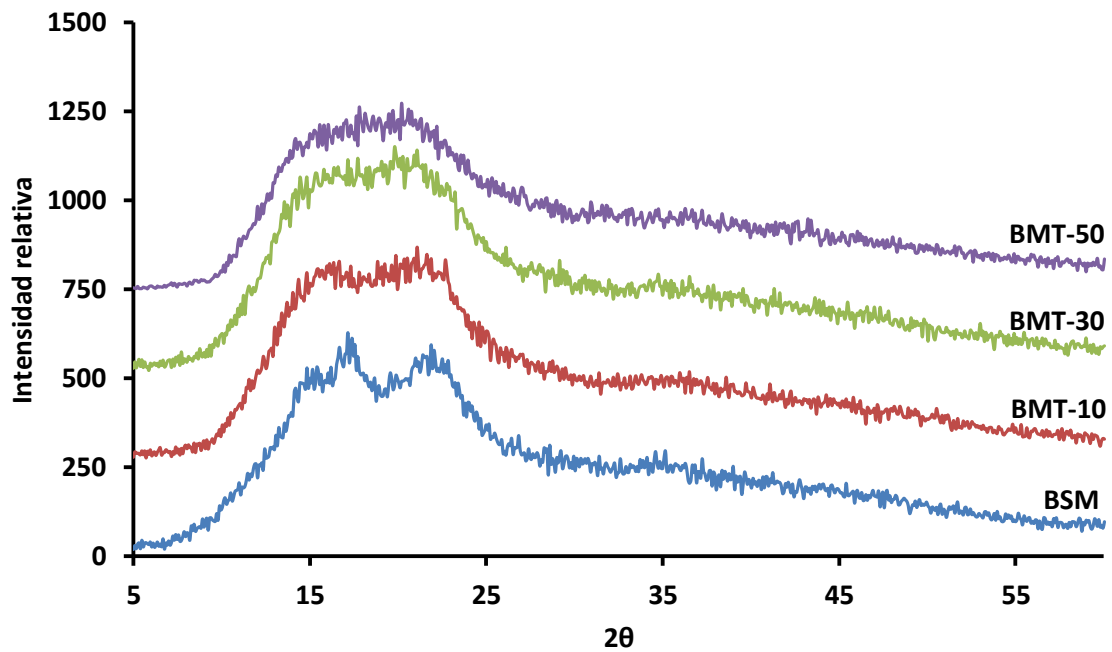


Figura 14. Difracción de rayos X del bagazo micronizado con carburo de tungsteno a diferentes tiempos de molienda y el bagazo sin modificar. BSM= Bagazo Sin Modificar; BMT-10 = Bagazo Micronizado con Tungsteno a 10 min; BMT = Bagazo Micronizado con Tungsteno a 30 minutos; BMT-50 = Bagazo Micronizado con Tungsteno a 50 min.

6.1.6 Perfil de viscosidad

Los perfiles de viscosidad del bagazo de chayotextle y las muestras micronizadas con nitruro de silicio, acero inoxidable y carburo de tungsteno, se presentan en la Figuras 15, 16 Y 17, respectivamente. El BSM presentó un pico de viscosidad máxima de 6,166 Cp, y un valor de viscosidad final de 6781 cP, valores que disminuyeron con cada uno de los tratamientos utilizados en este trabajo. Debido a que el componente mayoritario del bagazo es el almidón se presenta un perfil típico de viscosidad para el almidón. Sin embargo, los valores de viscosidad encontrados en este trabajo, son menores a los reportados para el propio almidón de chayotextle (9,000 cP) y para el almidón de papa (10,000 cP).

La Figura 15 muestra el perfil de viscosidad correspondiente al BMN, el cuál presenta una disminución del pico de viscosidad conforme aumenta el tiempo de molienda, sin embargo, a los 30 y 50 min de molienda las muestras presentaron un mismo comportamiento y no se presentaron diferencias estadísticas significativas ($P > 0.05$) en los perfiles de viscosidad. En el BMA (Figura 16) se puede apreciar que a los 10 min de molienda, aun se aprecia el perfil típico de viscosidad que mostro el BSM, aunque el pico de viscosidad máxima disminuyo hasta 3,485 cP y 4,560 cP para la viscosidad final. Sin embargo, al minuto 30 y 50, se obtuvieron VP de 1,963 y 1,377 cP, respectivamente. Y viscosidades mínimas de 2,255 cP a los 30 min y 1,357 cP para los 50 min de molienda.

En el caso de la micronización con carburo de tungsteno (Figura 17), desde el minuto 10 el pico de viscosidad máxima disminuyo drásticamente a 2,270 cP y una viscosidad mínima de 2,841 cP. Sin embargo, a los 30 y 50 min de molienda se pierde el perfil tipo mostrado por el BSM.

Urzúa-Valenzuela (2018), reportó que a mayores tiempos de molienda con nitruro de silicio, acero inoxidable y carburo de tungsteno, el perfil de viscosidad en el almidón de papa disminuye drásticamente, debido principalmente a las distintas energías suministradas por los diferentes materiales de molienda, ya que cuentan con diferentes densidades (nitruro de silicio: 3.1 g/cm³, acero inoxidable: 7.9 g/cm³ y carburo de tungsteno: 15.63 g/cm³). Así, mientras mayor es la densidad, más energético es la micronización y por tanto más daño será causando a la estructura física.

El comportamiento mostrado por las muestras de bagazo de chayotextle, coincide con los resultados de MEB donde se observa que la estructura granular del almidón se va perdiendo por

efecto de las densidades de los materiales y el tiempo de molienda, al igual que como se observó también en la disminución de la cristalinidad, la cual fue atribuida principalmente al almidón.

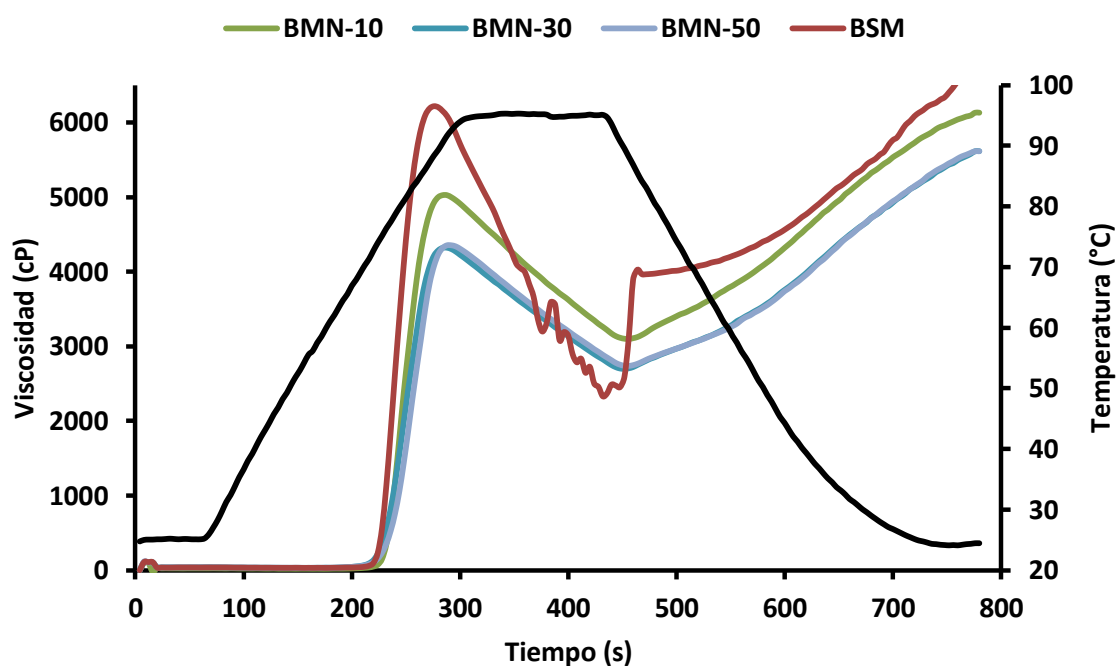


Figura 15. Perfil de viscosidad del bagazo micronizado con nitruro de silicio a diferentes tiempos de molienda y el bagazo sin modificar. BSM= Bagazo Sin Modificar; BMN-10 = Bagazo Micronizado con Nitruro a 10 min; BMN = Bagazo Micronizado con Nitruro a 30 minutos; BMN-50 = Bagazo Micronizado con Nitruro a 50 min.

