

UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

Campus Tuxtepec

Efecto de la hidrólisis enzimática en el contenido de fibra dietética soluble, propiedades fisicoquímicas, funcionales, reológicas y estructurales del bagazo de piña (*Ananas comosus*).

TESIS

Para obtener el título de:

INGENIERO EN ALIMENTOS

Presenta:

Edith Rivera Cruz

Director:

Dra. Rubí Guadalupe Utrilla Coello

San Juan Bautista Tuxtepec, Oaxaca. Marzo, 2019.



UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

CAMPUS TUXTEPEC

San Juan Bautista Tuxtepec, Oax., a 21 de Enero de 2019

LIC. YESENIA BARRIENTOS ARENAL
JEFA DEL DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES

Sirva la presente para informarle que los miembros de la Comisión Revisora del trabajo de tesis de la **C. EDITH RIVERA CRUZ** pasante de la carrera de Ingeniería en Alimentos con número de matrícula **12070044** revisó y aprobó el trabajo de investigación denominado **"EFECTO DE LA HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA EN EL CONTENIDO DE FIBRA DIETÉTICA SOLUBLE, PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS, FUNCIONALES, REOLÓGICAS Y ESTRUCTURALES DEL BAGAZO DE PIÑA (*Ananas comosus*)"** mismo que será presentado como prueba escrita del acto de recepción profesional, para obtener el Título de Ingeniero en Alimentos.

Por lo anterior y de acuerdo a los lineamientos institucionales, se le da trámite legal para que proceda a su impresión el trabajo presentado.



Atentamente
terra uberrima, mens aperta
Bou Lo-tama, chí jí jú


M.C. MIGUEL ÁNGEL GARCÍA MUÑOZ
JEFE DE CARRERA
INGENIERÍA EN ALIMENTOS



c.c.p. M.C. Héctor López Arjona / Vicerrector Académico. Para su conocimiento
c.c.p. Archivo



UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

CAMPUS TUXTEPEC

San Juan Bautista Tuxtepec, Oax., a 21 de Enero de 2019

LIC. YESENIA BARRIENTOS ARENAL
JEFA DEL DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES

Por medio de la presente le informo que la Jefatura de Carrera a mi cargo, ha tenido a bien designar como sinodales a los profesores investigadores:

TITULARES:

Dr. Alejandro Aparicio Saguilán	Presidente
Dr. Andrés Aguirre Cruz	Secretario
Dra. Rubí Guadalupe Utrilla Coello	Vocal

SUPLENTE:

M.C. Miguel A. Garcia Muñoz
Dra. Delia E. Páramo Calderón

Para fungir como sinodales en el examen profesional del **C. EDITH RIVERA CRUZ**, pasante de la carrera de Ingeniería en Alimentos con número de matrícula **12070044** para obtener el Título de Ingeniero en Alimentos.

Sin otro asunto, reciba un cordial saludo.

Atentamente
terra uberrima, mens aperta
B. Zu Lo-tama, chí jí jú

M.C. MIGUEL ÁNGEL GARCÍA MUÑOZ
JEFE DE CARRERA
INGENIERÍA EN ALIMENTOS



INGENIERIA EN
ALIMENTOS
CAMPUS TUXTEPEC



c.c.p. M.C. Héctor López Arjona / Vicerrector Académico. Para su conocimiento
c.c.p. Archivo

HOJA DE ORIGINALIDAD

El presente trabajo no ha sido aceptado o empleado para el otorgamiento de título o grado diferente o adicional al actual. La tesis es resultado de las investigaciones del autor, excepto donde se indican las fuentes de información consultadas. El autor otorga su consentimiento a la **UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN** para la reproducción del documento con el fin del intercambio bibliotecario siempre y cuando se indique la fuente.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por haberme permitido vivir hasta este día, haberme guiado a lo largo de mi vida, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por ser mi apoyo incondicional. Gracias por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad.

A mis tíos y tías, Juan, José, Isabel y Carmen, por su amor, consejos y apoyo incondicional brindado. Los quiero mucho, Dios los bendiga.

A mi novio y amigo Frank, por su paciencia, su apoyo, cuidados y sobre todo por su amor. Gracias por escucharme siempre y ser ese motor que a veces requiero. Te amo.

A la Dra. Rubí G. Utrilla Coello, muchísimas gracias por el apoyo, paciencia y dedicación. Además, gracias por enseñarme disciplina y compartir sus conocimientos, pero sobre todo por la confianza y la amistad que me ha brindado. Dios la bendiga en cantidad.

A mis revisores, el Dr. Andrés Aguirre Cruz, M.C. Miguel Ángel García Muñoz, Dr. Alejandro Aparicio Saguilán, Dra. Delia Esther Páramo Calderón y la Dra. María de Jesús García Gómez, por su ayuda y consejos proporcionados.

Al Ing. Juan Hernández Sánchez por toda la ayuda y asesoramiento brindado, por su amistad y paciencia.

A mis amigas y compañeras, Alma, Maki, Caro, Lupita y Mayra, por estar conmigo en las buenas y no tan buenas, por creer en mí, por su paciencia y su cariño. Además, gracias por ser cómplices en cada locura realizada y por escucharme, regañarme y aconsejarme cuando fue necesario. Dios las bendiga, las quiero mucho.

A Jere, que si bien tengo un año de conocerla, gracias por el apoyo, ayuda, y sobre todo por la confianza y amistad brindada.

A todos los profesores que han estado involucrados en mi desarrollo profesional durante la estancia en la Universidad del Papaloapan campus Tuxtepec, gracias por todo el conocimiento transmitido.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a todas aquellas personas que han creído en mí, que me apoyaron y me fomentaron el deseo de superación y el anhelo de triunfo en la vida:

A mis padres, Lupita y Alvaro, por el simple hecho de darme la vida, por su eterno amor, por creer en mí y por sacarme adelante, dándome ejemplos dignos de superación y entrega, porque en gran parte gracias a ustedes, hoy puedo ver alcanzada una de mis metas, ya que siempre estuvieron impulsándome en los momentos más difíciles de mi carrera, y porque el orgullo que sienten por mí fue lo que me hizo ir hasta el final. Va por ustedes, por lo que valen, por todos los sacrificios realizados, porque admiro su fortaleza y lo que han hecho de mí.

A mi hermano Alberto, por su apoyo y amor incondicional, de no ser por ti esta meta no se hubiese alcanzado.

A mi hermano Alvaro, que si bien tengamos discusiones y malos encuentros, y de que tal vez seamos polos opuestos, lejos de dañarme, tu existencia enriquece la mía.

Mil palabras no bastarían para agradecerles su apoyo, su comprensión y sus consejos en los momentos difíciles.

A todos, espero no defraudarlos y contar siempre con su valioso apoyo, sincero e incondicional. Gracias por formar parte de mi vida. Dios los bendiga. Los amo mucho.

CONTENIDO

Índice de figuras	X
Índice de tablas	XI
Abreviaturas	XII
Resumen	XIV
Abstract	XV
1 Introducción.....	16
2 Antecedentes	18
2.1 Piña.....	18
2.1.1 Comercialización	20
2.1.2 Residuos agroindustriales derivados de la piña.....	21
2.2 Importancia de los residuos agroindustriales	22
2.3 Aprovechamiento de los residuos agroindustriales	24
2.4 Modificaciones de residuos agroindustriales.....	25
2.4.1 Hidrólisis enzimática	27
2.4.1.1 Celulosa.....	28
2.4.1.2 Mecanismo de hidrólisis de celulosa por celulasas.....	29
2.5 Fibra dietética	30
2.5.1 Fibra dietética soluble.....	33
2.5.2 Fibra dietética insoluble.....	33
2.5.3 Propiedades fisicoquímicas de la fibra dietética.....	33
2.5.4 Beneficios a la salud.....	35
2.5.4.1 Efecto sobre el sistema digestivo	35
2.5.4.2 Efecto reductor de colesterol.....	36
2.5.4.3 Reducción de la respuesta glucémica.....	36
3 Justificación	38

4	Hipótesis	39
5	Objetivos	39
5.1	Objetivo general	39
5.2	Objetivos específicos	39
6	Materiales y métodos	40
6.1	Materiales	40
6.1.1	Materia prima	40
6.2	Métodos	40
6.2.1	Preparación de la harina de bagazo de piña.....	40
6.2.2	Análisis químico proximal.....	40
6.2.2.1	Humedad	41
6.2.2.2	Cenizas	41
6.2.2.3	Proteínas	41
6.2.2.4	Grasa cruda.....	41
6.2.3	Modificación enzimática	41
6.2.4	Evaluación reológica	42
6.2.5	Caracterización estructural por difracción de rayos X	42
6.2.6	Caracterización estructural por espectroscopia de transmisión de infrarrojo con transformada de Fourier de reflectancia total atenuada (FTIR-ATR).....	42
6.2.7	Determinación de fibra dietética total (FDT), FDI y FDS	42
6.2.8	Propiedades fisicoquímicas	43
6.2.8.1	Capacidad de retención de agua (CRA)	43
6.2.8.2	Capacidad de retención de aceite (CRA)	43
6.2.9	Efecto de la fibra dietética en la difusión de la glucosa	44
6.2.10	Efecto de la fibra dietética en la actividad de α -amilasa	44
6.2.11	Análisis estadístico	44

7	Resultados y discusión	45
7.1	Composición química proximal de la harina	45
7.2	Evaluación reológica.....	46
7.3	Difracción de rayos x	49
7.4	Espectroscopía de infrarrojo con transformada de fourier de reflectancia total atenuada (FTIR-ART).....	51
7.5	Determinación de fibra dietética total (FDT), FDI y FDS	52
7.6	Propiedades fisicoquímicas	53
7.6.1	Capacidad de retención de agua (CRA)	53
7.6.2	Capacidad de retención de aceite (CRa).....	54
7.7	Efecto de la fibra dietética en la difusión de glucosa	55
7.8	Efecto de la fibra dietética en la actividad de α -amilasa	57
8	Conclusiones	60
9	Referencias.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Principales exportadores mundiales de piña	19
Figura 2. Estructura generalizada de celulosa	29
Figura 3. Barrido de amplitud del módulo de almacenamiento G' de harina de bagazo de piña nativa y modificada.	47
Figura 4. Barrido de frecuencia para el módulo de almacenamiento G' en harina de bagazo de piña nativa y modificada.	48
Figura 5. Barrido de frecuencia para el módulo de pérdida G'' en harina de bagazo de piña nativa y modificada.	48
Figura 6. Diagramas de difracción de rayos X de harina de bagazo de piña nativa y modificada.	50
Figura 7. Espectros FTIR de harina de bagazo de piña nativa (HBP), modificada.....	51
Figura 8. Capacidad de retención de agua en harina de bagazo de piña nativa y modificada.....	54
Figura 9. Capacidad de retención de aceite en harina de bagazo de piña nativa y modificada....	55
Figura 10. Efecto de fibras dietéticas modificadas y no modificadas en la difusión de glucosa ..	56
Figura 11. Efecto de fibras dietéticas modificadas y no modificadas en la actividad de α -amilasa.	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de la FD con base a sus constituyentes.	32
Tabla 2. Tratamientos de la modificación enzimática de harina de bagazo de piña.	41
Tabla 3. Composición química proximal de la harina de bagazo de piña.	45
Tabla 4. Fibra dietética total, soluble e insoluble en harina de bagazo de piña nativa y modificada.	52

ABREVIATURAS

FD	Fibra dietética
FDT	Fibra dietética total
FDS	Fibra dietética soluble
FDI	Fibra dietética insoluble
FAO	Food and Agriculture Organization (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación)
t	tonelada
lb	libra
h	hora
min	minuto
μmol	micromoles
CRA	Capacidad de retención de agua
CRA	Capacidad de retención de aceite
ANOVA	Análisis de varianza
DRX	Difracción de rayos X
FTIR-ART	Espectroscopía de transmisión de infrarrojo con transformada de Fourier de reflectancia total atenuada
M	Fibra dietética comercial: Metamucil®
HBP	Harina de bagazo de piña
0.5U30	Harina de bagazo de piña modificada con 0.5 U de celulasa por 30 minutos
0.5U60	Harina de bagazo de piña modificada con 0.5 U de celulasa por 60 minutos
0.5U90	Harina de bagazo de piña modificada con 0.5 U de celulasa por 90 minutos
1U30	Harina de bagazo de piña modificada con 1 U de celulasa por 30 minutos

1U60	Harina de bagazo de piña modificada con 1 U de celulasa por 60 minutos
1U90	Harina de bagazo de piña modificada con 1 U de celulasa por 90 minutos
1.5U30	Harina de bagazo de piña modificada con 1.5 U de celulasa por 30 minutos
1.5U60	Harina de bagazo de piña modificada con 1.5 U de celulasa por 60 minutos
1.5U90	Harina de bagazo de piña modificada con 1.5 U de celulasa por 90 minutos

RESUMEN

La importancia de la fibra dietética (FD) se ha incrementado significativamente debido a los beneficios a la salud que proporciona, siendo la fracción soluble la de mayor importancia, ya que ayuda a modular la velocidad de digestión y absorción de carbohidratos, lo cual puede ser determinante para el control metabólico de algunas enfermedades crónicas. En este sentido, se han utilizado diversas metodologías para incrementar la fracción soluble de la FD, una de ellas es la hidrólisis enzimática, la cual modifica los componentes de la FD convirtiendo su fracción insoluble a soluble. El objetivo de este estudio fue realizar la modificación de la FD contenida en el bagazo de piña por un método enzimático, empleando la enzima celulasa a tres diferentes concentraciones (0.5U/g, 1U/g y 1.5U/g) y tres tiempos de hidrólisis (30min, 60min y 90min), así como también realizar la caracterización fisicoquímica, funcional, reológica y estructural de la fibra obtenida. La modificación enzimática empleando celulasa a una concentración de 1 U/g por 30 min de hidrólisis y 1.5 U/g por 90 min de hidrólisis, incrementó el contenido de fibra dietética soluble (FDS) 59.3 y 34 veces más respectivamente, con respecto a la harina nativa. Por otro lado, debido a la hidrólisis de la porción amorfa en celulosa, los tratamientos enzimáticos influyeron en las propiedades viscoelásticas, la cristalinidad y en la estructura de la FD del bagazo de piña, lo cual se reflejó en los análisis reológicos, difracción de rayos x y FTIR-ART, respectivamente. Además, la CRA y CRa de la harina de bagazo de piña (HBP) incrementaron con los tratamientos enzimáticos en comparación con la HBP nativa. Los efectos en la difusión de glucosa e inhibición de la actividad de α -amilasa se vieron favorecidos por la modificación enzimática a diferentes concentraciones de enzima y tiempos de hidrólisis, lo que está relacionado con el contenido de FDS. El estudio ilustra como la hidrólisis enzimática influye en las propiedades de la FD del bagazo de piña y proporciona una guía valiosa para su modificación y aplicación como ingrediente funcional. Con la gran cantidad de bagazo de piña que se desecha cada año, la utilización efectiva de este residuo agroindustrial ciertamente podría generar beneficios económicos sustanciales a la región.

Palabras clave: fibra dietética soluble, hidrólisis enzimática, residuo agroindustrial, bagazo de piña.

ABSTRACT

The importance of dietary fiber (DF) has also increased due to the health benefits that remain, such as solubility to the greatest importance, to the modular aid of the speed of digestion and the absorption of carbohydrates, which can be a determinant for the metabolic control of some chronic diseases. In this sense, several methodologies have been used to increase the soluble fraction of the DF, one of them is the enzymatic hydrolysis, which the components of the DF become insoluble in soluble. The objective of this study was realized the modification of the DF was contained in the pineapple bagasse by an enzymatic method, using the cellulase enzyme at three different concentrations (0.5U/ g, 1U/ g and 1.5U/ g) and three times of hydrolysis (30min, 60min and 90min), as well as perform the physicochemical, functional, rheological and structural characterization of the fiber. The enzymatic modification using cellulase at a concentration of 1 U/g for 30 min of hydrolysis and 1.5 U / g for 90 min of hydrolysis, increased the content of soluble dietary fiber (SDF) 59.3 and 34 times more, respectively, with respect to the native flour. On the other hand, due to the hydrolysis of the amorphous portion in cellulose, the enzymatic treatments influenced the viscoelastic properties, the crystallinity and the structure of the DF of the pineapple bagasse, which is reflected in the rheological, X-ray diffraction and FTIR-ART, respectively. In addition, CRA and increased pineapple bagasse flour (PBF) were increased with enzyme treatments compared to native PBF. The effects on the diffusion of glucose and the inhibition of the α -amylase activity have been favored by the enzymatic modification to the different results of the enzyme and the hydrolysis times, which is related to the content of SDF. The study illustrates how enzymatic hydrolysis influences the properties of the DF of pineapple bagasse and provides a valuable guide for its modification and application as a functional ingredient. With the large amount of pineapple bagasse that is discarded each year, the effective use of this agroindustrial waste could certainly generate substantial economic benefits to the region.

Keywords: soluble dietary fiber, enzymatic hydrolysis, agroindustrial waste, pineapple bagasse.

1 INTRODUCCIÓN

La piña (*Ananas comosus*) es una planta perenne de la familia Bromeliaceae, cuya fruta se comercializa en todo el mundo. En 2013, la producción de piña fue de alrededor de 210,000 t, principalmente en América Latina, el Caribe y Portugal (FAO, 2016). En los últimos años esta fruta ha adquirido una relevancia significativa por su dinámica económica y por ser una fuente importante de empleo, tanto en la producción y comercialización de la fruta fresca, como en el proceso de industrialización. Entre los subproductos que mayor participación tienen se encuentran la piña preparada o conservada y el jugo de piña, lo cual provoca que durante el proceso de preparación, se generen residuos y problemas ambientales (CEFP, 2002). Este residuo, llamado bagazo, está constituido por la cáscara, el corazón y sólidos centrifugados en la producción del jugo el cual comprende el 20 % del peso del fruto (Cervantes *et al.*, 1978). El residuo de piña es una materia prima compuesta principalmente por fibras, azúcares, proteínas, vitaminas, minerales y compuestos fenólicos (Díaz Vela *et al.*, 2013). Diversos autores han reportado que entre el 62 y 70 % de la composición del bagazo de piña es fibra dietética insoluble (Cervantes *et al.*, 1978; López-Herrera *et al.*, 2014; López-Herrera *et al.*, 2016).

La solución al problema de la disposición final del bagazo de piña es encontrar una tecnología apropiada para su tratamiento y valoración indirecta, aprovechando su característica de ser una buena fuente de fibra dietética, y de tal forma que pueda ser integrada al medioambiente (abonos, composta), dentro de la cadena alimenticia, o en los procesos industriales de interés económico. Por tal motivo, es importante buscar, de acuerdo con la estructura y análisis fisicoquímicos del bagazo, vías de valorización que puedan transformarlo en productos útiles para su comercialización.

