



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN
PARA EL DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL - OAXACA**



**DOCTORADO EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y
APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES**

TESIS DE DOCTORADO

**“ Desarrollo y caracterización mecánica de un material a base de
fibras de *Agave angustifolia* Haw, para elaborar un envase
biodegradable para frutos de papaya (*Carica papaya*)”**

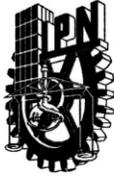
PRESENTA:

Martin Hidalgo Reyes

DIRECTOR: **Dr. Magdaleno Caballero Caballero**

DIRECTOR: **Dr. Luis Héctor Hernández Gómez**

OAXACA, MÉXICO., MAYO DE 2015



SIP-14 Bis

INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez siendo las 13:00 horas del día 07 del mes de mayo del 2015 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca (CIIDIR-OAXACA)** para examinar la tesis de grado titulada: "Desarrollo y caracterización mecánica de un material a base de fibras de *Agave angustifolia* Haw, para elaborar un envase biodegradable para frutos de papaya (*Carica papaya*)".

Presentada por el alumno:

Hidalgo

Apellido paterno

Reyes

materno

Martin

nombre(s)

Con registro:

A	1	1	0	2	0	4
---	---	---	---	---	---	---

aspirante al grado de: **DOCTOR EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis



 Dr. Magdaleno Caballero
 Caballero



 Dr. Luis Héctor Hernández Gómez



 Dr. Guillermo Manuel Urriolagoitia
 Calderón



 Dr. Francisco Castellanos León



 Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano
 Barrita

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES



 Dr. José Rodrigo Martínez y Cárdenas



CENTRO INTERDISCIPLINARIO
 DE INVESTIGACION PARA EL
 DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
 C.I.I.D.I.R.
 UNIDAD OAXACA
 I.P.N.



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

CARTA DE CESION DE DERECHOS

En la ciudad de Oaxaca de Juárez el día 21 del mes de mayo del año 2015, el (la) que suscribe Hidalgo Reyes Martin alumno del programa de **DOCTORADO EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES** con número de registro A110204, adscrito al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de los Drs. Magdaleno Caballero Caballero y Luis Héctor Hernández Gómez y cede los derechos del trabajo titulado: “Desarrollo y caracterización mecánica de un material a base de fibras de *Agave angustifolia* Haw, para elaborar un envase biodegradable para frutos de papaya (*Carica papaya*)”. Al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **Calle Hornos 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca**, e-mail: posgradoax@ipn.mx ó hogradi@hotmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Hidalgo Reyes Martin



CENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACION PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
C.I.I.D.I.R.
UNIDAD OAXACA
I.P.N.

RESUMEN

En los sistemas de producción agrícola, los envases para productos hortofrutícolas son componentes sujetos a historiales de cargas cíclicas que varían en el tiempo, causando cambios en la integridad estructural del material y provocando un deterioro progresivo en sus propiedades mecánicas, dichas alteraciones pueden ocasionar fallas con valores de esfuerzo inferiores a los límites de resistencia para cargas estáticas. Por tal razón, los estudios sobre la generación de materiales compuestos y el diseño de envases, con mejores capacidades de carga, han venido a ser un tema de gran relevancia. Para el caso específico de la papaya, los envases se encuentran bajo múltiples circunstancias de carga, por lo tanto están sujetos a un modo de falla. Este trabajo de investigación aborda el planteamiento expuesto y a la vez considera el escaso aprovechamiento de los residuos fibrosos del proceso artesanal de producción de mezcal en el estado de Oaxaca; por ello, se realizó un estudio formal y sistemático para caracterizar las propiedades químicas y físicas de las fibras del bagazo de *Agave angustifolia* Haw. También se desarrolló un material compuesto utilizando las fibras de agave y una matriz polimérica, posteriormente se caracterizó el compuesto para estimar, desde un punto de vista técnico, las condiciones probables para su aplicación en la elaboración un envase para papaya; así mismo, se estableció el diseño conceptual de un envase para frutos de papaya. A partir de los resultados obtenidos se concluye que estas fibras tienen potencial para utilizarse en diversas aplicaciones, ya que son comparables con las características reportadas para otras fibras lignocelulósicas. En este caso, debido a las propiedades térmicas, baja densidad y alto contenido de celulosa, una aplicación podría ser su incorporación a una matriz polimérica para producir materiales compuestos.

Palabras clave: alternativas, caracterización, composición química, diseño, pruebas mecánicas.

ABSTRACT

In agricultural production systems, containers for fruit and vegetable products are components subject to histories of cyclic loads that vary in time, which alters the material's structural integrity causing a deterioration in their mechanical properties, these alterations can cause failures with stress values lower than the limits of resistance to static loads. For this reason, studies on the generation of composite materials and design of packaging, with best capacities, have come to be a topic of great relevance. For the specific case of papaya, containers are under multiple load circumstances, are therefore subject to a failure mode. This research deals with the exposed approach and at the same time considers the scarce use of residual fibers from the artisanal process of mezcal production in Oaxaca State; Therefore, a formal and systematic study was conducted to characterize the chemical and physical properties of bagasse fibers of *Agave angustifolia* Haw and also, a composite material was composed using fibers of agave and a polymer matrix, then it was characterized in order to estimate, from a technical point of view, the likely conditions for its application in the development a container for papaya; Likewise, established the conceptual design of a container for fruits of papaya. From results it is concluded that these fibers have potential for use in various applications, since they are comparable to the features reported for other lignocellulosic fibers. In this case, due to the thermal properties, low density and high cellulose content, an application could be its incorporation into a polymer matrix to produce composite materials.

Key words: alternatives, design, characterization, chemical composition, mechanical tests.

DEDICATORIAS

Con todo mi amor, dedico este logro a la mujer que habita mi corazón y comparte su todo conmigo en el vaivén de la existencia, por ser la luz que dirige mi razón de ser. A mí compañera de vida:

Luz María.

...y a los guerreros imbatibles que luchan a mi lado desde siempre. Por enseñarme tanto y por su esfuerzo para alcanzar conmigo este logro, que solo es una victoria dentro de las múltiples batallas que aún nos quedan en el andar de la vida. A mis hijos:

Uriel y Ebani

AGRADECIMIENTOS

A Dios, gracias...por todo.

De manera especial agradezco a la Universidad Autónoma Chapingo, mi Alma Mater, y al Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola, por brindarme la oportunidad para crecer en todos los ámbitos, permitiéndome llegar hasta aquí.

Agradezco al Instituto Politécnico Nacional, al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca y al CONACYT, por haberme dado la oportunidad para realizar los estudios de doctorado.

A los integrantes del comité doctoral: Dr. Luis Héctor Hernández Gómez, Dr. Magdaleno Caballero Caballero, Dr. Guillermo Urriolagoitia Calderón, Dr. Felipe de Jesús Cano Barrita, Dr. Francisco Castellanos León y Dr. Alejandro Vázquez Feijoo, gracias por sus valiosas aportaciones en el desarrollo del presente trabajo de investigación.

De forma muy particular, agradezco a mi familia (Hidalgo-Pérez; Hidalgo-Reyes), por su apoyo incondicional y asiduo.

...por supuesto, agradezco a todos los partícipes en esta travesía.

Sinceramente

Martin.

CONTENIDO GENERAL	Pág.
Acta de Revisión de Tesis.....	ii
Carta de Derechos de Autor.....	iii
Resumen.....	iv
Abstract.....	v
Dedicatorias.....	vi
Agradecimientos.....	vii
Contenido General.....	viii
Índice de Figuras.....	xiv
Índice de Tablas.....	xvii
Abreviaturas / Simbología.....	xviii
Introducción.....	1
CAPÍTULO 1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	6
1.1. Antecedentes de la investigación.....	6
1.1.1 Residuos lignocelulósicos de Agave angustifolia Haw en Oaxaca.....	6
1.1.2 Importancia del envase en la cadena de producción de papaya.....	7
1.2. Planteamiento del problema de investigación.....	10
1.3. Justificación	11
1.4. Hipótesis	12
1.5. Objetivos	12
1.5.1 Objetivo General.....	12
1.5.2 Objetivos Particulares.....	12
1.6. Metodología	13
1.7. Delimitación de alcances	15
1.8. Sumario.....	15
1.9. Referencias bibliográficas	16

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	20
2.1. El cultivo de papaya	20
2.1.1 Características del fruto.....	20
2.1.2 Operación de cosecha.....	22
2.1.2.1 Criterios de calidad y madurez del fruto.....	23
2.1.2.2 Norma de calidad para la papaya	26
2.1.3 Envase y transporte de los frutos	28
2.1.3.1 Manejo en el centro de empaque.....	29
2.1.3.2 Condiciones de almacenamiento	31
2.2. Envase y embalaje.....	32
2.2.1 Conceptos	32
2.2.2 Clasificación	33
2.2.3 Funciones.....	39
2.2.4 Importancia.....	40
2.3. Materiales compuestos	41
2.3.1 Clasificación	41
2.3.2 Aplicaciones	42
2.3.3 Fibras naturales.....	44
2.3.3.1 Clasificación y uso general de las fibras naturales	44
2.3.4 Polímeros naturales.....	46
2.3.4.1 Principales plantas laticíferas y obtención del látex natural	47
2.3.4.2 Características y uso general del látex	52
2.4. Sumario.....	56
2.5. Referencias bibliográficas	56

CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE LAS FIBRAS	62
3.1. Caracterización del material lignocelulósico	62
3.2. Desarrollo experimental	64
3.2.1 Colecta del bagazo cocido de <i>Agave angustifolia</i> Haw	64
3.2.2 Preparación de las fibras.....	66
3.3. Técnicas y determinaciones.....	70
3.3.1 Determinación de propiedades físicas.....	70
3.3.1.1 Densidad.....	70
3.3.1.2 Diámetro y longitud del haz fibroso.....	72
3.3.1.3 Morfología de las fibras.....	72
3.3.1.4 Análisis por difracción de rayos X.....	73
3.3.2 Determinación de propiedades químicas	74
3.3.2.1 Contenido de humedad.....	74
3.3.2.2 Productos solubles en agua fría/caliente	74
3.3.2.3 Solubilidad en NaOH al 1%.....	75
3.3.2.4 Porcentaje de extractivos en etanol/tolueno	75
3.3.2.5 Lignina Klason	76
3.3.2.6 Lignina soluble	76
3.3.2.7 Contenido de holocelulosa.....	77
3.3.2.8 Contenido de α -celulosa	77
3.3.2.9 Contenido de cenizas	77
3.3.3 Determinación de propiedades térmicas	78
3.3.3.1 Análisis termogravimétrico	78
3.3.3.2 Calorimetría de barrido diferencial	78
3.3.4 Ensayo de tracción	78

3.4.	Análisis de resultados.....	79
3.4.1	Morfología de las fibras	80
3.4.2	Difracción de rayos X	82
3.4.3	Análisis termogravimétrico	83
3.4.4	Calorimetría de barrido diferencial.....	84
3.4.5	Ensayo de tracción	85
3.5.	Sumario.....	86
3.6.	Referencias bibliográficas	86
 CAPÍTULO 4. OBTENCIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO.....		90
4.1.	Los materiales compuestos	90
4.2.	Materiales y métodos	91
4.3.	Elementos del material compuesto	92
4.3.1	Fibras de bagazo cocido de <i>Agave angustifolia</i> Haw	92
4.3.2	Descripción del látex utilizado	95
4.4.	Desarrollo del material compuesto.....	98
4.4.1	Mercerizado de las fibras del bagazo cocido.....	99
4.4.2	Elaboración del material compuesto.....	101
4.5.	Caracterización del material compuesto	102
4.5.1	Análisis de superficie.....	103
4.5.2	Pruebas térmicas.....	104
4.5.3	Absorción de agua e hinchamiento	104
4.5.4	Prueba mecánica.....	106
4.6.	Análisis de resultados	106
4.6.1	Análisis de superficies	106

4.6.2	Pruebas térmicas.....	114
4.6.3	Absorción de humedad e hinchamiento	117
4.6.4	Resistencia a la tensión.....	118
4.7.	Sumario.....	119
4.8.	Referencias bibliográficas.	120
CAPITULO 5. DISEÑO CONCEPTUAL DE UN ENVASE PARA PAPAYA.		124
5.1.	El proceso de diseño.....	124
5.2.	Planteamiento del problema	124
5.3.	Diseño conceptual de un prototipo de envase para papaya	125
5.3.1	Parámetros de diseño	127
5.3.2	Requerimientos de un envase para frutos de papaya	127
5.3.3	Especificaciones.....	129
5.4.	Diseño preliminar.	129
5.5.	Selección del mejor concepto de diseño.....	132
5.6.	Consideraciones adicionales del diseño conceptual	134
5.7.	Desarrollo de la caja	136
5.7.1	Proceso de construcción del envase para papaya	137
5.8.	Evaluación de la funcionalidad del envase para papaya.....	141
5.9.	Sumario.....	142
5.10.	Referencias Bibliográficas.....	143
CONCLUSIONES.		144
RECOMENDACIONES PARA INVESTIGACIONES FUTURAS		145
ANEXOS.....		148

ÍNDICE DE FIGURAS	Pág.
Figura 1-1. Hojas de <i>Agave angustifolia</i> Haw, residuos de la cosecha.....	6
Figura 1-2. Caja de cartón corrugado para transporte de papaya.....	8
Figura 1-3. Metodología general de la investigación.....	14
Figura 2-1. Frutos de papaya (<i>Carica papaya</i>).....	20
Figura 2-2. Cosecha de papaya.....	23
Figura 2-3. Papaya amarilla.....	24
Figura 2-4. Papaya Maradol.....	25
Figura 2-5. Manejo postcosecha de la papaya.....	30
Figura 2-6. Envase primario.....	34
Figura 2-7. Envase secundario.....	34
Figura 2-8. Envase terciario.....	35
Figura 2-9. Envases de metal.....	36
Figura 2-10. Envases de plástico.....	37
Figura 2-11. Envases de madera.....	37
Figura 2-12. Envases de vidrio.....	38
Figura 2-13. Envase rígido compuesto, tetra pack.....	38
Figura 2-14. Materiales compuestos aplicados en la industria automotriz.....	43
Figura 2-15. Materiales compuestos aplicados en la industria aeronáutica.....	43
Figura 2-16. <i>Castilla elástica</i>	47
Figura 2-17. <i>Ficus elástica</i>	48
Figura 2-18. <i>Hevea brasiliensis</i>	48
Figura 2-19. <i>Landolphia parvifolia</i>	49
Figura 2-20. Mandioca o Yuca, (<i>Manihot esculenta</i>).....	49

Figura 2-21. Recolección del látex de caucho natural.....	50
Figura 2-22. Esquema general del proceso de obtención del látex natural.....	51
Figura 2-23. Fórmula química del monómero Isopreno.	52
Figura 2-24. Comportamiento típico de esfuerzo-deformación del caucho	53
Figura 3-1. Bagazo cocido de <i>Agave angustifolia</i> Haw	64
Figura 3-2. Localización de lugar de la colecta, San Baltazar Chichicapam.	65
Figura 3-3. Colecta de bagazo de agave, aplicación del método de cuarteo	66
Figura 3-4. Lavado manual del bagazo, fibra húmeda libre de impurezas	67
Figura 3-5. Secado al aire libre de las fibras obtenidas del bagazo de agave.	67
Figura 3-6. Fibras limpias y seleccionadas	68
Figura 3-7. Seccionado y corte manual de las fibras limpias.	68
Figura 3-8. Molienda de las fibras	69
Figura 3-9. Tamices utilizados para el cribado de las fibras	69
Figura 3-10. Fibras agrupadas para determinar su densidad	71
Figura 3-11. Analizador de humedad Mettler Toledo.	74
Figura 3-12. Productos solubles.....	75
Figura 3-13. Longitud del haz fibroso por rango.....	80
Figura 3-14. Micrografía de la sección transversal de la fibra de agave	81
Figura 3-15. Micrografía de la sección longitudinal de la fibra de agave.....	82
Figura 3-16. Patrón de difracción de rayos X de las fibras.....	83
Figura 3-17. Análisis termogravimétrico en atmosfera de nitrógeno.	83
Figura 3-18. Análisis termogravimétrico en atmosfera de aire.	84
Figura 3-19 Gráfica del análisis de DSC de las fibras de <i>Agave angustifolia</i>	85
Figura 3-20. Curva esfuerzo-deformación de las fibras de <i>Agave angustifolia</i>	85
Figura 4-1. Desarrollo experimental para elaboración del compuesto	91

Figura 4-2. Productos tejidos con fibras de agave	94
Figura 4-3. Material compuesto, fibra de agave y látex natural.....	94
Figura 4-4. Tipos de látex utilizados (natural y centrifugado).....	95
Figura 4-5. Muestras de látex utilizadas en laboratorio.....	96
Figura 4-6. Molienda y tamizado de las fibras de bagazo de agave.	98
Figura 4-7. Tamaño de partícula de fibra, rango uno (TPR1)	98
Figura 4-8. Tamaño de partícula de fibra, rango dos (TPR2).....	99
Figura 4-9. Disolución de NaOH, en una concentración de 0.5 M	100
Figura 4-10. Fibra en proceso de mercerización.....	100
Figura 4-11. Secado de fibra mercerizada	100
Figura 4-12. Elaboración de las películas del material compuesto	101
Figura 4-13. Película obtenida de material compuesto	102
Figura 4-14. Equipo utilizado para la prueba de absorción e hinchamiento	104
Figura 4-15. Probetas analizadas para en absorción de agua e hinchamiento...	105
Figura 4-16. Medición del peso de las probetas.....	105
Figura 4-17. Imágenes de microscopia de fuerza atómica tridimensionales de 1µm para cortes trasversales de biopelículas: a)Tr1; b) Tr2; c) Tr3; d) Tr4	107
Figura 4-18. Imágenes de microscopia de fuerza atómica “Amplitude Error” para: a) Tr1; b) Tr2; c) Tr3; d) Tr4	108
Figura 4-19. Imágenes de microscopia de fuerza atómica tridimensionales de 1µm, “Phase” en 3D para los tratamientos a) Tr1; b) Tr2; c) Tr3; d) Tr4.....	109
Figura 4-20. Fotografía del material obtenido con fibras de agave sin tratamiento y látex.	110
Figura 4-21. Microfotografías obtenidas del análisis EDS, elementos O, C, Ca y Si.....	111
Figura 4-22 Microfotografía del material compuesto obtenido.	112

Figura 4-23. Microfotografías obtenidas del análisis EDS, elementos O, Ca y C.	112
Figura 4-24. Conjunto de 30 secciones ópticas del material desarrollado. Separación entre secciones = 5 μm	113
Figura 4-25. Imagen “extended focus” obtenida a partir de las secciones de la imagen anterior	114
Figura 4-26. Análisis termogravimétrico a) muestra M1, b) muestra M2, c) muestra M3 d) muestra M4.	115
Figura 4-27 Gráfica del análisis de DSC de las muestras del material compuesto	116
Figura 4-28. Curva esfuerzo-deformación del material compuesto fibras-látex. .	119
Figura 5-1. Caja de solapas o americana de cierre propio.....	130
Figura 5-2. Caja telescópica total.....	131
Figura 5.3: Caja convencional o de una pieza	131
Figura 5-4. Diseño del desarrollo de la caja.....	137
Figura 5-5. Doble inicial para el armado del envase	138
Figura 5-6. Doble del cuerpo de la caja.....	139
Figura 5-7. Doble de la parte inferior.....	140
Figura 5-8. Doble de las tapas superiores.....	140

ÍNDICE DE TABLAS	Pág.
Tabla 2.1 Composición de la papaya (Contenido 100 g de porción comestible).....	21
Tabla 2.2 Composición porcentual del látex de los principales géneros laticíferos.....	49
Tabla 2.3 Especificaciones de látex de caucho natural.....	53
Tabla 3.1 Tamices ASTM E-11/95 utilizados.....	69
Tabla 3.2 Propiedades físicas y químicas de las fibras.....	78
Tabla 3.3 Diámetro del haz fibroso de <i>Agave angustifolia</i>	80
Tabla 4.1 Tiempo registrado hasta llegar al curado del látex, en horas.....	96
Tabla 4.2 Características de los tratamientos evaluados.....	100
Tabla 4.3 Absorción de humedad en los compuestos desarrollados.....	116
Tabla 5.1 Características del conjunto de soluciones útiles.....	132

ABREVIATURAS/SIMBOLOGIA

<i>a</i>	Aceleración
Å	ångström
<i>ABS</i>	Acrilonitrilo butadieno estireno
<i>ADN</i>	Ácido desoxirribonucleico
<i>AFM</i>	Microscopia de fuerza atómica
<i>ARN</i>	Ácido ribonucleico
<i>ASTM</i>	Sociedad Americana para Prueba de Materiales
<i>C</i>	Carbono
<i>CaC₂O₄</i>	Oxalato de calcio
<i>DSC</i>	Calorimetría de barrido diferencial
<i>EDS</i>	Espectrómetro de energía dispersiva
<i>F</i>	Flúor
<i>g</i>	Gramos
<i>H</i>	Hidrógeno
<i>HR</i>	Humedad relativa
<i>keV</i>	Kilo electrovoltio
<i>M</i>	Molaridad
<i>MCBL</i>	Microscopia confocal de barrido láser
<i>msnm</i>	Metros sobre el nivel del mar
<i>N</i>	Nitrógeno
<i>NaOH</i>	Hidróxido de sodio
<i>NMX</i>	Norma Mexicana
<i>NOM</i>	Norma Oficial Mexicana
<i>O</i>	Oxígeno
<i>P</i>	Fósforo

<i>PE</i>	Poli etileno
<i>PET</i>	Poli etileno tereftalato
<i>PP</i>	Poli propileno
<i>PS</i>	Poli estireno
<i>PVC</i>	Poli cloruro de vinilo
<i>S</i>	Azufre
<i>SB</i>	Estireno butadieno
<i>SEM</i>	Microscopia electrónica de barrido
<i>Si</i>	Silicio
<i>TAPPI</i>	Asociación técnica para la industria de la pulpa y el papel
<i>TGA</i>	Análisis termogravimétrico
<i>TPR1</i>	Tamaño de partícula rango 1
<i>TPR2</i>	Tamaño de partícula rango 2
<i>TS</i>	Esfuerzo de tracción
<i>XRD</i>	Difracción de rayos X

INTRODUCCIÓN

Dentro de los sistemas de producción agrícola, los envases son componentes sujetos a historiales de cargas cíclicas que varían en el tiempo, causando cambios en la integridad estructural del material y provocando un deterioro progresivo en sus propiedades mecánicas. Dichas alteraciones pueden ocasionar una falla final con valores de esfuerzo inferiores a los límites de resistencia para cargas estáticas. Por tal razón, los estudios sobre la generación de materiales compuestos y el diseño de envases, con mejores capacidades de carga, han venido a ser un tema de gran relevancia. Las investigaciones se enfocan en conocer las propiedades de los nuevos materiales, y establecer tanto los parámetros de diseño como los procesos de manufactura adecuados para elaborar envases que garanticen la conservación y calidad de los productos biológicos.