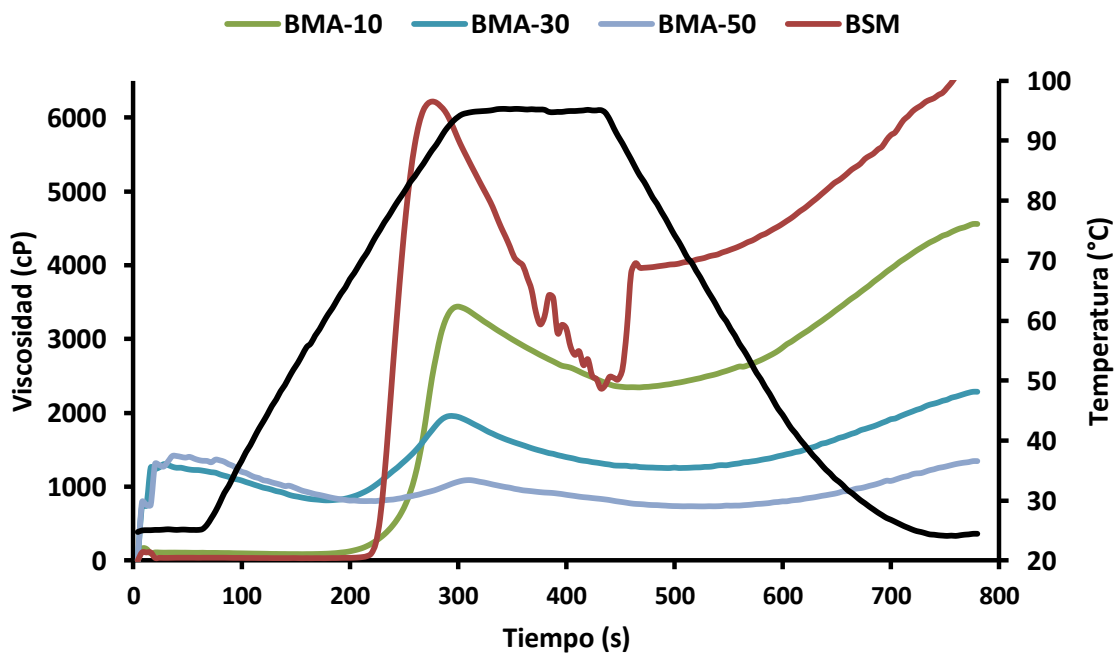


Figura 16. Perfil de viscosidad del bagazo micronizado con acero inoxidable a diferentes tiempos de molienda y el bagazo sin modificar. BSM= Bagazo Sin Modificar; BMA-10 = Bagazo Micronizado con Acero a 10 min; BMA = Bagazo Micronizado con Acero a 30 minutos; BMA-50 = Bagazo Micronizado con Acero a 50 min.

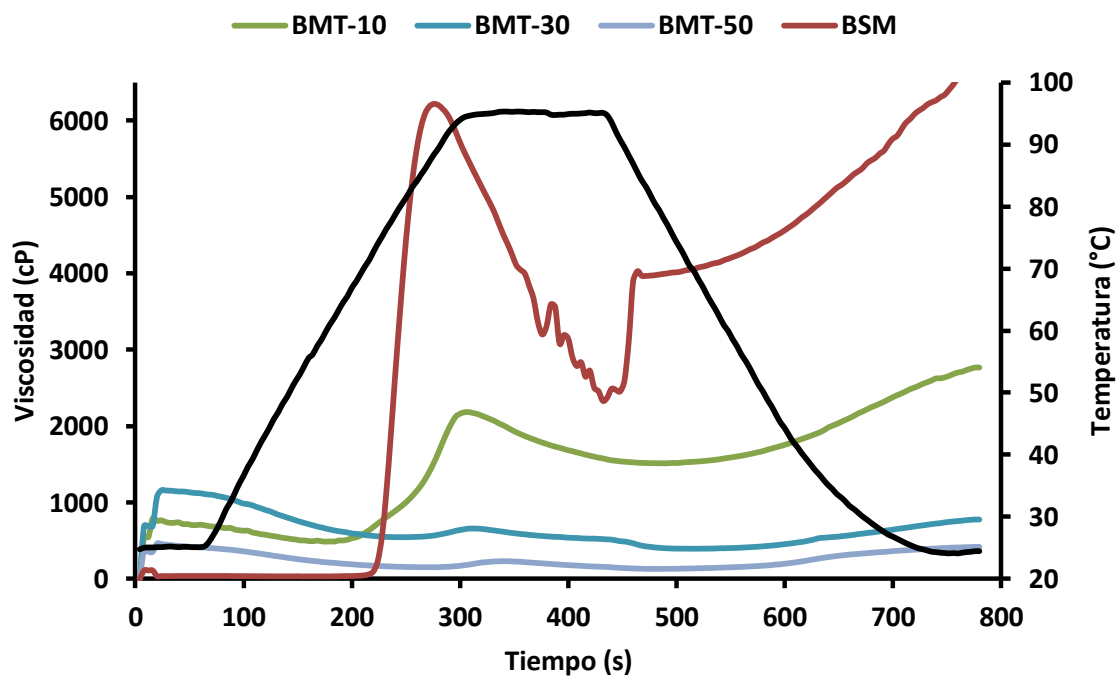


Figura 17. Perfil de viscosidad del bagazo micronizado con carburo de tungsteno a diferentes tiempos de molienda y el bagazo sin modificar. BSM= Bagazo Sin Modificar; BMT-10 = Bagazo Micronizado con Tungsteno a 10 min; BMT = Bagazo Micronizado con Tungsteno a 30 min; BMT-50 = Bagazo Micronizado con Tungsteno a 50 min.

6.2 Propiedades funcionales

6.2.1 Capacidad de retención de agua

En la Figura 18 se muestran los resultados de CRA, donde se pueden apreciar algunas diferencias significativas entre los materiales y tiempos empleados en la micronización. El BMN a los 10 min de molienda, no presentó diferencias estadísticamente significativas, respecto al valor (3.8 g de agua/g de muestra) de BSM, sin embargo, conforme los tiempos de molienda fueron aumentando dicho valor fue disminuyendo significativamente hasta 3.4 g de agua/g de muestra). Contrario a esto, la utilización de acero inoxidable tuvo un valor a los 10 min de molienda de 3.32 g de agua/g de muestra y el proceso de micronización, propicio un aumento en la CRA al aumentar el tiempo de molienda, hasta un valor máximo de 4.01 g de agua/g de muestra. Sin embargo, la micronización realizada con carburo de tungsteno presentó el valor más bajo (3.16 g de agua/g de muestra) a los 10 min de micronización, no obstante, a los 20 y 30 min de molienda los valores de CRA presentaron un máximo de 3.9 g de agua/g de muestra, mientras que a los 50 min de molienda la CRA disminuyó hasta 2.75 g de agua/g de muestra.