Estudios previos han confirmado que la fibra dietética (FD) proporciona efectos benéficos en la salud. Esta se define como hidratos de carbono con tres o más unidades monoméricas que no se digieren ni se absorben en el intestino delgado humano, incluye polímeros de carbohidratos comestibles que existen naturalmente en los alimentos, aislados a partir de materias primas alimentarias por medios físicos, enzimáticos o químicos y formas sintéticas (polidextrosa, metilcelulosa) (CODEX, 2009). En función de su solubilidad, la FD se puede dividir en dos categorías: fibra dietética soluble (FDS) y fibra dietética insoluble (FDI) (Paola *et al.*, 2008). La FDI ha demostrado apoyar el crecimiento de la microbiota intestinal, aumentar el volumen de las heces, disminuir el tránsito intestinal e inhibir la actividad de la lipasa pancreática (Foschia *et al.*,

2013; He *et al.*, 2015). Por otro lado, la FDS puede usarse para reducir la respuesta glucémica y el colesterol plasmático, disminuir el riesgo de enfermedades cardiovasculares y proteger contra el cáncer colorrectal (Harris *et al.*, 1993; Theuwissen y Mensink, 2008; Roehrig, 1988). Debido a estas propiedades, la fibra dietética soluble tiene una mayor influencia en el control y/o prevención de enfermedades relacionadas con el metabolismo de glucosa y lípidos, en comparación a la fracción insoluble. Por tal motivo, en los últimos años se ha buscado la manera de incrementar la fracción soluble de la fibra dietética, ya que en la mayoría de los alimentos que contienen fibra, la fracción insoluble es la parte predominante. Los tratamientos biológicos y físicos se utilizan actualmente para modificar la fibra dietética de diferentes fuentes de alimentos. Las condiciones de procesamiento cambian la composición y la microestructura de la FD, lo que da como resultado efectos satisfactorios sobre sus propiedades fisicoquímicas y funcionales (Peerajit, Chiewchan y Devahastin, 2012). El objetivo de este estudio fue realizar la modificación de la fibra dietética contenida en el bagazo de piña por un método enzimático, empleando la enzima celulasa (a partir de *Aspergillus niger*, actividad enzimática: 25,000 U/ g) a tres diferentes concentraciones (0.5 U/ g, 1 U/ g y 1.5 U/ g) y tres diferentes tiempos de hidrólisis (30 min, 60 min y 90 min), y caracterizar las propiedades fisicoquímicas, funcionales, reológicas y estructurales de la fibra obtenida. Se espera que la investigación contribuya al desarrollo de un método nuevo y eficaz para la modificación y aplicación de la fibra dietética contenida en el bagazo de piña.

2 ANTECEDENTES

2.1 PIÑA

La piña (*Ananas comosus*) es una planta perenne de la familia Bromeliaceae, es un fruto no climatérico, es decir, no continúa madurando después de la cosecha, sin embargo, su color verde puede cambiar a un color más claro o amarillento debido a que la clorofila continúa degradándose. Dependiendo de la variedad, su pulpa puede ser amarilla, anaranjada o blanca, tiene un sabor agrídulce cuando está madura y un poco ácido al inicio de su madurez comercial. La acidez disminuye después de ser cosechada lo que en ocasiones mejora su sabor cuando su contenido de azúcares es apropiado (Arias y Toledo, 2000).

La planta de piña es monocotiledónea, herbácea y perenne de 1 a 1.5 m de extensión, tanto a lo alto como en lo que a su circunferencia se refiere, es originaria de América del Sur de la región de Matto Grosso, entre Uruguay y Brasil. La inflorescencia contiene entre cien y doscientas flores colocadas en forma espiral, fusionadas al eje central. La floración se prolonga entre 30 y 70 días aproximadamente; el fruto maduro se obtiene 135 días después de haber emergido la flor. Según la variedad, el fruto asume forma cilíndrica o piramidal y su peso varía de acuerdo con la variedad, la densidad de siembra, el clima y el manejo brindado a la plantación (DGIEA, 1991).

Las principales variedades se clasifican en cinco grupos de acuerdo con sus hábitos de crecimiento, la forma de la fruta, las características de la pulpa y la morfología de las hojas y se han propagado por todo el mundo en función de su capacidad de adaptación a las condiciones climáticas locales: Cayena, Española, Queen, Pernambuco y Perolera (Py C. *et al.*, 1984). La Cayena Lisa abarcaba la mayor parte de la producción mundial en la segunda mitad del siglo XX. Su fuerte rendimiento, su buen potencial de conservación, su forma cilíndrica, la escasa presencia de espinas y sus buenas calidades organolépticas la convirtieron en el prototipo de piña destinada al comercio de masas. En cambio, su sensibilidad a la mancha negra, a la *Phytophthora* y a los parásitos telúricos requiere un seguimiento minucioso del cultivo. A finales de los años 1980, una nueva variedad de híbrido natural creado por el programa de investigación del Pineapple Research Institute de Hawái apareció. Cultivada desde principios de los años 1990 como MD-2 o Piña miel por la empresa Del Monte, revolucionó el sector de la piña transformándolo de forma considerable y duradera. Esta variedad medio espinosa se impuso gracias a su buen rendimiento, su poca sensibilidad a la mancha negra y a los parásitos telúricos y su estupendo potencial de conservación. Su sabor dulce y

azucarado, muy apreciado por el consumidor, la propulsó a la cima de las variedades producidas con fines comerciales. Su único inconveniente es su gran sensibilidad a la *Phytophthora* (PIP-Coleacp, 2011).

Las variedades Cayena Lisa y MD-2 abarcan la mayor parte de la piña destinada al comercio internacional. En el periodo 2003-2016 la producción de piña creció 29.06 %, además de que las exportaciones crecieron a un ritmo acelerado en el mismo periodo pues pasaron de 20.8 mil a 86.3 mil toneladas. En 2016, México se ubicó en la posición número seis de los diez principales exportadores de piña a nivel mundial (Figura 1) (SAGARPA, 2017).

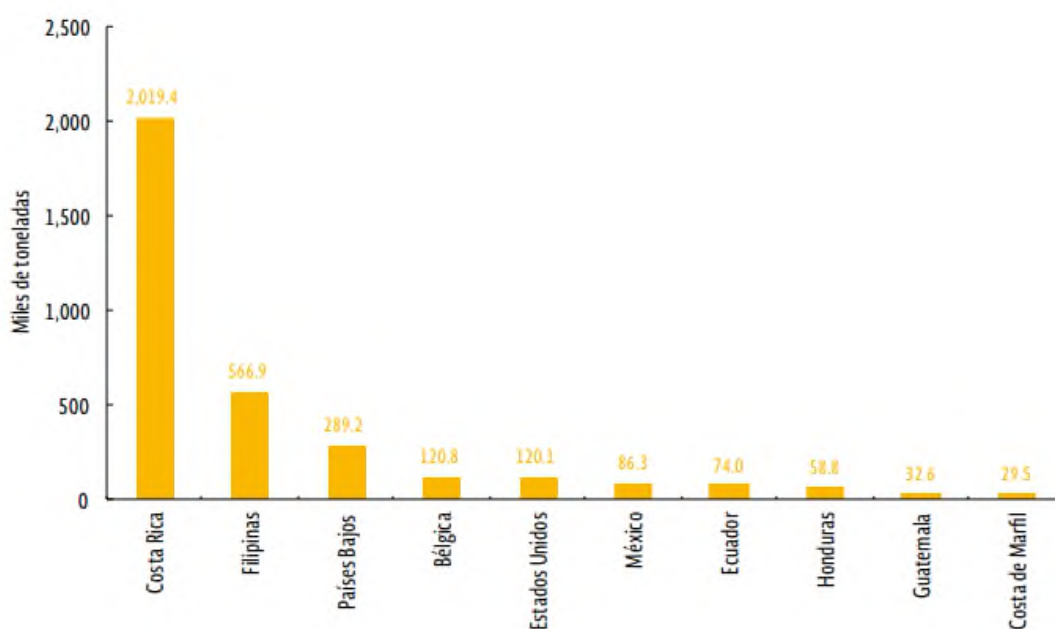


Figura 1. Principales exportadores mundiales de piña (UN COMTRADE e ITC, 2017).

Los principales países productores son Tailandia, Costa Rica, Brasil y Filipinas. A nivel internacional México es el sexto productor de piña fresca (FAO, 2014). A nivel nacional los principales estados productores de piña son: Veracruz, Oaxaca, Tabasco y Chiapas (SIAP, 2014). Es precisamente en los dos primeros estados, donde se ubica la principal zona productora de piña, conocida como la zona del Bajo Papaloapan o Cuenca del Papaloapan, en dicha zona se encuentran los principales municipios piñeros, que si bien políticamente pertenecen a los estados de Veracruz y Oaxaca, muestran, sin embargo, similitud de factores climatológicos, topográficos e hidrológicos, y sobre todo, una relativa homogeneidad en aspectos relacionados con las modalidades de cultivo, producción y comercialización. Los municipios que forman parte de esta región son (CEFP, 2002):

- a) Medellín, Alvarado y Tlalixcoyan, pertenecientes al Distrito de Desarrollo Rural de Veracruz. Así como Villa Isla, Juan Rodríguez Clara, Villa Azueta y Chacaltianguis, que pertenecen al Distrito de Desarrollo Rural de Los Tuxtlas, en el estado de Veracruz; y
- b) Loma Bonita y Tuxtepec, que se ubican en el Distrito de Desarrollo Rural de Tuxtepec, en el estado de Oaxaca.

Nutritionalmente, la parte comestible de la piña está constituida principalmente por un 85-90 % de agua y de 8 a 10 % de azúcares de los cuales dos terceras partes se encuentran en forma de sacarosa y el resto como glucosa y fructosa. Prácticamente no contiene almidón y su contenido de proteínas y grasa es muy baja. Contiene 0.6 a 0.9 % de ácidos de los cuales el 87 % es ácido cítrico y el resto ácido málico (Arias y Toledo, 2000).

La piña es un fruto rico en vitamina C y buena fuente de vitaminas B₁, B₂ y B₆. Se considera un alimento digestivo debido a que contiene bromelina, una enzima proteolítica que es utilizada como ablandador de carnes (Arias y Toledo, 2000).

2.1.1 Comercialización

La comercialización de la piña en México está estrechamente vinculada a la temporalidad de la época de cosecha, por ejemplo, en los meses de septiembre, octubre y noviembre, periodo en el que hay escasez del producto, éste se destina principalmente a la venta en fresco en el mercado doméstico, por lo que es en ese periodo cuando se alcanzan mayores cotizaciones del producto, mientras que en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo, cuando se levanta la cosecha en la zona del Bajo Papaloapan, los precios se reducen considerablemente y la agroindustria se convierte en el principal receptor de la abundante oferta (CEFP, 2002).

La piña que se produce en el país tiene tres usos como destino final. El mercado en fresco absorbe casi el 70 % de la producción nacional; la industria que tiene como objetivo principal la elaboración de almíbares y jugo, consume entre el 23 y 25 %; mientras que entre el 5 y el 7 % se destina al mercado de exportación de piña en fresco (CEFP, 2002).

Por otro lado, el comercio exterior de la piña de nuestro país es muy limitado, ya que la producción se destina básicamente a satisfacer la demanda interna y cubre casi totalmente el consumo doméstico. Cabe destacar que la piña, al igual que otras frutas tropicales, tiene la ventaja de poder comercializarse en diversos productos procesados que son altamente demandados en el mercado y

que permiten darle un valor agregado a la piña fresca, lo que reditúa en un mayor precio y la posibilidad de darle mayor vida de anaquel (CEFP, 2002).

2.1.2 Residuos agroindustriales derivados de la piña

En los últimos años la piña ha adquirido una relevancia significativa por su dinámica económica y por ser una fuente importante de empleo, tanto en la producción y comercialización de la fruta fresca, como en el proceso de industrialización. Entre los productos que mayor participación tienen en el comercio tanto nacional como internacional se encuentran la piña conservada y el jugo de piña, lo cual provoca que durante el proceso de preparación se dé una gran generación de residuos y problemas ambientales (CEFP, 2002).

Durante el procesamiento de la piña se producen grandes cantidades de residuos sólidos compuestos por cáscaras, corona y sólidos centrifugados. Este residuo, llamado bagazo, puede pesar alrededor del 10 % del peso total del fruto, compuesto por aproximadamente 96 % de materia orgánica y 4 % de materia inorgánica (Abdullah, 2007). De acuerdo con Conesa *et al.* (2015), en la elaboración de productos alimenticios a base de piña, este valor puede ser del 50 %. Otros autores informaron una producción de residuos en el intervalo de 20-35 % del peso total de la fruta (Seleni *et al.*, 2014). Esta discrepancia puede deberse a la variedad de piña y al tipo de procesamiento utilizado.

El bagazo de piña tiene usos potenciales como materia prima para obtener productos de valor agregado, ya que, además de otros componentes, contiene azúcares simples y complejos que se pueden usar en la fermentación para la producción de diferentes metabolitos como el etanol, el ácido cítrico o el vinagre (Imandi *et al.*, 2008; Kumar *et al.*, 2011; Nigam, 2000; Roda *et al.*, 2016; Tanaka *et al.*, 1999), y también puede ser una fuente de otros compuestos bioactivos como los antioxidantes (Ketnawa *et al.*, 2012). Además, los residuos de piña también pueden contener la enzima proteolítica bromelina, comúnmente obtenida del tallo, pero también presente en la fruta madura (Ketnawa *et al.*, 2012; Lozano *et al.*, 1993). Aunado a esto, el bagazo de piña también es una fuente de fibra, vitaminas, minerales y compuestos fenólicos (Díaz Vela *et al.*, 2013). Diversos autores han reportado que entre el 62 y 70 % de la composición del bagazo de piña es fibra dietética insoluble (Cervantes *et al.*, 1978; López-Herrera *et al.*, 2014; López-Herrera *et al.*, 2016).

2.2 IMPORTANCIA DE LOS RESIDUOS AGROINDUSTRIALES

Entre los diferentes enfoques que existen para definir a la “agroindustria”, se dice que es una “actividad que integra la producción primaria agrícola, pecuaria o forestal, el proceso de beneficio o transformación, así como la comercialización del producto, sin dejar de lado los aspectos de administración, mercadotecnia y financiamiento”. Dicho en otros términos, es 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).

A partir del 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, 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, ya que cuando los residuos no son reutilizados y se abandonan en el lugar que se generaron, se convierten en contaminantes de suelo y agua, la acumulación de biomasa en grandes cantidades provoca deterioro ambiental y genera pérdidas de materiales con alto potencial biotecnológico (Khalil, 2002). El problema al que se enfrentan los residuos agroindustriales es 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 (Saval, 2012). Aún en nuestros días, esta problemática prevalece a nivel mundial.

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).

En general, las características de los residuos agroindustriales son muy variadas, 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. Por ser la materia orgánica su principal componente, en la práctica se les denomina “residuos orgánicos”, dentro de este rubro se incluyen otros residuos, como los lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales, la hojarasca de parques y jardines, así como los residuos domésticos y residuos sólidos municipales.

Valdez-Vázquez *et al.* (2010), publicaron datos oficiales de 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, 15.6 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.

Algunos datos que sirven para tener una idea del volumen de residuos que generan diferentes tipos de industrias son los siguientes:

- La agroindustria azucarera durante la producción de azúcar genera residuos de cosecha, coproductos y subproductos tales como bagazos, cachazas, melazas, vinazas, sacarosa y aguas residuales (Zafranet, 2016). En este sentido, para la elaboración de productos como néctares, zumos y mermeladas únicamente se utiliza la pulpa y se desecha aproximadamente el 50 % del fruto (Ramos, 2015).
- En el caso del café y cacao sólo se aprovecha económicamente el grano que corresponde alrededor de un 10 % del peso del fruto fresco (Abarca *et al.*, 2010).

- Las industrias de producción vegetal generan una elevada cantidad de residuos como tallos, hojas o frutos con calidad no comercial como resultado de las operaciones de poda, corte, clasificación y renovación de cultivos durante la cosecha y postcosecha. La agroindustria de origen animal genera también residuos como los estiércoles, purines y subproductos como pelos o plumas (Gavilanes, 2016).
- La industria de la cerveza solamente utiliza el 8 % de los componentes del grano, el resto 92 %, es un residuo; la industria del aceite de palma utiliza el 9 %, el 91 % restante es un residuo y la industria del papel utiliza menos del 30 %, el resto es un residuo (Saval, 2012).

Al buscar una oportunidad de aprovechamiento de los residuos, 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. Respecto a esto último, es de esperar que después del aprovechamiento de un residuo se genere un siguiente residuo más agotado que podría tener otra aplicación, o bien, convertirse en un desecho.

2.3 APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS AGROINDUSTRIALES

Los residuos agroindustriales como ya se mencionó presentan una característica común, la fracción orgánica, ideal para su aprovechamiento en un sinnúmero de procesos dentro del mismo sector y/o en el flujo económico del país. Sin embargo, es necesaria la caracterización de estos para conocer la cantidad generada, composición química, cantidad y calidad de sus componentes, con el objetivo de seleccionar el proceso o sector donde puede ser aprovechado sin sufrir transformación, o las tecnologías apropiadas para su transformación y con ello lograr productos con alto valor añadido o la disposición final del mismo por no tener un valor comercial, es decir su disposición como residuo orgánico.

Ramírez (2012) resalta que el aprovechamiento de residuos es una alternativa que impulsa el desarrollo de tecnologías orientadas hacia una transformación sustentable de los recursos naturales. Por consiguiente, el aprovechamiento de residuos agroindustriales se enfoca como una estrategia base para el manejo de estos, con una diversidad de alternativas, gracias a la composición tan variada que presentan estos residuos o subproductos.

Existe básicamente tres grupos de tecnologías para la recuperación de residuos agroindustriales que corresponden a, la valorización biológica y química, la obtención de combustibles (derivados de desechos) y la valorización térmica. El primer grupo permite a partir de residuos orgánicos

obtener gases, líquidos o sólidos como pectinas, enzimas, aceites esenciales, fibra dietaria (alimento para animales y humanos), hongos comestibles, flavonoides y carotenoides que pueden ser comercializables utilizando procesos biológicos como el compostaje, la lombricultura, entre otros. El segundo grupo permite obtener combustibles como el biogás (utilizado para diversos fines), y el tercer grupo busca la reducción del volumen de los residuos y la recuperación de energía a partir de los gases, líquidos y sólidos que se generan, utilizando procesos como la incineración y pirolisis (Yepes *et al.*, 2008).

Los criterios de selección más generales y resaltantes para su aprovechamiento tienen que ver con:

1. La disponibilidad del residuo a nivel local
2. La estabilidad, es decir, no sufra descomposición rápida bajo condiciones climáticas del sitio de generación
3. El no requerir pretratamientos en la medida de lo posible y de ser necesario que sea sencillo y económico
4. La disposición de cantidades apreciables que permitan la planificación del proceso en el cual se va a utilizar y la fabricación de un producto
5. No poseer aplicaciones o usos que compitan con el proceso que se pretende promover.

2.4 MODIFICACIONES DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES

Los residuos agroindustriales difieren debido a la materia prima y proceso por el cual fueron generados, aunque comparten la principal característica al presentar alto contenido de materia orgánica constituida principalmente por celulosa, lignina, hemicelulosa y pectina; esta fuente renovable de materia orgánica puede ser transformada por métodos físicos (calor, molienda, prensado), químicos (hidrólisis con ácidos y bases) y biológicos (fermentación aerobia, anaerobia, sólida o líquida, hidrólisis enzimática, cultivo de microorganismos) en productos de interés pecuario o industrial como biocombustibles, enzimas, azúcares simples, metabolitos secundarios y proteínas (Howard *et al.*, 2003; Tengerdy y Szakacs, 2003; Ayala *et al.*, 2011).