En los envases para productos hortofrutícolas, la falla principal está representada por el pandeo inelástico del cartón corrugado, lo cual, en la mayoría de los casos es generado por sobrecargas en el proceso de almacenamiento y transporte, por un manejo inadecuado o por una combinación de los casos mencionados, durante los cuales, la falla evoluciona debido a la acción de las cargas fluctuantes. En el caso específico de la papaya, los envases se encuentran bajo diferentes circunstancias de carga, por lo tanto están sujetos a algún modo de falla. Bajo los argumentos establecidos y considerando el escaso aprovechamiento de los residuos fibrosos del proceso artesanal de producción de mezcal en el estado de Oaxaca, en esta investigación, se realiza un estudio formal y sistemático de las fibras del bagazo de *Agave angustifolia* Haw, determinando sus propiedades químicas y físicas para conocer sus características y así establecer, desde el punto de vista técnico, alguna alternativa de uso. De inicio, se plantea utilizar estas fibras como refuerzo dentro de una matriz polimérica y formar un material para fabricar envases para papaya. Así, se elabora y caracteriza un material compuesto utilizando fibras de agave como refuerzo en una matriz polimérica. Con los

resultados se estiman las condiciones para su aplicación en la elaboración un envase. Finalmente, se hace el diseño conceptual de un envase para frutos de papaya.

La investigación es de carácter demostrativo-experimental. Se realizaron pruebas, tanto a las fibras individuales, como al compuesto elaborado. Con ello, se sustenta la investigación y se validan los datos que contribuyen a soportar con rigor científico los resultados finales. El tema principal se desarrolla en torno al establecimiento de una alternativa de uso de las fibras del bagazo cocido de agave. El trabajo se presenta en cinco capítulos.

En el primer capítulo se establece la definición del problema de investigación, se hace un breve análisis histórico de la importancia y el desarrollo de los productos de agave y papaya, en el estado de Oaxaca. Se plantea el caso de estudio y una hipótesis al respecto, también se establecen los objetivos, la justificación y la delimitación de alcances de esta investigación. Finalmente se plantea la metodología seguida para llegar al cumplimiento del trabajo.

En el segundo capítulo, se establecen los fundamentos teóricos y el estado del arte del trabajo de investigación. En la primera parte, se presentan las características generales de la papaya. Se describen los índices morfológicos, fisiológicos, de madurez y de calidad del fruto. Así mismo, se plantean las principales condiciones postcosecha y los requerimientos necesarios para su envase. En una segunda parte de este capítulo, se presentan las características generales de los envases desde distintos puntos de vista, como el estructural y el de mercadotecnia. Al final del capítulo se definen las diferentes manifestaciones físicas en un material compuesto a nivel micro y macro estructural que hacen uso de fibras naturales. Con los conceptos expuestos, se espera obtener un mejor entendimiento de la importancia de hacer uso de un material residual desde un punto vista físico y valorar las consecuencias de utilizar materiales renovables como principal fuente de materia prima.

En el capítulo tres se describe el proceso para caracterizar la fibra del bagazo cocido de agave. En esta parte se explica detalladamente como se hizo la colecta, preparación y selección del material para realizar las pruebas físicas y químicas; así mismo, se expone la metodología, equipo y procedimientos específicos con base en las normas para la realización de los ensayos. Al final del capítulo se muestran los resultados obtenidos mediante tablas y gráficos. Cabe mencionar que, éste es el primer trabajo formal sobre caracterización física y química de las fibras de agave, realizado en el CIIDIR- OAXACA.

El capítulo cuatro trata sobre el planteamiento, desarrollo, análisis, cálculos y validación del material compuesto. Es bien conocido que este tipo de materiales compuestos son altamente atractivos, ya que las propiedades individuales provocan un efecto sinérgico sobre las propiedades finales de la mezcla, de esta manera, para determinar su factibilidad de aplicación, en la fabricación de envases para frutos de papaya, se realiza una caracterización del compuesto. Primeramente, se plasman las características de los elementos que forman el compuesto (fibras y látex) y, después, se desarrolla el procedimiento de elaboración. Al final se presentan los resultados de la caracterización del mismo.

En el capítulo cinco se desarrolla el diseño conceptual de un envase para frutos de papaya. Se retoma el planteamiento del problema y se establecen los parámetros de diseño, después se hace una evaluación de los requerimientos y se elijé la mejor alternativa de solución. A partir de ahí, se inicia con el desarrollo del envase.

Al final, se presentan las conclusiones y recomendaciones del trabajo, las cuales son una parte fundamental dentro de las investigaciones científicas, y aparecen una vez que se ha analizado cada uno de los resultados obtenidos en el transcurso del trabajo. En esta sección se plasma la proposición final del argumento, tras las premisas previas, y también se establecen las recomendaciones y sugerencias sobre futuras líneas de trabajo.

CAPÍTULO 1.

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

CAPÍTULO 1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Antecedentes de la investigación

1.1.1 Residuos lignocelulósicos de *Agave angustifolia* Haw en Oaxaca

En el estado de Oaxaca, México, se han identificado 23 especies de agave que se utilizan en la fabricación del mezcal; destacando el *Agave angustifolia* Haw (SAGARPA, 2005). En esta industria, únicamente se emplea el tallo o piña y se desechan las hojas, por lo que el productor sólo aprovecha el equivalente al 45% en peso del agave. Las hojas, que en su conjunto representan el 55% restante, son abandonadas en el campo a cielo abierto (Figura 1-1). La densidad de población de este agave es de 2500 plantas/ha. Cada planta tiene 80 hojas en promedio, mismas que se encuentran físicamente aptas para la extracción de fibra. En otras palabras, en una hectárea se generan 200 000 hojas que no son aprovechadas (Silva y Caballero, 2004). Lo mismo sucede con las fibras del bagazo residual al final de proceso. En cambio, en otros países, las fibras vegetales son aprovechadas industrialmente por su contenido lignocelulósico (Arrakhiz *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2012; Mishra *et al.*, 2004).



Figura 1-1. Hojas de *Agave angustifolia* Haw, residuos de la cosecha.

A nivel mundial, se está produciendo un fenómeno dirigido hacia el aprovechamiento integral de los recursos naturales. Este nuevo enfoque conlleva al cambio del uso de petroquímicos a recursos renovables (Bessadok *et al.*, 2008; FAO, 2004). Se prevé que las fibras lignocelulósicas tengan una función importante en la transición respecto a las fibras sintéticas (FAO, 2007; Reddy y Yang, 2005). Las fibras vegetales tienen una trascendencia económica, pero solo se aprovechan unas cuantas como el sisal, henequén, yute, kenaf, abaca y bonote; el resto es explotado a pequeña escala, por la falta de conocimiento de sus propiedades químicas, físicas y mecánicas (Cazaurang *et al.*, 1991; Kestur *et al.*, 2007; Tomczak *et al.*, 2007). En el caso específico del *Agave angustifolia* Haw, tanto las fibras de las hojas, como las del tallo (bagazo cocido), no han sido estudiadas a profundidad. En esta investigación se pretende hacer un análisis solo de las fibras que están en el bagazo cocido del agave, a fin de obtener información para establecer algún beneficio de las mismas. De entrada, existe una gran cantidad de material residual disponible, el cual contiene fibras lignocelulósicas, que por su composición física y química, pueden convertirse en un elemento potencial para ser utilizadas en múltiples aplicaciones (John y Thomas, 2008; Li *et al.*, 2008). Debido al contenido de celulosa de estas fibras, se espera que una alternativa de uso sea su incorporación como refuerzo en una matriz polimérica para formar un compuesto y posteriormente elaborar un envase para productos hortofrutícolas.

1.1.2 Importancia del envase en la cadena de producción de papaya

Las frutas y hortalizas forman una parte muy importante en la producción agrícola nacional; sin embargo, los cultivos presentan necesidades y características específicas en correspondencia con el clima, suelo, períodos vegetativos, variedades, labores culturales y especialmente en las actividades de cosecha, transporte y comercialización. A pesar de que los canales de comercialización son similares a nivel nacional, las diferencias se observan en función del mercado; así,

para exportación, las normas establecen los aspectos relacionados con el envase, embalaje y almacenamiento, influenciados por la demanda internacional que exige calidad, cantidad y oportunidad en el abastecimiento.

En el estado de Oaxaca, el desarrollo de envases y embalajes para los frutos de papaya presenta pocos avances debido a factores tales como: falta de organización; empleo de elementos tradicionales como canastos, sacos de yute o polipropileno, mallas de nylon, en algunos casos, se utilizan cajas de cartón corrugado (Figura 1-2), pero no se usan materiales auxiliares de empaque (separadores de cartón moldeado o corrugado, papel, polietileno, etc.), ó simplemente se transportan y comercializan a granel. También, es común que la ruta de transporte sea inapropiada, ya que no ofrece protección contra: las condiciones climáticas (calor, frío, lluvia, sol), el mal estado de las carreteras y las distancias muy largas con un estibado o acomodo inadecuado, entre otras.



Figura 1-2. Caja de cartón corrugado para transporte de papaya.

Tomada de la red <http://www.buscatan.com/directorio/fotos/507-caja-para-papayas-tapa-blanca-y-fondo-kraf-61-lbs-ect.jpg>

La falta de un envase para la comercialización de papayas es un factor que pone en desventaja a este sector ante las grandes exportadoras a nivel mundial; sin embargo, esta situación puede ser considerada como una área de oportunidad, en la cual se genere un producto original, fabricado con materiales de la región, y que

además cumpla con las normas establecidas. Actualmente, los envases además de contener al producto, deben cumplir una función de gran importancia en el manejo, transporte y comercialización de los frutos de papaya, ya que es necesario que absorban todas las cargas generadas y faciliten el manejo de los frutos. Los envases estarán sometidos a esfuerzos de distinta índole como compresión, torsión y flexión. Dichas cargas están presentes durante toda la vida del componente, siendo el principal modo de falla.

Actualmente, la importancia de un envase no se pone en duda, ni tampoco sorprende que las grandes empresas pongan tanta atención en su desarrollo, ya que se considera la carta de presentación del producto ante el potencial comprador. En cualquier centro comercial, mercado, supermercado, o pequeñas tiendas donde se exhiben una gran cantidad de productos, el consumidor promedio dedica un periodo de tiempo muy corto a la selección y compra de tales productos, poniendo especial atención en aquellos que son de su interés. Por ello, los envases deben enfocarse en la composición e imaginación del producto, en la sensación de durabilidad que produce, en el uso que podría tener el envase después de usar su contenido, en la reputación que ostenta, en una fácil maniobrabilidad, en una forma atractiva, en una buena funcionalidad, en una información convincente, en el deseo de colección, incluso varias de las cualidades anteriores en un solo producto.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente y considerando la gran disponibilidad de material lignocelulósico residual que puede ser aprovechado del proceso de producción de mezcal, y ante la necesidad de desarrollar un envase para frutos de papaya, se establece como problema de investigación: el desarrollo y caracterización mecánica de un material a base de fibras de *Agave angustifolia* Haw, para elaborar un envase biodegradable para frutos de papaya (*Carica papaya*).

1.2. Planteamiento del problema de investigación

En los últimos años, los estudios sobre el *Agave angustifolia* han venido a la alza, en principio debido al auge del mezcal, cuya producción representa una fuente de ingresos económicos para más de 25 000 familias del Estado de Oaxaca; pero actualmente, se debe a la posibilidad de hacer un uso integral de toda la planta de agave. Por otro lado, Oaxaca es uno de los estados con mayor producción de papaya, exportando más del 20% de total de su cosecha, aunque la distribución del producto se realiza principalmente a granel ya que no existe un envase específico para este producto. Las empacadoras existentes utilizan cajas de cartón corrugado y envoltorios de papel periódico (Propapaya, 2011). El origen de este trabajo se da a partir del escaso aprovechamiento de los residuos del *Agave angustifolia*. Se propone elaborar un material compuesto que sea biodegradable, utilizando las fibras del bagazo residual y agregarlas a un polímero natural (Látex), con el material desarrollado, se fabricará un envase para los frutos de papaya de la variedad maradol. Para ello, se deben caracterizar las fibras y también el material compuesto elaborado. Los resultados serán de gran utilidad para generar una alternativa de uso para las fibras de esta planta y colaborar en el desarrollo tecnológico del sistema producto agave.

Las consideraciones establecidas en el párrafo anterior son las razones principales que dan origen a este trabajo de investigación. Se colaborará en el desarrollo tecnológico de los sistemas producto agave y producto papaya. Se genera una alternativa de uso para estas fibras y se propone el diseño de un envase biodegradable para los frutos de papaya. Lo expuesto sugiere una alternativa para manejo de la fibra de agave, derivándose las siguientes preguntas de investigación. ¿Cuáles son las características físicas y químicas de las fibras del bagazo cocido del *Agave angustifolia*?, ¿Es posible elaborar un material compuesto utilizando estas fibras y posteriormente fabricar un envase para papaya maradol?, ¿Qué características debe cumplir el material compuesto para ser usado en la fabricación de un envase para frutos de papaya?.

1.3. Justificación

En el Estado de Oaxaca existen cultivos de gran importancia económica tales como: el de agave, el de papaya y el de látex natural, los cuales se han posicionado en mercados nacionales e internacionales; sin embargo, aún no se han logrado aprovechar totalmente. La papaya Maradol fue introducida en México hace aproximadamente 25 años, obteniendo un éxito en su cultivo y una gran aceptación por parte de los consumidores en los últimos 15 años. Incluso, México se ha colocado en primer lugar, a nivel mundial, respecto a las exportaciones de papaya (Propapaya, 2011). En Oaxaca existen alrededor de 1800 ha de superficie sembrada con este cultivo; sin embargo, los productores no logran exportar toda la producción por múltiples factores, entre otros por la falta de un envase adecuado. Actualmente, los envases utilizados son fabricados con cartón de celulosa proveniente de la madera de los árboles.

Por otro lado, en Oaxaca se localiza el 50% de la producción nacional de agave, es decir, aproximadamente 10000 hectáreas (FAO, 1994), de las cuales dependen directa e indirectamente 25000 familias. A pesar de esto, la planta de agave no es aprovechada de manera integral, es decir, no hay un aprovechamiento de toda la planta de agave. Solo se utiliza el tallo para la elaboración de mezcal y durante el proceso se generan residuos (hojas y bagazo) que solo se tiran en barrancas, en tierras en desuso y pocas veces en campos de cultivo.

En este sentido, desde un punto de vista de investigación científica, se trabaja en la elaboración de un material compuesto que sirva para fabricar un envase, utilizando las fibras del bagazo, para lo cual es necesario realizar su caracterización química y física. Todavía no hay una propuesta de aplicación para este material, por lo tanto, es claro que existe un vacío en la investigación respecto a estas fibras. La originalidad del trabajo radica en la falta de evidencias previas sobre su uso, lo cual permite tener un campo de investigación muy amplio; pero a la vez representa un reto por la falta de experiencias previas.

1.4. Hipótesis

Las fibras residuales del bagazo de agave se pueden utilizar para generar desarrollos tecnológicos, de tal forma que, estos subproductos sean aprovechados de alguna manera. Por lo tanto, en este trabajo de investigación se plantea la siguiente hipótesis: **Es posible diseñar un envase para frutos de papaya (*Carica papaya*) a partir de un compuesto utilizando como material de refuerzo, las fibras residuales del bagazo de *Agave angustifolia* Haw, y como matriz polimérica el látex natural.**

1.5. Objetivos

1.5.1 Objetivo General

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo general, diseñar un envase para papaya (*Carica papaya*), a partir del desarrollo y caracterización de un material compuesto formado con fibras de bagazo cocido de agave y una matriz polimérica natural, para utilizar y aprovechar de manera alternativa las fibras del bagazo residual de *Agave angustifolia* Haw.

1.5.2 Objetivos Particulares

- Conocer las características físicas y químicas de los frutos de papaya.
- Identificar los requerimientos de los envases para papaya maradol
- Caracterizar las fibras del bagazo de *Agave angustifolia*
- Elaborar un material compuesto con fibras residuales de *Agave angustifolia*
- Caracterizar el material compuesto elaborado
- Diseñar un envase para frutos de papaya

1.6. Metodología

La presente investigación es con base en el método científico, proceso destinado a explicar eventos, establecer relaciones entre los hechos y enunciar leyes que expliquen los fenómenos físicos del entorno y generar conocimientos para obtener aplicaciones útiles al hombre. En ese sentido, el objetivo de esta metodología es obtener el conocimiento para fabricar un envase para frutos de papaya, desarrollando un material compuesto, con fibras del bagazo cocido de agave y un polímero natural (látex); por lo tanto, se comienza determinando las características físicas y químicas de las fibras para verificar si es posible su uso en la elaboración del compuesto.

El enfoque de la presente investigación es de carácter demostrativo-experimental. La metodología (Figura 1-3) describe los pasos generales para realizar este trabajo de investigación, y a partir de las pruebas, se obtienen los datos cuantitativos para sustentar los resultados. Las pruebas y ensayos de laboratorio fundamentan sus procedimientos en las normas respectivas, desde la colecta de material, la definición del número de especímenes y las técnicas empleadas para realizar cada una de las determinaciones, hasta llegar al diseño, construcción, prueba y evaluación, tanto del compuesto, como del envase para los frutos de papaya.

En general, las etapas a seguir para el trabajo experimental son las siguientes:

1. Establecimiento de condiciones iniciales
2. Determinación del tamaño de muestra y colecta
3. Acondicionamiento del material
4. Caracterización de las fibras
5. Elaboración del compuesto biodegradable
6. Diseño del envase para papaya

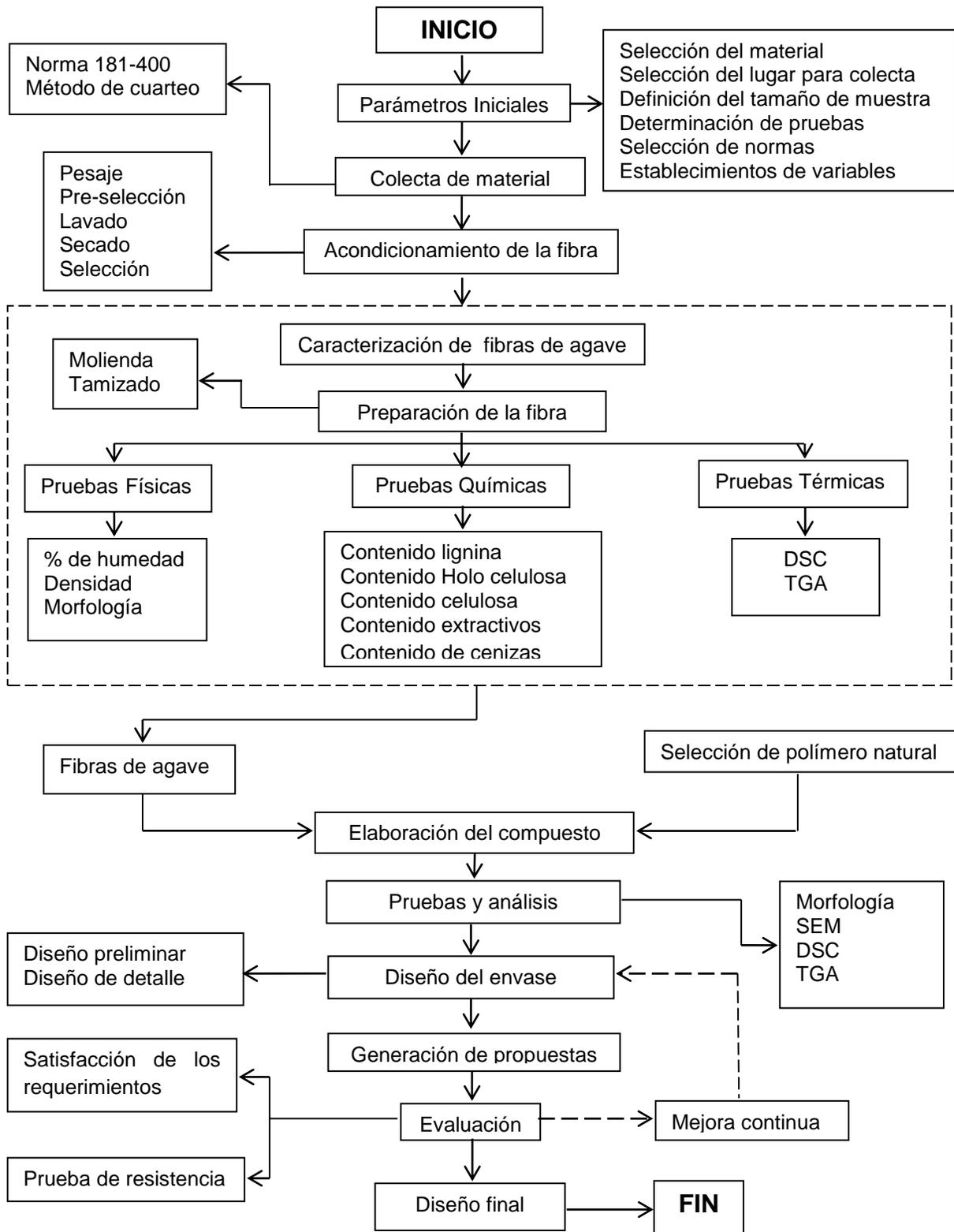


Figura 1-3. Metodología general de la investigación

1.7. Delimitación de alcances

Los alcances de la presente investigación están limitados por la escasa información bibliográfica sobre esta planta, por lo cual se recurrió la comparación de resultados con otros materiales lignocelulósicos similares.