La medición de la CRA proporciona una estimación de la cantidad de agua que puede unirse y quedar atrapada en la muestra y dependerá de la estructura del material (Robertson & Eastwood, 1981), por lo tanto, debido a los diferentes materiales y tiempos utilizados durante la micronización, la estructura de las partículas que conforman la muestra se modificaron drásticamente. Ma & Mu, 2016 reportaron comportamientos similares en muestras de fibras dietéticas de comino, obtenidas con diferentes métodos de extracción. En donde CRA aumentó cuando el tamaño de partícula disminuyó de 0.4 a 0.125 mm, sin embargo, cuando el tamaño de partícula pasó de 0.125 a menos de 0.1 la CRA presentó una disminución. Indicando que las fibras dietéticas de pequeño tamaño de partícula sometidas a una molienda intensa, provocan que los enlaces entre los polisacáridos en las fibras se desnaturalicen, contribuyendo a una reducción en la CRA.

Diversos autores reportaron que el tratamiento de micronización, es capaz de alterar las regiones cristalinas, aumentar la porosidad y por ende provocar la ruptura del almidón, permitiendo la disolución del almidón en agua fría (solubilidad) e inducir a una mayor capacidad de adsorción del almidón (Roa et al., 2014).

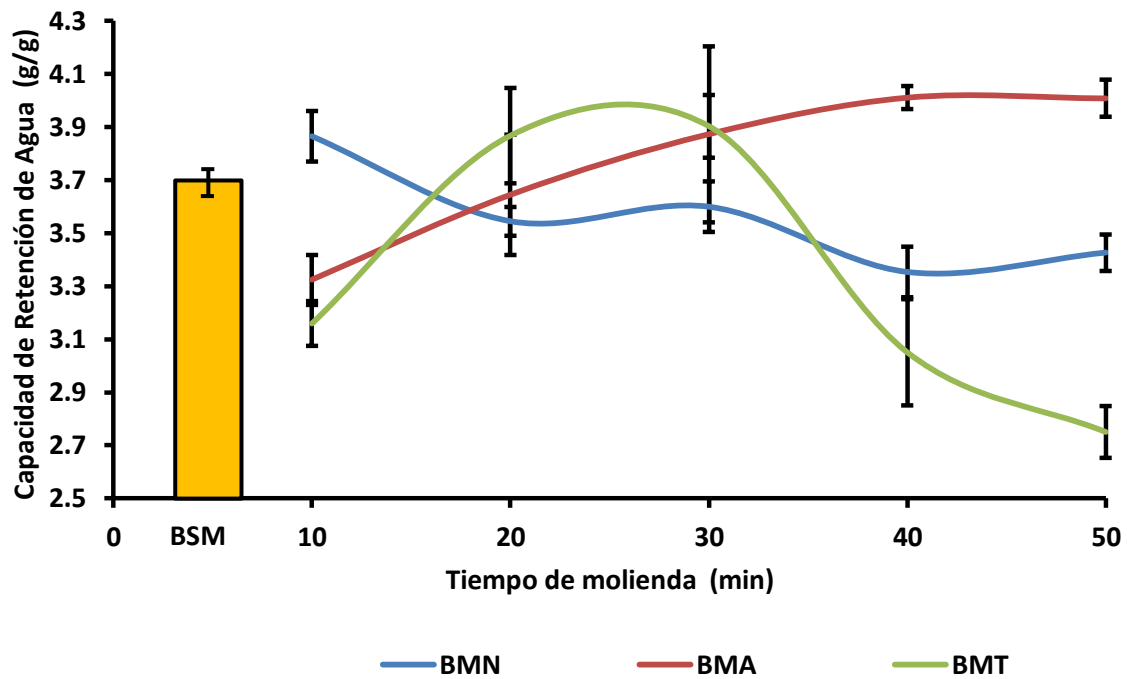


Figura 18. Capacidad de Retención de Agua de los bagazos micronizados con diferentes materiales y tiempos de molienda y el bagazo sin modificar. BSM= Bagazo Sin Modificar; BMN= Bagazo Micronizado con Nitruro; BMA= Bagazo Micronizado con Acero; BMT= Bagazo Micronizado con Tungsteno.

6.2.2 Capacidad de Adsorción de Aceite

En la Figura 19 se representan los valores de la capacidad de adsorción de aceite. Se observa que el bagazo de chayotextle sin micronizar presentó una capacidad de adsorción de aceite de 2.64 g de aceite por g de muestra, las muestras micronizadas presentaron diferencias significativas con respecto a este valor. Montiel-Gutiérrez, (2016), reportó valores similares en harinas nativas de chayotextle (2.3 g de aceite/g de muestra) y en almidones de chayotextle (1.4 g de aceite/g de muestra).

Por otro lado Chau et al., (2006) realizaron una micronización a fracciones de fibra insoluble preparadas de cáscara de naranja vs celulosa, encontrando un valor de capacidad de adsorción de aceite de 2.70 g/g y 2.63 g/g respectivamente. Las muestras micronizadas, no presentaron diferencias significativas entre los diferentes materiales y los tiempos de molienda, a excepción del minuto 20 en el cual se pueden observar diferencias estadísticas significativas entre las muestras micronizadas con diferentes materiales, siendo la muestra micronizada con nitruro de silicio la que obtuvo el valor más alto (2.07 g de aceite/g de muestra) de capacidad de adsorción de aceite y la muestra en la que se utilizó acero inoxidable mostró el valor más bajo (1.62 g de aceite/g de muestra). En cuanto a la cantidad de adsorción de aceite, se han reportado valores (2.2 g de aceite/g de muestra) similares pero para la fibra dietética de salvado de mijo (Chu et al., 2019). Sin embargo, también algunos estudios han reportado resultados ambiguos o incluso contradictorios con respecto a la relación entre la reducción del tamaño de partícula y la CAA de la fibra dietética, estas discrepancias podrían explicarse por las diferencias en las fuentes de origen de la fibra, así como por las diferentes técnica utilizada para la reducción de partículas (Wang, Sun, Raddatz, & Chen, 2013).

Dentro de la industria alimentaria, la capacidad de absorción de aceite es una propiedad funcional importante, debido a que ayuda a mejorar la sensación en la boca y la retención del sabor, mejora la palatabilidad y extiende la vida útil de los productos de panadería o productos cárnicos cuando se desean absorciones de grasa; además la mejora que proporciona la capacidad de absorción de aceite se ha atribuido a las propiedades hidrofóbicas mejoradas de las proteínas y un mayor rendimiento de unión a moléculas de grasa de las cadenas laterales de los aminoácidos no polares (Montiel-Gutiérrez, 2016). Un alto contenido de CAA en la fibra dietética, sugiere su uso potencial como ingrediente rico en fibra en alimentos que requieren retención de aceite, así como sus posibles efectos sobre la absorción de colesterol (Chau et al., 2006).