Martins *et al.* (2018) realizaron la valorización del subproducto de cáscara de maracuyá para la producción de xilanasas y su potencial como agente blanqueador para pulpa kraft donde encontraron que el hongo *Aspergillus flavus* mostraba un alto potencial para la producción de esta enzima. La optimización del proceso dio como resultado un aumento de 7.89 veces en la actividad de la enzima. Las xilanasas fueron estables a 55-60 °C, en un amplio intervalo de pH; estas son las

características deseadas para el blanqueo de la pulpa. Por lo tanto, se examinó el potencial de usar xilanasas crudas de *A. flavus* para blanquear pulpa kraft; los resultados muestran que estas enzimas son agentes blanqueadores potenciales, con una eficiencia Kappa de 35.93 %.

Torres *et al.* (2018) desarrollaron, caracterizaron y evaluaron recubrimientos y películas biodegradables mediante el uso de cáscara de mango y extractos antioxidantes de semillas, sus resultados mostraron que las películas comestibles formuladas con cáscara de mango mostraron buenas propiedades de barrera, como la permeabilidad al vapor de agua. La adición de extracto antioxidante no mostró un efecto significativo ($p > 0.05$) sobre las propiedades ópticas. Además, la actividad antioxidante y el contenido de polifenoles aumentaron en un 18 % y 60 % respectivamente. Además, duraznos recubiertos con una solución de cáscara de mango (1.09 %), extracto antioxidante de semilla de mango (0.078 g/ L) y glicerol (0.33 %) mostraron 64 % y 29 % menos de producción de etileno y CO₂, respectivamente, y 39 % menos consumo de O₂ en comparación con duraznos sin recubrimiento.

Contreras *et al.* (2017) evaluaron el efecto del pretratamiento con ultrasonido a hojas de *Agave durangensis* sobre la producción potencial de enzimas, observaron que la fermentación usando hojas de agave pretratadas con ultrasonido como sustrato mostraron un aumento significativo en la producción de inulinasas para cada una de las cepas fúngicas probadas (*A. niger* y *Neurospora crassa*), en comparación con la producción de enzimas en la muestra de control (hojas de agave no tratadas).

Ramírez *et al.* (2012) estudiaron la hidrólisis de la cáscara de piña con concentración de ácido sulfúrico y tiempo de reacción variable (2-6 % y 0-350 min respectivamente) y temperatura de 98 °C, para la producción de xilosa (monosacárido empleado para la obtención del edulcorante xilitol). Se determinó la concentración de xilosa, glucosa y los productos de degradación como ácido acético y furfural. Las condiciones óptimas encontradas para la hidrólisis fueron 6 % H₂SO₄ a 98 °C por 83 min con un rendimiento de 26.9 g xilosa/ L, 2.61 g glucosa/ L, 7.71 g ácido acético/ L y 0.29 g furfural/ L.

Por otro lado, Cruz *et al.* (2011) estudiaron el proceso para obtener celulosa y bioetanol utilizando bagazo de piña (desecho agrícola), mediante hidrólisis ácida (utilizando H₂SO₄) y fermentación en un medio anaeróbico, utilizando el microorganismo *Saccharomyces cerevisiae*, variando tiempos de fermentación (36, 40, 48 y 72 h) y manteniendo la temperatura a 30 °C. La celulosa obtenida

presentó una conversión del 60 % y mediante FTIR se corroboró que la celulosa fue tipo II. Se obtuvo bioetanol mediante destilación, presentando un rendimiento del 35 % con bagazo y del 57 % con celulosa con un tiempo de fermentación de 48 y 72 h, respectivamente.

Finalmente, Niu *et al.* (2017) realizaron comparaciones de tres diferentes métodos de modificación en propiedades estructurales, reológicas y funcionales de fibras dietéticas solubles de cáscaras de tomate. Usaron peróxido de hidrógeno alcalino (AHP), solución de ácido clorhídrico-etanol (HAE) e hidrólisis enzimática (EH) (denominados A-SDF, H-SDF y E-SDF, respectivamente) para mejorar el rendimiento de extracción de fibras dietéticas solubles (FDS) de la cáscara de tomate residual, donde en comparación con la FDS original (O-SDF), las tres muestras de fibra modificadas mostraron menor masa molecular y potencial zeta. Específicamente, A-SDF mostró la masa molecular y el potencial zeta más bajos, 1.30×10^6 Da y -39.5 mV, respectivamente, además, presentó la mayor propiedad de gelificación y una excelente capacidad de adsorción de glucosa *in vitro*. A-SDF y H-SDF exhibieron capacidades similares en la unión de ácidos biliares, que eran más altos que los de E-SDF y O-SDF.

2.4.1 Hidrólisis enzimática

Las modificaciones enzimáticas de los residuos agroindustriales está causando importantes beneficios en la industria alimentaria por los efectos fisicoquímicos u organolépticos que producen, tales como la disminución de la viscosidad, mejora de la filtrabilidad, disminución de la tendencia a la cristalización, clarificación y estabilización de los líquidos con vistas a su conservación, insolubilización de macromoléculas por formación de coágulos, mejora en la fermentabilidad, mejora de la estabilidad bacteriológica entre otros.

La mayoría de las modificaciones enzimáticas que se han realizado a los residuos agroindustriales están enfocados en la modificación de la fibra dietética contenida en ellos, proveniente de productos a base de frutas o verduras.

Romero-Bonilla *et al.* (2015) realizaron la hidrólisis enzimática de residuos agroindustriales del plátano aplicando tres pretratamientos (molienda; molienda + hidróxido de sodio al 1 %, y molienda + proceso hidrotérmico) y su efecto en la obtención de jarabe glucosado. El método consistió en hidrolizar mediante enzimas (celulasas y hemicelulasas) la celulosa y hemicelulosa presente en la cáscara de plátano para transformarla en glucosa, mediante la utilización del hongo de género *Trichoderma* especie *ressei* como agente productor de la enzima celulasa. El tratamiento

que produjo mayor concentración de glucosa, fue T18 (molienda + hidróxido de sodio – 60 % de cáscara de plátano maduro - 0.6 g/ L de hongo) al cabo de seis días de hidrólisis enzimática, con 5.91 g/ L de glucosa.

Wen *et al.* (2017) utilizaron celulasa y xilanasa en la investigación sobre las propiedades estructurales y funcionales de la fibra dietética de salvado de arroz (FDSA). Debido a la degradación de la FDI, los tratamientos de celulasa y xilanasa, aumentaron el contenido de FDS en 3 y 8 veces, respectivamente. El análisis por microscopía electrónica de barrido indicó que los tratamientos enzimáticos causaron la rotura de la estructura FDSA. La celulasa y la xilanasa aumentaron la cristalinidad de FDSA debido a la hidrólisis de hemicelulosa y la porción amorfa en celulosa. Además, las enzimas redujeron la capacidad de retención de agua y aceite, pero aumentaron la capacidad de hinchamiento y la capacidad de absorción de taurocolato sódico de FDSA.

Por su parte, Yu *et al.* (2018) realizaron la modificación enzimática de la FDI de residuo de zanahoria empleando celulasa + xilanasa, donde los resultados mostraron que el método enzimático complejo aumentó el contenido de FDS a 15.07 %, y la capacidad de adsorción de colesterol alcanzó su punto máximo. Los resultados obtenidos permitieron aplicar el residuo de zanahoria como ingrediente funcional en diversos productos alimenticios.

2.4.1.1 Celulosa

La celulosa es una cadena lineal de monómeros de glucosa con enlaces β (1 \rightarrow 4) y es el componente estructural de las paredes celulares en plantas verdes y vegetales (Figura 2). Es insoluble en agua e inerte a las enzimas digestivas en el intestino delgado. Sin embargo, puede pasar por una fermentación microbiana hasta cierto punto en el intestino grueso y producir AGCC (James y Mark, 2010).

La celulosa natural se puede dividir en dos grupos: cristalina y amorfa. El componente cristalino, que está formado por enlaces de hidrógeno no covalentes intra e intermoleculares, hace que la celulosa sea insoluble en agua. Sin embargo, se han desarrollado muchas celulosas modificadas, como celulosa en polvo, celulosa microcristalina e hidroxipropilmetilcelulosa, que se utilizan como ingredientes alimentarios. La diferencia entre celulosas naturales y modificadas es el grado de cristalización y enlaces de hidrógeno. Cuando estos enlaces de hidrógeno se rompen y la cristalinidad se pierde, el derivado de celulosa se vuelve soluble en agua (Takahashi *et al.*, 2003).

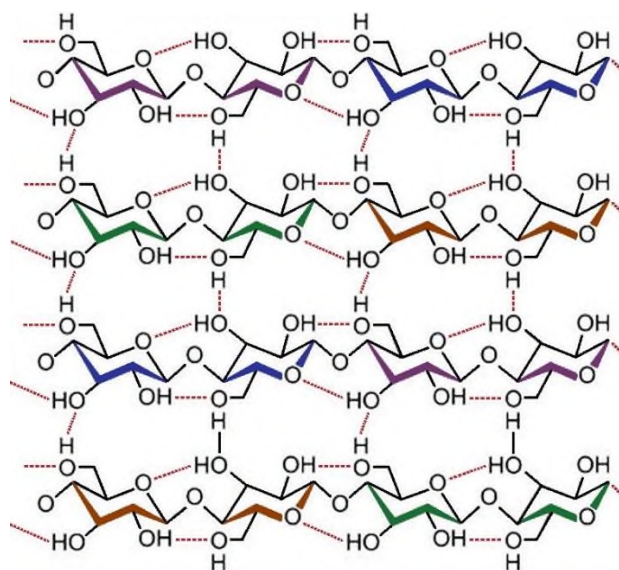


Figura 2. Estructura generalizada de celulosa (Summers, 2018).

2.4.1.2 Mecanismo de hidrólisis de celulosa por celulasas

La hidrólisis enzimática de la celulosa implica la acción secuencial de un grupo de enzimas, conocidas como celulasas, que pertenecen a la superfamilia de las glicosil hidrolasas, llamadas así porque catalizan la hidrólisis del enlace glicosídico entre 2 o más hidratos de carbono o entre estos y una fracción que no sea un hidrato de carbono. Las glicosil hidrolasas han sido clasificadas en más de 100 familias, y cada una de estas contiene proteínas que están relacionadas por su secuencia, su estructura y, en consecuencia, por su mecanismo catalítico (Davies y Henrissat, 1995). El sistema de celulasas típico incluye 3 tipos de enzimas: 1) endoglucanasas o 1,4-β-D-glucano-4-glucanohidrolasas (EC.3.2.1.4); 2) exoglucanasas, que incluyen 1,4-β-D-glucano-glucanohidrolasas (celodextrinas) (EC 3.2.1.74) y 1,4-β-D-glucano-celobiohidrolasas (celobiohidrolasas) (EC.3.2.1.91), y 3) β-glucosidasas o β-glucosidasa hidrolasas (EC.3.2.1.21) (De Vries y Visser, 2001; Lynd *et al.*, 2002; Davies y Henrissat, 1995). Las endoglucanasas cortan al azar en el interior de la celulosa amorfa, generando oligosacáridos de varias longitudes y, en consecuencia, nuevos extremos de cadena. Las exoglucanasas actúan de una manera progresiva en los extremos reductores y no reductores de las cadenas del polisacárido, liberando glucosa (glucanohidrolasas) o celobiosa (celobiohidrolasas). Las β-glucosidasas hidrolizan las celodextrinas solubles y la celobiosa a glucosa (Lynd *et al.*, 2002; Davies y Henrissat, 1995).

La estructura de la celulosa representa un reto para este sistema enzimático. Las características estructurales que afectan fundamentalmente la hidrólisis enzimática son la cristalinidad y el área de superficie, siendo esta última importante porque el contacto físico entre la enzima y la celulosa es un prerequisite para la hidrólisis. En cuanto a la cristalinidad, esta afecta en la medida en que disminuye la accesibilidad de las enzimas al sustrato, de manera que la celulosa amorfa es rápidamente degradada y, a medida que aumenta el grado de cristalinidad, la celulosa comienza a ser resistente a la hidrólisis (Fan *et al.*, 1981).

Por otro lado, los sistemas de celulasas no son simplemente una aglomeración de enzimas, ya que todas ellas actúan de manera coordinada y sinérgica para una hidrólisis eficiente. Se han descrito 4 tipos de sinergia: 1) endo-exo sinergia entre endoglucanasas y exoglucanasas; 2) exo-exo sinergia entre exoglucanasas que procesan los extremos reductores y no reductores de la cadena; 3) sinergia entre exoglucanasas y β -glucosidasas que eliminan celobiosa y celodextrinas, y 4) sinergia intramolecular entre los dominios catalíticos y los dominios de unión a la celulosa (Lynd *et al.*, 2002). La mayoría de estos preparados son producidos a partir de *T. reesei* y *Trichoderma longibrachiatum* (Singhania *et al.*, 2010). Sin embargo, debido a que *Trichoderma* tiene baja actividad de β -glucosidasa, algunos de estos preparados consisten en mezclas de enzimas producidas por *Trichoderma* y otros microorganismos como *A. niger* y, más recientemente, especies de *Penicillium* (Gusakov *et al.*, 2007; Singhania *et al.*, 2010). La eficiencia hidrolítica de estos complejos enzimáticos depende tanto de las propiedades individuales de cada enzima (eficiencia catalítica, estabilidad a temperatura alta y pH ácido), como de su proporción en la mezcla, lo que influye en el tipo de sinergia que se establece (Gusakov *et al.*, 2007; Van y Pletschke, 2012).

2.5 FIBRA DIETÉTICA

La fibra dietética se define como hidratos de carbono con tres o más unidades monoméricas que no se digieren ni se absorben en el intestino delgado humano, incluye los carbohidratos comestibles que se encuentran de forma natural en los alimentos, los obtenidos a partir de materias primas alimentarias mediante tratamientos físicos, químicos o enzimáticos y los sintetizados artificialmente pero que demuestran beneficios para la salud (CODEX, 2009).

Desde el punto de vista nutricional, la FD no es un nutriente, ya que no participa directamente en procesos metabólicos básicos del organismo. La razón por la que el organismo humano no puede

procesarla se debe a que el aparato digestivo no dispone de las enzimas que pueden hidrolizarla. Esto no significa que la FD pase intacta a través del aparato digestivo, ya que las enzimas de la microbiota bacteriana la fermentan parcialmente y la descomponen en diversos compuestos químicos: gases (hidrógeno, dióxido de carbono y metano) y ácidos grasos de cadena corta (acetato, propionato y butirato) (Saura-Calixto *et al.*, 2000).

Es importante recordar que la FD se encuentra en los alimentos como una matriz vegetal que lleva asociados compuestos bioactivos, entre ellos los polifenoles que tienen capacidad antioxidante, así como otros nutrientes. Además de los compuestos incluidos en la definición (polisacáridos celulósicos, hemicelulósicos, β -glucanos y lignina), también escapan al proceso digestivo y llegan sin degradar al colon otros constituyentes del alimento, principalmente proteína resistente, almidón resistente, compuestos polifenólicos y compuestos de Maillard (Cummings, 1996).

El conocimiento de los efectos benéficos de una dieta alta en FD para la prevención de enfermedades cardiovasculares, cáncer, obesidad e hipertensión, ha llevado al desarrollo de productos con FD, así como la inclusión de suplementos de FD en dietas hipocalóricas o conocidas también como dietas para adelgazar. La FD es uno de los principales ingredientes de los alimentos bajos en calorías (constituye más del 50 % del total de ingredientes usados a nivel mundial) y se está incorporando progresivamente a todo tipo de alimentos y bebidas, como factor de calidad nutricional muy apreciado por los consumidores. (Mazza, 1998; Ransley *et al.*, 2001).

La FD está formada por una mezcla heterogénea de sustancias que por sus propiedades físicas y el efecto que cumplen en el organismo se clasifican como Fibra Dietética Soluble (FDS) y Fibra Dietética Insoluble (FDI), referida dicha solubilidad a las fibras que se dispersan en el agua. Las secreciones de las plantas como pectinas y gomas, constituyentes como mucílagos y agentes quelantes como los fitatos forman parte de la FDS; mientras que la celulosa, algunas Hemicelulosas y el almidón resistente constituyen la FDI (Gorinstein *et al.*, 2001).

La FD también puede clasificarse con base en sus constituyentes (Tabla 1). Los polisacáridos estructurales como celulosa, hemicelulosa y los no estructurales como pectinas, gomas y mucílagos forman parte de los polisacáridos no amiláceos y oligosacáridos resistentes. Los elementos como dextrinas indigeribles, metilcelulosa y almidón resistente se consideran carbohidratos análogos; éstos no forman parte de la planta de manera natural, pero surgen de los tratamientos que se aplican a los alimentos y presentan las mismas funciones de la FD. Finalmente, compuestos no

polisacáridos como ceras, cutina, suberina, ácido fítico y taninos se incluyen como sustancias asociadas al complejo de polisacáridos no amiláceos y lignina, ya que se encuentran enlazados a estas estructuras en la planta. Con excepción de los carbohidratos análogos, todos estos compuestos se encuentran asociados a las células vegetales y, debido a que su pared celular varía en composición de acuerdo con el tipo de célula y de planta, la composición de la FD es a su vez variable (Dreher, 1987).

Tabla 1. Clasificación de la FD con base a sus constituyentes.

Clasificación	Constituyentes	
	FDS	FDI
Polisacáridos no amiláceos y Oligosacáridos resistentes	Hemicelulosa Polifruktosas Inulina Oligofruktanos Galacto-oligosacáridos Pectinas Gomas Mucílagos	Celulosa Arabinosilanos y Arabinogalactanos
Carbohidratos análogos		Almidón resistente Dextrinas Indigeribles Maltodextrinas y Dextrinas Polidextrosa Metilcelulosa Hidroxipropilcelulosa
Sustancias asociadas al complejo de polisacáridos no amiláceos y lignina	Fitatos Saponinas	Ceras Cutina Suberina Lignina Ácido Fítico Taninos

Fuente: Sánchez, 2005.

2.5.1 Fibra dietética soluble

La fibra dietética soluble (FDS) está formada por componentes (inulina, pectinas, gomas y fructo-oligosacáridos) que captan mucha agua y son capaces de formar geles viscosos en el tracto intestinal, retardando la evacuación gástrica, generando una mayor sensación de saciedad y haciendo más eficiente la digestión y absorción del alimento (Zambrano *et al.*, 1998). Además, ayuda a reducir la respuesta glucémica y el colesterol plasmático, disminuir el riesgo de enfermedades cardiovasculares y proteger contra el cáncer colorrectal (Harris *et al.*, 1993; Theuwissen y Mensink, 2008; Roehrig, 1988). Este tipo de fibra predomina en las leguminosas, cereales (avena y cebada) y frutas (Zambrano *et al.*, 1998).