- El alcance general es hacer un estudio demostrativo experimental de las características físicas de un material compuesto, formado con fibras del bagazo de agave y un polímero natural, para determinar si es posible utilizarlo en la fabricación de un envase para frutos de papaya.
- Obtener la caracterización química y física de las fibras de *Agave angustifolia* Haw.
- Elaborar un compuesto formado con una matriz polimérica reforzada con fibras de bagazo de agave
- Determinar las propiedades físicas y químicas del compuesto.
- Determinar la factibilidad de uso del compuesto en la fabricación de un envase para frutos de papaya
- Determinar las propiedades mecánicas del compuesto.
- Hacer el diseño de un envase para frutos de papaya.
- Determinar si el material tiene posibilidades de uso en esta aplicación.

1.8. Sumario

En el presente capítulo se ha definido el problema de investigación a través de un breve análisis sobre la importancia y el desarrollo de los productos agave y papaya, en el estado de Oaxaca. Se planteó el problema de estudio y una hipótesis al respecto, también se estableció la justificación, los objetivos y la metodología general para llegar al cumplimiento de la investigación. Se finaliza este capítulo delimitando los alcances del trabajo.

1.9. Referencias bibliográficas

- Arrakhiz F.Z., El Achaby M., Malha M., Bensalah M.O., Fassi-Fehri O., Bouhfid R., y Benmoussa K., Qaiss A. (2013). "Mechanical and thermal properties of natural fibers reinforced polymer composites: Doum/low density polyethylene". *Materials and Design*. **43**, 200-205.
- Bessadok A., Marais S., Roudesli S., Lixon C., y Métayer M. (2008). "Influence of chemical modifications on water sorption and mechanical properties of Agave fibers". *Journal composites: Part A: applied science and manufacturing*. **39**, 29-45.
- Cazaurang-Martinez M. N., Herrera-Franco P. J., González-Chi P. I., y Aguilar-Vega M. (1991). "Physical and mechanical properties of henequen fibers". *Journal of applied polymer science*. **43**, 749-756.
- FAO (1994). ECOCROP. The adaptability level of the FAO crop environmental requirements database, by Sims, D., P. Diemer and U. Woods - Sinchra. AGLS, FAO, Rome, Italy
- FAO. (2004). "Los efectos ambientales de las fibras duras y el yute en aplicaciones industriales no textiles". Consulta sobre fibras naturales. http://www.fao.org/es/esc/common/ecg/343/es/esc_4_sp.pdf [Consulta 08.08.14].
- FAO. (2007). "La evolución paralela de los precios del yute y las fibras duras con los precios del polipropileno y el petróleo crudo". Consulta fibras naturales. http://www.fao.org/es/esc/common/ecg/341/es/OILDOCUMENT_SPANISH.pdf [Consulta 26.07.14]
- John M. J., y Thomas S. (2008). "Review. Biofibres and biocomposites". *Carbohydrate polymers*. **71**, 343-364.
- Kestur G. S, Guimaraes J. L., y Wypych F. (2007). "Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications". *Journal composites: Part A: applied science and manufacturing*. **38**, 1694-1709.

- Li Y., Hu C., y Yu Y. (2008). “Interfacial studies of sisal fiber reinforced high density polyethylene (HDPE) composites”. *Journal composites: Part A: applied science and manufacturing*. **39(4)**, 570-578.
- Liu D., Song J., Anderson D., Chang P., y Hua Y. (2012). “Bamboo fiber and its reinforced composites: structure and properties”. *Cellulose*. **19**, 1449-1480.
- Mishra S., Mohanty A. K., Drzal L. T., Misra M., y Hinrichsen G. (2004). A review on pineapple leaf fibers, sisal fibers and their biocomposites. *Macromolecular Materials and Engineering*. **289**, 955-974.
- PROPAPAYA. (2011). “Sistema Producto Papaya”. SAGARPA. <http://propapaya.org/> [Consulta 20.07.14]
- Reddy, N., y Yang, Y. (2005). “Biofibers from agricultural byproducts for industrial applications”. *Trends in biotechnology*. **23(1)**, 22-27.
- SAGARPA, SEDAF, y COMMAC. (2005). “Plan rector del sistema producto maguey-mezcal”. Oaxaca: COMMAC.
- Silva-Santos L. y Caballero-Caballero M. (2004). “Informe técnico final del proyecto de investigación: desarrollo de tecnologías adecuadas para el proceso de fabricación del mezcal en el estado de Oaxaca”. Clave CGPI-IPN: 20020524 – 20031488
- Tomczak F., Sydenstricker T.H.D. y Satyanarayana K.G. (2007). Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part II: Morphology and properties of Brazilian coconut fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* **38**:1710-1721.

CAPÍTULO 2.

MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. El cultivo de papaya

2.1.1 Características del fruto

La papaya (*Carica papaya* spp.) es originaria de los bosques de México, Centroamérica y del norte de América del Sur. Tiene nombres comunes como: fruta bomba (Cuba), papaya (México), lechosa, chamburo y papaya (Colombia, República Dominicana, Venezuela), mamão (Brasil), papaw, paw paw y papaya (Estados Unidos), papaye (Francia) (Desai y Wagh, 1995; Kalra *et al.*, 1995). Esta planta se cultiva en la mayoría de los países de la zona intertropical del orbe. Crece en elevaciones desde el nivel del mar hasta los 1000 msnm, con climas secos o húmedos, con precipitaciones desde 750 mm a 2500 mm, y requiere una estación seca marcada para florecer y producir de manera satisfactoria. Puede tolerar heladas. Crece en una amplia variedad de suelos, pero prefiere suelos profundos, fértiles, de origen calcáreo, y espontáneamente crece en sitios secos costeros. (Paull, 1993; Perfetti, 2000; Samson, 1986). La papaya (Figura 2-1) es una baya ovoide, cuya forma varía de casi esférica a oblonga o periforme.



Figura 2-1. Frutos de papaya (*Carica papaya*).

Los frutos contienen sus semillas en una cavidad interior de tamaño variable, la cual puede llegar a ser mayor que la mitad del diámetro del fruto. La pulpa es de color amarillo, anaranjado o rojizo, es succulenta y aromática, de sabor agradable y dulce. El látex de la fruta inmadura posee una enzima llamada papaína, de naturaleza proteolítica, utilizada para ablandar carnes, para aclarar bebidas y para fines medicinales e industriales (Avilan y Rengifo, 2001; Desai y Wagh, 1995; Sankat y Maharaj, 2001).

La papaya es una fruta climatérica, su maduración continúa después de la cosecha, produciendo cantidades significativas de etileno, conjuntamente con un alto ritmo respiratorio. Después de la cosecha, la fruta es muy susceptible a los daños físicos y al deterioro en general, por lo tanto, su manejo tiene que ser muy cuidadoso (Paull y Chen, 1997).

La fruta madura contiene alrededor de 85 % de agua, 10 a 13 % de azúcares, 0.6 % de proteínas, es rica en vitamina A y contiene vitaminas B1, B2 y C. La composición de la papaya se puede observar en la tabla 2-1. Este fruto es muy apreciado por sus propiedades nutritivas y su delicado sabor. Es ideal para dietas alimenticias, por contener vitaminas B1, B2 y Niacina o B3, todas del Complejo B, que regulan el sistema nervioso y el aparato digestivo; fortifican el músculo cardíaco; protegen la piel y el cabello y son esenciales para el crecimiento. Contiene vitaminas A y C, es rica en minerales como Calcio, Fósforo, Magnesio, Hierro, Azufre, Silicio, Sodio y Potasio. Posee un bajo valor calórico, cerca de 53 calorías por cada 100 gramos de fruta. El contenido de fibra mejora la digestión. Tiene propiedades astringentes. Su cáscara contiene una sustancia que ayuda a eliminar la tos (Aguirre y Fernández 1996; Kalra *et al.*, 1995).

Tabla 2-1. Composición de la papaya (Contenido 100 g de porción comestible).

	Papaya de Colombia	Papaya de Bolivia	Papaya de Bolivia	Papaya de México
Humedad %	90.00	85.86	87.93	88.80
Proteínas %	0.50	0.48	0.46	0.60
Grasa %	0.10	0.10	0.10	0.10
Cenizas %	0.50	0.74	0.52	0.60
Fibra diet. %				
Carbohidratos %	8.90	12.82	10.99	9.90
Potasio (K) mg				257.00
Calcio (Ca) mg	25.00	24.00	22.00	24.00
Fósforo (P) mg	12.00	21.00	15.00	5.00
Hierro (Fe) mg	0.40	0.60	0.40	0.10
Vitamina A mg	700.0	86.00	95.00	21.00
B Caroteno mg	595.0			
Tiamina mg	0.03	0.03	0.03	0.03
Riboflavina mg	0.02	0.04	0.04	0.03
Niacina mg	0.30	0.30	0.34	0.30
Vitamina C mg	75.00	56.00	44.00	62.00

Fuente: FAO/INFOODS, 2014.

2.1.2 Operación de cosecha

El estado de recolección se alcanza cuando los frutos empiezan a ablandarse y a perder el color verde del ápice. La madurez se alcanzará a los 4 o 5 días de la recolección y los frutos tomarán un color amarillo (Infoagro, 2002). Las frutas están listas para cosecharse cuando el color de la epidermis empieza a cambiar de un color verde oscuro a un verde más claro, formando vetas amarillas que posteriormente se convierten en rayas amarillas de la punta de la fruta hacia el pedúnculo. La papaya es cosechada manualmente con una ligera torsión para desprenderla de la planta; en ocasiones esto puede ocasionar desgarramiento y heridas en el punto de desprendimiento de la fruta, se recomienda utilizar un cuchillo curvo para cortar el pedúnculo del fruto. La fruta cosechada se coloca cuidadosamente en una caja de madera o plástico para su traslado al centro de empaque. Para facilitar la operación de cosecha se trabaja en pareja (Figura 2-2). Una persona separa la fruta del árbol y la entrega al segundo operador que coloca la fruta en los recipientes de cosecha. Posteriormente, los frutos son transportados

al centro de selección y empaque o a los centros de distribución y consumo. Se trata de evitar la exposición directa a los rayos solares y se protegen de las inclemencias del tiempo. Debido a la fragilidad de la cáscara y del fruto en general, la papaya debe ser manejada con cuidado para evitar daños físicos. Los golpes, magulladuras, abrasiones y cortes, incrementan el ritmo de maduración y deterioro fisiológico y patológico del producto cosechado disminuyendo su calidad comercial (Peña *et al.*, 1996).



Figura 2-2. Cosecha de papaya.

2.1.2.1 Criterios de calidad y madurez del fruto

La calidad de la papaya depende directamente de la forma en que fue cultivada. El tamaño, el color de la pulpa, la textura y el tamaño de la cavidad dependen principalmente de la variedad de papaya. La forma está influida por su procedencia de una flor femenina o hermafrodita. Las deficiencias nutricionales producen alteraciones en el aspecto y calidad de la fruta, por ejemplo la deficiencia de boro produce protuberancias en la fruta, el ataque de insectos y la incidencia de enfermedades afectan seriamente la calidad y presentación de la fruta. La calidad de la papaya depende de su estado sanitario y de su aspecto en general (Figura 2-3). La fruta no debe tener daños y defectos objetables desde el punto de vista comercial y sanitario. Su madurez deber ser tal que permita su comercialización en un tiempo razonable y que satisfaga los requerimientos del consumidor.

Cuando la papaya es para exportación, deberá cumplir con los requisitos de calidad, sanidad, envase y presentación exigidos por el país importador.



Figura 2-3. Papaya amarilla.

El índice de madurez más común para este fruto es el color. En el estado verde-maduro, la fruta ha alcanzado su máximo desarrollo. La cáscara es dura y de color verde claro y se encuentra bien adherida a la pulpa que cambia de color blanco a ligeramente amarilla o rojiza, dependiendo de la variedad y las semillas se tornan negras porque fisiológicamente han madurado. Para exportación, las papayas se cosechan generalmente al estado «pintón», en el cual la cáscara es de color verde claro con un ligero desarrollo de color amarillo (menos de 1/4 de la superficie del fruto). A medida que incrementa el color de la cáscara, la pulpa se vuelve más colorida y se torna más suave y aromática. Cuando toda la superficie de la fruta es de color amarillo y aparecen pequeñas manchas de color café, el fruto entra en la etapa de sobre maduración, iniciando su deterioro. Para exportación vía aérea, se consideran frutos hasta con un 40% de desarrollo de color en su superficie y un valor Brix de 10°-11.5°. La cosecha en estado verde-maduro asegura una mayor vida útil postcosecha del producto, pero la dificultad para diferenciar un fruto verde-maduro de uno inmaduro hace difícil la utilización de este índice de madurez en la práctica. La fruta inmadura no desarrolla aroma, ni dulzura normales. Se deshidrata fácilmente y presenta mal aspecto; al no madurar normalmente se

pierde su valor comercial. Las frutas cosechadas más maduras (1/4, 1/2 y 3/4 de amarillo) tienen una vida poscosecha inversamente proporcional a su maduración.

Otros índices de madurez, complementarios al color, son la textura y el contenido de sólidos solubles (11.5% mínimo). Es recomendable determinar estos índices, ya que sus valores varían según las condiciones ambientales y del cultivo.

En México, la variedad Maradol es la papaya más cultivada (Figura 2-4). La norma mexicana NMX-FF-041-SCFI-2007, establece las especificaciones de calidad que debe cumplir la papaya, para ser comercializada y consumida en estado fresco en el territorio nacional, después de su acondicionamiento y envasado. Describe el color externo de esta variedad con base en la designación de rayas y porcentajes de color verde, amarillo y naranja, de acuerdo con siete grados de maduración que incluyen a los frutos en madurez fisiológica y en madurez de consumo.



Figura 2-4. Papaya Maradol.

2.1.2.2 Norma de calidad para la papaya

Para comercializar papayas en los mercados locales, se recomienda aplicar los factores contemplados en las normas nacionales (NMX–FF–041–SCFI–2007). Para exportación, es necesario cumplir con las exigencias de calidad y envase de los países importadores. A nivel internacional existe la norma Codex Alimentarius para la papaya (Codex Stan 183-1993). Esta norma se aplica a las variedades comerciales de papaya (*Carica papaya L.*), que habrán de suministrarse frescas al consumidor, después de su acondicionamiento y envasado.

La norma establece como requisitos mínimos de calidad para las papayas, a reserva de las disposiciones especiales para cada categoría y las tolerancias permitidas, que deben estar enteras, tener una consistencia firme, ser frescas y estar sanas. Se deben excluir los productos afectados por pudrición o deterioro que impidan su consumo. Deben estar exentas de materias extrañas visibles y de daños causados por parásitos, así como de magulladuras pronunciadas y daños causados por bajas temperaturas. Además, no deben presentar humedad externa anormal, salvo la condensación por su remoción de una cámara frigorífica; también deben estar exentas de olores o sabores extraños. Si presentan pedúnculo, su longitud no deberá ser superior a un centímetro, y el corte deberá ser neto; estar suficientemente desarrolladas y presentar un grado de madurez satisfactorio según la naturaleza del producto. El desarrollo y condición de las papayas deberán ser tales que les permitan soportar el transporte y la manipulación, y llegar en estado satisfactorio a su destino (Codex Stan 183-1993).

La norma clasifica en tres categorías a las papayas: Extra, categoría I y categoría II. En la primera, las papayas serán de calidad superior, no deberán tener defectos, con excepción de irregularidades superficiales muy leves en la piel, siempre y cuando no afecten su aspecto general, su calidad, su estado de conservación y su presentación en el envase. En la Categoría II, las papayas deberán ser de buena calidad, podrán permitirse defectos leves, siempre y cuando

no afecten su aspecto general, su calidad, su estado de conservación y su presentación en el envase, tales como: defectos leves de forma y color; defectos leves en la piel (rasguños, cicatrices, magulladuras, manchas por el sol y quemaduras de látex). La superficie total afectada no deberá exceder del tres por ciento. En ningún caso los defectos deberán afectar a la pulpa de la fruta. Finalmente, la categoría III coloca a las papayas que no pueden clasificarse en las categorías superiores. Se permiten los siguientes defectos, siempre y cuando las papayas conserven sus características esenciales en lo que respecta a su calidad, estado de conservación y a su presentación: defectos de forma y color, siempre y cuando el producto tenga las características propias de la papaya; defectos de la piel (rasguños, cicatrices, raspaduras, magulladuras, manchas por el sol y quemaduras de látex). La superficie total afectada no deberá exceder del diez por ciento. En ningún caso los defectos deberán afectar a la pulpa de la fruta.

Las disposiciones sobre la clasificación por calibres de la papaya se pueden observar en la Tabla 2-2. El calibre se determina por el peso de la fruta, de acuerdo con el cuadro siguiente:

Tabla 2-2. Clasificación por calibres de la papaya

Letra de referencia	Peso (g)
A	200 – 700
B	700 – 1300
C	1300 – 1700
D	1700 - 2300
E	>2300

Fuente: Codex Stan 183-1993

Tolerancias de calidad. En cada envase se permitirán tolerancias en lo referente a la calidad para aquellos productos que no satisfagan los requisitos de la categoría indicada. Las tolerancias de calidad quedan establecidas para cada categoría. Para la Categoría Extra, cinco por ciento, en número o en peso, de las papayas

que no satisfagan los requisitos de esta categoría, pero que cumplan los de la categoría I o, en casos excepcionales, que no superen las tolerancias establecidas para esta última. Para la Categoría I, diez por ciento, en número o en peso, de las papayas que no satisfagan los requisitos de esta categoría, pero que estén de acuerdo a lo establecido en la categoría II o, en casos excepcionales, que no superen las tolerancias establecidas para esta última. Para la categoría II, diez por ciento, en número o en peso, de las papayas que no satisfagan los requisitos de esta categoría ni los requisitos mínimos, con excepción de los productos afectados por podredumbre o cualquier otro tipo de deterioro que hagan que no sean aptos para el consumo (Codex Stan 183-1993).

Tolerancias de calibre. Cinco por ciento para la categoría Extra y diez por ciento para las categorías I o II; en número o en peso, de las papayas que no satisfagan los requisitos relativos al calibre, pero entren en la categoría inmediatamente inferior o superior, según corresponda.

Requerimientos adicionales. La norma establece condiciones respecto a agentes contaminantes presentes en los frutos. Las papayas deberán ajustarse a los límites máximos para residuos de plaguicidas establecidos en el Codex sobre residuos de plaguicidas (CAC/RCP 1-1969, Rev. 2 - 1985), para este producto.

2.1.3 Envase y transporte de los frutos

Los envases utilizados para el transporte y la comercialización de la papaya son cajas plásticas, cajas de madera, y cajas de cartón; pero en general, se realiza a granel. Algunos elementos utilizados no tienen medidas estandarizadas y su estructura es inadecuada (aberturas irregulares, superficies y bordes rústicos), son inestables para su apilamiento en los almacenes y en los vehículos de transporte. En todos los casos es común exceder la capacidad del empaque y utilizar papel periódico como envoltura.