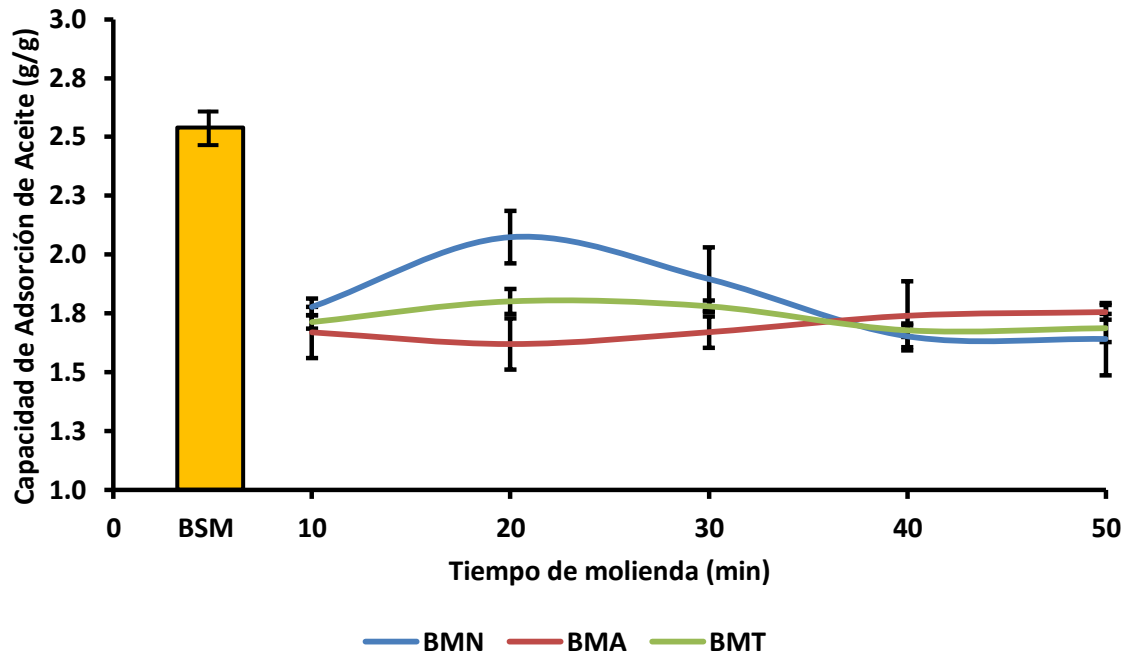


Figura 19. Capacidad de Adsorción de Aceite de los bagazos micronizados con diferentes materiales y tiempos de molienda y el bagazo sin modificar. BSM= Bagazo Sin Modificar; BMN= Bagazo Micronizado con Nitruro; BMA= Bagazo Micronizado con Acero; BMT= Bagazo Micronizado con Tungsteno.

6. 2.3 Solubilidad de agua

El porcentaje de solubilidad en agua de las muestras de bagazo de chayotextle, se muestran en la Figura 20. En esta Figura se puede observar que el BSM presento una solubilidad de 4.66%, al igual que el BMN, porcentaje que se mantuvo a pesar de haber incrementado los tiempos de molienda. No obstante, también se puede observar que la solubilidad de las muestras fue afectada por cada uno de los tratamientos empleados, debido a que la solubilidad del BMA y del BMT fue incrementado conforme se incrementó el tiempo de molienda y en el caso del BMT, presento siempre los mayores valores de solubilidad.

El índice de solubilidad en agua es un parámetro que mide el grado de degradación total que puede sufrir la muestra (Fiorda et al., 2013). Este comportamiento coincide con lo que se observó en las micrografías de las muestras micronizadas (Figuras 5-8), donde se mostró que cada uno de los tratamientos utilizados, modificaron y/o degradaron los gránulos de almidón y las partículas de fibra que componen al bagazo de chayotextle. Urzúa-Valenzuela (2018) mencionó que en el caso del almidón, es común que los gránulos dañados tiendan a aumentar la solubilidad. Por su parte, Xia, Li, Wei, Wang, & Lin (2017) reportaron que la micronización del almidón de yuca, aumentó el índice de solubilidad de 15 a 85 %, después de 60 minutos de molienda.

Daou & Zhang (2012) Indicaron que el tratamiento de micronización reduce el tamaño de partícula y aumenta significativamente ($p < 0.05$) la solubilidad de agua en comparación con otros tratamientos sobre fibras dietéticas derivadas del salvado de arroz desgrasado. Chau, Wang, & Wen (2007) Reportaron que la micronización podría aumentar enormemente la porosidad y la atracción capilar de la fibra y, en consecuencia, dar lugar a una redistribución de la composición de la fibra de la fracción insoluble a la soluble. Huang et al., (2010) reportaron que conforme el tamaño de partícula se reduce debido a la micronización, aumentó la solubilidad en muestras de cáscara de batata, cáscara de taro y cáscara de ñame, y que probablemente el proceso generó un tamaño de partícula menor, aumentando enormemente la porosidad y la atracción capilar de la fibra y, en consecuencia, una redistribución de los componentes de la fibra de la fracción insoluble a la soluble.

De acuerdo a lo que se mencionó anteriormente y a los resultados presentados en este trabajo, donde el bagazo de chayotextle contiene gránulos de almidón y partículas de fibra, la solubilidad fue afectada por las condiciones empleadas en cada uno de los tratamientos de micronización,

como se mostró en las micrografías, donde se observaron diferentes niveles de degradación, tanto de los gránulos de almidón, como de las partículas de fibra.

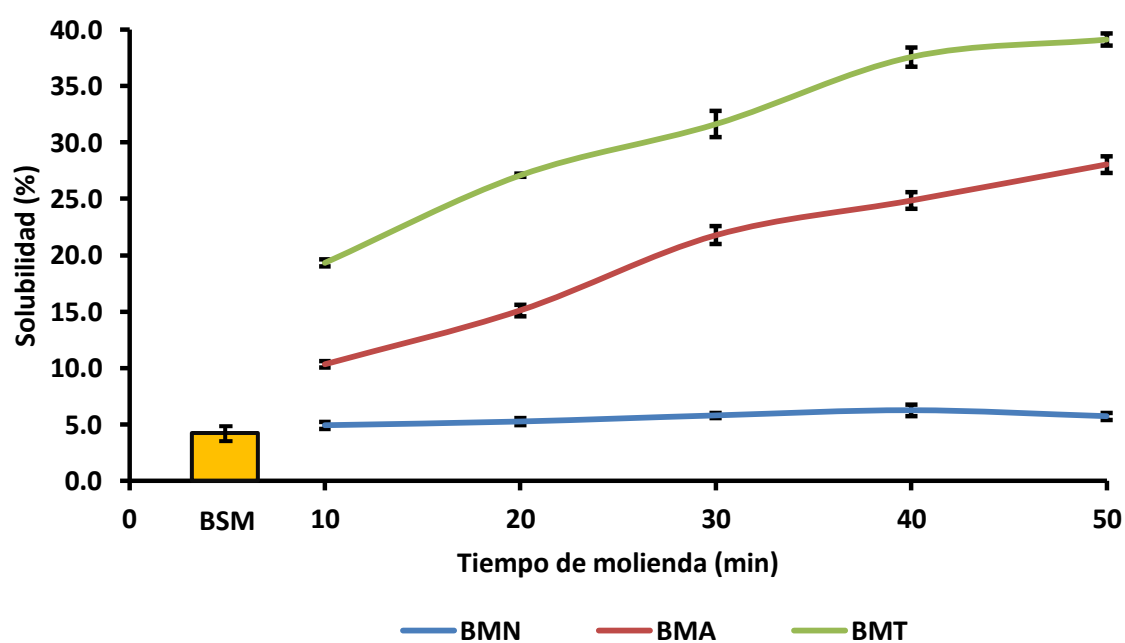


Figura 20. Solubilidad de agua de los bagazos micronizados con diferentes materiales y tiempos de molienda y el bagazo sin modificar. BSM= Bagazo Sin Modificar; BMN= Bagazo Micronizado con Nitruro; BMA= Bagazo Micronizado con Acero; BMT= Bagazo Micronizado con Tungsteno.