2.5.2 Fibra dietética insoluble

La fibra dietética insoluble (FDI) no se disuelve en agua y pasa a través del tracto intestinal sin sufrir cambios. Sus formas más importantes son la celulosa, algunas hemicelulosas y lignina (Dreher, 1999). La FDI ha demostrado las funcionalidades fisiológicas de apoyar el crecimiento de la flora intestinal, aumentar el volumen de las heces, disminuir el tránsito intestinal e inhibir la actividad de la lipasa pancreática (Foschia *et al.*, 2013; He *et al.*, 2015). Se encuentran en todos los granos integrales, salvado de trigo y algunos vegetales (Dreher, 1999).

Las frutas y verduras (cualquier producto vegetal) contienen fibras solubles e insolubles, pero la proporción de éstas varía de acuerdo al tipo y grado de madurez de la verdura o fruta. Cerca del 75 % de la fibra dietética en los alimentos está presente en la forma de FDI, sin embargo, la mayoría de las fuentes de fibra en la actualidad son mezclas de ambas fibras, insolubles y solubles (Dreher, 1999).

2.5.3 Propiedades fisicoquímicas de la fibra dietética

El interés actual de la FD se debe a la asociación epidemiológica entre una dieta rica en fibra y una menor incidencia de enfermedades crónico-degenerativas. Las repercusiones fisiológicas atribuidas al consumo de FD derivan de sus características fisicoquímicas (Guillon y Champ, 2000).

Las principales propiedades fisicoquímicas de la FD son: capacidad de retención de agua, capacidad de absorción de moléculas orgánicas, viscosidad y fermentabilidad (Guillon y Champ, 2000). Estas propiedades específicas que se conocen estudiando la fibra *in vitro*, pueden

modificarse en función de muchos factores, entre los que pueden mencionarse la madurez del alimento vegetal, presencia de otros tipos de fibra, etc. (Mälkki, 2001; Mataix y Gassull, 2002).

La capacidad de retención de agua (CRA) es la cantidad de agua retenida por el peso conocido de las fibras secas en condiciones específicas de temperatura, tiempo de duración y velocidad de centrifugación. En general, los constituyentes polisacáridos de las fibras dietéticas son fuertemente hidrófilos. El agua se mantiene en los sitios hidrófilos de la propia fibra o dentro de espacios vacíos en la estructura molecular (Mudgil y Barak, 2013).

La CRA es importante por su grado de asociación con efectos de saciedad, el aumento del tamaño del bolo alimenticio, el peristaltismo intestinal y los incrementos del volumen y el peso de las heces, además de su efecto laxante (Danisco, 2003; Duque *et al.*, 1998). Cabe señalar que las pectinas, mucílagos (FDS) y algunas hemicelulosas poseen una gran capacidad de retención de agua (Dello Staffolo, 2003).

La capacidad de absorción de moléculas orgánicas, se refiere a la capacidad de absorción de ácidos biliares, colesterol y ciertos compuestos tóxicos (drogas, agentes carcinogénicos y mutagénicos) (Zambrano *et al.*, 2001). La matriz de gel formada por fibras solubles que eventualmente se excretan en las heces puede atrapar algunos de los ácidos biliares liberados de la vesícula biliar. Este atrapamiento físico parece ser más pronunciado en el íleon terminal donde los ácidos biliares generalmente se reabsorben (Elleuch *et al.*, 2011).

La viscosidad se describe como la resistencia al flujo cuando se aplica un esfuerzo de corte. En general, con el aumento del peso molecular y la longitud de la cadena, incrementa la viscosidad de la solución de fibra; sin embargo, dependen también de la concentración de la FD en la solución, la temperatura, el pH y las condiciones del esfuerzo de corte (Dhingra *et al.*, 2012). La unión del agua para desarrollar viscosidad o formar geles es un efecto físico importante de la FD en los alimentos. Los geles, que existen como una solución, dispersión o suspensión de flujo libre en sus estados iniciales, son esencialmente sistemas de fluidos viscoelásticos que no muestran ningún flujo de estado estable. La gelificación es causada por la reticulación, ya sea de naturaleza química a través de enlaces covalentes o por una interacción física entre cadenas de polímero (Bohm y Kulicke, 1999).

Las propiedades gelificantes se evalúan en pruebas oscilatorias a pequeña escala, que no afectan adversamente a la microestructura del gel, en estas se miden los parámetros G' y G'' . El valor G'

representa las características elásticas del gel y también refleja el grado de deformación cuando las fuerzas actúan sobre el material. Cuanto mayor sea el valor de G' , mejor será la elasticidad del gel. La propiedad de la viscosidad de la solución puede expresarse mediante el módulo de pérdida G'' , que dificulta el flujo de líquido, por lo tanto, cuanto mayor es el valor G'' , mayor será también la viscosidad (Erasov *et al.*, 2015).

La viscosidad y la formación de geles del contenido estomacal juegan un rol importante en los efectos fisiológicos y bioquímicos, puesto que al formar una estructura tridimensional, se reduce el contacto físico entre las enzimas digestivas y los nutrientes, los cuales son arrastrados por la materia fecal sin haber sido digeridos y absorbidos a través del intestino (Dhingra *et al.*, 2012; Isken *et al.*, 2010).

La fermentación de la FD varía de acuerdo al grado de solubilidad desde una fermentación completa (pectina), pasando por fermentación mediana (hemicelulosa) y hasta una fermentación nula (lignina). La fermentación es producida por la microbiota intestinal, principalmente por los microorganismos anaeróbicos distribuidos en dos phylus: Firmicutes (*Ruminococcus*, *Clostridium*, *Eubacterium*, *Lactobacillus*) con 60 %, Bacteroidetes (*Alistipes*, *Prevotella*, *Bacteriodes*) con 15 % y con un número significativo de Actinobacterias (*Bifidobacterium*) y Proteobacterias (López *et al.*, 2014). La fermentación de la FD juega un rol importante en los efectos fisiológicos y bioquímicos (regulación del sobrepeso y la obesidad) puesto que a partir de ella se producen los ácidos grasos de cadena corta (AGCC) tales como el butirato, propionato y acetato; involucrados con la promoción y/o inhibición de ciertas hormonas responsables de la estimulación de saciedad y apetito (Romo-Vaquero *et al.*, 2014; Layden *et al.*, 2013). La manzana con alto contenido de pectina, el plátano y los tubérculos con altos contenidos de almidón resistente, han demostrado una fermentación rápida y completa; sin embargo, todos ellos contribuyen escasamente con el aumento del volumen fecal. Por otro lado, el Psyllium y el salvado de trigo fermentan lentamente; y están más asociados al incremento de la masa y volumen fecal (Mudgil y Barak, 2013).

2.5.4 Beneficios a la salud

2.5.4.1 Efecto sobre el sistema digestivo

La microflora colónica fermenta parcial o completamente los carbohidratos que resisten la digestión y la absorción en el intestino delgado. Los productos de fermentación, como los ácidos grasos de cadena corta, desempeñan un papel fisiológico clave. Los carbohidratos no digeridos que

alcanzan el intestino grueso suavizan la consistencia de las heces y aumentan la frecuencia del peso de defecación. Con una mayor ingesta de FD, el peso de las heces tiende a ser mayor y el tiempo de tránsito aumenta, lo que puede contribuir a la prevención de trastornos del intestino grueso, como estreñimiento, diverticulitis y cáncer (Elleuch *et al.*, 2011). La mayoría de los carbohidratos no absorbidos tienen efectos laxantes, tanto por el aumento de la masa bacteriana o los efectos osmóticos, como por la unión del agua a la fibra no fermentada restante. Estudios han evaluado la relación entre la ingesta de FD y el riesgo de cáncer en el colon o el recto. Los estudios de intervención han abordado los efectos de la FD sobre la recurrencia del adenoma, que generalmente se consideran un marcador temprano para el cáncer colorrectal. La evidencia general de un efecto de la ingesta total de fibra en el riesgo de cáncer colorrectal no se considera suficiente para servir de base para las pautas sobre la ingesta de FD. Sin embargo, las personas con menos ingesta de fibra pueden tener un mayor riesgo (Mudgil y Barak, 2013).

2.5.4.2 Efecto reductor de colesterol

Estudios recientes muestran una asociación inversa entre la ingesta de FD y el riesgo de enfermedades coronarias. En general, se considera que los niveles adecuados de ingesta de FD disminuyen el riesgo de enfermedades coronarias. Los mecanismos postulados para niveles bajos de colesterol de lipoproteínas totales y de baja densidad (LDL) incluyen alteraciones en la absorción de colesterol y la reabsorción de ácidos biliares, y alteraciones en el metabolismo hepático y la depuración plasmática de las lipoproteínas. Las fibras altamente viscosas (como los β -glucanos de avena, las pectinas y la goma guar) influyen en los niveles de lípidos en la sangre, mientras que las fibras no viscosas, como la fibra de trigo y la celulosa, generalmente no lo hacen. En algunos países, la evidencia de las propiedades reductoras del colesterol de ciertas fibras viscosas, especialmente β -glucanos de la avena, se considera suficiente para los reclamos sobre la reducción del riesgo de enfermedades coronarias (Theuwissen y Mensink, 2008).

2.5.4.3 Reducción de la respuesta glucémica

En países desarrollados y en vías de desarrollo, la diabetes tipo 2 es reconocida como un problema importante para la salud; fisiopatología que ocasiona la disminución de la sensibilidad de insulina y la alteración de la función de las células β del páncreas que conduce a la hiperglicemia (Kim *et al.*, 2016). En la actualidad, la ingesta de alimentos ricos en FD ya sea en forma natural (cereales y leguminosas integrales), enriquecidos o como fibras purificadas; es considerada como una terapia

médica y es una buena estrategia para reducir la hiperglucemia postprandial en pacientes con diabetes tipo 2. Los mecanismos están basados en la reducción de la densidad en calorías de los alimentos, tiempo prolongado de masticación, aumento de la saciedad, retraso en el vaciamiento gástrico y atenuación de la velocidad de absorción de glucosa en el intestino delgado debido a que la fibra tiene la capacidad de adsorber y retener moléculas orgánicas tal como la glucosa y grasa (Kim *et al.*, 2016; Bae *et al.*, 2016). Estudios en humanos, han demostrado que el consumo de 15 g/día de fibra reduce significativamente la diabetes (Slavin, 2013). Por otro lado, la Asociación Americana de Diabetes (sigla en inglés: ADA) recomienda el consumo de fibra entre 20 y 25 g/día (soluble e insoluble) en personas saludables para mantener un mejor control glucémico e insulínico, y en pacientes con diabetes tipo 2 hasta 50 g/día de fibra; aunque esta cantidad puede presentar limitaciones en la palatabilidad y problemas gastrointestinales secundarios (Miller, 2014).

3 JUSTIFICACIÓN

La generación de residuos agroindustriales es actualmente una problemática a nivel mundial, debido a que en la mayoría de los casos éstos no son procesados o dispuestos adecuadamente, situación que contribuye a la contaminación ambiental. El bagazo de piña es considerado un residuo agroindustrial que tiene usos potenciales como materia prima para obtener productos de valor agregado, ya que contiene fibra, azúcares y compuestos bioactivos de interés alimentario. Actualmente, los estudios de éste se enfocan únicamente en la producción de bioetanol y enzimas proteolíticas, o simplemente es desechado contribuyendo al problema de generación de residuos sólidos.

Una alternativa al problema en la disposición final del bagazo de piña es encontrar una tecnología apropiada para su tratamiento y valoración indirecta, aprovechando su contenido de fibra dietética. En los últimos años, la importancia de la fibra dietética se ha incrementado significativamente debido a los beneficios a la salud que proporciona, siendo la fracción soluble la de mayor importancia. Se han utilizado diversas metodologías para incrementar esta fracción en diversas fuentes, una de ellas es la hidrólisis enzimática, que modifica los componentes de la fibra dietética convirtiendo su fracción insoluble a soluble o hasta azúcares simples. El producto final depende principalmente del tipo de sustrato, tiempo de reacción y del tipo y concentración de enzima. Por lo anterior, el bagazo piña puede ser una fuente ideal para conocer el efecto del tratamiento enzimático sobre sus componentes.

4 HIPÓTESIS

La hidrólisis enzimática incrementará el contenido de fibra soluble y mejorará las propiedades fisicoquímicas, funcionales, reológicas y estructurales del bagazo de piña.

5 OBJETIVOS

5.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de la hidrólisis enzimática sobre el contenido de fibra dietética soluble, propiedades fisicoquímicas, funcionales, reológicas y estructurales de harina de bagazo de piña

5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener harina de bagazo de piña hidrolizada con celulasa a diferentes tiempos y concentraciones de enzima.
- Determinar el contenido de fibra dietética total, soluble e insoluble de la harina nativa y modificada.
- Evaluar las propiedades fisicoquímicas, funcionales, reológicas y estructurales de la harina de bagazo de piña nativa y modificada.

6 MATERIALES Y MÉTODOS

En esta investigación se efectuó la caracterización de la fibra del bagazo de piña, después de ser modificada enzimáticamente. La experimentación se llevó a cabo en el laboratorio de Alimentos de la Universidad del Papaloapan Campus Tuxtepec.

6.1 MATERIALES

6.1.1 Materia prima

El bagazo de piña (*Ananas comosus*) fue donado por un productor de jugo de piña que comercializa este producto en la ciudad de Tuxtepec, Oaxaca. La piña de tipo MD2, o también conocida como piña miel, es cultivada en el municipio de Loma Bonita, Oaxaca. La α -amilasa termoestable (actividad enzimática: 3,000 U/ mL) y la celulasa (actividad enzimática: 25,000 U/ g) se adquirieron de Megazyme y Sigma-Aldrich, respectivamente (Megazyme International Ireland; Louis, EE. UU.). El resto de los reactivos y disolventes fueron de grado analítico.

6.2 MÉTODOS

6.2.1 Preparación de la harina de bagazo de piña

Se realizaron tres lavados con agua al bagazo de piña, se escurrió y se separó la pulpa y el corazón, además se eliminaron residuos de cáscara. La materia prima se sometió a un proceso térmico (15 min a 15 lb de presión en autoclave). Posteriormente se secó durante 24 h en un secador de horno a 60 °C, para eliminar el agua. Una vez obtenida la materia seca se trituro y tamizó (tamiz de malla 40) para tener un tamaño de partícula homogéneo. La harina obtenida se almacenó a temperatura ambiente en un recipiente herméticamente cerrado.

6.2.2 Análisis químico proximal

Para conocer la composición química de la harina nativa, se determinó mediante los métodos oficiales descritos por la AOAC (2000), comprendiendo los análisis siguientes:

6.2.2.1 Humedad. (Método 925.09). Se realizó por pérdida de peso al calentar una muestra de harina a 110 °C en una estufa durante 4 h a presión atmosférica.

6.2.2.2 Cenizas. (Método 923.03). Se obtuvo por incineración de una muestra de harina en una mufla a 550 °C durante 4 h.

6.2.2.3 Proteínas. (Método 954.01). Este análisis se basó en el método Kjeldahl para la cuantificación del nitrógeno total presente en la muestra, utilizando el coeficiente 6.25 como factor de conversión a proteínas.

6.2.2.4 Grasa cruda. (Método 920.39). Se cuantificó después de una extracción de la muestra durante 4 h con éter de petróleo en un sistema Soxhlet.

6.2.3 Modificación enzimática

Se realizó una mezcla de fibra dietética con una solución de regulador de fosfatos (0.2 M) a pH 4.8 en una relación 1:12 p/v. La enzima (celulasa) se adicionó a la mezcla y se colocó en baño maría a 50 °C. Se utilizaron tres concentraciones de enzima (0.5, 1 y 1.5 U/ g) utilizando 3 tiempos de hidrólisis diferentes (30, 60 y 90 min), para la identificación de cada tratamiento se utilizaron las etiquetas que se muestra en la Tabla 2. Una vez pasado el tiempo de hidrólisis, se colocó la mezcla en ebullición por 15 min para detener la actividad de la enzima y posteriormente se dejó enfriar a temperatura ambiente. La solución se centrifugó a 4500 x g por 15 min, se removió el sobrenadante y el precipitado se secó a 60 °C por 18 h.

Tabla 2. Tratamientos de la modificación enzimática de harina de bagazo de piña.

Tiempo (min)	Concentración de celulasa (U/ g)		
	0.5	1	1.5
30	0.5U30	1U30	1.5U30
60	0.5U60	1U60	1.5U60
90	0.5U90	1U90	1.5U90

6.2.4 Evaluación reológica

Las evaluaciones reológicas se realizaron de acuerdo con el método utilizado por Morales *et al.* (2017) usando un reómetro híbrido (TA Modelo HR2, TA Instrument, EE. UU.) utilizando una geometría de placa plana (placa SST ST 40 mm sandblast) a 25 °C. Se realizó una mezcla de fibra dietética con agua destilada en una relación 1:20. Las muestras se cargaron y se dejaron equilibrar durante 5 min. Los experimentos se realizaron utilizando dos pasos de mediciones reológicas: (1) barridos de deformación y (2) barridos de frecuencia. Los barridos de deformación (0.1 y 100 %) de las muestras fueron evaluados a 25 °C, y una frecuencia constante de 0.1 Hz. Estos experimentos se realizaron para determinar la máxima deformación alcanzable por todas las muestras en la región viscoelástica lineal (LVR). Los barridos de frecuencia de las muestras se evaluaron a 25 °C. Los espectros mecánicos obtenidos se caracterizaron por G' , G'' en función de la frecuencia (f (Hz)) en el rango de 0.01 a 100 Hz, en una deformación constante (0.2 % de deformación). G' es el módulo elástico o de almacenamiento dinámico, relacionado con la respuesta del material como un sólido. G'' es el módulo viscoso o de pérdida, relacionado con la respuesta del material como un fluido.

6.2.5 Caracterización estructural por difracción de rayos X

Los patrones de difracción de rayos X de las fibras se obtuvieron mediante un difractómetro de rayos-X (Bruker Axs, modelo D8 Advance), con un generador de radiación de Cu-K α con filtro de Ni y rejilla de 2 mm. Se midieron en 2θ de 5 a 50 ° con una corriente de 30 mA y un voltaje de 40 kV.

6.2.6 Caracterización estructural por espectroscopia de transmisión de infrarrojo con transformada de Fourier de reflectancia total atenuada (FTIR-ATR)

Los análisis de FTIR se llevaron a cabo en un espectrómetro (DYNASCAN modelo Spectrum 100, Perkin Elmer) utilizando un interferómetro de reflectancia total atenuada (ATR). Los espectros fueron obtenidos a una resolución de 4 cm^{-1} , en un rango de 4000-550 cm^{-1} . (García-Muñoz, 2017).