Para el mercado de exportación, el estándar de envase para papaya es: se utilizan cajas de cartón troqueladas de una sola pieza, contienen de 6-12 unidades por caja, 4.54 Kg (10 lb) de peso neto. Los frutos se acomodan en una sola capa con el extremo peduncular hacia abajo. Cada fruta es protegida con una manga de malla de espuma o envoltura en papel. También, se incluye una almohadilla de espuma en el fondo de la caja. Entre 10-15% del área de la caja debe considerarse para orificios de ventilación. La carga se debe transportar en contenedores refrigerados.

Generalmente, el transporte se hace en cargas exclusivas, se evita movilizar cargas mixtas con agroquímicos, animales o personas. Se realiza en camiones, remolques, contenedores aéreos, y esporádicamente en transporte combinado de carretera-ferrocarril. Las pérdidas principales durante el transporte se pueden atribuir al mal estado de las vías, a la ausencia de envases, al uso de envases inadecuados, a una cosecha inadecuada, y a las grandes distancias de recorrido, aunado al escaso control de las condiciones ambientales (Flórez *et al.*, 2009)

En los vehículos de carga particulares, las prácticas de limpieza y mantenimiento son ocasionales; pero no se realiza una desinfección adicional. Los transportistas no conciben que esta carga es de productos vivos, perecederos y susceptibles a factores como el clima, la temperatura, el aire y la humedad relativa.

2.1.3.1 Manejo en el centro de empaque

En la Figura 2-5 se presenta la secuencia de operaciones realizadas en el centro de empaque. Cuando las frutas llegan al lugar, se colocan sobre mesas o bandas transportadoras y se realiza una selección simple. Se eliminan los frutos que presentan deformaciones, estado de madurez avanzado, pudrición o daños y defectos físicos. Generalmente, la selección se realiza en forma manual, en pocos casos se emplean equipos de clasificación. Esta operación es un filtro antes de

pasar al tratamiento hidrotérmico, área donde se aplica un control para la mosca de la fruta y la antracnosis, enfermedad de postcosecha más importante de esta fruta ocasionada por el hongo *Colletotrichum gloeosporoides* Penz.

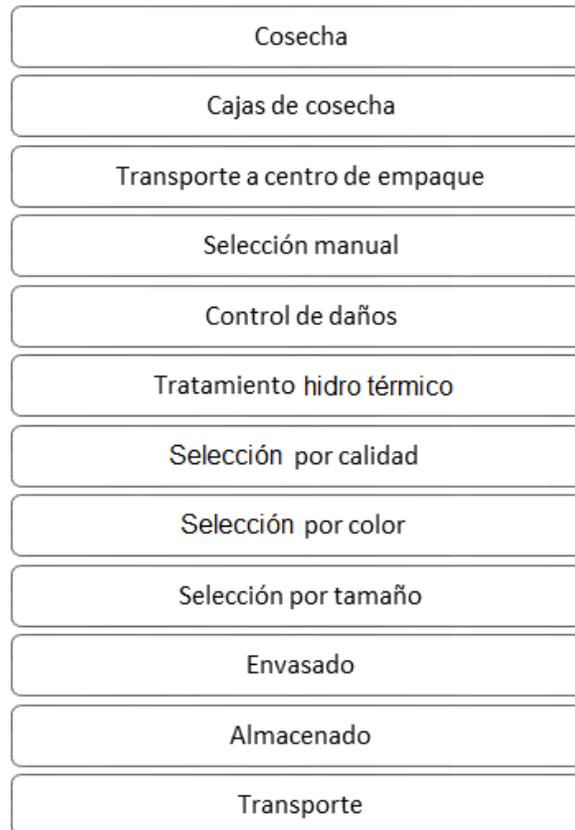


Figura 2-5. Manejo postcosecha de la papaya

Existen tres tratamientos fitosanitarios para la papaya: tratamiento hidrotérmico, tratamiento con vapor y tratamiento con aire caliente forzado. En México el más común es el tratamiento hidrotérmico. Se aplica en frutas cosechadas antes del estado de madurez de 1/4 de color amarillo, durante las primeras 18 h después de la cosecha. Consiste en una inmersión inicial durante 30 min en agua a 42 °C, pasando a otro tanque con agua a 49 °C en donde la fruta debe permanecer otros 20 min. El tiempo entre las inmersiones no debe exceder los tres minutos (Arias-Velázquez, 2007).

Después del tratamiento hidrotérmico, la fruta se maneja en un ambiente aislado. En esa área protegida, la fruta se clasifica nuevamente por color, tamaño y daños. Posteriormente, las papayas se colocan en cajas de cartón corrugado, en una sola capa. Adicionalmente, se protegen contra daños físicos usando papel en tiras o protectores de espuma plástica como las almohadillas (Arias-Velázquez, 2007).

2.1.3.2 Condiciones de almacenamiento

Los frutos de papaya maduran y se deterioran rápidamente en condiciones medio ambientales, por eso deben almacenarse bajo condiciones controladas de temperatura y humedad, a fin de alargar su vida de comercialización, transporte y consumo. La papaya es susceptible al daño por frío, no debe almacenarse a menos de 7 °C. La fruta 100% madura es más resistente al frío que la parcialmente madura, cuanto menos madura es la fruta, mayor es su sensibilidad al frío. La temperatura para maduración organoléptica es de 21-27 °C. Puede conservarse de 1-3 semanas a una temperatura entre 7-13 °C, con 85-90% de humedad relativa, dependiendo del grado de maduración. Para ingresar la fruta al almacén refrigerado, se debe eliminar el calor que trae del campo. El enfriamiento tarda de 6 a 8 h, hasta una temperatura de aproximadamente 10 °C. Para el enfriamiento rápido se utiliza un sistema de aire forzado (60-100 m/min) entre las estibas de cajas.

El almacenamiento de la papaya, aplicando atmósferas controladas, prolonga su vida útil de almacenamiento hasta por tres semanas. Se recomienda considerar los siguientes parámetros: 3-5% de CO₂, 3% de O₂, 10-12 °C de temperatura y 90-95% de humedad relativa. La conservación de la fruta en condiciones hipobáricas (20 mm Hg) inhibe la maduración y el deterioro. Actualmente, estos tratamientos no son utilizados comercialmente.

2.2. Envase y embalaje

2.2.1 Conceptos

El empleo del término empaque sigue vigente en México, pero de manera errónea. Su uso correcto en el español se refiere a realizar la acción de envolver un artículo o producto para protegerlo del clima, así como de los animales, entre otros factores; pero difiere del embalaje que es el contenedor que unifica y distribuye a los envases (Aguirre, 2008).

Vidales (2003), define empaque como: “Un sistema coordinado para la preparación de mercancías para su transporte, distribución, almacenamiento, ventas y uso. Es una función de negocio compleja, dinámica, científica, artística y controversial, que en su forma más fundamental contiene, protege, preserva, transporta, informa y vende. El empaque es una función de servicio”.

Proenza (2004) define empaque como: “Lo que contiene a un producto y la percepción visual que del mismo tienen los consumidores. A través de la forma, los colores y el diseño, el envase hace que el producto se destaque o pase inadvertido. Un requisito importante en todo envase es que debe mostrar claramente lo que contiene y que, además de su aspecto formal, sea también útil o funcional de acuerdo con su forma de uso o consumo”.

Por otro lado, se define envase como: “Cualquier recipiente o envoltura en el cual esté contenido el producto para su venta, almacenaje o transporte; por su relación con la mercancía. Está en contacto directo con el producto, por lo que su función es proteger, guardar, conservar e identificar al producto que contiene, a la vez que facilite su manejo, transportación y comercialización” (Vidales, 2003).

La NMX-EE-148-1982, en su inciso 3.1.14 define envase como: “Cualquier recipiente adecuado en contacto con el producto, para protegerlo y conservarlo, facilitando su manejo, transportación, almacenamiento y distribución.” Así mismo, en su inciso 3.1.13 define embalaje como: “Todo aquello que envuelve, contiene y protege debidamente los productos envasados, que facilita, protege y resiste las operaciones de transporte y manejo e identifica su contenido”.

Vidales (2003) define embalaje como: “El material que se utiliza para envolver, proteger y reunir productos previamente envasados de forma individual, presentándolos de forma colectiva con el objeto de facilitar su manejo, almacenamiento, carga, descarga, distribución y comercialización en general”.

En mercadotecnia el término empaque se refiere indiscriminadamente al envase primario, secundario o terciario, y el embalaje es el que distribuye el producto y puede funcionar como punto de venta. (Aguirre, 2008). El término envase se refiere a: “cualquier objeto o material que encierra, protege o guarda un producto, pero que no forma parte integral del mismo” (Mercado, 1992); mientras el término empaque es: “el instrumento de la mercadotecnia que tiene por objeto cubrir un producto, con el fin de protegerlo, identificarlo, facilitar su manejo y hacerlo de gran utilidad en la promoción y venta” (Mercado, 1992).

2.2.2 Clasificación

Según Rodríguez (2005), el primer criterio de clasificación considera al envase como un contenedor de boca angosta para líquidos que se extraen por gravedad, y de boca ancha para granulados, polvos, geles y pastas que se extraen con la ayuda de un utensilio. El segundo criterio considera la forma de contacto que tiene el envase con el producto, clasifica los envases como: envase primario, envase secundario y en envase terciario.

Los envases primarios (Figura 2-6) son aquellos que se encuentran en contacto directo con el producto contenido.



Figura 2-6. Envase primario.

Tomada de la red <https://encrypted-tbn3.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTX2ggETmhFrwBGoLPeMHCXVAvRgYK121FdJvHpzbRDG89nUZ7i>

El envase secundario (Figura 2-7) es aquel que contiene o agrupa a uno o más envases primarios. Su función es proteger a los envases primarios y comunicar e identificar un producto ante el vendedor y el consumidor.



Figura 2-7. Envase secundario.

Tomada de la red http://www.druckertek.com/images/linx_IJ370-4.jpg

El envase terciario (Figura 2-8) contiene los dos anteriores, es decir, agrupa envases primarios y/o secundarios. Su finalidad es facilitar la manipulación y el transporte de los productos. Unifica y protege al producto a lo largo de la cadena comercial, se maneja a nivel del fabricante en el proceso de distribución, solo llega al consumidor final para el caso de consumidores mayoristas.



Figura 2-8. Envase terciario.

Tomada de la red <http://www.empaque.com/documenta/imagenes/4045999/Envase-y-embalaje-g2.jpg>

Los envases también se pueden dividir en flexibles y rígidos. Esta clasificación abarca características de biodegradables o no biodegradables, considerando el impacto ambiental que causa el envase cuando pasa a ser desechado, en función de los materiales que los componen.

Los envases flexibles se obtienen a partir de laminados de materiales en forma de rollos. Se fabrican con diferentes materiales: papel aluminio, papel celofán, polietileno, polipropileno y otros plásticos de alta y mediana resistencia. Los envases de papel y cartón son fabricados a partir de celulosa. Los principales productos elaborados con estos materiales son: bolsas, cajas, envolturas, contenedores, estuches, sobres, etiquetas, bandejas y vasos. Pueden ser combinados con materiales plásticos para lograr ciertas características especiales.

Los envases rígidos adquieren su forma básica desde la fabricación y la mantienen aún después de haber sido llenados y sellados. Estos envases se pueden dividir en envases de metal, envases de plástico, envases de madera, envases de vidrio, envases de cerámica y envases compuestos.

Los envases de metal (Figura 2-9) se fabrican con componentes metálicos como la hojalata y el aluminio. Generalmente necesitan recubrimientos para evitar la interacción química entre el envase y el producto. Los principales procesos para su fabricación son: laminación, troquelado, soldadura, extrusión y lacado. Ejemplos de estos envases son: cajas, latas, peroles, contenedores, charolas, estuches, tapas, tarros y tubos.



Figura 2-9. Envases de metal.

Tomada de la red

http://www.revcyl.com/www/images/images_cyl/menu_superior/colaboradores/pedrom_ortega/2013/REVCYL_revista_de_castilla_y_leon_anillas_hi_conen_anonimas_botes_cerveza_pack.jpg

Los envases de plástico (Figura 2-10) utilizan varios polímeros plásticos para su elaboración, el polietileno (PE), el polipropileno (PP), el poli cloruro de vinilo (PVC), el poli estireno (PS), el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), el estireno butadieno (SB), el polietileno tereftalato o poliéster (PET). Sus excelentes características los hacen ser muy utilizados.

Entre los procesos más comunes para la fabricación de envases de plástico está la inyección, el soplado, el termo tornado, la extrusión y coextrusión de lámina, la laminación, el calandrado, el espumado y la compresión. Ejemplos de estos envases son: bandejas, cubetas, botellas, barriles, cajas, cápsulas, contenedores, estuches, tambos, tarros y vasos.



Figura 2-10. Envases de plástico.

Tomado de la red <http://www.seijasenvases.com/wp-content/gallery/envases-de-plastico/3400-2-8.jpg>

Los envases de madera (Figura 2-11) están fabricados con contrachapado de pino procedente de cultivos gestionados de manera sostenible. Son ecológicos y sostenibles. La fabricación de los envases de madera es mediante un proceso limpio y sencillo que consume un mínimo de energía. La madera se utiliza más para el embalaje, que para el envase de los productos. Una vez terminada la vida útil del envase, es fácilmente reciclable.



Figura 2-11. Envases de madera.

Tomado de la red <http://www.infoagro.com/noticias/2003/01/cajas.gif>

Los envases de vidrio (Figura 2-12) y cerámica se obtienen al mezclar y fundir arena de sílice, carbonato de calcio y pequeñas cantidades de aditivos para lograr el color y brillo necesario. Sus principales ventajas se relacionan directamente con su capacidad aséptica y al hecho de ser un material transparente, lo que permite ver el contenido claramente. Botellas, frascos y vasos son ejemplos de estos envases.



Figura 2-12. Envases de vidrio.

Tomado de la red <http://www.envasesdevidrio.com.mx/conservas.jpg>

Los envases rígidos compuestos están formados por dos o más de los materiales mencionados anteriormente, el ejemplo más común de este tipo de envases es el tetra-pack (Figura 2-13).



Figura 2-13. Envase rígido compuesto, tetra pack.

2.2.3 Funciones

De acuerdo con Zikmund y D'Amico (1993), el envase es una extensión del producto, el cual aporta funciones de utilidad y seguridad. Los productos, con un envase adecuado, proporcionan ventajas y garantías al consumidor, como: limpieza, buen estado, comodidad de uso y facilidad de manejo.

Actualmente, los sistemas de venta tienden hacia el autoservicio, y ahora el envase es la imagen del producto, ya que en esta modalidad no hay una persona para asistir en la compra, en consecuencia la función del envase va más allá de la protección del producto, también debe atraer la atención del cliente, impactarlo, motivarlo y finalmente debe convencerlo para su compra. Debe identificar y recomendar al producto, evidenciando las cualidades del mismo, sin dejar de brindar ventajas para su manipulación y protección (Vidales, 2003).

El envase debe permitir un buen manejo para almacenar el producto. El diseño del envase debe considerar las dimensiones del espacio que ocupará en el estante para su óptima organización al exhibirse ante el consumidor en las tiendas de autoservicio, además debe mostrar claramente el nombre del producto y sus características, en partes estratégicas del mismo (Girón, 1997).

El envase debe mostrar información sobre los ingredientes que contiene el producto, debe incluir un instructivo de preparación, así como registros sanitarios, nombre del fabricante, peso, advertencias, fecha de elaboración y de vencimiento (Girón, 1997). Por otro lado, el embalaje proporciona protección en el transporte, puede contener varios productos, haciéndolo un contenedor terciario. La finalidad principal del embalaje es ayudar en el transporte y proteger los productos.

2.2.4 Importancia

En el campo de distribución física, el envase ocupa un lugar muy importante. Los productos deben estar envasados apropiadamente para salvaguardar al producto contra cualquier daño o amenaza significativa durante la distribución. Los daños se traducen en costos y pueden ocurrir en el manejo, en el almacenamiento o en el transporte. En mercadotecnia, el envase es un factor de gran importancia ya que funciona como el vehículo que canaliza el producto hacia el consumidor final, a través de las vías que constituyen los circuitos de distribución, interviniendo en las cuatro variables consideradas dentro de la estrategia de venta del producto:

Variable producto

- El envase aporta valores agregados al producto (utilidad y seguridad).
- El envase debidamente sellado evita el fraude.

Variable precio

- El envase atractivo, seguro y cómodo establece mayores precios de venta.
- El envase incide en los costos de distribución y por tanto en el precio final.

Variable distribución

- Los distribuidores dan prioridad a productos con envases más eficaces.
- Un envase adecuado (tamaño, manejo) tiene mayor aceptación.

Variable promoción

- El envase ayuda a realizar la persuasión de compra en el punto de venta.
- Un envase adecuado incrementa el ciclo de vida y las ventas del producto.

2.3. Materiales compuestos

En ciencia de materiales, los *materiales compuestos* son aquellos que cumplen las siguientes propiedades:

- Están formados de dos o más componentes, distinguibles físicamente y separables mecánicamente.
- Presentan varias fases químicamente distintas, completamente insolubles entre sí, y separadas por una interface.
- Sus propiedades mecánicas son superiores a la simple suma de las propiedades de sus componentes, sinergia.

Los materiales compuestos nacen de la necesidad de obtener materiales que combinen las propiedades de los cerámicos, los plásticos y los metales. Como ejemplo, en la industria del transporte se requieren materiales ligeros, rígidos, resistentes al impacto, a la corrosión y al desgaste, propiedades que rara vez se dan juntas (Askeland, 1998).

Aunque existe una gran variedad de materiales compuestos, en todos se pueden distinguir las partes de su estructura: agente reforzante y matriz. El agente reforzante es una fase de carácter discreto con geometría fundamental para definir las propiedades mecánicas del material. La matriz tiene carácter continuo y es responsable de las propiedades físicas y químicas. Transmite los esfuerzos al agente reforzante, también lo protege y da cohesión al material.

2.3.1 Clasificación

De manera general, los materiales compuestos se dividen en tres categorías dependiendo de la forma de los materiales involucrados.

a) Materiales compuestos reforzados con partículas.

Están compuestos por partículas de un material duro y frágil dispersas discreta y uniformemente, rodeadas por una matriz más blanda y dúctil. Existen dos tipos: los endurecidos por dispersión y los formados por partículas verdaderas.

b) Materiales compuestos reforzados con fibras.

Estos compuestos consiguen una mejor resistencia a la fatiga, mejor rigidez, y una mejor relación resistencia-peso, al incorporar fibras resistentes y rígidas aunque frágiles, en una matriz más blanda y dúctil. El agente reforzante (fibra) proporciona al material su fuerza a tracción, mientras el otro componente (matriz) transfiere la carga a todas las fibras. También, a menos que la matriz elegida sea especialmente flexible, evita el pandeo de las fibras por compresión (Askeland, 1998).

c) Materiales compuestos reforzados laminares.

Están formados por varias capas o láminas unidas entre sí. El triplay es un material compuesto laminar, tiene varias capas unidas entre sí, resultando un material con mejores características con respecto a cada uno de sus componentes.

2.3.2 Aplicaciones

Las aplicaciones de los materiales compuestos dependen de su matriz, del material disperso, y de la interface. Actualmente, estos materiales son utilizados en la vida diaria, con aplicaciones diversas, desde las más comunes hasta las muy específicas, por ejemplo: en la industria aeroespacial, automotriz (Figura 2-14), electrónica, militar y deportiva (Hernández y García, 2010).



Figura 2-14. Materiales compuestos aplicados en la industria automotriz.

Tomada de la red <http://cannabischile.cl/wp-content/uploads/2013/09/hemp-museum-16-640x360.jpg>

En la industria aeronáutica (Figura 2-15), los materiales compuestos se utilizan por ser resistentes y livianos al mismo tiempo, mejoran la eficiencia de los sistemas y reducen el consumo de combustibles; además, son menos sensibles a las vibraciones, se obtienen superficies más lisas, y el proceso de producción de menos toxico ya que la fibra no se volatiliza (Lucena *et al.*, 2009).

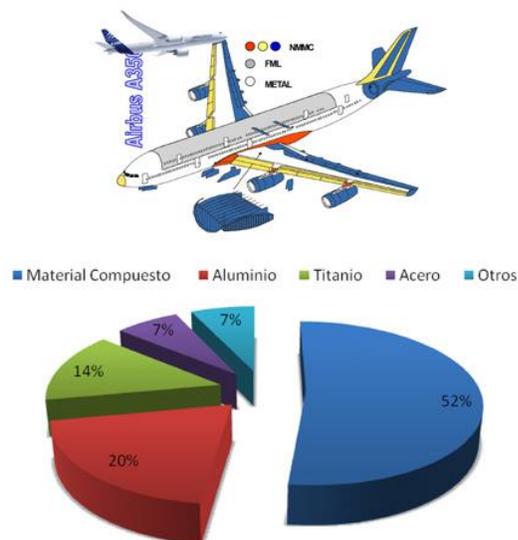


Figura 2-15. Materiales compuestos aplicados en la industria aeronáutica.

Tomada de la red <http://img.interempresas.net/fotos/769544.jpeg>

2.3.3 Fibras naturales

Las fibras naturales han sido utilizadas desde la antigüedad, se han empleado como alimento, material de construcción, en la fabricación de utensilios, vestimenta, herramientas y muchos otros usos (Taj *et al.*, 2007). Como fibras naturales, se entienden los materiales fibrosos que pueden extraerse de la naturaleza, principalmente constituidos por celulosa y lignina, además de otros componentes en menor cantidad como hemicelulosa y ceniza, por esta razón las fibras naturales también reciben el nombre de fibras lignocelulosicas.