6.2.4 Perfil de hinchamiento

El perfil de hinchamiento del bagazo de chayotextle sin modificar y las muestras micronizadas se muestran en la Figura 21. El BSM presentó un poder de hinchamiento de 3.80 mL de agua/gramo de muestra. Un comportamiento similar lo presentó el BMN, donde se muestra que a los 10 min de molienda el poder de hinchamiento fue ligeramente menor al BSM, y conforme se aumentó el tiempo de molienda, la muestra tuvo también un ligero incremento, pero que en general no rebasó los 3.8 mL de agua por gramo de muestra. Para el BMA, a los 10 min se presentó un poder de hinchamiento de 4.8 mL de agua/g de muestra, valor que fue aumentando hasta 10.33 mL de agua/g de muestra a los 40 min de molienda sin presentar cambios estadísticamente significativos a los 50 min de micronización. En el caso del BMT a los 10 min se presentó el valor (7.20 mL de agua/g de muestra) más alto de poder de hinchamiento, mientras que el poder de hinchamiento más alto lo presentó a los 20 min de molienda y fue similar al del BMA obtenido a los 40 min. Posterior a los 20 min el BMT presentó una disminución en el poder de hinchamiento, hasta llegar a los 7.58 mL de agua/g de muestra.

Valores similares a los obtenidos en este trabajo han sido reportados pero para fibra dietética de comino desgrasado (3.75 mL de agua/g de muestra), obtenida mediante extracción alcalina, y cuando dicha fibra fue extraída mediante hidrólisis enzimática el valor fue de 3.49 mL de agua/g de muestra.

El perfil de hinchamiento coincide con el comportamiento que presentaron los bagazos de chayotextle en la CAA y esto puede estar relacionado también con el daño que presentaron tanto los gránulos de almidón de las partículas de la fibra. Ya que se ha reportado que el tamaño de partícula y los grupos polares libres pueden contribuir a la alta capacidad de hinchamiento en las muestras, principalmente si se habla de fibra. Por otro lado también se ha reportado que los componentes de la muestra pueden interactuar con el agua a través de dos mecanismos: (1) agua retenida en estructuras capilares como resultado de la resistencia a la tensión superficial y (2) agua retenida por enlaces de hidrógeno y formas dipolo (Ma & Mu, 2016).

La capacidad de hinchamiento de una muestra depende de las características de los componentes individuales y de su estructura física (porosidad y cristalinidad) (Raghavendra et al., 2006). Para el caso de almidones proporciona evidencia de la magnitud de la interacción entre las cadenas de almidón dentro de los dominios amorfos y cristalinos (Urzúa-Valenzuela, 2018). Por lo tanto, como las muestras de bagazo están compuestas principalmente de almidón y fibra, el poder de

hinchamiento puede depender tanto de los componentes como de las condiciones empleadas durante la micronización.

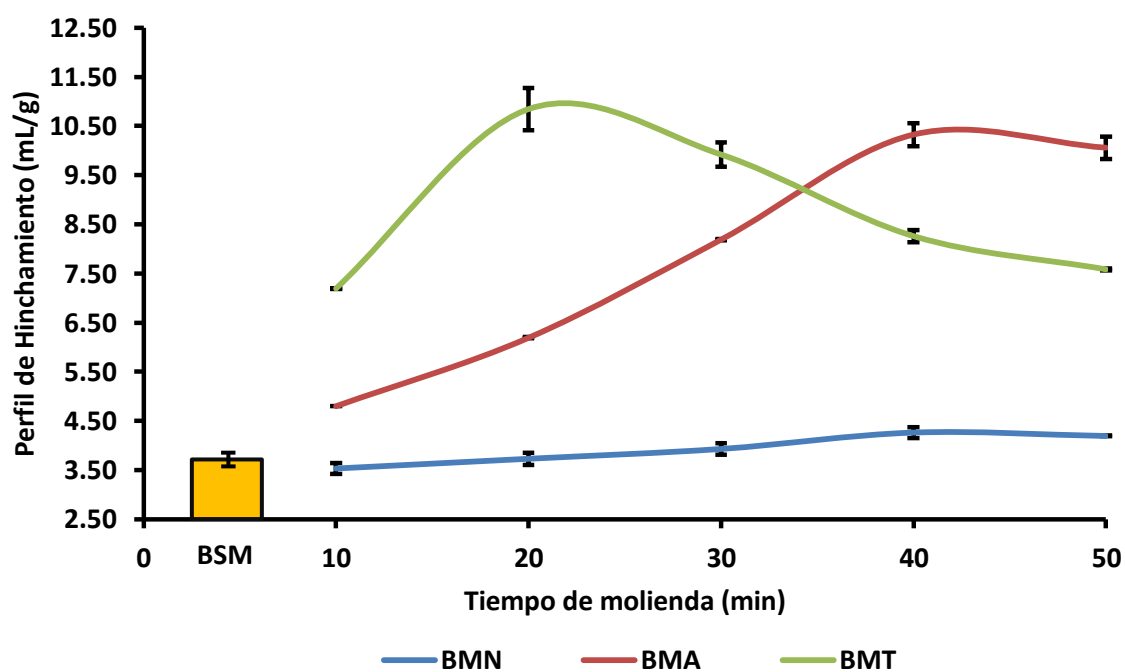


Figura 21. Perfil de hinchamiento de los bagazos micronizados con diferentes materiales y tiempos de molienda y el bagazo sin modificar. BSM= Bagazo Sin Modificar; BMN= Bagazo Micronizado con Nitruro; BMA= Bagazo Micronizado con Acero; BMT= Bagazo Micronizado con Tungsteno.

6.3 Propiedades fisiológicas

6.3.1 Capacidad de adsorción de glucosa

La capacidad de adsorción de glucosa (CAG), del BSM y las muestras micronizadas se muestran en la Figura 22. Donde se puede observar que la CAG no presenta diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos de micronización que se utilizaron para modificar el bagazo de chayotextle. Únicamente se aprecia un aumento significativo cuando se incrementó la concentración de glucosa. Peerajit, Chiewchan, & Devahastin (2012), reportaron una CAG constante para fibras modificadas y no modificadas obtenidas a partir de residuos de lima, indicando que el tamaño de partícula, no tuvo ningún efecto significativo sobre los valores de CAG. Por otro lado, cuando compararon tamaños de partícula similares, los resultados tampoco tuvieron un efecto significativo sobre la CAG. El valor de la CAG que reportaron para muestras modificadas y no modificadas fue de 4.78 mmol/g, cuando la concentración de glucosa fue de 50 mmol/L, mientras que para la concentración de 200 mmol/L el valor de la CAG incremento a 18mmol/g, tanto para las muestras modificadas como para las no modificadas, estos valores reportados para fibras extraídas residuos de lima, son similares a los obtenidos en este trabajo.

Chau et al. (2007), reportaron valores de 11 mmol/g para fibras dietéticas insolubles de zanahoria cuando usaron una concentración de 100 mmol/L y esta aumento hasta un 205%, cuando la muestra fue micronizada, indicando que este incremento en el CAG pudo haberse debido a la mayor área superficial y porosidad de la fibra, lo que permitió una mayor adsorción de glucosa.

Ou et al., (2001) evaluaron la capacidad que tiene el almidón resistente de maíz retrogrado, para adsorber glucosa a diferentes concentraciones de glucosa (0.5 – 100 mmol/L), donde a la concentración mínima de 0.5 mmol/L el almidón no presentó ningún efecto, mientras que a una concentración de 1 mmol/L la CAG fue de 0.024mmol/g, lo cual sugirió que la glucosa en el intestino delgado podría mantenerse en una baja concentración. Por otro lado, también reportaron que cuando se elevó la concentración de glucosa a 100 mmol/L, la CAG del almidón resistente incremento hasta 0.413 mmol/g.