6.2.7 Determinación de fibra dietética total (FDT), FDI y FDS

Los contenidos de FDT, FDI y FDS de fibra dietética nativa y modificada se determinaron mediante los métodos oficiales AOAC 991.43 (AOAC, 2000). Las mediciones se llevaron a cabo por triplicado. Las muestras se sometieron a digestión enzimática secuencial mediante α -amilasa, proteasa y amilglucosidasa termoestable para eliminar el almidón y la proteína. Para FDI y FDS,

el digestado de enzima se filtró; el residuo (FDI) se lavó con agua destilada y luego se secó y se pesó. Para FDS, el filtrado y los lavados combinados se precipitaron con etanol, y luego se filtraron, secaron y pesaron. El valor residual de FDI y FDS se corrigió para proteínas, cenizas y blanco. El contenido de FDT se obtuvo por la suma de los resultados para FDI y FDS. Los resultados para FDS y FDI se determinaron de acuerdo a las ecuaciones siguientes:

$$FD (\%) = \frac{\frac{R_1 + R_2}{2} - p - A - B}{\frac{m_1 + m_2}{2}} \times 100$$

Dónde: R_1 = peso del residuo 1 de m_1 ; R_2 = peso del residuo 2 de m_2 ; m_1 = peso de la muestra 1; m_2 = peso de la muestra 2; p = peso de proteína de R_1 ; A = peso de ceniza de R_2 y B = Blanco.

$$B = \frac{BR_1 + BR_2}{2} - BP - BA$$

Dónde: BR = residuo en blanco; BP = proteína en blanco de BR_1 ; BA = ceniza en blanco de BR_2 .

6.2.8 Propiedades fisicoquímicas

6.2.8.1 Capacidad de retención de agua (CRA)

La CRA se determinó de acuerdo con el método utilizado por Robertson *et al.* (2000) con algunas modificaciones. Las muestras (0.2 g) se hidrataron en 6 mL de agua destilada a temperatura ambiente con agitación constante durante 18 h y se centrifugaron a 4500 x g durante 25 min. El peso del residuo resultante se registró tanto antes como después del secado (es decir, peso fresco y seco, respectivamente) a 105 °C hasta peso constante. La CRA fue calculada mediante la siguiente ecuación:

$$CRA (g/g) = \frac{(Mp - Ms)}{Ms}$$

Dónde Mp es el peso del residuo nuevo (g) y Ms es el peso del residuo seco (g).

6.2.8.2 Capacidad de retención de aceite (CRA)

Se determinó de acuerdo con el método realizado por Abdul-Hamid y Luan (2000). Se añadieron cuatro gramos de muestra a 20 mL de aceite de maíz en un tubo de centrífuga de 50 mL. El

contenido se agitó luego durante 30 s cada 5 min a temperatura ambiente y, después de 30 min, los tubos se centrifugaron a 1600 x g durante 25 min. La CRa se expresó de la siguiente manera:

$$CRa (g/g) = \frac{(Mp - Ms)}{Ms}$$

Dónde Mp es el peso del pellet (g) y Ms es el peso seco de la muestra (g).

6.2.9 Efecto de la fibra dietética en la difusión de la glucosa

El efecto de la FD en la difusión de la glucosa se determinó mediante el método descrito por Ou *et al.* (2001) con algunas modificaciones. El sistema de fibra dietética-glucosa comprendía 100 mmol/L de glucosa y 2 % de fibra dietética. Un total de 23 muestras (2 réplicas de 11 fibras dietéticas diferentes y un blanco), de 25 mL cada una, se dializaron en bolsas de diálisis con un peso molecular de corte de 12000 contra 200 mL de agua destilada a pH 7.0 y 37 °C. El contenido de glucosa del dializado se determinó después de 20, 30, 60, 90 y 120 min.

6.2.10 Efecto de la fibra dietética en la actividad de α -amilasa

El efecto de la FD en la actividad de α -amilasa se determinó mediante el método descrito por Ou *et al.* (2001) con algunas modificaciones. Se añadieron 40 g de almidón de papa a ~900 mL de tampón de fosfato 0.05 M (pH 6.5). La solución, después de agitar a una temperatura de 65 °C durante 30 min, se completó hasta un volumen final de 1000 mL para dar una solución de almidón al 4 % (p/v). El sistema de almidón- α -amilasa-fibra dietética comprendía la solución de almidón anterior, 100 μ L de α -amilasa y 2 % de fibra dietética: 25 mL de cada una de las soluciones de fibra se dializaron frente a 200 mL de agua destilada a 37 °C. El contenido de glucosa en el dializado se midió a 20, 30, 60, 90 y 120 min.

6.2.11 Análisis estadístico

Cada prueba se llevó a cabo por triplicado. Los análisis estadísticos se realizaron con el software estadístico Minitab 16. Las diferencias entre las muestras se determinaron mediante análisis de varianza (ANOVA) seguido por la prueba de Tukey ($p < 0.05$ se consideró estadísticamente significativo).

7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA PROXIMAL DE LA HARINA

El contenido de humedad, cenizas, carbohidratos, grasas y proteína de la harina de bagazo de piña se muestran en la Tabla 3. La harina de bagazo de piña presentó un contenido de humedad del 7.07 %, valor que se encuentra dentro del contenido de humedad que caracteriza a las harinas en general (<15 %), lo cual indica que la harina obtenida cumple con esta especificación (CODEX Alimentarius, 2007). Cabe mencionar que el contenido de humedad depende de la variedad de la materia prima (fruta o verdura), así como del proceso de secado al cual fue sometida (Muños *et al.*, 2001).

Tabla 3. Composición química proximal de la harina de bagazo de piña.

Componente	Porcentaje (%)
Humedad	7.07 ±0.04
Cenizas	2.15 ±0.007
Carbohidratos	81.47 ±0.05
Grasa cruda	0.87 ±0.007
Proteína ¹	8.43 ±0.04
Fibra dietética total	53.54 ±0.2

Los datos se presentan como media ± DE (n = 3). Los carbohidratos se determinaron por diferencia.

¹N x 6.25.

En cuanto al contenido de cenizas, éste se refiere al análisis de residuos inorgánicos (minerales) que quedan después de la ignición u oxidación completa de la materia orgánica de un alimento. En general, la piña es considerada como una buena fuente de minerales, la cual contiene en mayor proporción potasio y sodio (228 mg/ 100 g y 2.9 mg/ 100 g respectivamente) y en menor proporción zinc y selenio, teniendo en consideración que estos valores pueden variar dependiendo del tipo y variedad de piña (Paul y Shaha, 2004; Rickman y Barrett, 2007). En este caso, la harina presentó 2.15 % de cenizas. Existen reportes sobre el contenido de cenizas para el rastrojo de piña y para una mezcla de bagazo de piña-bagacillo de caña, los cuales presentaron un contenido de 8.6 % y 8.2 % respectivamente (López *et al.*, 2009; Cervantes *et al.*, 1978), sin embargo, la materia prima estudiada por esos autores no fue procesada para su transformación en harinas y no hace referencia a los mismos componentes del bagazo de piña analizado (sólidos centrifugados del jugo y parte de la cáscara), lo cual no hace factible el comparar nuestros resultados obtenidos con ellos.

Por otro lado, el contenido de grasas y carbohidratos fue de 0.87 % y 27.93 % respectivamente. La fruta de piña solo hace una contribución baja de lípidos (Valderrain-Rodríguez *et al.*, 2017). Para el caso de carbohidratos, la sacarosa, la fructosa y la glucosa son los azúcares predominantes en la piña, sin embargo, la sacarosa se encuentra en niveles más altos que los otros monosacáridos (Cordenunsi *et al.*, 2010). Para la calidad de la piña, el perfil del azúcar juega un papel importante en la calidad del sabor y su aceptabilidad comercial (Lu *et al.*, 2014). Debido a que la piña es una fruta no climatérica, el nivel de azúcar en esta fruta depende del momento de la cosecha. Por lo tanto, para obtener frutos dulces de piña, es necesario cosecharlos a medida que se acercan a la etapa madura (Cordenunsi *et al.*, 2010). Por lo anterior, el valor para contenido de carbohidratos de harina de bagazo de piña puede variar dependiendo de la variedad de piña en estudio.

Además, la harina de bagazo de piña presentó un valor de 8.42 % para el contenido de proteína. La piña es una fuente de bromelina, una enzima proteolítica, reconocida como el ingrediente bioactivo más valioso y estudiado de la fruta (Lozano *et al.*, 1993). López *et al.* (2014), reportaron un contenido de proteína del 8.7 % para el rastrojo de piña, valor muy similar al obtenido a pesar de que el rastrojo de piña hace referencia a hojas, tallo y parte de las raíces. Por otro lado, Cervantes *et al.* (1978) obtuvieron un valor de proteína del 4.4 % para una mezcla de bagazo de piña-bagacillo de caña (relación 6:1, aproximadamente), donde la variedad de piña de estudio fue Cayena lisa.

Finalmente, el contenido de FDT obtenido para la harina de bagazo de piña fue del 53.54 %. En general, la fibra de piña incluye sustancias de celulosa, hemicelulosa, lignina y pectina (Vidal-Valverde *et al.*, 1982). De acuerdo con las directrices para el uso de declaraciones nutricionales y saludables del CODEX alimentarius, un alimento con contenido alto en fibra dietética es aquel que tenga 6 g por 100 g o 3 g por 100 kcal. Por lo que la harina de bagazo de piña cumple con ser un producto con un contenido alto en fibra dietética.

7.2 EVALUACIÓN REOLÓGICA

Se realizaron mediciones para obtener los parámetros G' y G'' para reconocer la región viscoelástica lineal. En la Figura 3 se muestra el barrido de amplitud del módulo de almacenamiento G' , esto realizado con el fin de poder encontrar la región donde el gel, formado por la muestra, no sea destruido, para posteriormente poder definir los barridos de frecuencia y garantizar que la medición se encuentre dentro de la región lineal y así tener un correcto valor de viscoelasticidad. Según la Figura 3, se observa que los valores de G' para la harina de bagazo de piña sin modificar y de todos

los modificados se encuentran por encima de los valores de G' de la muestra control (M). Esto puede deberse a la diferencia en la composición del bagazo de piña y la fibra comercial, ya que además de tener diferentes tipos de FDS, a la cual se le atribuye la capacidad de formar geles, cuentan con carbohidratos no fibrosos ni amiláceos, lo cual afecta la resistencia del gel a ser deformado al aplicar un esfuerzo cortante. Además, se observa que para las harinas modificadas, sus valores de G' se encuentran por debajo de los valores de la harina nativa, lo que quiere decir que la enzima utilizada en la hidrólisis actúa sobre la celulosa, logrando la despolimerización de esta, lo cual generó cambios en su composición, y a su vez, cambios significativos en el módulo de almacenamiento G' para estos barridos de amplitud.

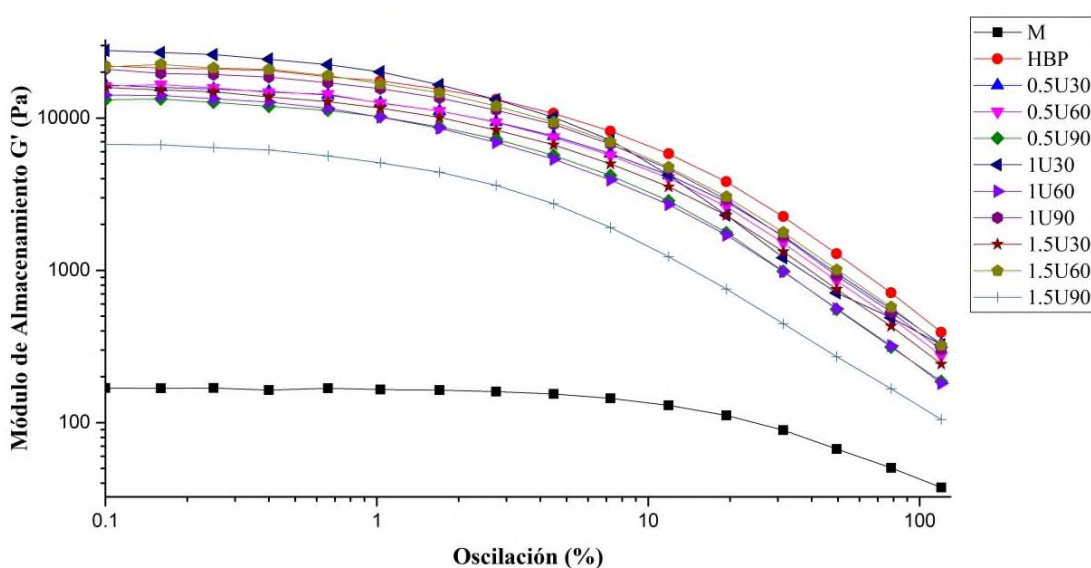


Figura 3. Barrido de amplitud del módulo de almacenamiento G' de harina de bagazo de piña nativa y modificada.

Por otro lado, se observa que todas las muestras a un % de Oscilación $>10^{10}$, el gel formado empieza a ser destruido debido a la fuerza cortante aplicada.

Después de realizar el barrido de amplitud, se procedió al realizar el barrido de frecuencia para cada uno de los módulos, G' y G'' , los cuales se muestran en las Figuras 4 y 5. Cuando G' es mucho más grande que G'' indica que la deformación es esencialmente recuperable y que el gel formado es rígido, es decir, se comporta más como un sólido; mientras que cuando G' es mucho más pequeño que G'' , refleja que la energía utilizada para deformar el gel se disipa viscoso y la muestra es menos rígida, comportándose más como un líquido (Tabilo-Munizaga y Barbosa-Canovas, 2005). El módulo de almacenamiento G' fue mayor que el módulo de pérdida G'' para casi todas las muestras (excepto para 0.5U90, 1.5U30 y 1.5U60) a la misma frecuencia, lo que indica un comportamiento más elástico. Se observa que el valor inicial de G' y G'' para la muestra M es menor al resto de las

muestras, lo que quiere decir que presenta propiedades viscoelásticas menores que las demás, sin embargo, a valores $>10^{10}$ para el módulo G' este comportamiento cambia, en comparación de las muestras 0.5U90, 1.5U30 y 1.5U60, lo que quiere decir que a velocidades de corte mayores a 10^{10} rad/s el gel formado por la muestra M tiende a comportarse más como un sólido por lo que se vuelve más elástico.

Por su parte, las muestras HBP y 1U30 mostraron un comportamiento similar en sus propiedades reológicas dinámicas. Sin embargo, los módulos G' y G'' de 1U30 fueron mayores que los de HBP, lo cual indicó que la muestra 1U30 presenta mejores propiedades viscoelásticas que las de la muestra HBP.

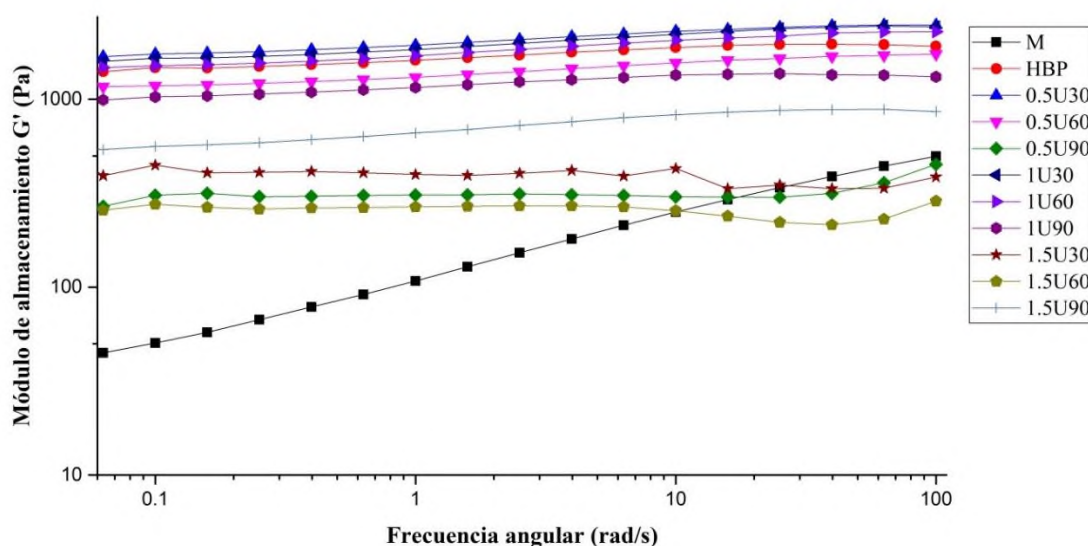


Figura 4. Barrido de frecuencia para el módulo de almacenamiento G' en harina de bagazo de piña nativa y modificada.

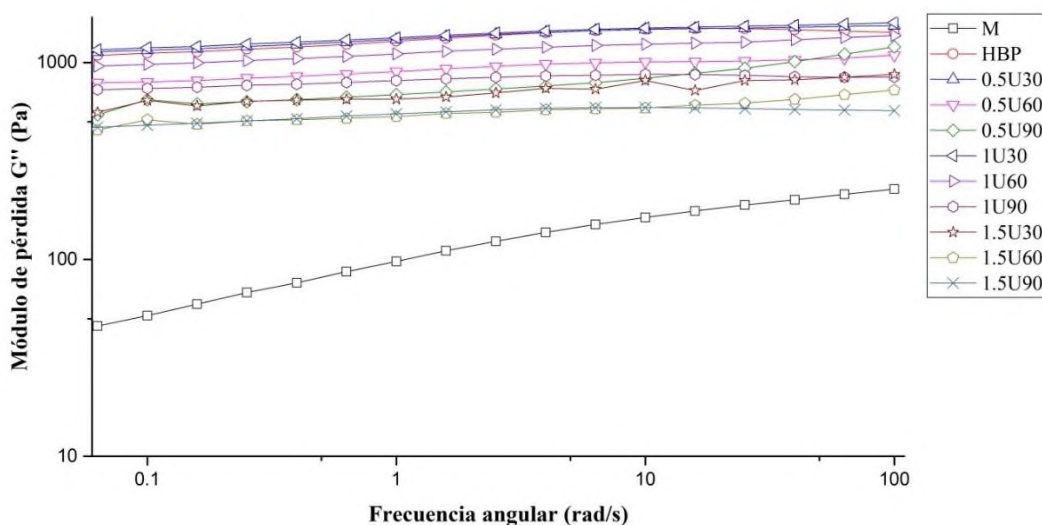


Figura 5. Barrido de frecuencia para el módulo de pérdida G'' en harina de bagazo de piña nativa y modificada.

7.3 DIFRACCIÓN DE RAYOS X

El análisis de difracción de rayos X es un método efectivo que se puede llevar a cabo para evaluar la cristalinidad de esta fibra después de diferentes tratamientos físicos, químicos o enzimáticos (Kallel *et al.*, 2016). La Figura 6 muestra los patrones de DRX de harina de bagazo de piña nativa y modificada con 0.5U, 1U y 1.5U de celulasa. Se observa que las intensidades máximas y el ensanchamiento máximo difieren de una muestra a otra. La diferencia más pronunciada ocurre en el rango máximo de reflexión entre 21.90° y $22.20^\circ 2\theta$ asignada al plano cristalográfico [0 0 2] de celulosa. Los planos cristalográficos se marcan de acuerdo con la estructura de celulosa nativa, como describió Wada *et al.* (2001).