Las fibras naturales son materiales que pueden extraerse de la naturaleza. Están constituidas principalmente por celulosa y lignina, además de otros componentes en menor cantidad como hemicelulosa y ceniza, por esta razón reciben el nombre de fibras lignocelulósicas. Estas fibras se han empleado como alimento, vestimenta, material de construcción, en la fabricación de utensilios, desarrollo de herramientas y muchos otros usos (Rowell, 1997).

Las fibras son estructuras de origen animal (lana, seda), vegetal (algodón, lino, yute, cáñamo, sisal), mineral (asbestos) o sintético parecidas al pelo. Su diámetro no suele ser superior a 0,05 cm, y se clasifican en función de su origen, de su estructura química o de ambos factores (Narendra y Yang, 2005).

2.3.3.1 Clasificación y uso general de las fibras naturales

Hay fibras que son obtenidas de hojas, raíces, frutos, tallos y semillas. Las fibras, se clasifican en función de su estructura química y de su origen. Por su origen las fibras naturales se dividen en cuatro grupos. Fibras vegetales, fibras de animales o de proteínas, fibras minerales y aquellas que son obtenidas de residuos agrícolas de plantas anuales o bien de plantas arbóreas madereras (Bodros y Baley, 2008). Las fibras vegetales de mayor utilidad pueden clasificarse tomando en

consideración su origen anatómico, su tipificación botánica y sus usos. Hay aquellas que son obtenidas de hojas, raíces, frutos, tallos y semillas. Los residuos agrícolas son las partes de las plantas que se quedan en el campo después de cosechar el cultivo principal son una fuente importante de fibras residuales por ser anualmente renovables, abundantemente disponibles y de valor limitado (Saheb y Jog, 1999).

La optimización de los recursos lleva al uso de materiales naturales, tal es el caso del mundo vegetal, donde las células, individuales o en grupos, están diseñados a tensión y rigidez. Constituidos principalmente de celulosa, un polímero natural con alta resistencia y rigidez por unidad de peso, y material de construcción de las células fibrosas en las plantas. Dando pauta a investigaciones que propongan aplicaciones más técnicas, como es el desarrollo de nuevos materiales. Materiales compuestos, en matrices elastoméricas o poliméricas. Estas fibras son utilizadas en la elaboración de compuestos debido a su bajo costo, baja densidad y alta resistencia. Proveen rigidez y resistencia, son fáciles de reciclar y a diferencia de otras fibras, como la fibra de vidrio, no son quebradizas. Los compuestos son usados para elaborar partes de automóviles, muebles, aislantes térmicos y paneles prefabricados para el ramo de la construcción (Narendra y Yang, 2005).

Dentro de este tipo de fibras se encuentra la fibra del bagazo cocido de agave, la cual no tiene un uso específico. De manera muy escasa se ha utilizado para la elaboración de sogas, para la confección de algunas artesanías, para la nutrición de suelos como composta, para macetas en malla, para relleno de colchones, asientos, y como sustrato para plántulas; sin embargo, estas fibras lignocelulosicas son de abundante disposición, anualmente renovables y de valor limitado.

2.3.4 Polímeros naturales

Los polímeros son compuestos moleculares de cadena larga, resultado de la unión de moléculas simples (monómeros) mediante una reacción química denominada polimerización. Su composición química es a base de C, H y O principalmente, en algunas ocasiones pueden presentar F, N, P, S y Si, entre otros. El C forma la columna vertebral de la mayoría de las cadenas. El número de monómeros en una cadena se denomina grado de polimerización y puede variar desde 100 hasta 100,000. La polimerización puede realizarse de manera natural, mediante reacciones bioquímicas en el interior de células, dando origen a polímeros naturales como las proteínas y el hule natural, o bien de manera artificial obteniéndose materiales plásticos. La manera aleatoria en que se produce la reacción de polimerización artificial, genera cadenas de diferente tamaño que pueden ramificarse. Estas macromoléculas pueden presentar muchas configuraciones y conformaciones. La configuración se refiere a diferencias estructurales de corto alcance y no se puede modificar de manera reversible. La conformación se define como el acomodo en el espacio de los monómeros de una cadena, este arreglo si puede modificarse de manera reversible debido a la libertad de rotación de los enlaces (Reyes e Hinojosa, 2000).

Previo a la existencia de los plásticos y los polímeros sintéticos, la naturaleza se valía de los polímeros naturales; sin embargo, se les resta importancia con respecto a los polímeros sintéticos, a pesar de que en muchos sentidos, son más importantes. Los polímeros naturales incluyen al ácido ribonucleico (ARN) y al ácido desoxirribonucleico (ADN), vitales en los procesos de la vida. Por ejemplo, el ARN mensajero hace posible la existencia de las proteínas, los péptidos y las enzimas. Las enzimas colaboran en la química interior de los organismos vivos y los péptidos conforman algunos componentes estructurales de la piel, el cabello y muchos más elementos. Otros polímeros naturales son los polisacáridos (azúcares) y los polipéptidos como la seda, la queratina y el cabello. El caucho natural es otro polímero natural, constituido por carbono e hidrógeno.

2.3.4.1 Principales plantas laticíferas y obtención del látex natural

Género *Castilloa*. Conocido como caucho o hule, *Castilla elástica* (Figura 2-16), es un árbol que pertenece a la familia de las moráceas, nativo del sur de México y Centroamérica. Se encuentra en selvas y prolifera desde el nivel del mar hasta los 600 o 780 m.s.n.m., en temperaturas media de 25 °C, máxima de 33 °C y mínima de 19 °C, con precipitaciones menores de 1,500 mm anuales (Xalapa, 2009).



Figura 2-16. *Castilla elástica*.

Tomada de la red <http://www.southeastgrowers.com/images/Castilla%20lastica%20tr%20VV%20Y4508%20N158%202.jpg>

Género *Ficus*. *Ficus elástica* (Figura 2-17) es una especie perennifolia del género de los higos, nativa del noreste de India y sur de Indonesia. Cuando se produce una herida el látex fluye abundantemente, por lo que en las podas es conveniente cubrir los cortes con algún material para evitar el sangrado. Esta savia es muy irritante a los ojos y piel, y fatal si se ingiere. El látex del árbol se usa para hacer chicle, después de un proceso de depuración (Johnson y More, 2006).



Figura 2-17. *Ficus elástica*.

Tomada de la red <http://3.bp.blogspot.com/-OL8IDUchNF8/Tu45BKAUI8I/AAAAAAAAAAc/YHOA9uCFOC8/s1600/Ficus+elastica.JPG>

Género *Hevea*. *Hevea brasiliensis* (Figura 2-18) pertenece a la familia de las euforbiáceas, es una planta tropical, alcanza hasta 20 metros de altura y puede explotarse cada tercer día en forma ininterrumpida durante más de 30 años (SAGARPA *et al.* 2005). Su látex es blanco o amarillento, contiene 30-36% de hidrocarburo del caucho, 0.5% de cenizas, 1.5% de proteínas, 2.0% de resina y 0.5% de quebrachitol (Royo, 1990; Zhang *et al.*, 2008).



Figura 2-18. *Hevea brasiliensis*.

Tomada de la red http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1d/Plantation_of_heveas.jpg

Género *Landolphia*. Género de plantas con flores (Figura 2-19), y muchas especies de lianas, pertenece a la familia *Apocynaceae*. Esta planta se utiliza principalmente para decoración de interiores por el color de sus flores. Su látex es considerado de segunda calidad por el alto contenido de suero acuoso que dificulta el cremado e incrementa los procesos de concentración del caucho en suspensión (Johnson y More, 2006).



Figura 2-19. *Landolphia parvifolia*.

Tomada de la red http://www.westafricanplants.senckenberg.de/images/pictures/apoc_landolphia_parvifol--flow-p4_gbaumann_3045_4a1649.jpg

Género *Manihot*. Género de la familia de las euforbiáceas, con 98 especies en América. El miembro más conspicuo del género es *Manihot esculenta* (Figura 2-20). Este cultivo (yuca, mandioca, casava o casabe) se establece para la producción del tubérculo para consumo, no para explotación laticífera. El cultivo no produce látex de buena calidad porque se cosecha muy joven (FAO, 1990).



Figura 2-20. Mandioca o Yuca, (*Manihot esculenta*).

Tomada de la red http://www.botany.hawaii.edu/faculty/carr/images/man_esc.jpg

Un análisis de la composición porcentual de caucho, resina y albúmina de los géneros de mayor producción laticífera a nivel mundial, se detalla en la Tabla 2-2, se observa que, el látex con mayor porcentaje de caucho (94%) se presenta en *Hevea brasiliensis*, especie idónea, cultivada con fines de producción comercial.

Tabla 2-2. Composición porcentual del látex de los principales géneros laticíferos.

Género	% de caucho	% de resina	% de albúmina
<i>Castilloa</i>	6	12	--
<i>Ficus</i>	84	11	--
<i>Hevea</i>	94	2	1
<i>Landolphia</i>	80	6	--
<i>Manihot</i>	76	10	8

Fuente: Vian, 1999.

La recolección del látex se realiza por gravedad, en la corteza del árbol se realiza un corte diagonalmente (Figura 2-21), utilizando una cuchilla. Las dimensiones del corte corresponden a la mitad o a un tercio de la circunferencia del tronco, para llegar a los tubos laticíferos. No se debe realizar el corte a mayor profundidad, ya que el árbol no se recuperaría para la siguiente recolección de látex (Royo, 1990).



Figura 2-21. Recolección del látex de caucho natural.

Tomada de la red <http://culturacolectiva.com/wp-content/uploads/2015/01/3052145.jpg>

Royo (1990), recomienda emplear compuestos de amonio y tiuram (resina antioxidante p-ter-butil-fenolformaldeidica) en el corte para prevenir la coagulación del látex exudado, permitiendo su fluidez y recopilación. La cantidad de látex extraída por corte es alrededor de 30 ml/día, varía de acuerdo con la especie vegetal. Cuando la sustancia deja de emanar del tajo, se espera un día para taparlo con un trozo de corteza de la base del tronco. Cuando los cortes llegan al suelo, se espera hasta que la corteza se renueva totalmente. En promedio, la edad de producción de látex de los árboles laticíferos es de veinticinco años, entonces son talados para ser sustituidos.

El látex extraído se tamiza y se disuelve en agua para tratarlo con ácido, y favorecer la concentración o aglutinamiento de las partículas en suspensión del caucho en el látex. Posteriormente, es prensado utilizando rodillos, formando capas de caucho natural con un grosor de 0.6 cm que serán secadas con aire o humo antes de salir al mercado (Royo, 1990). Cuando se requiere látex natural en estado líquido, se retira el látex antes del proceso de prensado y se envasa. En otro proceso llamado cremado, mediante centrifugación se retira el suero acuoso del látex, concentrándolo hasta tener 60% en peso de caucho. La Figura 2-22 muestra un esquema general del proceso de obtención del Látex (Royo, 1990).

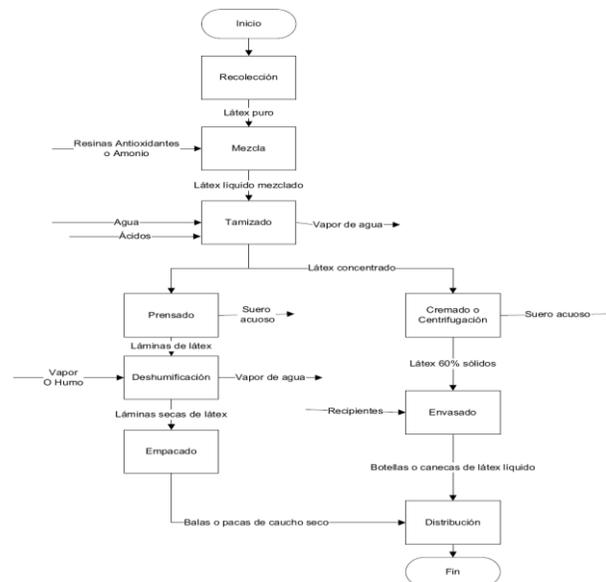


Figura 2-22. Esquema general del proceso de obtención del látex natural.

2.3.4.2 Características y uso general del látex

“Se define como látex a una suspensión coloidal acuosa, generalmente de color blanquecino, segregada por la corteza de árboles laticíferos al sufrir una herida en su tronco. En esta sustancia, el polímero se mantiene disperso en la fase acuosa continua de forma relativamente estable” (Feliú, 1996).

El látex es una sustancia de gran complejidad, entre sus componentes se encuentran gomas, aceites, azúcares, sales minerales, proteínas, alcaloides, terpenos, ceras, hidrocarburos, almidón, resinas, taninos y bálsamos. Además, la cantidad de estos compuestos varía ostensiblemente en función de factores, como la especie vegetal, la parte de la planta en la que se encuentra, la época del año y el tipo de suelo sobre el que crece la planta (Feliú, 1996).

El caucho o hule, contenido en el látex, es un elastómero con fórmula C_5H_8 , ordenado por varios monómeros isopreno (Figura 2-23), es una sustancia natural caracterizada por su insolubilidad en agua, su resistencia eléctrica y su elasticidad, que se encuentra en forma de suspensión coloidal en el látex (Royo, 1990).

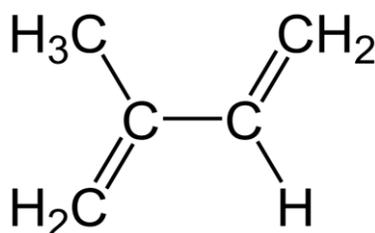


Figura 2-23. Fórmula química del monómero Isopreno.

Las partículas de caucho que, en estado natural aparecen en forma de suspensión coloidal en el látex, se encuentran cargadas negativamente y tienen un diámetro que se sitúa entre los 0,5 y los 3,0 μm (Ramos y Sánchez, 2003).

Un elastómero puede ser deformado por aplicación de una tensión muy baja, se estira con facilidad. En general resisten a la compresión. La deformación elástica es reversible, por lo tanto, cuando la tensión se retira, el elastómero se revierte a su forma original con lentitud o rapidez, según su estructura (Royo, 1990). La Figura 2-24 muestra el comportamiento típico de esfuerzo-deformación unitaria del caucho. El esfuerzo no es proporcional a la deformación unitaria (curva de color rojo), sin embargo, aunque la sustancia es elástica, al disminuir el esfuerzo la curva de retorno (azul) no se recorre en sentido contrario. El cálculo del módulo de Young se obtiene de la pendiente de la recta resultante en la medición del esfuerzo aplicado sobre el material (García, 2002).

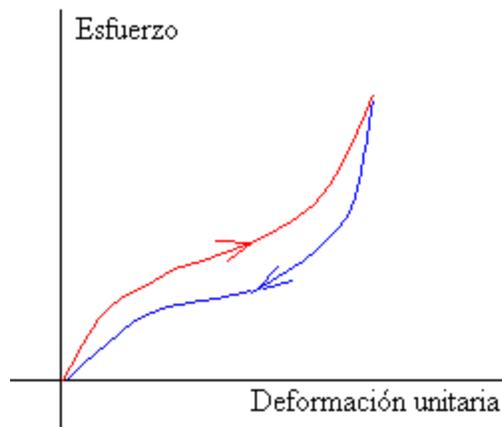


Figura 2-24. Comportamiento típico de esfuerzo-deformación del caucho

Tomada de la red http://4.bp.blogspot.com/_n_Kw1ZKjcyQ/TJ_UAH9DTsl/AAAAAAAAAEo/1O--t0lweS8/s1600/k%C3%B1.png

Los elastómeros están formados por polímeros no cristalinos que tienen dobles enlaces, los cuales son puntos susceptibles de reticulación, casi siempre por vulcanización con azufre. El grado de vulcanización es pequeño, la cifra típica es aproximadamente el 10% en peso, si sobrepasa este porcentaje a uno mayor que el 50% en peso, se convierte en un material muy quebradizo llamado ebonita. El azufre forma puentes entre las cadenas del polímero, y es esto lo que produce la “recuperación” del elastómero cuando se estira y se suelta (Friedenthal, 2000).

El caucho puro es insoluble en agua, álcalis y ácidos débiles, pero soluble en benceno, petróleo, hidrocarburos clorados y disulfuro de carbono. Con agentes oxidantes químicos se oxida rápidamente, pero con el oxígeno de la atmósfera la oxidación es mucho más lenta (Ramos y Sánchez, 2003).

Las especificaciones del látex de caucho natural centrifugado están establecidas en las normas internacionales ASTM 1076-02, ISO 2004 y UNE 53618. La tabla 2-3 muestra las especificaciones de látex.

Tabla 2-3. Especificaciones de látex de caucho natural.

Características	Valores mínimos
% total de sólidos	61.5
% contenido en caucho	60.0
% sólidos no caucho	8.7
% amoníaco	8 ppm
Contenido de cobre	8 ppm
pH	10.4 – 11.2
Viscosidad Brookfiel	120 cPs/400 cps
Estabilidad mecánica	650 s(min)

Fuente: Feliú (1996).

Usos principales.- Actualmente existen más de 40.000 productos manufacturados para uso industrial y doméstico, entre los que destacan neumáticos, cámaras, mangueras, suelas, guantes, pegamentos, aislantes, etc. (SAGARPA *et al.*, 2005). Del proceso de beneficiado del hule natural se derivan tres productos: hule laminado, hule granulado y látex. El hule granulado se usa para la fabricación de llantas, partes automotrices, calzado, mangueras, bandas y adhesivos, entre otros; el hule laminado se ocupa sobre todo para suelas, sandalias, adhesivos para calzado y en menor medida llantas; y el látex se emplea para elaborar productos con elasticidad, como son guantes, globos, preservativos, artículos médicos (Comité Estatal del Sistema Producto Hule de Oaxaca, 2009).

Uso sanitario.- Posiblemente, en el área sanitaria es donde existe una mayor presencia de objetos laticíferos, como los guantes quirúrgicos, las mascarillas anestésicas, las sondas, los ductos asépticos, los estetoscopios, los torniquetes, los vendajes elásticos, las tapas de frascos que contienen medicinas, los diques odontológicos, la cinta adhesiva o las almohadas y colchones de las camas hospitalarias (Wittcoff y Reuben, 1991).

Uso cosmético.- El látex ha sido utilizado en disfraces y maquillaje, incluso en la imitación de heridas y cicatrices, la elaboración de orejas de elfo, la fabricación de prótesis o la simulación de piel envejecida (Wittcoff y Reuben, 1991).

Uso medicinal. La medicina natural atribuye diversas propiedades curativas al látex de diferentes especies vegetales. Por ejemplo, el látex del fruto de la papaya es empleado para sanar afecciones cutáneas y matar lombrices intestinales (Pardo, 2009). El látex rojizo del género *Croton* es considerado un buen cicatrizador de heridas externas y de úlceras estomacales e intestinales, y el látex anaranjado de *Chelidonium majus* cura herpes y verrugas (Cebrian, 2009).

No obstante, el látex de determinadas plantas puede resultar muy peligroso e incluso mortal. El látex de adelfa amarilla (*Thevetia peruviana*), perteneciente a la familia de las apocináceas, se considera una sustancia eficaz contra un gran número de dolencias como la fiebre o los dolores de muelas y por ello es usado para sanarlas, pero un consumo excesivo puede producir la muerte (Rojas, 2009).

Otros usos. A partir del año 1920 se comenzaron a introducir en el mercado los preservativos de látex, en la fabricación de ropa, calzado, material deportivo, material escolar, neumáticos, colchones, almohadas, globos, bolsas para compresas de agua caliente, etc. Algunos látices se utilizan como gomas de mascar o en los elásticos de las prendas de vestir, tejidos o cuerdas, revestimiento de equipos, tuberías, mangueras, productos para sellar ventanas y puertas, como espumas para recubrimientos, incluso en colchones y almohadas (Núñez, 2009).

2.4. Sumario

Desde sus orígenes, hasta nuestros días, el envase se ha presentado como un elemento de gran utilidad. Contener, proteger, transportar y conservar diferentes objetos han sido las principales necesidades que han motivado al ser humano a elaborar envases. El envase y el embalaje son parte del medio para garantizar la entrega segura y eficiente de las mercancías en buenas condiciones al consumidor final, complementada por la reutilización eficiente o la recuperación y/o eliminación de los materiales de los envases a un costo mínimo. La influencia de los envases está presente en todos los ámbitos que intervienen en el desarrollo de las sociedades, principalmente en la producción, distribución y venta de productos. Sin lugar a dudas, el envase es parte integral para el desempeño óptimo de la estrategia funcional de una empresa, de ahí la importancia de conocer en profundidad los alcances del concepto del envase, así como de las funciones que lleva a cabo (Vidales, 2003).