Chau et al., (2004) evaluaron la capacidad de adsorción de glucosa de la celulosa a diferentes concentraciones, ellos reportaron valores similares a los obtenidos para el bagazo de chayotextle, los cuales fueron de 4.39, 8.45 y 17.90 mmol/g a 50, 100 y 200 mmol/L de glucosa,

respectivamente. Incluso a una concentración de 10 mmol/L, aún puede adsorber una pequeña cantidad de glucosa. Por lo tanto, especularon que la fibra insoluble podría ayudar a retener la glucosa en la luz intestinal, incluso a una concentración baja de glucosa.

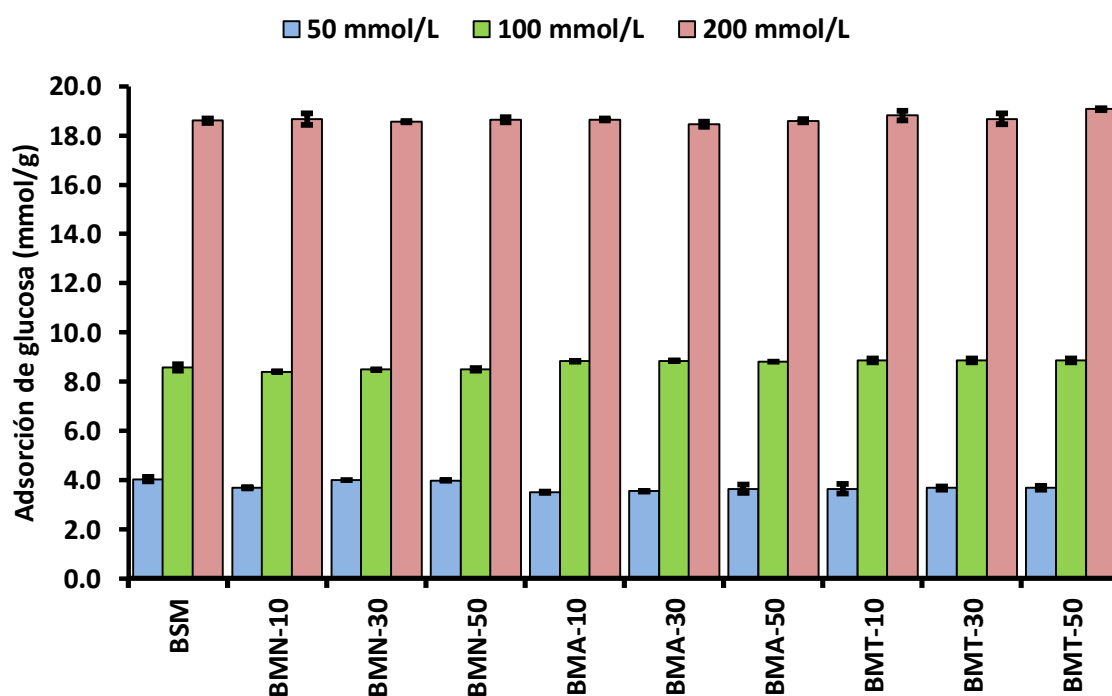


Figura 22. Capacidad de adsorción de glucosa a diferentes concentraciones de los bagazos micronizados con diferentes materiales y tiempos de molienda y el bagazo sin modificar. BSM= Bagazo Sin Modificar; BMN-10 = Bagazo Micronizado con Nitruro a diez minutos; BMN = Bagazo Micronizado con Nitruro a 30 minutos; BMN-50 = Bagazo Micronizado con Nitruro a 50 min; BMA-10 = Bagazo Micronizado con Acero a 10 min; BMA = Bagazo Micronizado con Acero a 30 minutos; BMA-50 = Bagazo Micronizado con Acero a 50 min; BMT = Bagazo Micronizado con Tungsteno a 30 minutos; BMT-50 = Bagazo Micronizado con Tungsteno a 50 min.

7. CONCLUSIONES

El proceso de micronización generó cambios en la estructura del bagazo de modo que afectó significativamente sus propiedades fisicoquímicas, funcionales y fisiológicas. En conjunto los resultados de este trabajo indican que:

- Al aumentar los tiempos de micronización se genera una tendencia a la formación de aglomerados, los cuales se corroboran con la distribución del tamaño de partícula, principalmente cuando se utiliza acero inoxidable y carburo de tungsteno.
- A tiempos mayores de micronización se obtuvieron cambios estructurales que disminuyeron significativamente la cristalinidad, el perfil de viscosidad, fibra cruda y la capacidad de retención de aceite, sin embargo el índice de solubilidad, el perfil de hinchamiento y capacidad de retención de agua, aumentaron significativamente.
- El bagazo presenta una buena capacidad de adsorción de glucosa, dicha capacidad no se vio afectada con los diferentes materiales y tiempos de molienda.

Esto muestra que la micronización es un método adecuado para la modificación del bagazo de chayotextle, (*Sechium edule*) para su posible aplicación en la industria alimentaria. Las diferencias en las propiedades confirman la viabilidad de las harinas micronizadas a base del bagazo de chayotextle, como ingredientes innovadores no convencionales, proporcionando un valor agregado a estos bagazos generados durante el aislamiento del almidón, para su posible aplicación en la industria de los alimentos.

8. BIBLIOGRAFÍA

- AOAC (Association of Oficial Analytical Chemists). 1990. Official Methods of Analysis. Virginia,1000-1050.
- BeMiller, J. N. & Huber, K.C. (2012). Starch. *Encyclopedia of Industrial Chemistry Ullmann's*, 34, 113-141. <https://doi.org/10.1002/14356007.a25>
- Broseghini, M., Gelisio, L., Incau, M. D., Ricardo, C. L. A., Pugno, N. M., &Scardi, P. (2016). Modeling of the planetary ball-milling process: The case study of ceramic powders. *Journal of the European Ceramic Society*, 36(9), 2205–2212.<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2015.09.032>
- Cardoso, B.V.S.; Freire, J.A.P.; DE Oliveira, G.A.L.; DE Souza, I.G.M.; DE Freitas, R.M.; Nunas, L.C.C. (2015). Prospecção tecnológica e científica de alimentos probióticos funcionais na forma de barra de cereais. *Revista GEINTEC*, 5, 2273-2283.
- Charrondière, U. R., Stadlmayr, B., Rittenschober, D., Mouille, B., Nilsson, E., Medhammar, E., Olango, T., Eisenwagen, S., Persijn D., Ebanks, K. Verena Nowak, V., Du, J. & Burlingame, B. (2013). FAO/INFOODS food composition database for biodiversity. *Food Chemistry*, 140, 408–412. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.08.049>
- Chau, C. F., Chen, C. H., & Lin, C. Y. (2004). Insoluble fiber-rich fractions derived from Averrhoa carambola: Hypoglycemic effects determined by in vitro methods. *LWT-Food Science and Technology*, 37(3), 331–335. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2003.10.001>
- Chau, C., Wang, Y., & Wen, Y. (2007). Different micronization methods significantly improve the functionality of carrot insoluble fibre. *Food Chemistry*, 100, 1402–1408. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.11.034>
- Chau, C., Wen, Y., & Wang, Y. (2006). Effects of micronisation on the characteristics and physicochemical properties of insoluble fibres. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86, 2380–2386. <https://doi.org/10.1002/jsfa>