Por otra parte, las muestras de HBP nativa y modificada, 0.5U30, presentaron intensidades y ensanchamientos iguales con ángulos típicos de difracción de celulosa tipo I, generando un pico fuerte a $22.1^\circ 2\theta$ en el plano cristalográfico [0 0 2] y un pico de difracción débil a $34.50^\circ 2\theta$. Este nulo cambio en el patron DRX se debe a que la muestra modificada (0.5U30) se obtuvo con una concentración baja de enzima y el menor tiempo de hidrólisis, lo cual no afectó la cristalinidad original. Por su parte, las muestras 0.5U60 y 0.5U90 presentaron el mismo pico de difracción a $22.1^\circ 2\theta$ que las muestras de HBP nativa y modificada (0.5U30), sin embargo, no se observó el pico a $34.5^\circ 2\theta$, esto pudo deberse a la modificación estructural de la celulosa por un mayor tiempo de hidrólisis.

Por otro lado, se observa que la muestra 1U30 presentó similitudes en los picos de difracción con la muestra M, aunque con diferentes intensidades y ensanchamientos, excepto los picos 16° y $45^\circ 2\theta$ presentes en la muestra M y no en 1U30. Esto pudo deberse a que la naturaleza de ambas muestras es distinta, con respecto al tipo de fibra dietética presente.

Finalmente, los picos de difracción de las muestras 1.5U30 y 1.5U60 fueron muy similares, al igual que el de las muestras 1U90 y 1.5U90, esto puede deberse a la forma en cómo actuó la celulasa en ellas por efecto de la concentración de enzima y los tiempos de exposición de hidrólisis aplicados.

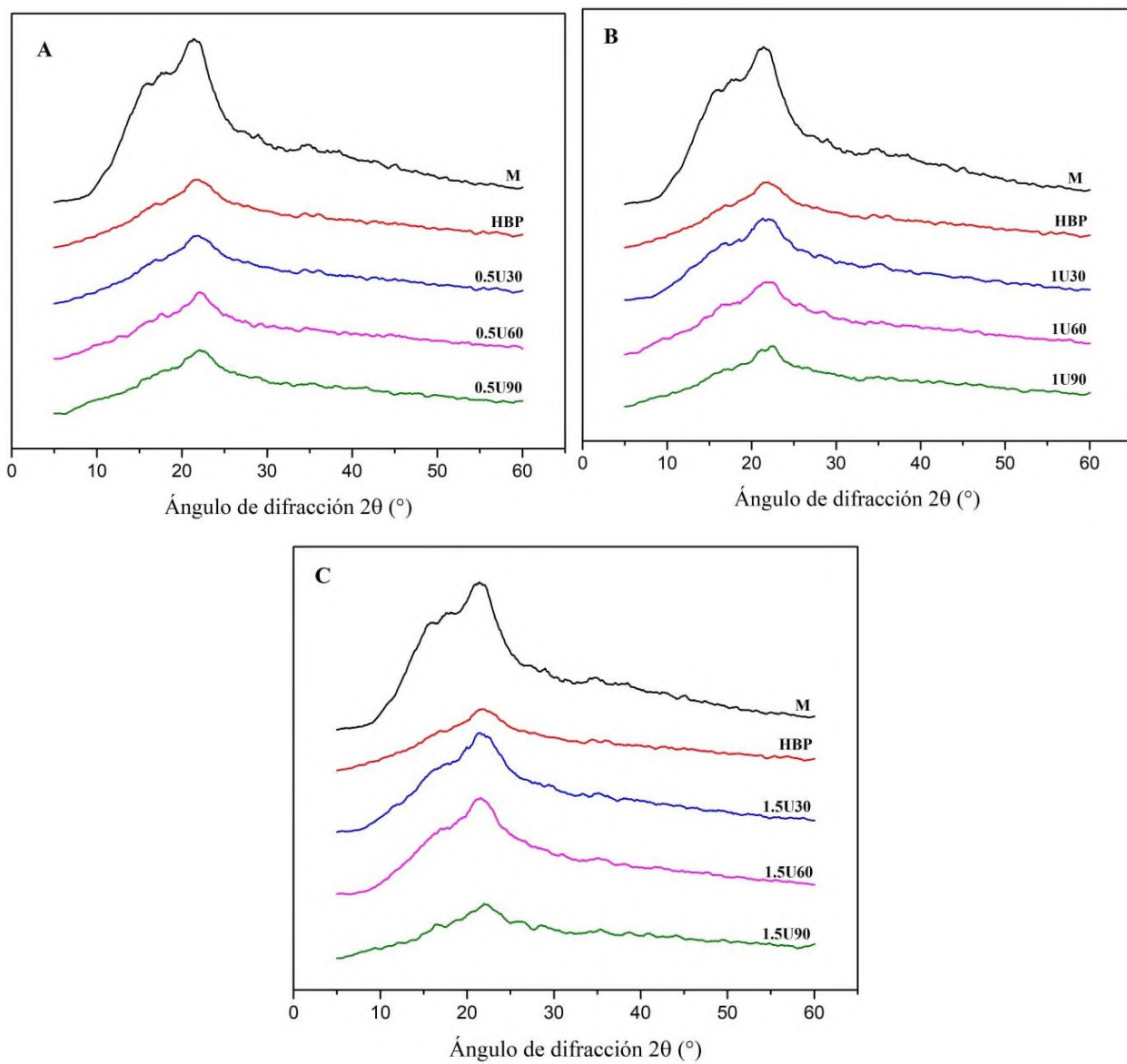


Figura 6. Diagramas de difracción de rayos X de harina de bagazo de piña nativa y modificada. A) Muestras con una concentración de enzima de 0.5U: tiempo de hidrólisis de 30 (0.5U30), 60 (0.5U60) y 90 (0.5U90) minutos. B) Muestras con una concentración de enzima de 1U: tiempo de hidrólisis de 30 (1U30), 60 (1U60) y 90 (1U90) minutos. C) Muestras con una concentración de enzima de 1.5U: tiempo de hidrólisis de 30 (1.5U30), 60 (1.5U60) y 90 (1.5U90) minutos.

7.4 ESPECTROSCOPIA DE INFRARROJO CON TRANSFORMADA DE FOURIER DE REFLECTANCIA TOTAL ATENUADA (FTIR-ATR)

En la Figura 7 se observan los espectros obtenidos por FTIR de harina de bagazo de piña modificada y sin modificar. Todas las muestras modificadas presentan una banda ancha entre 3100-3600 cm^{-1} , atribuida a las vibraciones de tensión de los grupos O-H, lo que comprueba el proceso de hidrólisis enzimática en la celulosa. A diferencia de la banda pequeña de HBP que se encuentra sin hidrolizar. En todas las bandas de los materiales hidrolizados se observan algunas diferencias en forma y anchura, esta variabilidad puede deberse a varios factores, entre ellos la accesibilidad de enzima al sustrato, el área superficial, entre otros, afectando directamente la hidrólisis enzimática. Las bandas localizadas a 2923 y 2848 cm^{-1} son el resultado de las vibraciones por tensión de los grupos C-H el cual están presentes en todos los espectros. La banda cercana a 1750 cm^{-1} está asignada principalmente a las vibraciones de tensión del grupo carbonilo y acetilo C=O, en el componente de xilano de las hemicelulosas y lignina. A 1645 cm^{-1} se observa el grupo OH, correspondiente al agua absorbida por la celulosa. Entre 1450 y 1350 cm^{-1} se presentan vibraciones por deformación de los grupos C-H. En la misma figura se presenta una banda cercana a 1250 cm^{-1} corresponde a la deformación axial asimétrica de =C-O-C, que se observa generalmente cuando están presentes grupos de éter, éster y fenol (Siqueira *et al.*, 2010). Estos picos se encuentran más pronunciados para las muestras 0.5U30, 0.5U60 y 0.5U90.

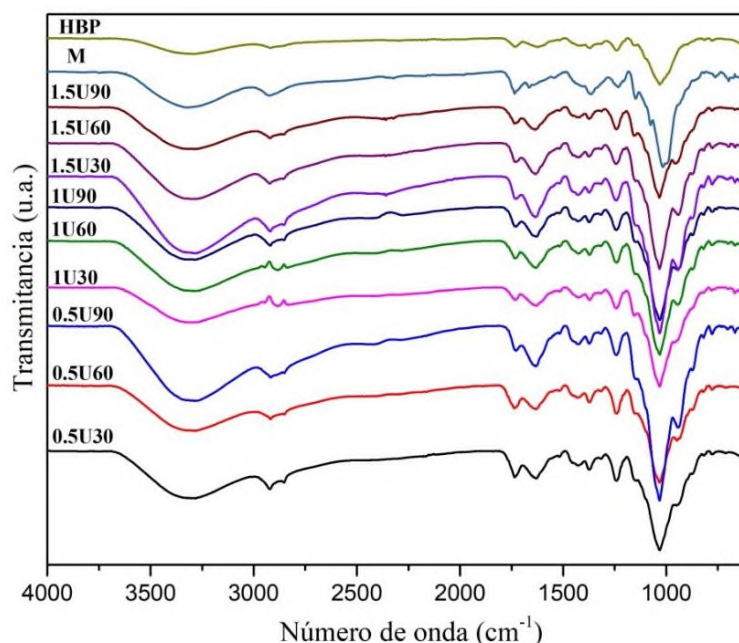


Figura 7. Espectros FTIR de harina de bagazo de piña nativa (HBP), modificada ([E]: 0.5, 1 y 1.5 U; tiempo de hidrólisis: 30, 60, 90 minutos) y Metamucil (M).

A 1162 cm^{-1} se observa una banda de tensión asimétrica del puente C–O–C. Estos resultados son similares a los obtenidos por Cruz *et al.* (2011), los cuales realizaron la modificación de bagazo de piña para la obtención de celulosa y bioetanol, por medio de hidrólisis ácida y fermentación anaerobia, respectivamente. A 1030 cm^{-1} se observa la tensión C–O y a 895 cm^{-1} la frecuencia del grupo C1 (carbono anomérico), asignado al estiramiento C-O-C en enlaces β -(1-4) glucosídico. Todas las muestras modificadas presentaron una banda de menor intensidad, en comparación con HBP y M, lo cual indica que en estos compuestos hay mayor contenido de azúcares, y en los modificados la celulosa únicamente fue hidrolizada hasta oligosacáridos por la hidrólisis.

Esto último se le atribuye a la forma en la que actúa la celulasa empleada (actividad endo-1,4-(1,3:1,4)- β -D-Glucane 4-glucanohidrolasa) (ver apartado 2.4.1.2).

7.5 DETERMINACIÓN DE FIBRA DIETÉTICA TOTAL (FDT), FDI Y FDS

La proporción de FDT, FDS y FDI de FD de harina de bagazo de piña nativa y modificada se muestran en la Tabla 4. Los tratamientos evaluados fueron elegidos en base a su análisis reológico y estructural realizado.

Tabla 4. Fibra dietética total, soluble e insoluble en harina de bagazo de piña nativa y modificada.

Muestras	FDT	FDS	FDI
HBP	53.54 ± 0.2^a	0.1 ± 0.02^c	53.44 ± 0.2^a
1U30min	51.95 ± 0.5^b	5.93 ± 0.1^a	46.02 ± 0.7^b
1.5U90min	40.41 ± 0.9^c	3.4 ± 0.2^b	37.01 ± 0.6^c

Los datos se presentan como media \pm DE (n = 3) y se expresaron como "g/ 100 g base seca". Los valores en la misma columna con letras diferentes son significativamente diferentes ($p < 0.05$).

El contenido de FDS mejoró significativamente ($p < 0.05$) mediante el método enzimático. La modificación de la FDS empleando 1U de enzima durante 30 min de hidrólisis (1U30 min) fue 59.3 veces mayor que la FDS de la harina de bagazo de piña nativa (HBP), mientras que el contenido de FDI fue 1.16 veces menor que la FDI contenida en la muestra nativa. Por otro lado, el contenido de FDS y FDI empleando 1.5U de enzima durante 90 min de hidrólisis (1.5U90 min) fue 34 veces mayor y 1.44 veces menor, respectivamente, que la FDS y FDI de la HBP. Según el análisis estadístico, los valores del contenido de FDT, FDS y FDI obtenidos para cada tratamiento

son significativamente diferentes entre ellos ($p < 0.05$), dando como mejor tratamiento a la modificación 1U30 min en el aumento de FDS.

El cambio en la proporción de FDT, FDS y FDI de las diferentes modificaciones de harina de bagazo de piña en relación a la harina nativa, se debe al mecanismo de acción enzimático de la celulasa y a los productos resultantes del mismo (ver apartado 2.4.1.2). Lo que nos dice que la muestra 1.5U90 sobrepasó la hidrólisis esperada debido a la concentración alta de enzima y al tiempo prolongado de ésta, perdiéndose 13.13 % de la FDT contenida en la muestra sin tratar (HBP), la cual pudo convertirse a azúcares simples, afectando también la proporción de modificación de FDI a FDS. Por otro lado, la muestra 1U30 presentó una mejor modificación de la FDI a FDS, perdiéndose solo el 1.59 % de la FDT a azúcares, con respecto a la fibra total contenida en la muestra HBP, llegando la hidrólisis a la formación de compuestos solubles de carácter fibroso.

Estos resultados fueron similares a los obtenidos por Wen *et al.*, (2017) quienes por medio de modificación enzimática, empleando celulasa (0.56 U/ g, actividad enzimática= 78,000 U/ g), lograron el aumento del contenido de FDS (4.8 veces) y la disminución de FDI (1.07 veces) de fibra dietética de salvado de arroz (compuesta por 32.7 % lignina, 18.5 % hemicelulosa y 19.6 % celulosa), con respecto a la FDS y FDI inicial. La diferencia entre los resultados se debe a que la composición química y el contenido de sustrato presente en las materias primas en contraste son diferentes y por ende, también su conformación estructural, dando una mejor hidrólisis en el bagazo de piña que en salvado de arroz.

7.6 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS

7.6.1 Capacidad de retención de agua (CRA)

Los resultados de CRA de harina de bagazo de piña nativa y modificada se muestran en la Figura 8. La HBP nativa y modificada se compararon frente a un control de fibra dietética comercial: Metamucil, el cual es un suplemento alimenticio compuesto por la fibra psyllium, derivada de la cáscara de semilla de *Plántago ovata*, excipiente y aspartame. Se observa que existe diferencia significativa ($p < 0.05$) de la CRA entre las muestras M, HBP y 1.5U90, con valores de 25.15, 13.15 y 14.76 g agua/ g MS, respetivamente, siendo metamucil el que mayor contenido de agua retuvo. La alta capacidad para retener agua por parte del metamucil puede asociarse a la presencia de sustancias mucilaginosas (17.2 %), las cuales actúan como FDS (Shahriari *et al.*, 2018).

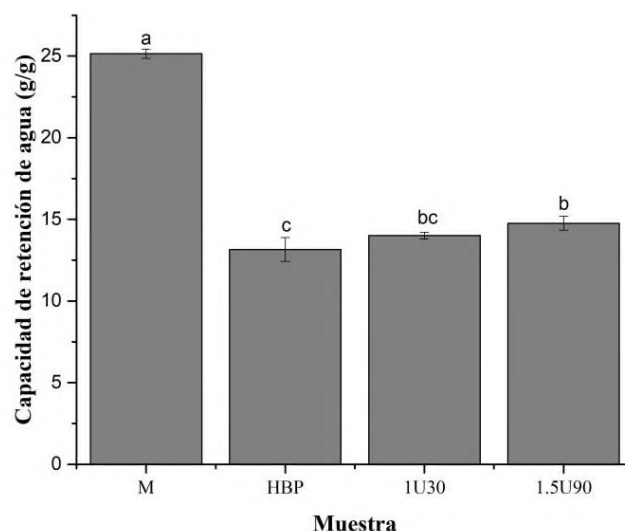


Figura 8. Capacidad de retención de agua en harina de bagazo de piña nativa y modificada. Los datos se presentan como media \pm DE (n = 3). Los valores con letras diferentes son significativamente diferentes ($p < 0.05$). HBP, harina de bagazo de piña nativa; M, fibra comercial (Metamucil); 1U30, modificado con 1U de enzima durante 30 minutos; 1.5U90, modificado con 1.5U de enzima durante 90 minutos de hidrólisis.

Por otro lado, las harinas modificadas 1U30 y 1.5U90 presentaron un aumento en la CRA del 6.08 % y 10.9 %, respectivamente, en comparación con la harina nativa, siendo significativo ($p > 0.05$) el aumento de la muestra 1.5U90. Esto indica que la celulasa, en un tiempo de hidrólisis de 90 min, pudo degradar mayor parte del sustrato (celulosa) contenida en la harina nativa, conduciendo a la formación de cadenas más cortas y de grupos hidroxilos disponibles para la interacción con las moléculas de agua, lo que puede corroborarse con el difractograma C de la Figura 6.

Los resultados obtenidos son similares a los reportados por Yu *et al.* (2018), que a partir de la modificación enzimática (celulasa + xilanasas) de la FDI de residuo de zanahoria, lograron un aumento de la CRA del 19.2 % en comparación con residuo de zanahoria sin modificación.

7.6.2 Capacidad de retención de aceite (CRa)

De la misma manera que para CRA, los resultados de la CRa de harina de bagazo de piña nativa y modificada se compararon frente al control de fibra dietética comercial: Metamucil, los cuales se muestran en la Figura 9. En este caso, se observa que existe diferencia significativa ($p < 0.05$) de la CRa entre las muestras M, HBP y 1U30, con valores 1.26, 1.54 y 1.77 g aceite/g MS, respectivamente. Esta diferencia se debe a la proporción y tipo de FDS presentes en las muestras, ya que ciertos polisacáridos no celulósicos solubles, tales como las pectinas y la goma guar, favorecen la retención y absorción de moléculas orgánicas (Zambrano *et al.*, 2001). Tal es el caso de las muestras HBP y 1U30, las cuales en su composición contienen sustancias pécticas asociadas

a la fracción soluble, y en el caso del Metamucil la FDS presente son sustancias mucilaginosas, lo que puede corroborarse con el análisis FTIR realizado a cada una de las muestras.

Por otro lado, las harinas modificadas 1U30 y 1.5U90 presentaron un aumento de la CRA del 12.9 % y 5.5 %, respectivamente, en comparación con la harina nativa (HBP), mostrando diferencia significativa ($p > 0.05$) el aumento de CRA de la muestra 1U30. Esto de igual forma se le atribuye a la proporción y estructura del tipo de FDS presente en las muestras.

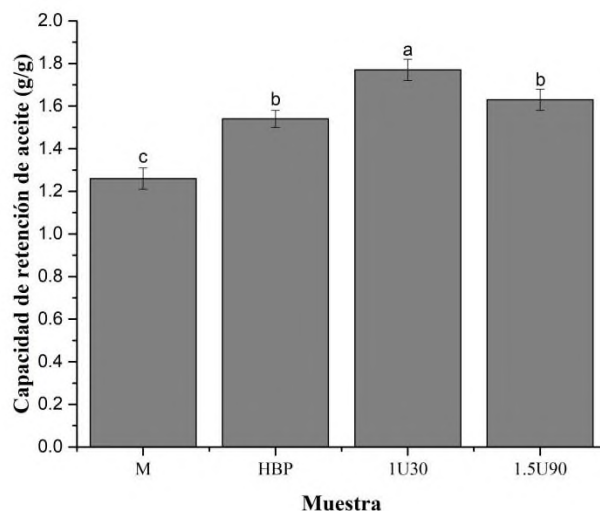


Figura 9. Capacidad de retención de aceite en harina de bagazo de piña nativa y modificada. Los datos se presentan como media \pm DE ($n = 3$). Los valores con letras diferentes son significativamente diferentes ($p < 0.05$). HBP, harina de bagazo de piña nativa; M, fibra comercial (Metamucil); 1U30, modificado con 1U de enzima durante 30 minutos; 1.5U90, modificado con 1.5U de enzima durante 90 minutos de hidrólisis.