2.5. Referencias bibliográficas

- Aguirre C. y Fernández V. (1996). “El sabor de la papaya. Campo y Tecnología”. N° 26, Mayo/Junio. Colombia
- Aguirre Cárdenas, A.C. (2008). “Significado de los términos envase, empaque y embalaje”. Revista @-scholarum. México. Disponible en: <http://genesis.uag.mx/escholarum/vol3/envase.htm> [Consulta: 10.05.2014]
- Arias-Velázquez C.J. (2007). “Manual de manejo postcosecha de frutas tropicales. (Papaya, piña, plátano, cítricos)”. F.A.O. Disponible en: <http://www.fao.org/inpho/content/documents/vlibrary/ac304s/ac304s00.htm> [Consulta: 25.08.2014].
- Askeland D.R. (1998). Ciencia e Ingeniería de los Materiales. 3ra. Edición. International Thompson Editores. México.
- Avilan L. y Renfigo C. (2001). “El lechoso”. 2da Edición. Editorial América. Maracay, Venezuela. pp. 13- 21.

- Bodros E. y Baley Ch. (2008), “Study of the tensile properties of stinging nettle fibres (*Urtica dioica*)”. *Materials Letters* **62 (14)**, 2143-2145.
- CAC/RCP 1-1969, Rev. 2. (1985). “Código Internacional Recomendado de Prácticas, Principios Generales de Higiene de los Alimentos”.
- CAC/RCP 44-1995. (1995). “Código internacional recomendado de prácticas para el envasado y transporte de frutas y hortalizas fresca”
- Codex Stan 1-1985. Rev.1-1991. V-1. Codex Alimentarius. Requisitos Generales.
- Codex Stan 183. 1993. “Norma Internacional de los alimentos. Papaya”.
- Comité Estatal del Sistema Producto Hule de Oaxaca. (2009). “Rehabilitación de la Infraestructura de Vivero y Jardines de Multiplicación de Hule (*Hevea brasiliensis*)”. Tuxtepec, Oaxaca.
- Desai U.T. y Wagh A.N. (1995). “Papaya”. In: Salunke DJ and Kadam SS (eds). Hand book of fruit science and technology: Production, composition, storage, and processing. Marcel Dekker, New York. pp. 4-314
- FAO/INFOODS. (2014). “Tablas y bases de datos”. Disponible en: <http://www.fao.org/infoods/infoods/tablas-y-bases-de-datos/es/> [Consulta: 25.08.2013]
- Feliú Vilaclara J.L. (1996). “Látex, su proceso”. *Cauchotecnía* **9**: 9-30.
- Flórez O.A, Marín H.F. y Zapata J.A. (2009). “Estudio de las prácticas de cosecha y poscosecha de la papaya (*Carica papaya* cv. *Maradol*), Departamento del Huila, Colombia”. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental* (**1**): 29-36
- Friedenthal E. (2000). “Tecnología Básica del Caucho”. 1^{ra}. Ed. Buenos Aires, Argentina.
- García A. (2002). Medida del módulo de Young. http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/solido/din_rotacion/alargamiento/alargamiento.htm [Consulta: 15.06.2014]
- Girón C. (1997). “El empaque de confites nacionales y su efecto en la preferencia del consumidor”. Facultad de Ciencias Económicas. Universidad Rafael Landívar. Guatemala.

-
- Hernández Rivera J.L. y García Rocha J. (2010). Los materiales compuestos y su desarrollo actual. *Revista Ciencia y Desarrollo* (36): 62-69.
 - Infoagro. (2002). “El cultivo de la papaya”. Disponible en: http://www.infoagro.com/frutas/frutas_tropicales/papaya.htm [Consulta: 26.05.2014].
 - Johnson O. y More D. (2006). Árboles: guía de campo. 2da. Edición, ed. Omega. ISBN 13: 978-84-282-1400-1. Barcelona, España.
 - Kalra S.K., Tandon D.K. y Singh B.P. (1995). Papaya. In U. T. Desai and A. N. Wagh (Eds.), *Handbook of fruit Science and Technology*. pp. 297-310. New York: Marcel Dekker Inc.
 - Lucena M., Suarez A. y Zamudio I. (2009). Desarrollo de un material compuesto a base de fibras de bambú para aplicaciones aeronáuticas. Suplemento de la *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales* S1 (3): 1107-1114
 - Mercado H.S. (1992). “Mercadotecnia”. México: LIMUSA Noriega Editores.
 - Narendra, R. y Yang, Y. (2005). “Biofibers from agricultural byproducts for industrial applications”. *Trends in biotechnology* (23):22-27
 - NMX-EE-148-1982. “Envase y embalaje -Terminología Básica”. Norma Mexicana. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial.
 - NMX-FF-041-SCFI-2007. “Productos alimenticios no industrializados para consumo humano-fruta fresca-papaya (*carica papaya l.*)-especificaciones”. Norma Mexicana. Vigente a partir de 2007.
 - Núñez R. (2009). “El preservativo”. *Muy Interesante* (339):100 - 101.
 - Pardo O. (2009). “Papayo”. <http://www.wikipedia.com/papayo> [Consulta: 27.06.2014]
 - Paull R.E. (1993). “Pineapple and papaya”. In: Symour GB, Taylor JE and Tucker GA (eds.), *Biochemistry of fruit ripening*. Chapman and Hall, N.Y., Tokyo.
 - Paull R.E. y Chen W. (1997). “Minimal processing of papaya (*Carica papaya L.*) and the physiology of halved fruit”. *Postharvest Biology and Technology* (12):93-99

- Peña H.A, Díaz A.J y Martínez R.T. (1996). “Fruticultura Tropical”. Instituto Colombiano para el Fomento de la Educación Superior. Tomo I. Colombia.
- Perfetti J. (2000). “Papaya producción mundial”. Manual del exportador de frutas, hortalizas y tubérculos en Colombia. Corporación Colombia Internacional. <http://www.cci.org.co/Manual%20del%20Exportador/frutas/papaya02.htm> [consultado 20.06.2014].
- Proenza-Segura R. (2004). Diccionario de publicidad y diseño gráfico, 2ª. Ed., Bogotá, Colombia, 3R. pp. 300, 3001. Editores: Panamericana editorial.
- Ramos L. y Sánchez S. (2003). “Vulcanización y Formulación de Hules”. 1ra. Edición. Ed. Limusa. México D.F., México. pp 17- 19, 86-87
- Reyes-Melo M.E. y Hinojosa-Rivera M. (2000). “Estructura de sólidos amorfos”. *Ingenierías (3)-9*: 7-14.
- Rodríguez-Tarango J.A. (2005). “Cuándo usar las palabras envase, empaque y embalaje”. El empaque conversión. Disponible en: <http://www.elempaque.com/temas/Cuando-usar-las-palabras-envase,-empaque-y-embalaje+4040278?idioma=en>. [Consulta: 22.08.2014]
- Rowell R.M., Sanadi A.R., Caulfield D.F., y Jacobson R.E. (1997). “Utilization of natural fibers in plastic composites: problems and opportunities”, in *Lignocellulosic-Plastics Composites*, A. L. Leao, F. X. Carvalho, and E. Frollini (eds.), USP and UNESP, Brazil.
- Royo J. (1990). “Manual de Tecnología del Caucho”. 2da. edición, Ed. Reclamo Técnico C.A. Barcelona, España. pp. 452
- SAGARPA. (2005). “Plan Rector Sistema Nacional Hule”. Tecnológico de Monterrey. Inca Rural. Villahermosa, Tabasco.
- Saheb D.N. y Jog J.P. (1999). Natural fiber polymer composites: a review. *Advances in polymer technology (18)*: 351–363.
- Samson J.A. (1986). “Tropical Fruits”. 2nd ed., Longman Scientific and Technical, England. pp. 335

-
- Sankat C.K. y Maharaj R. (2001). "Papaya". In: S. Mitra (ed.). Postharvest physiology and storage of tropical and subtropical fruits. Faculty of Horticulture, CAB International, West Bengal, India. pp.167-185.
 - Taj S., Munawar A. y Khan S. (2007). "Natural fiber - reinforced composites". *Proceedings of the Pakistan Academy of Sciences* **44(2)**: 129-144.
 - Vian Ortuño A. (1999). Introducción a la química industrial. Editorial Reverté. pp. 496, 497, 498 y 507
 - Vidales Giovenetti M.D. (2003). "El mundo del envase: manual para el diseño y producción de envases y embalajes". UAM, Unidad Azcapotzalco : Gustavo Gili, México.
 - Wittcoff H. y Reuben B. (1991). Productos Químicos Orgánicos Industriales. Volumen 2. 1ra. Edición. Ed. Noriega Editores, México D.F., México.
 - Xalapa J. (2009). "Resumen de *Castilla elástica*. Especies forestales de uso tradicional del Estado de Veracruz". <http://www.verarboles.com/Hule/hule.html> (consulta 28.08.2014)
 - Zhang J., Huss V., Sun X., Chang K. y Pang D. (2008). "Morphology and phylogenetic position of a trebouxiophycean green algae (*Chlorophyta*) growing on the rubber tree, *Hevea brasiliensis*, with the description of a new genus and species". *European Journal Phycology* **43(2)**:185 - 193.
 - Zikmund W. y D'Amico M. (1993). "Mercadotecnia". Marketing Universitario. Editorial CECSA. Primera Edición. México.

CAPÍTULO 3.

CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE LAS FIBRAS

CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE LAS FIBRAS

Este capítulo presenta la caracterización física y química de las fibras del bagazo cocido de *Agave angustifolia*. Para determinar estas propiedades, se estableció una metodología, la cual se siguió durante la realización de las pruebas. Al final del capítulo se presentan los resultados, sabiendo que estos dependen directamente de múltiples factores.

3.1. Caracterización del material lignocelulósico

El objetivo de realizar la caracterización de las fibras es conocer sus propiedades físicas y químicas, para obtener los elementos que ayuden a determinar posibles usos alternativos de las mismas. Con los resultados obtenidos se determinará si las fibras pueden ser utilizadas para elaborar un material compuesto, y después fabricar un envase para frutos de papaya. El enfoque es completamente experimental, los resultados se obtienen de pruebas en laboratorio. Cada prueba y ensayo se fundamenta en normas y estándares internacionales, tal como se indica en cada apartado, incluyendo los criterios para definir la muestra y el número de repeticiones, así como los procedimientos en cada técnica utilizada.

Durante el desarrollo del trabajo experimental se siguieron las siguientes etapas: selección del lugar, determinación del material (bagazo cocido), tamaño de muestra, colecta, realización de pruebas, obtención de datos, análisis estadístico, obtención de resultados y conclusiones. La metodología establece el desarrollo de cada prueba de manera particular, la técnica a seguir y los equipos a utilizar, todo de acuerdo con los procedimientos establecidos en cada una de las normas.

De manera específica, las etapas consideradas para hacer la caracterización física y química de las fibras del bagazo cocido de *Agave angustifolia* fueron las siguientes:

1. Colecta de material
2. Preparación de material
3. Determinación de propiedades físicas
 - a. Densidad
 - b. Diámetro y longitud del haz fibroso
 - c. Morfología de las fibras (SEM)
 - d. Análisis por difracción de rayos X (XRD)
4. Determinación de propiedades químicas
 - a. Contenido de humedad
 - b. Productos solubles en agua fría/caliente
 - c. Solubilidad en NaOH al 1%
 - d. Porcentaje de extractivos en etanol/tolueno
 - e. Lignina Klason
 - f. Lignina soluble
 - g. Contenido de holocelulosa
 - h. Contenido de celulosa
 - i. Contenido de α -celulosa
 - j. Contenido de cenizas
5. Determinación de propiedades térmicas
 - a. Análisis termo gravimétrico (TGA)
 - b. Calorimetría de barrido diferencial (DSC)
6. Prueba mecánica
 - a. Ensayo de tracción con máquina universal
7. Análisis de resultados
8. Conclusiones

3.2. Desarrollo experimental

En la presente investigación solo se utilizó bagazo cocido de agave, el cual fue colectado en el municipio de San Baltazar Chichicapam, Oaxaca, México. Las fibras fueron tomadas del bagazo (Figura 3-1) residual del proceso de elaboración de mezcal.



Figura 3-1. Bagazo cocido de *Agave angustifolia* Haw

3.2.1 Colecta del bagazo cocido de *Agave angustifolia* Haw

El Distrito de Tlacolula tiene la mayor concentración de productores de mezcal en Oaxaca, por esta razón se eligió para realizar la colecta del material. El bagazo de agave se colectó en una fábrica artesanal (*palenque*) de producción de mezcal, ubicada en el municipio de San Baltazar Chichicapam, localizado en la parte central del Estado (Figura 3-2), en la región denominada “Región del mezcal”, en los Valles Centrales, con coordenadas 96° 29' longitud oeste, 16° 46' latitud norte, a 1,540 m de altura sobre el nivel del mar. Limita al norte con los municipios de Santo Tomás Jalieza y San Bartolomé Quialana; al sur con Yaxe; al oriente con Santiago Matatlán y San Dionisio Ocotepéc; al poniente con San Juan Chilteca, San Antonio Castillo Velasco, San Miguel Tilquiapam y San Jerónimo Taviche. La distancia aproximada a la capital del Estado es de 56 kilómetros. (Anónimo, 2013).

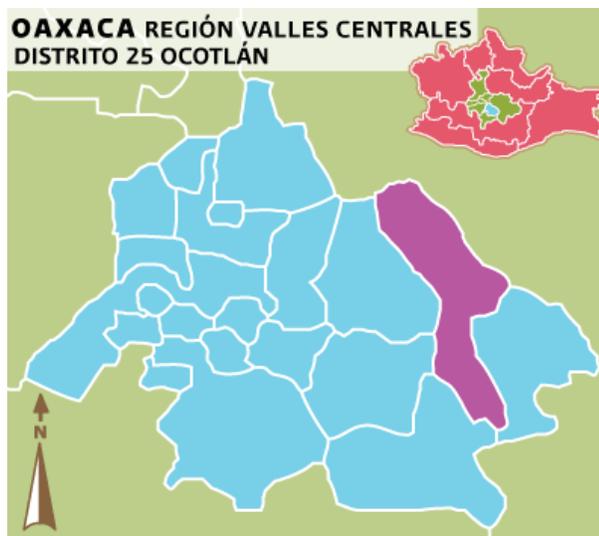


Figura 3-2. Localización de lugar de la colecta, San Baltazar Chichicapam.

Tomada de la red <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM20oaxaca/municipios/mapas/20m112.jpg>

Los materiales y el equipo utilizados para realizar la colecta del bagazo, y para preparar las fibras fueron los siguientes:

- Palas
- Bieldos
- Machetes
- Bolsas de polietileno (1.10 x 0.90 m), calibre mín. del No. 200
- Cámara fotográfica.
- Recipientes de plástico
- Báscula
- Etiquetas
- Agua
- Canastas
- Marcadores
- Ligas

Para realizar la colecta del bagazo, se utilizó la norma de muestreo y método de cuarteo NMX-AA-015-1985, correspondiente a residuos sólidos municipales. El material se colectó en el sitio siguiendo los pasos descritos a continuación: Cuarteo. Para efectuar esta operación se requiere la participación de tres personas con su respectivo equipo. Se toman las bolsas de polietileno conteniendo los residuos sólidos, resultado del estudio de generación según la Norma NMX-AA-061-1985. En ningún caso se toman más de 250 bolsas para efectuar el cuarteo. El contenido de dichas bolsas, se vacía formando un montón

sobre una superficie plana horizontal (4 x 4 m) de cemento pulido o similar y bajo techo. El montón, de residuos sólidos, se traspalea con pala y/o biello, hasta homogeneizarlos, a continuación, se divide (Figura 3-3) en cuatro partes aproximadamente iguales A, B, C y D. Se eliminan las partes opuestas A y C ó B y D, repitiendo esta operación hasta dejar un mínimo de 50 kg de residuos sólidos, en los cuales se hace una selección de subproductos de acuerdo a la Norma NMX-AA-022-1985. De las partes eliminadas del primer cuarteo, se toman alrededor de 10 Kg de residuos sólidos para los análisis del laboratorio, con el resto se determina el peso volumétrico de los residuos sólidos "in situ", según Norma NMX-AA-019-1985. La muestra obtenida para los análisis físicos, químicos y biológicos debe trasladarse al laboratorio en bolsas de polietileno debidamente selladas e identificadas, evitando roturas y que queden expuestas al sol durante su transporte.



Figura 3-3. Colecta de bagazo de agave, aplicación del método de cuarteo

3.2.2 Preparación de las fibras.

Después de la colecta, el bagazo cocido de agave se trasladó a las instalaciones del CIIDIR-Oaxaca, ahí se realizaron las operaciones de preparación y acondicionamiento de las fibras, siguiendo los pasos que se describen a continuación:

Lavado. La fase de lavado consistió en remojar (Figura 3-4) y lavar el bagazo de agave. Se utilizó agua potable. Durante este proceso se realizó la separación de las cortezas leñosas, hasta obtener la fibra seleccionada, libre de cenizas, piedras y médula. El procedimiento se realizó manualmente.



Figura 3-4. Lavado manual del bagazo, fibra húmeda libre de impurezas

Secado. En esta fase, la fibra se colocó al aire libre (Figura 3-5) y se dejó secar bajo las condiciones ambientales del lugar, a una temperatura promedio de 24 °C con una humedad relativa de 38%. La fibra se colocó bajo un cobertizo para evitar la incidencia directa de los rayos solares sobre el material. Posteriormente se almacenó en bolsas oscuras de polietileno de 45 x 90 cm.



Figura 3-5. Secado al aire libre de las fibras obtenidas del bagazo de agave.

Selección y Limpieza. La selección y limpieza de la fibra seca se realizó para eliminar los residuos ajenos como material medular, cenizas, tierra e incluso algunas piedras. Las fibras se seleccionaron manualmente, separando una por una, y eliminando todo los residuos no deseados, hasta obtener un material libre de impurezas (Figura 3-6).



Figura 3-6. Fibras limpias y seleccionadas

Molienda. Una vez obtenida la fibra, limpia y seca, se procedió al corte y molienda de la misma. El corte inicial, para obtener secciones con 15 mm de longitud promedio, se realizó manualmente con tijeras de corte (Figura 3-7), este corte inicial fue necesario para pasar el material a la fase de molienda.



Figura 3-7. Seccionado y corte manual de las fibras limpias.

Molienda. Para la molienda de las fibras se utilizó un molino de laboratorio tipo Willy, Arthur Thomas (Figura 3-8). En esta fase, las fibras se colocaron en la tolva de alimentación, el molino jala, reduce y tamiza las fibras. Un tornillo regulador, ajusta la holgura entre las cuchillas de corte para que la molienda sea más o menos fina.

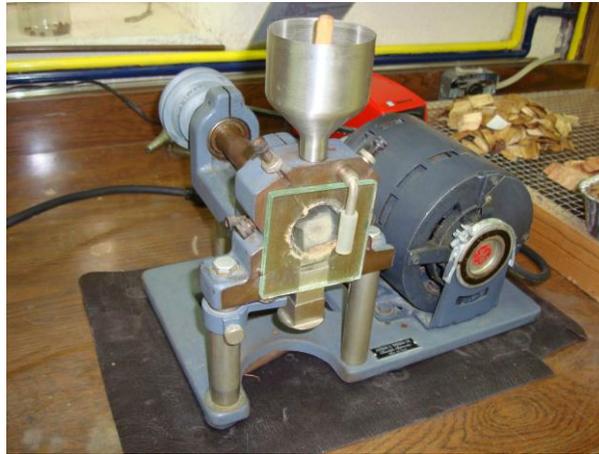


Figura 3-8. Molienda de las fibras

Tamizado. Después de la molienda, la fibra se clasificó por tamaños utilizando tamices normalizados según la norma ASTM E-11/95. Se utilizaron dos tamices de diferente calibre (Figura 3-9), un tamiz de malla No. 40 y un tamiz de malla No. 60.



Figura 3-9. Tamices utilizados para el cribado de las fibras

Para elaborar el material compuesto se emplearon dos rangos de partículas. En el primero están las fibras que pasaron la malla No. 30; pero fueron retenidas por la malla No. 50, y en el segundo están las fibras que pasaron la malla No. 50; pero fueron retenidas por la malla No. 80, es decir, que se retiraron las fibras más pequeñas. El tamaño de la partícula obtenida en cada uno de los tamices se especifica en la tabla 3-1.

Tabla 3-1. Tamices ASTM E-11/95 utilizados.