- Chen, J., Gao, D., Yang, L., & Gao, Y. (2013). Effect of microfluidization process on the functional properties of insoluble dietary fiber. *Food Research International*, 54(2), 1821–1827. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.09.025>
- Chen, J., Gao, D., Yang, L., & Gao, Y. (2013). Effect of microfluidization process on the functional properties of insoluble dietary fiber. *Food Research International*, 54(2), 1821–1827. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.09.025>
- Chen, J., Gao, D., Yang, L., & Gao, Y. (2013). Effect of microfluidization process on the functional properties of insoluble dietary fiber. *Food Research International*, 54(2), 1821–1827. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.09.025>
- Chen, T., Zhang, M., Bhandari, B., & Yang, Z. (2017). Micronization and Nanosizing of particles for an Enhanced Quality of Food: a Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(6), 993-1001.
- Chu, J., Zhao, H., Lu, Z., Lu, F., Bie, X., & Zhang, C. (2019). Improved physicochemical and functional properties of dietary fiber from millet bran fermented by *Bacillus natto*. *Food Chemistry*, 294, 79–86. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.05.035>
- Comisión Europea, 2005. Disponible en: https://ec.europa.eu/comm/agriculture/eval/reports/amidon/sum_es.pdf, consultado en 2020
- Cury, R. K., Aguas, M. Y., Martinez, M. A., Olivero, V. R., & Chams, C. L. (2017). Residuos agroindustriales su impacto, manejo y aprovechamiento. *Revista colombiana de ciencia animal*, 9, 122–132. <https://doi.org/10.24188/recia.v9.nS.2017.530>
- Daou, C., & Zhang, H. (2012). Study on Functional Properties of Physically Modified Dietary Fibres Derived from Defatted Rice Bran. *Journal of Agricultural Science*, 4(9), 85–97. <https://doi.org/10.5539/jas.v4n9p85>
- Dussán-Sarria, S., Hurtado-Hurtado, D., & Camacho-Tamayo, J.H. (2019). Granulometría, propiedades funcionales y propiedades de color de las harinas de quinua y chontaduro. *Información tecnológica*, 30(5), 3-10. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000500003>

- Fernández-Bañares F. & Gassull-Duro, MA. (1999). Revisión y consenso en terapia nutricional: nutrición en enfermedad inflamatoria intestinal. *Nutr Hosp. Suppl* 2:71S-80S. Spanish. PMID: 10548029.
- Fiorda, F. A., Soares, M., & Júnior, S. (2013). Farinha de bagaço de mandioca: aproveitamento de subproduto e comparação com fécula de mandioca . 408–416.
- Fiorda, F. A., Soares, M., Júnior, S., Silva, S.A., Souto, L.R.F. & Grossmann, M.V.E. (2013). Farinha de bagaço de mandioca : aproveitamento de subproduto e comparação com fécula de mandioca. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 43(4), 408–416.
- Guilbot, A., and C. Mercier. 1985. Starch. In: The Polysaccharides. Aspinall, O. (ed.). Academic Press. New York. USA. 209 -282.
- Helkar, P. B., Sahoo, A. K., & Patil, N. J. (2016). Review: Food Industry By-Products used as a Functional Food Ingredients. *International Journal of Waste Resources*, 6(3), 1-6. <https://doi.org/10.4172/2252-5211.1000248>
- Hernández-Uribe, J. P., Agama-Acevedo, E., Gonzalez-Soto, R. A., Bello-Pérez, L. A., & Vargas-Torres, A. (2011). Isolation and characterization of Mexican chayote tuber (*Sechium edule Sw.*) starch. *Starch/Staerke*, 63(1), 32–41. <https://doi.org/10.1002/star.201000078>
- Huang, C. C., Chen, Y. F., & Wang, C. C. R. (2010). Effects of micronization on the physico-chemical properties of peels of three root and tuber crops. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90(5), 759–763. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3879>
- Huang, C. C., Chen, Y. F., & Wang, C. C. R. (2010). Effects of micronization on the physico-chemical properties of peels of three root and tuber crops. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90(5), 759–763. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3879>
- Huang, C. C., Chen, Y. F., & Wang, C. C. R. (2010). Effects of micronization on the physico-chemical properties of peels of three root and tuber crops. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90(5), 759–763. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3879>
- Jasko, A.C.; DE Andrade, J.; Campos, F.B.; Padilha, L.; DE Pauli, R.B.; Quasti, L.B.; Schnitzler, E.; Demiate, I.M. 2011. Caracterização físico-química de bagaço de mandioca in natura e após tratamento hidrolítico. *Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial*, 5, 427-441.

- Jiménez-Hernández, J., Salazar-Montoya, J. A., & Ramos-Ramírez, E. G. (2007). Physical, chemical and microscopic characterization of a new starch from chayote (*Sechium edule*) tuber and its comparison with potato and maize starches. *Carbohydrate Polymers*, 68(4), 679–686. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2006.07.035>
- Kim, H.J., Lee, S., Kim, J., Mitchell, R.J., Lee, J.H. (2013). Environmentally friendly pretreatment of plant biomass by planetary and attrition milling. *Bioresour. Technol*, 144, 50–56.
- Kim, S.M., Dien, B.S., Tumbleson, M.E., Rausch, K.D., Singh, V., 2016. Improvement of sugar yields from corn stover using sequential hot water pretreatment and disk milling. *Bioresour. Technol*, 216, 706–713.
- Lee, J. H., Kwon, J. H., Kim, T. H., & Choi, W. Il. (2017). Impact of planetary ball mills on corn stover characteristics and enzymatic digestibility depending on grinding ball properties. *Bioresource Technology*, 241, 1094–1100. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.044>
- Liu, T. Y., Ma, Y., Yu, S. F., Shi, J., & Xue, S. (2011). The effect of ball milling treatment on structure and porosity of maize starch granule. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 12(4), 586–593. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2011.06.009>
- Loubes, M. A., & Tolaba, M. P. (2014). Thermo-mechanical rice flour modification by planetary ball milling. *LWT - Food Science and Technology*, 57(1), 320–328. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.12.048>
- Ma, M. M., & Mu, T. H. (2016). Effects of extraction methods and particle size distribution on the structural, physicochemical, and functional properties of dietary fiber from deoiled cumin. *Food Chemistry*, 194, 237–246. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.07.095>
- Ma, Z., Boye, JI, Simpson, BK, Prasher, SO, Monpetit, D. y Malcolmson, L. (2011). Thermal processing effects on the functional properties and microstructure of lentil, chickpea, and pea flours. *Food Research International*, 44 (8), 2534-2544. doi: 10.1016 / j.foodres.2010.12.017
- Mauro, A.K.; Silva, V.L.M.; Freitas, M.C.J. (2010). Caracterização física, química e sensorial de cookies confeccionados com Farinha de Talo de Couve (FTC) e Farinha de Talo de Espinafre (FTE) ricas em fibra alimentar. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 30, 719-728.