El aumento en la capacidad de retención de aceite de la muestra 1U30, es comparable con el resultado reportado por Yu *et al.* (2018), quienes a partir de la modificación de la FDI de residuo de zanahoria empleando celulasa + xilanas, lograron un aumento de la CRA del 11.9 %, valor muy similar al obtenido en este estudio a pesar de que sólo se empleó un tipo de enzima. Esto pudo deberse a que el bagazo de piña contiene mayormente celulosa como fibra dietética y que probablemente el residuo de zanahoria, además de celulosa, contenga otro tipo de compuestos lignocelulósicos.

7.7 EFECTO DE LA FIBRA DIETÉTICA EN LA DIFUSIÓN DE GLUCOSA

El efecto de la fibra dietética de harina de bagazo de piña nativa y modificada en la difusión de glucosa se presenta en la Figura 10. Para todas las muestras el contenido de glucosa ($\mu\text{mol/mL}$) en el medio aumentó a medida que transcurrió el tiempo. Se observa que la muestra HBP fue la que mayor difusión de glucosa presentó, arrojando un valor final de 1175.6 $\mu\text{mol/mL}$, cuyo valor fue

significativamente mayor ($p < 0.05$) al presentado con la muestra blanco (748.6 $\mu\text{mol/mL}$), seguido de las muestras 1U90 (1150.8 $\mu\text{mol/mL}$) y 1.5U90 (1067.5 $\mu\text{mol/mL}$), las cuales no presentan diferencia significativa ($p < 0.05$) con respecto a la muestra HBP. La razón por la cual la muestra HBP presentó mayor contenido de glucosa en el medio en comparación al blanco, se debe a su contenido adicional de azúcares, ya que, además de fibra, está compuesta por carbohidratos no fibrosos ni amiláceos (ver análisis químico proximal: Tabla 3) los cuales también lograron difundir del dializado al medio cuantificable. En el caso de las muestras 1U90 y 1.5U90, la razón por la cual difundieron menos glucosa al medio se debe a la proporción de FDS presente en ellas, resultado de la modificación enzimática de su fracción insoluble, la cual retiene parte de los azúcares propios de la muestra.

Por otro lado, las muestras 0.5U60, 1U60, 0.5U90 y 0.5U30 presentaron una difusión de glucosa significativamente menor ($p < 0.05$) al presentado por las muestras HBP, 1U90 y 1.5U90, arrojando valores que oscilaban entre 960.8-925.8 $\mu\text{mol/mL}$, valores significativamente iguales entre sí ($p < 0.05$) pero significativamente mayores a la muestra blanco. Esto, de igual forma, debido al contenido adicional de azúcares presentes, con la diferencia de que la proporción de FDS que pudiese existir en ellas es mayor a las muestras 1U90 y 1.5U90, por lo que es capaz de retener mayor contenido de los azúcares provenientes de su misma composición.

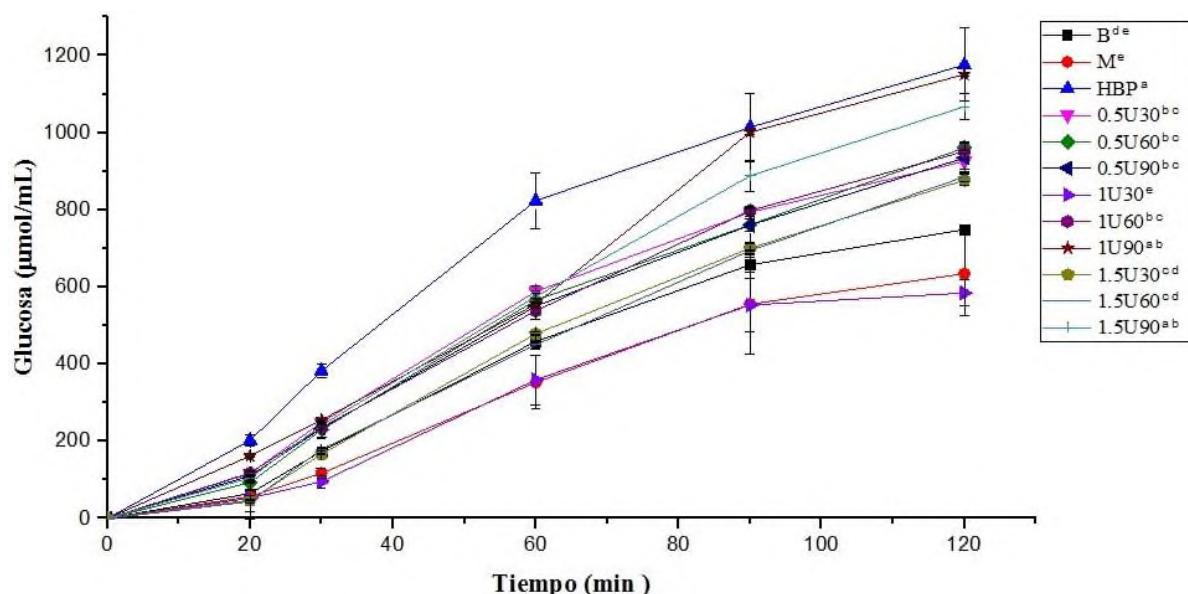


Figura 10. Efecto de fibras dietéticas modificadas y no modificadas en la difusión de glucosa. Los datos se presentan como media \pm EE ($n = 4$). Los valores con letras diferentes son significativamente diferentes ($p < 0.05$).

Para el caso de las muestras 1.5U60 y 1.5U30, se reflejaron valores similares de difusión de glucosa ($p < 0.05$) a los presentados por la muestra blanco, arrojando valores finales de 885.3 $\mu\text{mol/mL}$ y

877 $\mu\text{mol/mL}$, respectivamente, lo cual dice que a estas condiciones de hidrólisis no existe cambio significativo con respecto a su difusión después de las 2 h de experimento y que la FDS contenida en ellas logra retener, casi en su 100 %, los azúcares de su misma composición.

Finalmente, las muestras M y 1U30 mostraron valores finales de difusión de glucosa significativamente menores al presentado por el blanco, con valores de 634.4 $\mu\text{mol/mL}$ y 584.4 $\mu\text{mol/mL}$, respectivamente, los cuales no presentan diferencia significativa entre sí. Esto quiere decir, que, la FDS formada de la modificación enzimática en la muestra 1U30, retiene glucosa del dializado más el contenido adicional de azúcares de su composición, llegando a presentar un valor menor de difusión de glucosa en comparación a la fibra comercial, que si bien no es significativo, genera una pauta como alternativa para el posible reemplazo de este suplemento alimenticio comercial. Además, cabe resaltar, que en la muestra 1U30 se evitó la difusión de glucosa en un 50.28 % con respecto al valor final de la muestra HBP. En conclusión, la exposición de los grupos polares y no polares mejora la interacción entre la fibra dietética presente y la molécula de glucosa (Gibbs, *et al.*, 2016), lo que aumenta la capacidad de absorción de glucosa de la FDS, lo que refleja que a mayor contenido de FDS, mayor cantidad de glucosa absorberá y por lo tanto menor contenido de glucosa difundirá al medio.

Los resultados obtenidos son similares a los reportados por Ma y Mu (2016), los cuales evaluaron los efectos de la presión hidrostática elevada (HHP) más tratamiento enzimático (lacasa y celulasa) sobre las propiedades estructurales, fisicoquímicas, funcionales y la actividad antioxidante de la FD de comino desaceitado. La fibra dietética de comino desaceitado, modificado por celulasa a 0.1 MPa y 6 h de hidrólisis, exhibió una mejora en su capacidad de absorción de glucosa, con lo cual se evitó la difusión del 26.4 % de glucosa en el medio con respecto al comino no modificado. Tal proporción es menor al obtenido en este estudio por la muestra 1U30, debido a que en el caso de la modificación de comino, no se logró un aumento significativo de su contenido de FDS con respecto a la fibra soluble presente en el comino nativo.

7.8 EFECTO DE LA FIBRA DIETÉTICA EN LA ACTIVIDAD DE α -AMILASA

El efecto de la fibra dietética de harina de bagazo de piña nativa y modificada en la actividad de la α -amilasa se presenta en la Figura 11. La tendencia para esta prueba es similar a la mostrada por la prueba de difusión de glucosa, ya que se aprecia que para todas las muestras el contenido de glucosa en el medio aumentó a medida que transcurrió el tiempo. Se observa que la muestra HBP no inhibió

la actividad de la α -amilasa, arrojando un valor final de glucosa de 2026.1 $\mu\text{mol/g}$, valor significativamente mayor ($p < 0.05$) al presentado por el blanco (1289.3 $\mu\text{mol/g}$). Este efecto negativo se le atribuye a que el bagazo de piña sólo cuenta con 0.1 % de FDS, proporción que se considera nula para tener un efecto en la inhibición de la enzima. Además, el estar 736.8 unidades por encima del blanco se debe al contenido adicional de azúcares no amiláceos ni fibrosos presentes en la muestra, los cuales logran difundir al medio cuantificable.

Por su parte, las muestras 1.5U90 y 1U30 muestran un efecto similar, arrojando valores de 1561.4 $\mu\text{mol/g}$ y 1520.3 $\mu\text{mol/g}$, respectivamente, los cuales presentan diferencia significativa ($p < 0.05$) con respecto a la muestra HBP y al blanco. La razón por la cual los valores de glucosa se encuentran por debajo de la muestra HBP, se debe a la proporción de FDS que presentan ambas muestras, lo que contribuye a una mayor viscosidad y formación de geles, puesto que al formar una estructura tridimensional con el almidón de papa, se reduce el contacto físico entre la enzima y este, impidiendo la hidrólisis del almidón, con lo cual se evita el aumento de azúcares y por consiguiente la difusión de estos al medio.

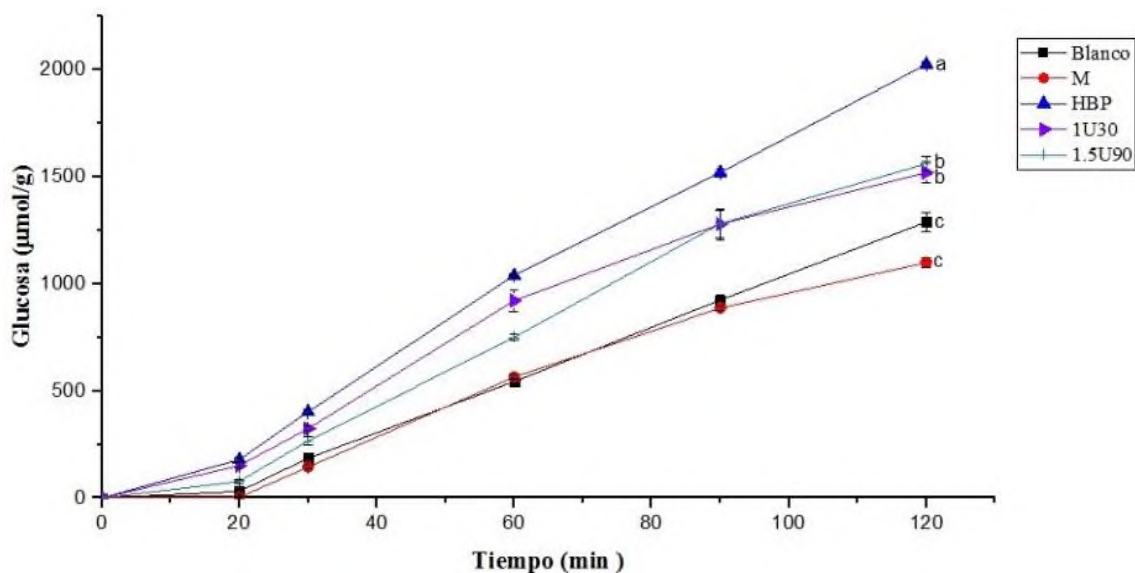


Figura 11. Efecto de fibras dietéticas modificadas y no modificadas en la actividad de α -amilasa. Los datos se presentan como media \pm DE ($n = 4$). Los valores con letras diferentes son significativamente diferentes ($p < 0.05$). HBP, harina de bagazo de piña nativa; M, fibra comercial (Metamucil); 1U30, modificado con 1U de enzima durante 30 minutos; 1.5U90, modificado con 1.5U de enzima durante 90 minutos.

Por otro lado, la muestra M presentó un valor de 1099.77 $\mu\text{mol/g}$, concentración significativa ($p < 0.05$) en comparación con las muestras HBP, 1U30 y 1.5U90, pero estadísticamente igual al valor presentado por el blanco. Esto quiere decir que la fibra soluble contenida en la fibra comercial (M)

atrapa de cierta manera el almidón en el dializado evitando que la α -amilasa actúe sobre ella, y así generar cadenas de azúcares o glucosas.

Los resultados obtenidos son similares a los reportados por Ou *et al.* (2001), los cuales realizaron la comparación del efecto en la actividad de la α -amilasa de diferentes fuentes de fibra dietética y almidón resistente, donde se observó un efecto similar al obtenido en este estudio, ya que con respecto al control, las diferentes fuentes de fibra dietética empleadas lograron la inhibición de la actividad de esta enzima a medida que su contenido de FDS fue mayor.

8 CONCLUSIONES

La modificación del bagazo de piña influyó en sus propiedades reológicas, predominando el módulo elástico (G') sobre el viscoso (G''), lo que indica un comportamiento rígido del gel formado por la muestra. Además, el tratamiento 1U30 presentó mejores propiedades viscoelásticas que el resto de los modificados.

Debido a la hidrólisis de la porción amorfa en celulosa, los tratamientos enzimáticos lograron la modificación en la cristalinidad y en la estructura de la FD del bagazo de piña, lo cual se reflejó en los análisis por DRX y FTIR-ART.

La modificación enzimática de la harina de bagazo de piña, empleando celulasa a una concentración de 1 U/g por 30 min de hidrólisis y 1.5 U/g por 90 min de hidrólisis, incrementó el contenido de FDS 59.3 y 34 veces más, respectivamente.

La CRA y CRa incrementó con los tratamientos enzimáticos en comparación con la HBP nativa.

Los efectos en la difusión de glucosa e inhibición de la actividad de α -amilasa se vieron favorecidos por la modificación enzimática a diferentes concentraciones de enzima y tiempos de hidrólisis, lo que está relacionado con el contenido de FDS.

El estudio ilustra como la hidrólisis enzimática influye en las propiedades de la fibra dietética del bagazo de piña y brinda un aporte al conocimiento para el desarrollo de un ingrediente funcional. Aunado a esto, la utilización de este residuo agroindustrial podría generar beneficios económicos sustanciales a la región.

9 REFERENCIAS

- Abarca, D., Martínez, R., Muñoz, J., Torres, M., Vargas, G. 2010. Residuos de café, cacao y cladodio de tuna: Fuentes promisorias de fibra dietaria. Rev. Tec. ESPOL-RTE. 23(2): 63-69.
- Abdul Hamid, A., y Luan, Y. S. 2000. Functional Properties of Dietary Fibre from Defatted Rice Bran. Food Chemistry. 68:15-19.
- Abdullah. 2007. Solid and liquid pineapple waste utilization for lactic acid fermentation using *Lactobacillus delbrueckii*. Reaktor. 11: 50-52.
- AOAC. 2000. Official Methods of Analysis of Association of Official Analytical Chemists International.
- AOAC. 2000. Official Methods of Analysis of Association of Official Analytical Chemists International. Method 991.43 Total dietary fiber. Enzymatic gravimetric method. The Association: Gaithersburg, MD. 1543-1545.
- Arias Velázquez, C. J., Toledo Hevia, J. 2000. MANUAL DE MANEJO POSTCOSECHA DE FRUTAS TROPICALES (Papaya, piña, plátano, cítricos). ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN (FAO). 61 pp.
- Ayala, M. M., Gonzalez, M. S., Mendoza, M. G., Meneses, M. M., Vázquez, G. C., Loera, C. O. 2011. Fibrolytic potential of spent compost of the mushroom *Agaricus bisporus* to degradate forages for rumin. African Journal of Microbiology Research. 5: 241-249.
- Bae, I. Y., Jun, Y., Lee, S., y Lee, H.G. 2016. Characterization of apple dietary fibers influencing the *in vitro* starch digestibility of wheat flour gel. LWT - Food Science and Technology. 65, 158-163.
- Bohm, N., y Kulicke, W. 1999. Rheological studies of barley (1→3)(1→4)-β-glucan in concentrated solution: Investigation of the viscoelastic flow behaviour in the sol-state. Carbohydr Res. 315(3-4): 293-301.
- CEFP, Centro de Estudios de las Finanzas Públicas. 2002. La problemática actual de la producción de piña en México. Distrito Federal.

- Cervantes Nuñez, A., Arroyo Ramos, D. y S. Shimada, A. 1978. Valor nutritivo de un ensilaje de bagazo de piña y bagacillo de caña como fuentes de forraje suplementario para ganado durante la época de secas. *Técnica Pecuaria*. 11-12 pp.
- CODEX. 2009. Codex Alimentarius Commission, ALINORM 09/32/26. Report of the 30th Session of the Codex Committee on Nutrition and Foods for Special Dietary Uses. Cape Town, South Africa, 3-7 November 2008.
- Cordenunsi, B., Saura Calixto, F., Diaz Rubio, M. E., Zuleta, A., Tiné, M. A., Buckeridge, M. S., Silva, G. B. D., Carpio, C., Giuntini, E. B. y Menezes, E.W.D. 2010. Carbohydrate composition of ripe pineapple (cv. Perola) and the glycemic response in humans. *Food Science and Technology*. 30(1): 282-288.
- Conesa, C., García Breijo, E., Loeff, E., Seguí, L., Fito, P., y Laguarda Miró, N. 2015. An electrochemical impedance spectroscopy-based technique to identify and quantify fermentable sugars in pineapple waste valorization for bioethanol production. *Sensors*. 15(9): 22941-22955.
- Contreras Hernández, M. G., Ochoa Martínez, L. A., Rutiaga Quiñones, J. G., Rocha Guzmán, N. E., Lara Cenicerros, T. E., Contreras Esquivel, J. C., Prado Barragán, L. A., y Rutiaga Quiñones, O. M. 2017. Effect of ultrasound pre-treatment on the physicochemical composition of *Agave durangensis* leaves and potential enzyme production. *Bioresource Technology*.
- Cruz, R. A., Mendoza Martínez, A. M., Chávez Cinco, M. Y., Rivera Armenta, L., y Cruz Gómez, M. J. 2011. Aprovechamiento del bagazo de piña para obtener celulosa y bioetanol.
- Cummings, J. H. 1996. Dietary fiber and fermentation concluding remarks. Ed. Y. Mälkki, J. H. Cummings. *Costaction 92*. Eur Com Brus. 394-398 pp.
- Danisco, Sweeteners. 2003. Efecto de la ingestión de polidextrosa sobre las funciones fisiológicas.
- Davies G, Henrissat B. 1995. Structures and mechanisms of glycosyl hydrolases. *Structure*. 3: 853-9.
- Dello Staffolo, M. 2003. Desarrollo de un alimento funcional. Estudio de la propiedades fisicoquímicas y aceptabilidad microbiológica y sensorial en yogures adicionados con fibra

dietética alimentaria. Tesis de Maestría. Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos (CIDCA). Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata (FCE-UNLP).