Malla No.	30	40	50	60	80
Calibre (µm)	600	425	300	250	180

3.3. Técnicas y determinaciones

3.3.1 Determinación de propiedades físicas

3.3.1.1 Densidad

Para obtener la densidad, las fibras se agruparon utilizando un hilo, formando cilindros pequeños (Figura 3-10) de 0.5 cm de diámetro y 2 cm de largo. Posteriormente, por el método de inmersión, se obtuvo el volumen verde de cada pieza cilíndrica de fibra, utilizando agua destilada en un vaso de precipitado y una balanza analítica (Pioneer, Ohaus, USA) con resolución de 0.0001 g. Después, las piezas se colocaron en un horno de vacío (Modelo 3618, Barnstead International, USA) a 70 °C por 8 h. Al terminar la etapa de secado, los cilindros de fibra se colocaron en un desecador sobre gel de sílice hasta alcanzar la temperatura ambiente, y finalmente se registró el peso seco en la balanza analítica. La densidad se obtuvo utilizando la ecuación 1.

$$D_b (\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}) = P_0 / V_v \quad (1)$$

Donde:

D_b = Densidad básica, $g \cdot cm^{-3}$

P_0 = Peso anhidro de la muestra, (g)

V_v = Volumen verde de la muestra, (cm^3)



Figura 3-10. Fibras agrupadas para determinar su densidad

La densidad del material requiere una corrección debido al contenido de extraíbles, para este ajuste se utilizó la ecuación 2.

$$D_c = D_b / (1 + ((E_T \rho)/100)) \quad (2)$$

Donde:

D_c = Densidad básica corregida por contenido de extraíbles, $g \cdot cm^{-3}$

D_b = Densidad básica, $g \cdot cm^{-3}$

E_T = Extractivos totales, %

ρ = Factor de corrección por densidad básica de los extraíbles = 1.25

3.3.1.2 Diámetro y longitud del haz fibroso

El diámetro de las fibras se obtuvo usando un microscopio óptico marca Axiolab con un lente de aumento 10x. El procedimiento experimental para medir el diámetro fue: primero se realizó un muestreo aleatorio para obtener fibras individuales. Estas fibras se montaron sobre una tarjeta de papel aperturada, después la tarjeta se colocó en un portaobjetos de vidrio para poder observar la fibra en el microscopio. Con el programa Axiovision LE, se adquirió la imagen, se eligió la escala de medición correspondiente al número de objetivo con el cual se obtuvo la imagen y mediante la función “Length” del menú “Dimensions” se realizó la medición del diámetro, en cada fibra se realizaron 10 mediciones a través de la sección longitudinal de la fibra.

Para medir la longitud de cada una de las fibras de la unidad experimental (1000 unidades) se utilizó una regla metálica (Mitutoyo, No.182-307) con rango de 0 a 1000 mm y precisión de 0.5 mm. Las mediciones se realizaron colocando la regla sobre una mesa de trabajo, sujetando las fibras desde un extremo con el punto inicial de la regla, las fibras se extendieron sobre la regla hasta registrar la medida en el extremo final del haz fibroso.

3.3.1.3 Morfología de las fibras

El estudio de la morfología de las fibras se realizó utilizando imágenes de microscopía óptica y de microscopía electrónica de barrido (SEM). Para obtener el material disociado, las fibras se cortaron a 1 cm de longitud, se colocaron en un recipiente, se agregó una mezcla de ácido acético y peróxido de hidrógeno al 50% hasta cubrir las fibras y se mantuvo durante 12 h a 72 °C de temperatura constante. Después, el material se lavó con agua destilada y se realizó la tinción con colorante en polvo (pardo de Bismarck con índice de color 21000), en una solución de agua destilada y alcohol al 50%, agregando 1 g de colorante por cada

100 ml de solución. Se utilizó un microscopio óptico Leica DM500 con cámara digital ICC50. Las mediciones se realizaron con el programa LAS EZ.

Para el estudio de microscopía electrónica, las muestras de fibra fueron montadas en postes de latón utilizando cinta de carbono, y utilizando un metalizador (Fine Coat Ion Sputer JFC 1100, Jeol, USA) se sombrearon con un recubrimiento de oro. Las muestras se observaron con un microscopio electrónico de barrido JSM 6390 (JEOL, Japón) a 15 keV, habilitado con un espectrómetro de rayos X (EDAX INCA X-ACT, Oxford Instruments, UK).

3.3.1.4 Análisis por difracción de rayos X

El análisis de difracción de rayos X (XRD) se realizó utilizando un difractómetro Bruker, modelo D8-ADVANCE, con radiación característica $K\alpha_1$ Cu, con dispositivo Linx Eye para captación de radiación difractada simultánea sobre un intervalo de $3^\circ 2\theta$, con monocromática de germanio, radiación ($\lambda = 1,540619 \text{ \AA}$), bajo condiciones de funcionamiento de 40 keV y 20 mA. Para determinar la cristalinidad de la fibra se siguió el método de difracción regular. Se utilizó una muestra de 100 mm^3 , tratando de obtener la mejor distribución aleatoria del material para estimar el índice de cristalinidad. La medición se realizó con aberturas de 1° .

3.3.2 Determinación de propiedades químicas

3.3.2.1 Contenido de humedad

El contenido de humedad de las fibras se determinó utilizando un analizador de humedad Mettler Toledo HB43 (Figura 3-11) con lámpara infrarroja de halógeno. Se ajustó en desecación estándar, con una temperatura de desecación de 100 °C y un intervalo de respuesta de 30 s.



Figura 3-11. Analizador de humedad Mettler Toledo.

3.3.2.2 Productos solubles en agua fría/caliente

Para determinar el contenido de productos solubles en agua fría y en agua caliente se siguió la norma ASTM D1110-84R07. El porcentaje de solubilidad se calculó usando la ecuación 3.

$$S(\%) = [(W1 - W2)/W1] \times 100 \quad (3)$$

Donde, S es el porcentaje de los productos solubles en (Figura 3-12) agua fría/caliente, W1 es el peso anhidro inicial de la muestra y W2 es el peso anhidro de la muestra después de la prueba.



Figura 3-12. Productos solubles

3.3.2.3 Solubilidad en NaOH al 1%

Para determinar la solubilidad en solución de NaOH al 1%, se siguió la norma TAPPI T212 om-02. Este análisis se realiza en materiales lignocelulósicos para conocer el grado de ataque por hongos u otros agentes nocivos como el calor, la luz, la oxidación, etc. Este dato es importante debido a la naturaleza húmeda del residuo y a su alta probabilidad de degradación.

3.3.2.4 Porcentaje de extractivos en etanol/tolueno

A partir de la norma ASTM D1105-96 y siguiendo la norma ASTM D1107-96 R07, se determinó el porcentaje de productos extractivos en etanol/tolueno. Se utiliza para extraer las ceras, grasas, algunas resinas y gomas. Para la extracción de taninos, gomas, azúcares, almidones y materiales coloreados, se usó agua caliente. Para calcular la cantidad (%) de extractivos se utilizó una ecuación similar a la ecuación 3, pero ahora S es el porcentaje de extractivos en etanol-tolueno, W1 es el peso anhidro de la muestra inicial, W2 es el peso anhidro de la muestra después de la extracción con etanol/tolueno.

3.3.2.5 Lignina Klason

Esta determinación se realiza de acuerdo a los procedimientos establecidos en la norma ASTM D 1106 - 96, derivada de la norma TAPPI T 249 cm-00: Contenido de lignina insoluble en ácido (lignina Klason).

Cuando el material ligno celulosico se trata con ácidos los carbohidratos se hidrolizan, es decir, se disuelven en agua. El residuo que queda sin disolver se le conoce como lignina Klason, en honor a la persona que desarrolló el método. Puesto que algunos de los extractivos de la muestra (aceites, grasas, ceras y gomas) permanecerían insolubles junto con la lignina Klason, los extractivos son removidos antes de la determinación de la lignina con los solventes indicados.

En resumen, para determinar el contenido de lignina insoluble en ácido conocido como lignina Klason, se utilizó el método tradicional con una muestra de fibra libre de extractivos, y el cálculo se hizo con la ecuación 4.

$$LK (\%) = [PLK0 / P0] \times 100 \quad (4)$$

Donde, LK (%) es el porcentaje de lignina Klason, P0 es el peso anhidro de la fibra libre de extraíbles, PLK0 es el peso anhidro de la lignina Klason.

3.3.2.6 Lignina soluble

Para determinar el contenido de lignina soluble en ácido se siguió la norma TAPPI TUM 250-91. Se utilizó un espectrómetro UV/vis. Durante la prueba, se midió la absorbancia a 206 nm de una muestra (5 ml) de la solución hidrolizada, obtenida en la determinación de la lignina Klason. De acuerdo con Browning (1967), el contenido total de lignina es el resultado de sumar la lignina Klason (en %) + lignina soluble (en %).

3.3.2.7 Contenido de holocelulosa

El contenido de holocelulosa se determinó por el método del clorito de sodio establecido por Rowell *et al.* (2005). La ecuación que se utiliza para calcular el porcentaje de holocelulosa es la siguiente:

$$\text{Holocelulosa (\%)} = ((\text{p.s.cr con residuo sólido} - \text{p.s.cr vacío}) / \text{p.s de la muestra}) \times 100$$

De la holocelulosa resultante, se toman aproximadamente 300 mg, y se determina el contenido de lignina total remanente (Klason + soluble en ácido), para obtener el contenido corregido de holocelulosa.

3.3.2.8 Contenido de α -celulosa

La fracción de α -celulosa se determinó siguiendo el procedimiento establecido en la norma ASTM D1103-60.

3.3.2.9 Contenido de cenizas

El contenido de cenizas se determinó según la norma ASTM D1102-84R07. Se depositaron 200 mg del material preparado en crisoles de porcelana previamente tarados y se introdujeron en la mufla a 575°C durante 6 h. Para tarar los crisoles, estos se limpiaron con HCl y se introdujeron en la mufla a 575°C durante 1 h. El cálculo se hizo utilizando la ecuación 5.

$$\text{Ash (\%)} = (A1 / A2) \times 100 \quad (5)$$

Donde, A1 es el peso anhidro de las cenizas y A2 es peso anhidro de la muestra.

3.3.3 Determinación de propiedades térmicas

3.3.3.1 Análisis termogravimétrico

El análisis termogravimétrico (TGA) se realizó con un analizador Q5000 V3.10 Build 258. La muestra se analizó en dos atmósferas. La primera, con nitrógeno, impide la combustión y permite la degradación de los componentes, por lo tanto es posible identificar las regiones de degradación de cada uno de los componentes de la fibra. La segunda con aire/Oxígeno donde las reacciones pueden ocurrir al mismo tiempo y no es posible separar los diferentes procesos de degradación de los componentes de la fibra, tales como hemicelulosa, celulosa y lignina (Tomczak *et al*, 2007). Las condiciones experimentales fueron: nitrógeno (50 ml/min) entre 25 y 500 °C y aire (50 ml/min) entre 25 y 700 °C, con un rango de calentamiento de 20 °C/min.

3.3.3.2 Calorimetría de barrido diferencial

La prueba de calorimetría de barrido diferencial (DSC) permite identificar las transiciones y modificaciones de la estructura de la fibra, a partir de sus características térmicas, en función de tratamientos combinados de calor y humedad. Se utilizó un equipo TA Instruments, modelo Q2000, en el rango de 50-400 °C, con velocidad de calentamiento de 10°C/min, en una atmósfera de nitrógeno con presión de 104 Pa.

3.3.4 Ensayo de tracción

Se utilizó una máquina Instron (modelo 3382) con una carga media mínima de 0,05 N y máxima de 2,25 N a temperatura ambiente (24 °C \pm 1), y humedad relativa de 38% \pm 2. Debido a la variación en el diámetro de las fibras, solo se consideró el diámetro medio 501 μ m. Se probaron 50 muestras. Las curvas de esfuerzo-deformación se obtuvieron con una velocidad de la cruceta de 5 mm/min. Se obtuvo el valor de la resistencia a la tracción última (UTS), el módulo de Young (YM), y el porcentaje de deformación unitaria (ϵ).

3.4. Análisis de resultados.

En la Tabla 3-2 se muestran los resultados obtenidos de la caracterización física y química de las fibras del bagazo cocido de *Agave angustifolia* Haw.

Tabla 3-2. Propiedades físicas y químicas de las fibras.

Parámetro	Resultado
Densidad	414.7 kg/m ³
Diámetro del haz fibroso	501 µm
Longitud del haz fibroso	144 mm
Contenido de humedad	7.78 ± 0.37 %
Solubilidad en agua fría	2.66 ± 0.12 %
Solubilidad en agua caliente	4.39 ± 0.32 %
Solubilidad en NaOH al 1%	20.22 ± 0.27 %
Extractivos en etanol/tolueno	1.54 ± 0.11 %
Extractivos totales	5.30 ± 0.40 %
Lignina Klason	17.91 ± 1.02 %
Lignina Soluble	2.78 ± 0.35 %
Lignina total	20.69 ± 0.97 %
Holocelulosa	82.12 ± 0.49 %
Celulosa	48.04 ± 1.36 %
Hemicelulosa	34.08 ± 1.03 %
α-Celulosa	55.03 ± 0.33 %
Contenido de cenizas	1.28 ± 0.06 %
Morfología de las fibras	Ver sección 3.4.1
Difracción de rayos X	Ver sección 3.4.2
TGA	Ver sección 3.4.3
DSC	Ver sección 3.4.4
Ensayo de tracción	Ver sección 3.4.5

Fuente: Propia.

3.4.1 Morfología de las fibras

Las fibras analizadas presentan un color marrón. La Figura 3-13 muestra la distribución de frecuencias de la longitud de las fibras. Se establecieron 15 intervalos entre el rango de valores encontrado (de 50 a 240 mm). Los resultados muestran una distribución normal con una desviación estándar de 2.79 y un error estándar de 0.0015. Las fibras más largas se registraron en el último rango, mientras que las fibras más cortas se ubican en el primer rango (de 50 a 67 mm). Los valores de longitud mínimos y máximos fueron 53 y 232 mm, respectivamente. La longitud de frecuencia más alta está en el rango de 136 a 152 mm, y la media longitud media encontrada para este haz fibroso fue de 144 mm.

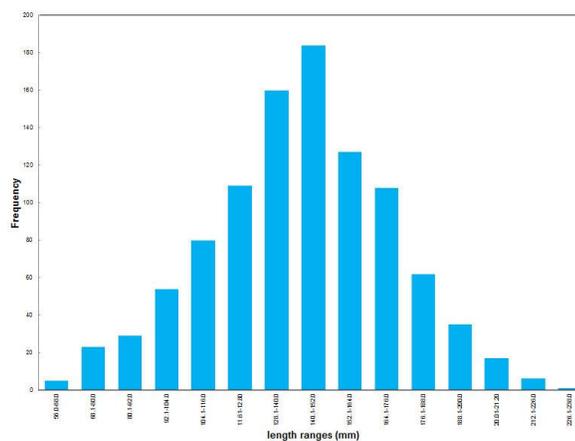


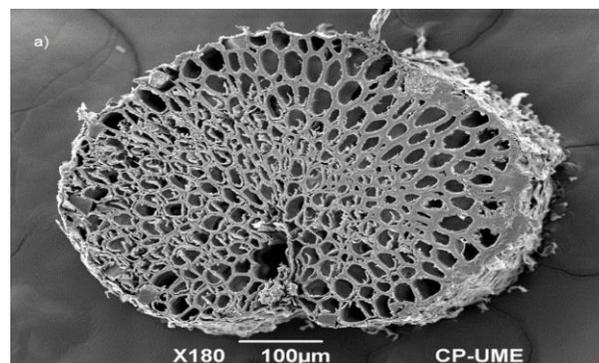
Figura 3-13. Longitud del haz fibroso por rango

Por otro lado, la Tabla 3-3 presenta los resultados correspondientes al diámetro de las fibras. Se encontró que el diámetro varía a lo largo del haz fibroso, y presentó un valor medio de $\sim 501 \mu\text{m}$. En cada intervalo, se observó una tendencia similar de variación con respecto a la desviación estándar. Las desviaciones estándar Df1 y Df3 son similares; sin embargo, puede observarse una diferencia con respecto a Df2.

Tabla 3-3. Diámetro del haz fibroso de *Agave angustifolia*.

Diámetro	D _{f1}	D _{f2}	D _{f3}
Intervalo (mm)	[0.20 - 0.39]	[0.40 - 0.59]	[0.60 - 0.80]
Min	0.245	0.408	0.603
Max	0.381	0.581	0.766
Mean	0.329	0.470	0.676
SD	0.047	0.054	0.048

Las micrografías muestran la sección transversal (Figura 3-14) y la sección longitudinal (Figura 3-15) de la estructura celular del haz fibroso. La fibra presenta una ranura tipo C a lo largo del eje y agrupa alrededor de 190-210 microtubos como se puede observar en la Figura 3-14. Las microfibrillas están separadas por una lámina media y se agrupan de forma muy estrecha. Las microfibrillas son ovaladas y poligonales, con pared celular gruesa, que se compone de dos paredes celulares (primaria y secundaria) estrechamente unidas entre sí. Cada microfibrilla tiene una abertura central, de tamaño irregular, llamada lumen con un tamaño promedio de $\sim 28.6 \mu\text{m}$. La pared de la microfibrilla presentó un ancho de $\sim 2.4 \mu\text{m}$. El ancho de la lámina fue $\sim 1.7 \mu\text{m}$. El ancho de la pared entre dos microtubos fue $\sim 6.5 \mu\text{m}$, y casi en la periferia de la fibra, se pueden observar espacios intercelulares, tales como el lumen de células de parénquima que contienen cristales de oxalato de calcio.

**Figura 3-14. Micrografía de la sección transversal de la fibra de agave**

La disposición longitudinal de una gran cantidad de fibras individuales y la estructura interna de las microfibrillas se puede observar en la Figura 3-15. Esta vista del haz fibroso indica que es un haz vascular donde se aprecian escasos elementos traqueales. Las células restantes son paredes de las fibras y fuera de estos, las células cortas se asemejan a células de parénquima. La longitud media de cada fibra fue de $\sim 580.3 \mu\text{m}$ y el ancho de $\sim 33.4 \mu\text{m}$. Al exterior, la superficie longitudinal es nudosa y áspera con venas transversales y longitudinales. Se observa un patrón de rejilla irregular debido a los surcos. También pueden verse fracturas en las paredes, lo cual es un daño mecánico que puede ser debido al proceso elaboración de mezcal.

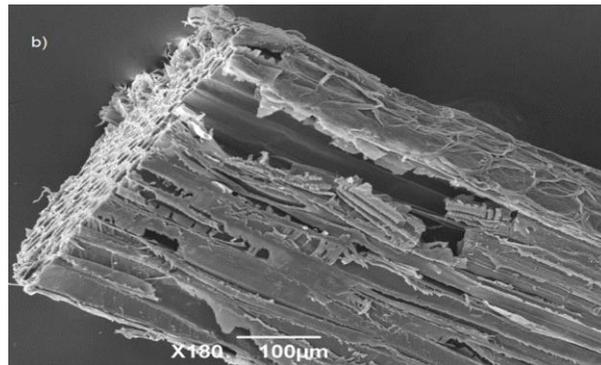


Figura 3-15. Micrografía de la sección longitudinal de la fibra de agave

3.4.2 Difracción de rayos X

La Figura 3-16 muestra el patrón de difracción de rayos X de las fibras. Se observan varios picos de manera repetida, lo cual indica una fase cristalina, los picos mostrados también corresponden a una amilosa alomorfa tipo A. Se caracteriza por un pico grande en $2\theta = 16,5^\circ$ y un pico muy grande a $2\theta = 21,9^\circ$, que corresponde a la fase orgánica y a consecuencia de la reflexión específica de su estructura cristalina. La información cristalográfica presentada en las fases, en relación con el análisis cualitativo, demuestra que la fase cristalina corresponde con el hidrato de oxalato de calcio compuesto ($\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot (\text{H}_2\text{O})$) con un sistema

cristalino monoclinico. La base de datos de estructura del cristal inorgánico es 030782 y los valores obtenidos son los siguientes, grupo del espacio: 2 P1/c; $a = 6,29 \text{ \AA}$; $b = 14,58 \text{ \AA}$; $c = 10,11 \text{ \AA}$; $A = \Gamma = 90^\circ$; $B = 109,46^\circ$; $V = 874,9 \text{ \AA}^3$.

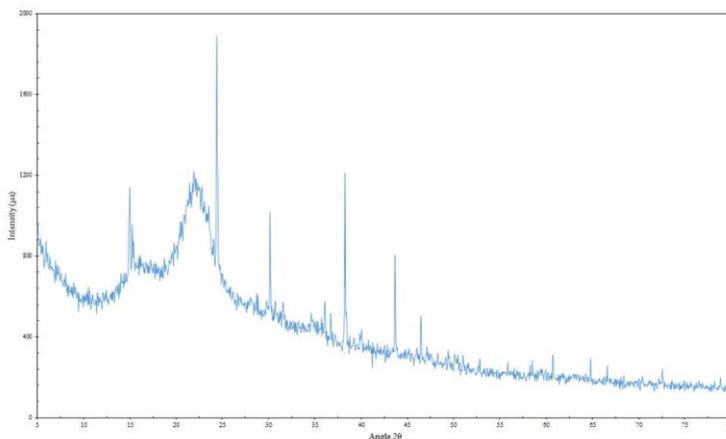


Figura 3-16. Patrón de difracción de rayos X de las fibras.

3.4.3 Análisis termogravimétrico

En la Figura 3-17 y 3-18 se muestra los gráficos del análisis termo gravimétrico en dos ambientes: nitrógeno y aire, respectivamente. El peso de la fibra se pierde a tres diferentes temperaturas: $\sim 7.8\%$ a 80°C (contenido de humedad de la fibra), $59,8\%$ a 298°C y finalmente, el 22% a 618°C .