- Megazyme International Ireland, 2019. Disponible en: <https://www.megazyme.com/search?sSearch=starch&p=2>, consultado en 2020, 27 de junio.
- Montiel-Gutiérrez, E.F. (2016). *Caracterización de harinas y almidones de Oca (Oxalis tuberosa) y Chayotextle (Sechium edule) para su posible aplicación en la industria alimentaria*. (Tesis inédita de maestría). Instituto de ciencias agropecuarias, Tulancingo de Bravo, Hidalgo, México.
- Morales-Toledo, L. I. 2018. *Efecto de la molienda mecánica en las propiedades fisicoquímicas de fuentes de carbono con posible uso en producción de hidrógeno por fermentación*. (Tesis inédita de maestría). Universidad del Papaloapan, Tuxtepec, Oaxaca, México.
- Narayana, S. M. (2002). Physicochemical and Functional Properties of Tropical Tuber Starches : A Review. *Starch/Stärke*, 54, 559–592.
- Ou, S., Kwok, K., Li, Y., & Fu, L. (2001). In vitro study of possible role of dietary fiber in lowering. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49, 1026-1029. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.10.120>
- Palavecino, P. M., Penci, M. C., & Ribotta, P. D. (2019). Effect of planetary ball milling on physicochemical and morphological properties of sorghum flour. *Journal of Food Engineering*, 262, 22–28. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.05.007>
- Peerajit, P., Chiewchan, N., & Devahastin, S. (2012). Effects of pretreatment methods on health-related functional properties of high dietary fibre powder from lime residues. *Food Chemistry*, 132(4), 1891–1898. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.12.022>
- Pimentel, T., & Klososki, S. J. (2016). Barra de cereal adicionada de bagaço de mandioca : composição química e aceitação sensorial. *Brazilian Journal of Food Research*, 7(2), 42-52. <https://doi.org/10.14685/rebrapa.v7n2.3520>
- Raghavendra, S. N., Ramachandra Swamy, S. R., Rastogi, N. K., Raghavarao, K. S. M. S., Kumar, S., & Tharanathan, R. N. (2006). Grinding characteristics and hydration properties of coconut residue: A source of dietary fiber. *Journal of Food Engineering*, 72(3), 281–286. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.12.008>

- Ramadhan, K., & Foster, T. J. (2018). Effects of ball milling on the structural, thermal, and rheological properties of oat bran protein flour. *Journal of Food Engineering*, 229, 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.10.024>
- Roa, D. F., Santagapita, P. R., Buera, M. P., & Tolaba, M. P. (2014). Ball Milling of Amaranth Starch-Enriched Fraction. Changes on Particle Size, Starch Crystallinity, and Functionality as a Function of Milling Energy. *Food and Bioprocess Technology*, 7(9), 2723–2731. <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1283-0>
- Roa-Acosta, D. F. (2015). *Métodos de molienda seca y húmeda en molino planetario para la obtención y caracterización de fracciones de amaranto y su aplicación como agente encapsulante*. (Tesis de Doctorado). Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.
- Robertson, J. A., & Eastwood, M. A. (1981). An examination of factors which may affect the water holding capacity of dietary fibre. *British Journal of Nutrition*, 45(1), 83–88. <https://doi.org/10.1079/bjn19810079>
- Sarup, R., Kaur, N., & Kennedy, J. F. (2019). Pullulan production from agro-industrial waste and its applications in food industry: A review. *Carbohydrate Polymers*, 217, 46–57. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.04.050>
- Saval, S. (2012). Aprovechamiento de Residuos Agroindustriales: Pasado , Presente y Futuro. *Biotecnología*, 16 (2), 14–46.
- Silva, I. Q.; Oliveira, B. C. F.; Lopes, A. S.; Pena, R. S. (2009). Cereal bar with the industrial residue of passion fruit. *Alim. Nutr., Araraquara*, 20 (2), 321-329.
- Souza, C. B. De., Jonathan, M., Saad, S. M. I., Schols, H. A. & Venema, K. (2018). Characterization and in vitro digestibility of by- products from Brazilian food industry: cassava bagasse, orange bagasse and passion fruit peel. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fiber*, 16, 90-99. <https://doi.org/10.1016/j.bcdf.2018.08.001>
- Sowbhagya, H. B., Suma, P. F., Mahadevamma, S., & Tharanathan, R. N. (2007). Spent residue from cumin - a potential source of dietary fiber. *Food Chemistry*, 104(3), 1220–1225. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.01.066>

- Urzúa-Valenzuela, M. 2018. *Estudio del efecto de la molienda mecánica de alta energía sobre las propiedades del almidón de papa y maíz*. (Tesis inédita de maestría), Universidad del Papaloapan, Tuxtepec, Oaxaca, México.
- Valdez-Vázquez, Acevedo-Benítez J A & Hernández-Santiago C. (2010). Distribution and potential of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico. *Renew. Sust. Energy Rev.* 14: 2147-2153.
- Vieira, E. F., Pinho, O., Ferreira, I. M. P. L. V. O., & Delerue-Matos, C. (2019). Chayote (*Sechium edule*): A review of nutritional composition, bioactivities and potential applications. *Food Chemistry*, 275, 557–568. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.146>
- Vilhalva, D.A.A.; Soares Junior, M.S.; Moura, C.M.A.; Caliari, M.; Souza, T.A.C.; Silva, F.A. (2011). Aproveitamento da farinha de casca de mandioca na elaboração de pão de forma. *Revista do Instituto Adolfo Lutz*, 70, 514-521.
- Villarroel, Pía, Gómez, Camila, Vera, Camila, & Torres, Jairo. (2018). Almidón resistente: Características tecnológicas e intereses fisiológicos. *Revista chilena de nutrición*, 45(3), 271-278. <https://dx.doi.org/10.4067/s0717-75182018000400271>
- Wang, T., Sun, X., Raddatz, J., & Chen, G. (2013). Effects of microfluidization on microstructure and physicochemical properties of corn bran. *Journal of Cereal Science*, 58(2), 355–361. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2013.07.003>
- Wang, T., Sun, X., Zhou, Z., & Chen, G. (2012). Effects of microfluidization process on physicochemical properties of wheat bran. *Food Research International*, 48(2), 742–747. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.06.015>
- Wani, IA, Sogi, DS, Wani, AA y Gill, BS (2013). Physico-chemical and functional properties of flours from Indian kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars. *LWT - Food Science and Technology*, 53 (1), 278–284. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.02.006>
- Wen, Y., Niu, M., Zhang, B., Zhao, S., & Xiong, S. (2017). Structural characteristics and functional properties of rice bran dietary fiber modified by enzymatic and enzyme-micronization treatments. *LWT - Food Science and Technology*, 75, 344–351. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.09.012>

- Xia, W., Li, J. H., Wei, X. Y., Wang, F., & Lin, Y. Y. (2017). Effect of micronization on the solubility, viscosity and structural properties of tapioca starch. *Materials Science and Engineering*, 231(1), 0–4. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/231/1/012128>
- Xu, F., Shi, Y., & Wang, D. (2017). X-ray scattering studies of lignocellulosic biomass : A review. *Carbohydrate Polymers*, 94(2), 904–917. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.02.008>
- Zaidul, I. S. M., Absar, N., Kim, S., & Suzuki, T. (2008). DSC study of mixtures of wheat flour and potato, sweet potato, cassava and yam starches. *Journal Food engineering*, 86, 68–73. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.09.011>
- Zhang, H., Wang, H., Cao, X., & Wang, J. (2018). Preparation and modification of high dietary fiber flour: A review. *Food Research International*, 113, 24–35. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.06.068>
- Zhang, Z., Zhao, S., & Xiong, S. (2010). Morphology and physicochemical properties of mechanically activated rice starch. *Carbohydrate Polymers*, 79(2), 341–348. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.08.016>
- Zhao, X. Y., Zhu, H. T., Zhang, G. X., & Tang, W. D. (2015). Effect of superfine grinding on the physicochemical properties and antioxidant activity of red grape pomace powders. *Powder Technology*, 286, 838-844.
- Zobel, H. F., & Illinois, U. S. A. (1988). Starch Crystal Transformations and Their Industrial Importance. *Starch–stärke*, 40, 1-7. <https://doi.org/10.1002/star.19880400102>