De Vries R, y Visser J. 2001. *Aspergillus* enzymes involved in degradation of plant cell wall polysaccharides. *Microbiol Mol Biol Rev.* 65: 497-522.

DGIEA, Dirección General de Investigación y Extensión Agrícola. 1991. Aspectos Técnicos sobre Cuarenta y Cinco Cultivos Agrícolas de Costa Rica. Ministerio de Agricultura y Ganadería. San José, Costa Rica.

Dhingra, D., Michael, M., Rajput, H., y Patil, R. T. 2012. Dietary fibre in foods: a review. *J Food Sci Technol.* 49(3): 255-266.

Díaz-Vela, J., Totosaus, A., Cruz-Guerrero, A., y Pérez-Chabela, M. L. 2013. *In vitro* evaluation of the fermentation of added-value agroindustrial by-products: Cactus pear (*Opuntia ficus-indica* L.) peel and pineapple (*Ananas comosus*) peel as functional ingredients. *International Journal of Food Science and Technology.* 48(7): 1460-467.

Dreher, M. L. 1987. Handbook of dietary fiber: An applied approach. New York, NY: Marcel Dekker Inc.

Duque, R. L., Gallardo, N. Y., Santoyo, M. A., Sánchez, P. M. E. 1998. Efecto fisiológico de seis tipos de fibras dietéticas sobre el volumen fecal en ratas wistar. En: fibra dietaria. CYTED. Editora IPN. México, 282 pp.

Elleuch, M., Bedigian, D., Roiseux, O., Souhail, Besbes., Blecker, C., y Attia, H. 2011. Dietary fibre and fibre-rich by-products of food processing: Characterisation, technological functionality and commercial applications: A review. *Food Chemistry.* 124(2), 411-421.

Erasov, V. S., Pletnev, M., Yu., y Pokidko, B. V. 2015. Stability and rheology of foams containing microbial polysaccharide and particles of silica and bentonite clay. *Colloid Journal.* 77(5): 614-621.

Fan L, Lee Y, Beardmor D. 1981. The influence of major structural features of cellulose on rate of enzymatic hydrolysis. *Biotechnol Bioeng.* 23: 419-24.

- FAO (Organización Mundial para la Agricultura). 2014. Estadísticas de producción mundial de piña. (En línea). Disponible en: <http://faostat.fao.org/>.
- FAO (Organización Mundial para la Agricultura). 2016. Food and agriculture organization of the United Nations. USA: Statistical Division. (En línea). Disponible en: <http://faostat3.fao.org/home/E>
- Foschia, M., Peressini, D., Sensidoni, A., y Brennan, C. S. 2013. The effects of dietary fibre addition on the quality of common cereal products. *Journal of Cereal Science*. 58(2): 216-227.
- Gavilanes Teran, Irene. 2016. Sostenibilidad del sector agroindustrial de Ecuador mediante el compostaje de sus residuos y el uso agrícola de los materiales obtenidos. Tesis doctoral. Universidad Miguel Hernández (UMH) de Elcher.
- Gibbs, P. E., Miralem, T., Lerner marmarosh, N., y Maines, M. D. 2016. Nanoparticle delivered human biliverdin reductase-based peptide increases glucose uptake by activating IRK/Akt/GSK3 axis: The peptide is effective in the cell and wild-type and diabetic Ob/Ob mice. *Journal of Diabetes Research*. 2: 1-15.
- Gorinstein, S., Zachwieja, Z., Foltá, M., Barton, H., Piotrowicz, J., Sembré, M., Weisz, M., Trakhtenberg, S. y Martín-Belloso, O. 2001. Comparative content of dietary fiber, total phenolics, and minerals in persimmons and apples. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 49: 952-957.
- Guillon, F. y Champ, M. 2000. Structural and physical properties of dietary fibres, and consequences of processing on human physiology. *Food Research Int*. 33: 233-245.
- Gusakov, A. V., Salanovich, T. N., Antonov, A. I., Ustinov, B. B., Okunev, O. N., Burlingame, R., *et al.* 2007. Design of highly efficient cellulase mixtures for enzymatic hydrolysis of cellulose. *Biotechnol Bioeng*. 97: 1028-38.
- Harris, P. J., Robertson, A. M., Watson, M. E., Triggs, C. M., y Ferguson, L. R. 1993. The effects of soluble-fiber polysaccharides on the adsorption of a hydrophobic carcinogen to an insoluble dietary fiber. *Nutrition & Cancer*. 19(1): 43-54.

- He, B., Nohara, K., Ajami, N. J., Michalek, R. D., Tian, X., Wong, M., *et al.* 2015. Transmissible microbial and metabolomic remodeling by soluble dietary fiber improves metabolic homeostasis. *Scientific Reports*. 5: 10604.
- Howard, R. L., Abotsi, E., Jansen, E. L., Howard, S. 2003. Lignocellulose biotechnology: issues of bioconversion and enzyme production. *African Journal Biotechnology*. 2: 602-619.
- Imandi, S. B., Bandaru, V. V. R., Somalanka, S. R., Bandaru, S. R. y Garapati, H. R. 2008. Application of statistical experimental designs for the optimization of medium constituents for the production of citric acid from pineapple waste. *Bioresource Technology* 99(10). 4445-4450.
- James, M. Lattimer y Mark, D. Haub. 2010. Effects of Dietary Fiber and Its Components on Metabolic Health. *Journal Nutrients*. 2, 1266-1289.
- Kallel, F., Bettaieb, F., Khiari, R., García, A., Bras, J., y Chaabouni, S. E. 2016. Isolation and structural characterization of cellulose nanocrystals extracted from garlic straw residues. *Industrial Crops and Products*. 87: 287-296.
- Khalil, A. I. 2002. Production and characterization of cellulolytic and xylanolytic enzymes from the ligninolytic white-rot fungus *Phanerochaete chrysosporium* grown on sugar cane bagasse. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 18: 753-759.
- Kim, S. J., de Souza, R. J., y Choo, V. L., *et al.* 2016. Effects of dietary pulse consumption on body weight: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 103, 1213-23.
- Kumar, S., Hemavathi, A. B., y Umesh Hebbar, H. 2011. Affinity based reverse micellar extraction and purification of bromelain from pineapple (*Ananas comosus* L. Merrill) waste. *Process Biochemistry*. 46, 1216-1220.
- Layden, B. T., Angueira, A. R., Brodsky, M., Durai, V., y Lowe, W. L. 2013. Short chain fatty acids and their receptors: new metabolic targets. *Transl Res*. 161(3): 131-140.
- López-Herrera, M., WingChing-Jones, R., Rojas-Bourrillon, A. 2016. Bromatología de ensilados de corona de piña con pulpa de cítricos, heno y urea. *Agronomía Mesoamericana*. 27(1):37-47.

- López-Herrera, M., WingChing-Jones, R., Rojas-Bourrillon, A., y Rodríguez Chacón, S. 2014. Valor nutricional del ensilaje de rastrojo de piña con niveles crecientes de urea. *Nutrición Animal Tropical*. 8(1):1-20
- López, M., Wingching Jones, R., y Rojas, A. 2009. Características fermentativas y nutricionales del ensilaje de rastrojo de piña (*Ananas comosus*). *Agronomía Costarricense*. 33(1): 1-15.
- Lozano-de-González, P. G., Barrett, D. M., Wrolstad, R. E., y Durst, R. W. 1993. Enzymatic browning inhibited in fresh and dried apple rings by pineapple juice. *Journal of Food Science*. 58, 399-404.
- Lu, X. H., Sun, D. Q., Wu, Q. S., Liu, S. H., y Sun, G.-M. 2014. Physico-chemical properties, antioxidant activity and mineral contents of pineapple genotypes grown in China. *Molecules*. 19(6): 8518-8532.
- Lynd L. R., Weimer P. J., van Zyl W. H., Pretorius I. S. 2002. Microbial cellulose utilization: Fundamentals and biotechnology. *Microbiol Mol Biol Rev*. 66: 506-77.
- Ma, M., y Mu, T. 2016. Modification of deoiled cumin dietary fiber with laccase and cellulase under high hydrostatic pressure. *Carbohydrate polymers*. 136: 87-94.
- Martins, D. M., Guimarães, M. W., de Lima, V. A., Gaglioti, A. L., Da-Silva, P. R., Kadowaki, M. K., y Knob, A. 2018. Valorization of passion fruit peel by-product: Xylanase production and its potential as bleaching agent for kraft pulp. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 16: 172-180
- Mataix Verdú, J., y Gassull, M.A. 2002. Fibra alimentaria. En: J Mataix Verdú. Ed. *Nutrición y alimentación humana*. Ergon, Madrid. 119-135 pp.
- Mazza, G. 1998. Biochemical and processing aspects. Technomic Publishing Company, Lancaster (U.S.A.). *Functional foods*. 35-36 pp.
- Mälkki, Y. 2001. Physical properties of dietary fiber as keys to physiological functions. *Cereal Foods World*. 46: 196-199.
- Miller, J. 2014. CODEX-aligned dietary fiber definitions help to bridge the “fiber gap”. *Journal Nutrins*. 13(1), 1-10.

- Mudgil, D., y Barak, S. 2013. Composition, properties and health benefits of indigestible carbohydrate polymers as dietary fiber: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*. 61, 1-6.
- Nigam, J. N. 2000. Optimization of dilution rate for the production of value added product and simultaneous reduction of organic load from pineapple cannery waste. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 18, 301-305.
- Niu, Y., Li, N., Xia, Q., Hou, Y., y Xu, G. 2017. Comparisons of three modifications on structural, rheological and functional properties of soluble dietary fibers from tomato peels. *LWT - Food Science and Technology*. 88: 56-63.
- Ou, S., Kwok, K., Li, Y., y Fu, L. 2001. *In Vitro* Study of Possible Role of Dietary Fiber in Lowering Postprandial Serum Glucose. *Food chemistry*. 49: 1026-2019.
- Paola, V., Aurora, N., y Vincenzo, F. 2008. Cereal dietary fibre: A natural functional ingredient to deliver phenolic compounds into the gut. *Trends in Food Science & Technology*. 19(9): 451-463.
- Paul, D. K., y Shaha, R. K. 2004 Nutrients, vitamins and minerals content in common citrus fruits in the northern region of Bangladesh. *Pakistan Journal of Biological Sciences*. 7(2): 238-242.
- Peerajit, P., Chiewchan, N., y 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.
- PIP-Coleacp. 2011. Pineapple Cayenne, crop production protocol. (En línea). Disponible en: <http://pip.coleacp.org/en/pip/31144-production-guides>
- PIP-Coleacp. 2011. Pineapple MD2, crop production protocol. (En línea). Disponible en: <http://pip.coleacp.org/en/pip/31144-production-guides>
- Py C., Lacoeyllhe JJ., Teisson C. 1984. L'ananas: sa culture, ses produits, Maisonneuve et Larose, France.

- Ramírez Cortina, C. R., Alonso Gutiérrez, M. S., Rigal, L. 2012. Valorización de residuos agroindustriales del tequila para alimentación de rumiantes. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 18(3): 449-457.
- Ramírez, S. 2012. Aprovechamiento de residuos agroindustriales, cascarilla de arroz (*Oriza sativa*) y residuos de papa (*Solanun tuberosun*) para la producción de *Trichoderma spp.* (Trabajo de grado). Universidad técnica de Ambato, Ambato, Ecuador.
- Ramos Casselis, M. E. 2015. BUAP crea fibra, alimento y biocombustible de residuos frutales. Comunicación institucional BUAP. (En línea). Recuperado de: http://cmas.siu.buap.mx/portal_pprd.
- Ransley, J. K., Donnelly, J. K. y Read, N. W. 2001 Food and nutritional supplements: Their role in health and disease. Springer, Germany. 45-47 pp.
- Rickman, J. C., y Barrett, D. M. 2007. Nutritional comparison of fresh, frozen and canned fruits and vegetables. Part 1. Vitamins C and B and phenolic compounds. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 87(6): 930-944.
- Robertson, J. A., Monredon, F. D. D., Dysseler, P., Guillon, F., Amado, R., y Thibault, J. F. 2000. Hydration properties of dietary fibre and resistant starch: A European collaborative study. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*. 33(2): 72-79.
- Roda, A., Lucini, L., Torchio, F., Dordoni, R., Faveri, D., y Lambri, M. 2017. Metabolite profiling and volatiles of pineapple wine and vinegar obtained from pineapple waste. *Food Chemistry*. 734-742.
- Roehrig, K. L. 1988. The physiological effects of dietary fiber - A review. *Food Hydrocolloids*. 2(1): 1-18.
- Romero-Bonilla, H., Ayala-Armijos, H., y Lapo-Calderón, B. 2015. Efecto de tres pre-tratamientos de cáscara de banano para la obtención de jarabe glucosado mediante hidrólisis enzimática. *Avances en Química*. 10(1): 79-82.
- Romo-Vaquero, M., Selma, M. V., Larrosa, M., Obiol, M., Garcia-Villalba, R., González, L., *et al.* 2014. A rosemary extract rich in carnosic acid selectively modulates caecum microbiota

- and inhibits β -glucosidase activity, altering fiber and short chain fatty acids fecal excretion in lean and obese female rats. *PloS One*. 9(4): e94687.
- SAGARPA, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. 2017. Planeación Agrícola Nacional 2017-2030. Piña Mexicana. México. 2-5 pp
- Saura-Calixto, F., García-Alonso, A., Goñi, I. y Bravo, L. 2000. *In vitro* determination of the indigestible fraction in foods: Alternative to dietary fiber analysis. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48: 3342-3347.
- Saval, S. 2012. Aprovechamiento de Residuos Agroindustriales: Pasado, Presente y Futuro. Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, México. 14-46 pp.
- Seleni, M. M., Canniatti, S. G., dos Santos, C. T., Ratnayake, W. S., Flores, R. A., y Bianchini, A. 2014. Characterization and potential application of pineapple pomace in an extruded product for fiber enhancement. *Food Chemistry*. 163: 23-30.
- Shahriaria, Z., Heidaria, B., Dadkhodaie, A., y Richards, C. M. 2018. Analysis of karyotype, chromosome characteristics, variation in mucilage content and grain yield traits in *Plantago ovata* and *P. psyllium* species. *Industrial Crops & Products*. 123, 676-686.
- SIAP. 2014. Servicio de información agroalimentaria y pesquera SAGARPA. (En línea). Disponible en: <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado/>.
- Siqueira, G., Bras, J., y Dufresne, A. 2010. Luffa cylindrical as lignocellulosic source of fiber, microfibrillated cellulose, and cellulose nanocrystals. *Bioresources*. 5: 727-740.
- Singhania, R. R., Sukumaran, R. K., Patel, A. K., Larroche, C., y Pandey A. 2010. Advancement and comparative profiles in the production technologies using solid-state and submerged fermentation for microbial cellulases. *Enzyme Microb Technol*. 46: 541-9.
- Slavin, J. 2013. Fiber and prebiotics: Mechanisms and health benefits. *Nutrients*. 5, 1417-1435.
- Tabilo-Munizaga, G., y Barbosa-Canovas, G. V. 2005. Rheology for the food industry. *Journal of Food Engineering*. 67, 147-156.
- Takahashi, R., Hirasawa, Y., Nichinari, K. 2003. Cellulose and its derivatives. *Foods & Food Ingredients Journal of Japan*. 208, 824.

- Tanaka, K., Hilary, Z. D., y Ishizaki, A. 1999. Investigation of the utility of pineapple juice and pineapple waste material as low cost substrate for ethanol fermentation by *Zymomonasmobilis*. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 87, 642-646.
- Tengerdy, R. P., Szakacs, G. 2003. Bioconversion of lignocellulose in solid substrate fermentation. *Biochemical Engineering Journal*, 13: 169-179.
- Theuwissen, E., y Mensink, R. P. 2008. Water-soluble dietary fibers and cardiovascular disease. *Physiology y Behavior*. 94(2): 285-292.
- Torres León, C., Vicente, A. A., Flores López, M. L., Rojas, R., Serna Cock, L., Alvarez Pérez, O. B., Aguilar, C. N. 2018. Edible films and coatings based on mango (var. Ataulfo) by-products to improve gas transfer rate of peach. *LWT - Food Science and Technology*.
- Valderrain-Rodríguez, G. R., de Ancos, B., Sánchez-Moreno, C., y González-Aguilar, G. A. 2017. Functional properties of pineapple. *Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. (CIAD)*.
- Valdez-Vázquez, I., Acevedo Benitez, J. A. y Hernandez Santiago, C. 2010. Distribution and potential of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14: 2147-2153.
- Van Dyk, J. S., y Pletschke, B. I. 2010. A review of lignocellulose bioconversion using enzymatic hydrolysis and synergistic cooperation between enzymes—Factors affecting enzymes, conversion and synergy. *Biotechnol Adv*. 30: 1458-80.
- Vidal-Valverde, C., Herranz, J., Blanco, I. y Rojas-Hidalgo, E. 1982. Dietary fiber in Spanish fruits. *Journal of Food Science*. 47(6), 1840-1845.
- Wada, M., y Okano, T. 2001. Localization of I α and I β phases in algal cellulose revealed by acid treatments. *Cellulose*. 8: 183-188.
- Wen, Y., Niu, M., Zhang, B., Zhao, S., y 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.

- Yepes, S., Montoya, L., y Orozco, F. 2008. Valorización de residuos agroindustriales - frutas - en Medellín y el sur del Valle de Aburrá, Colombia. *Revista de la Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. 61(1): 4422-4431.
- Yu, G., Bei, J., Zhao, J., Li, Q., y Cheng, C. 2018. Modification of carrot (*Daucus carota* Linn. var. *Sativa Hoffm.*) pomace insoluble dietary fiber with complex enzyme method, ultrafine comminution, and high hydrostatic pressure. *Food Chemistry*. 257: 333–340.
- Zafranet. 2016. El potencial y la diversificación de la caña de azúcar. (En línea). Recuperado de: www.zafranet.com/2016/01/entrevistanriquez-poy/.
- Zambrano, M. L., Meléndez, R., Gallardo, Y. 2001. Propiedades funcionales y metodología para su evaluación en fibra dietética. En: *Fibra Dietética en Iberoamérica: Tecnología y Salud. Obtención, caracterización, efecto fisiológico y aplicación en alimentos*. 195-209 pp.
- Zambrano, Z., Hernández, A. D. and Navarro Y. 1998. Caracterización fisicoquímica del nopal. En: *Temas de tecnología de alimentos*. Vol. 2. Editado por Lajolo, M. y E. Wenzel. CYTED. Instituto Politécnico Nacional. México. 29-41 pp.