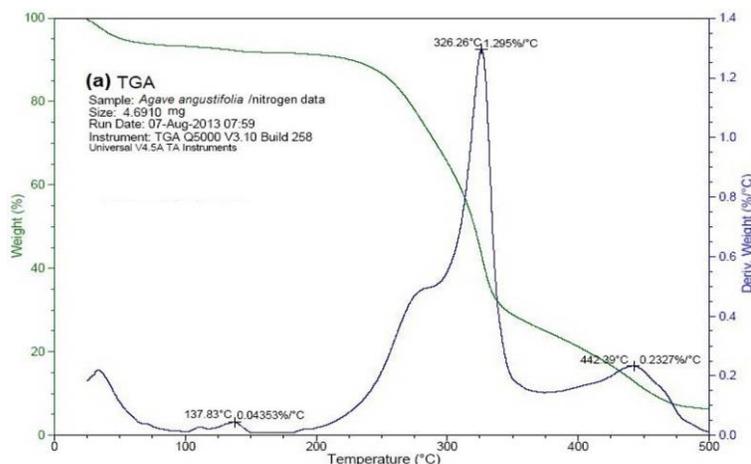


Figura 3-17. Análisis termogravimétrico en atmosfera de nitrógeno.

Se puede observar que entre 80 y 225 °C, la muestra fue térmicamente estable, lo que sugiere que se pueden utilizar estas fibras de forma segura hasta una temperatura máxima de 225 °C. También se observa que la muestra perdió peso con temperaturas de más de 220 °C y hasta 620 °C. Finalmente, un residuo de aproximadamente ~5% puede observarse en la Figura 3-17, el cual es muy probable que sea de carácter mineral.

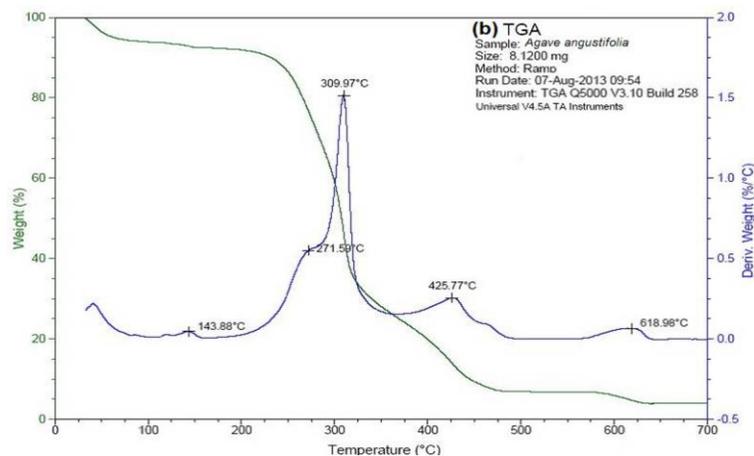


Figura 3-18. Análisis termogravimétrico en atmosfera de aire.

3.4.4 Calorimetría de barrido diferencial

El contenido de agua libre se midió por las temperaturas de vaporización y obtuvo por medio del estudio de DSC. En este caso, las fibras presentan (Figura 3-19) dos picos endotérmicos, uno a 147,37 °C y el otro a 203,83 °C, que corresponden a la deshidratación y descomposición de la celulosa de la fibra, respectivamente, así mismo, la cantidad de energía utilizada para evaporar el agua fue $\Delta H = 3,8$ J/g y $\Delta H = 18,56$ J/g, respectivamente

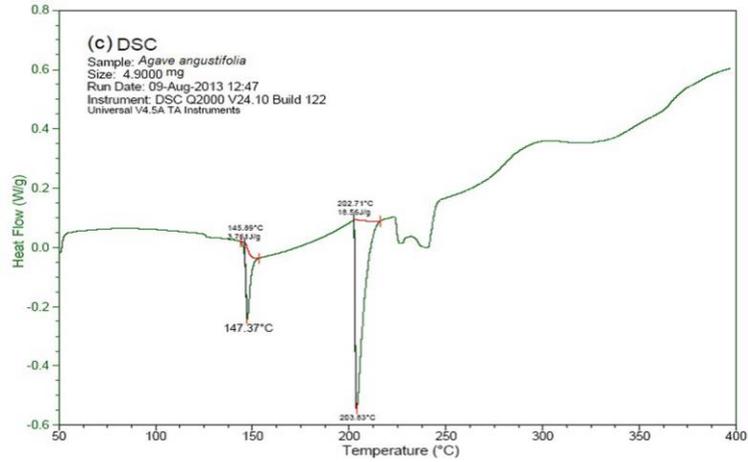


Figura 3-19 Gráfica del análisis de DSC de las fibras de *Agave angustifolia*.

3.4.5 Ensayo de tracción

En la Figura 3-20 se muestra la curva de esfuerzo-deformación de la fibra, cuya forma es típica de un material viscoelástico. Las principales propiedades de tracción fueron evaluadas usando estas curvas. El valor del esfuerzo ultimo de tracción (UTS) fue de 86.9 MPa, con una desviación estándar de 0.314; el valor módulo de Young (YM) fue de 2.509 MPa y presentó una desviación estándar de 0.721; y el valor promedio del porcentaje de deformación (ϵ) fue de 14.187 con una desviación estándar de 5.414. Esta propiedad no difiere significativamente con el diámetro a nivel de 0.05. Finalmente, el valor medio esfuerzo de tracción (TS) obtenido en este estudio fue 44.167 MPa.

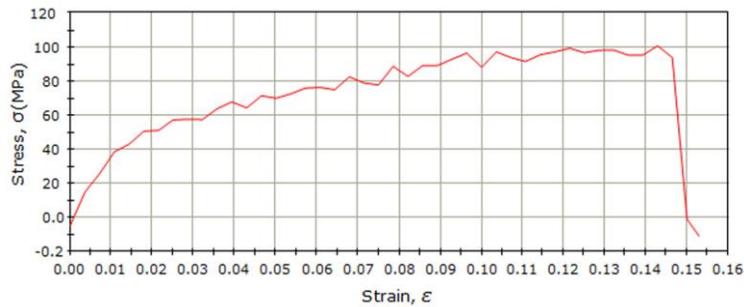


Figura 3-20. Curva esfuerzo-deformación de las fibras de *Agave angustifolia*.

3.5. Sumario

En conclusión, el bagazo de agave es un material de desecho del proceso de mezcal y tiene una abundante disponibilidad; por lo tanto, conocer las propiedades de estas fibras ofrece alternativas, no sólo para agregar un valor a estos residuos, sino también para generar oportunidades de trabajo en esta región en particular. Por lo tanto, los resultados obtenidos son útiles porque permiten determinar el alcance de los productos que pueden ser producidos utilizando estas fibras. Se realizó la caracterización de estas fibras y se concluye que tienen potencial para utilizarse en diversas aplicaciones, ya que son comparables con las características reportadas para otras fibras lignocelulósicas. En este caso, debido a las propiedades térmicas, baja densidad y alto contenido de celulosa, una aplicación podría ser su incorporación a una matriz polimérica para producir materiales compuestos.

3.6. Referencias bibliográficas

- Anónimo, 2013. Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México. Ayuntamiento de San Baltazar Chichicapam. Gobierno del Estado de Oaxaca. <<http://www.e-84R07local.gob.mx/work/templates/enciclo/EMM20oaxaca/municipios/20112a.html>> (consultado 25.05.14).
- ASTM. 1976. D 1103-60: Alpha-cellulose in wood. Annual book of ASTM standards. Part 22: Wood; Adhesives. Pennsylvania: ASTM. pp 343-345
- ASTM. 1995. E11-95. Standard Specification for Wire Cloth and Sieves for Testing Purposes. American Society for Testing Materials. Washington, U.S.A. <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/003/astm.e11.1995.pdf> (accessed 20.10.14)
- ASTM. 1996. D1106-96. Standard Test Method for Acid-Insoluble Lignin in Wood. American Society for Testing Materials. USA.

-
- ASTM. 2007. D 1102-84: Ash in wood. Annual Book of ASTM Standards. Volume 04.10: Wood (CD-ROM). West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International. 2 p
 - ASTM. 2007. D 1105-96: Standard test method for preparation of extractive-free wood. Annual Book of ASTM Standards. Volume 04.10: Wood (CD-ROM). West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International. 2 p
 - ASTM. 2007. D 1107-96R07: Ethanol-toluene solubility of wood. Annual Book of ASTM Standards. Volume 04.10: Wood (CD-ROM). West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International. 2 p
 - ASTM. 2007. D1110-84R07: Water solubility of wood. Annual Book of ASTM Standards. Volume 04.10: Wood (CD-ROM). West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International. 2 p
 - Browning BL. 1967. Methods of wood chemistry, Vol 1 New York: Interscience Publishers.
 - NMX-AA-015-1985. Norma Mexicana. Protección al ambiente -Contaminación del suelo- Residuos sólidos municipales- Muestreo- Método de cuarteo. (Cancela a la nmx-aa-015-1975). Secretaria de Comercio y Fomento Industrial. México. http://www.cmic.org/comisiones/Sectoriales/medioambiente/Varios/Leyes_y_Normas_SEMARNAT/NMX/Contaminaci%C3%B3n%20del%20Suelo/7.1985.pdf (consultado 20.10.14)
 - NMX-AA-061-1985. Norma Mexicana. Protección al ambiente- Contaminación del suelo- Residuos sólidos municipales- Determinación de la generación. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial. México. <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/DO3433.pdf> (consultado 20.10.14)
 - NMX-AA-022-1985. Norma Mexicana. Protección al ambiente- Contaminación del suelo- Residuos sólidos Municipales- Selección y cuantificación de Subproductos. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial. México. <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/NMX-AA-022-1985.pdf> (consultado 20.10.14)
-

-
- NMX-AA-019-1985. Norma Mexicana. Protección al Ambiente- Contaminación del suelo- Residuos sólidos Municipales- Peso volumétrico "IN SITU". Secretaria de Comercio y Fomento Industrial. México. <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/NMX-AA-019-1985.pdf> (consultado 20.10.14)
 - TAPPI. 2002. T212 om-02. One percent sodium hydroxide solubility of wood and pulp. Technical Association of Pulp and Paper Industry Standard Method. Test methods. Atlanta, USA.
 - TAPPI. 2000. T249 cm-00. Carbohydrate composition of extractive-free wood and wood pulp by gas-liquid chromatography (section 8.2 Hydrolysis). Technical Association of Pulp and Paper Industry Standard Method. Test methods. USA.
 - TAPPI. 1991. Tum 250-91. Acid-soluble lignin in wood and pulp. TAPPI Useful Methods. Test methods. Atlanta, USA.
 - Rowell R.M., Pettersen R., Han J.S., Rowell J.S. y Tshabalala M.A. 2005. Cell wall chemistry. In: Handbook of chemistry and wood composites. Rowell R. M. (Ed.). Boca Raton: Taylor & Francis Group. pp 62-63.
 - Tomczak F., Sydenstricker T.H.D. y Satyanarayana K.G. 2007. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part II: Morphology and properties of Brazilian coconut fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* **38**:1710-1721.

CAPÍTULO 4.

OBTENCIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO

CAPÍTULO 4. OBTENCIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO

4.1. Los materiales compuestos

En los últimos años, ha surgido un interés particular por el desarrollo de materiales compuestos reforzados con fibras naturales, como consecuencia de las ventajas técnicas, económicas y ambientales que presentan. En este estudio se caracterizaron las fibras de bagazo cocido del *Agave angustifolia* y se incorporaron como refuerzo en una matriz polimérica natural de uso comercial sin ningún tratamiento. Los materiales compuestos se prepararon con fibra de distintos tamaños, distintos tratamientos y con diferente porcentaje de la misma. Se evaluaron sus propiedades a través de análisis de superficies, resistencia a la ruptura por tensión, análisis térmicos y difracción de rayos x.

En Oaxaca, los desechos de la industrialización artesanal del agave constituyen hasta el 65% de la masa total de la planta. Las hojas y el tallo generan residuos vegetales que solo se desechan. Sin embargo, su aprovechamiento en materiales compuestos, es una alternativa a las prácticas de eliminación de estos desechos. El uso de fibras naturales en diversas áreas ha surgido con gran fuerza debido a su disponibilidad, diversidad y renovabilidad, así como el bajo consumo energético de preparación, los costos competitivos y su baja densidad; aunque también presentan algunos inconvenientes como su carácter hidrófilo, su baja estabilidad dimensional y térmica, su degradabilidad ante microorganismos, la luz ultravioleta, ácidos y bases fuertes, y la tendencia a la inflamabilidad (Gómez *et al.*, 1998)

Al elaborar un material compuesto se pretende obtener propiedades mecánicas y funcionales diferentes a las del polímero solo. El empleo de materiales compuestos se debe a las características técnicas que aportan como mayor rigidez, resistencia y estabilidad dimensional, mayor resistencia al impacto, modificación de las propiedades de permeabilidad a los gases y líquidos y cambio de las propiedades eléctricas (Bledski *et al.*, 1996; Joseph *et al.*, 1996; Nabi and Jog., 1999).

4.2. Materiales y métodos

Para elaborar el material compuesto se procedió de acuerdo con las etapas mostradas en el esquema de la Figura 4-1.

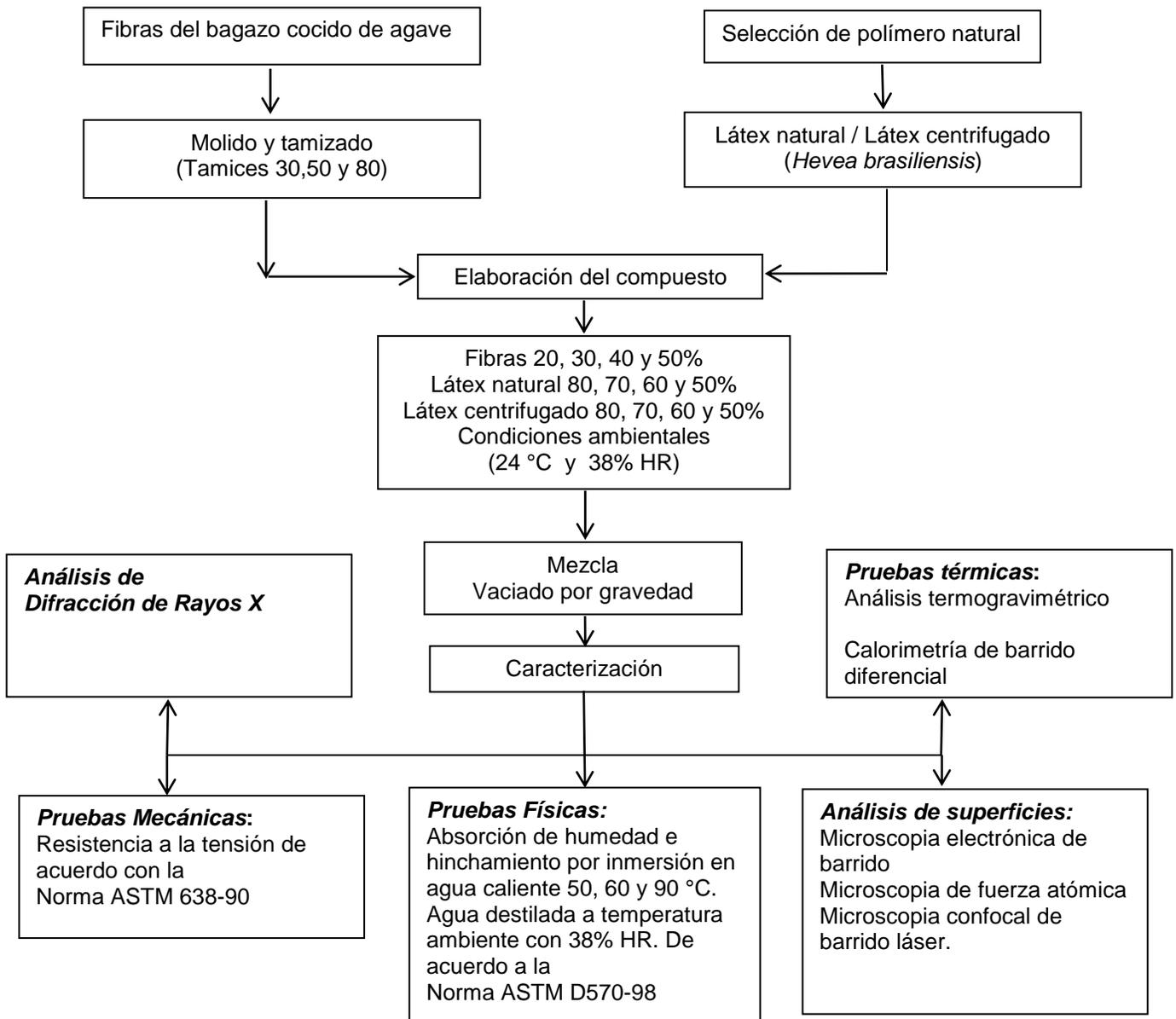


Figura 4-1. Desarrollo experimental para elaboración del compuesto

4.3. Elementos del material compuesto

Actualmente, los materiales compuestos con fibras sintéticas, brindan a la industria propiedades mecánicas excepcionales; pero esos aspectos, favorables durante el período de uso, operan en contra al momento de su degradación (Monserrate, 2005). Por tal razón es necesario sustituir el tipo de fibra y de matriz utilizadas. En este trabajo de investigación se desarrolla un material compuesto con fibras de bagazo cocido de agave como agente de refuerzo y con una matriz polimérica natural e inocua al medio ambiente. Las fibras lignocelulósicas utilizadas son un recurso renovable y de gran disposición en el Estado de Oaxaca, son biodegradables, no generan gases tóxicos ni dejan residuo sólidos en combustión, su peso es aproximadamente un tercio de las fibras de vidrio, no producen abrasión en las máquinas de procesamiento, presentan un módulo de elasticidad muy bueno, y soportan altas temperaturas. Así mismo, se sabe que los materiales compuestos con agregados de fibras naturales son menos sensibles a las vibraciones, reducen el peso, el costo es menor, se pueden obtener superficies más lisas, y el proceso de producción es menos toxico para los operarios ya que la fibra no se volatiliza.

4.3.1 Fibras de bagazo cocido de *Agave angustifolia* Haw

El bagazo cocido es el material residual que se obtiene a partir de la destilación del mezcal, proceso artesanal que consta de las siguientes fases: a) cosecha del agave, b) seccionado de las piñas, c) cocción de los tallos, d) molienda del agave hidrolizado, e) fermentación del jugo y bagazo, y f) destilación de mosto y bagazo (Silva y Caballero, 2004).

El proceso inicia en los campos de cultivo de agave, donde se cortan las hojas y se cosechan los tallos (piñas) utilizando herramientas manuales (machetes, hachas y barretas). Se cosechan lotes de 3 a 6 toneladas de piña y se trasladan a

la fábrica artesanal de elaboración de mezcal (palenque). Para la cocción, las piñas se seccionan en cuartos o mitades y se colocan en un horno cónico truncado a flor de tierra con capacidad para 6 toneladas. En la fase de molienda, el agave hidrolizado se secciona con machete, hasta obtener trozos de 50 a 150 mm de longitud de formas irregulares, posteriormente se procesan de diversas formas. En algunos casos se utiliza un molino chileno de tracción animal para separar mecánicamente la médula de la fibra y de esa forma se obtienen los trozos desgarrados y el jugo. La mezcla se deposita en tanques para iniciar la etapa de fermentación, donde la mezcla se somete a los siguientes efectos principales que flexibilizan el haz fibroso: producción de microorganismos, hidratación del material fibroso y descomposición debido a los microorganismos que provocan la fermentación. En la fase de destilación, la mezcla fermentada se deposita en alambiques de cobre y somete al haz fibroso a un segundo cocimiento. Al final, en los alambiques queda lo que se denomina bagazo. Estos residuos no se reincorporan al proceso, en las comunidades, del estado de Oaxaca, se utiliza una parte como combustible doméstico, como material de composta para plantas y como forraje para animales, pero la mayor parte se amontona, y posteriormente se trasladada a los campos y barrancas, en donde el material es desechado (Silva y Caballero, 2004).

El bagazo utilizado se obtuvo del tallo o piña del agave, la variación de la longitud de las fibras depende de los equipos y procedimientos utilizados en cada uno de los procesos de elaboración de mezcal. Después de la separación de la médula y secado al sol, la fibra del bagazo de agave se utiliza en la confección de artesanías (Figura 4-2), en la recuperación de suelos dañados o erosionados, en forma de malla se hacen macetas para siembra de plantas, alfombras, relleno de colchones, asientos, mezclado con arcilla para hacer ladrillos y recientemente se han realizado estudios para utilizarse como medio de cultivo o compost para sustrato orgánico en cultivo sin suelo de plantas (Martinez *et al.*, 2013).



Figura 4-2. Productos tejidos con fibras de agave

Actualmente se investigan usos técnicos para la fibra del bagazo de agave mediante la obtención de materiales compuestos (Figura 4-3), en matrices elastoméricas o poliméricas, así como también en matrices cerámicas por las características físicas y químicas que presenta la fibra (Herrera y Valadez, 2005; Wang, 2008).



Figura 4-3. Material compuesto, fibra de agave y látex natural.

4.3.2 Descripción del látex utilizado

El material seleccionado para hacer las pruebas fue látex de campo, debido a sus características físico-químicas, su bajo costo, su buena disponibilidad y a la importancia económica en el Estado de Oaxaca. En México existen 14,142.85 ha de plantaciones de hule establecidas. En producción hay 9,563.15; alrededor de 4,579.70 en desarrollo y 1,168.35 abandonadas. Las plantaciones se localizan en Veracruz, Tabasco, Oaxaca y Chiapas. Veracruz concentra el 49% de la superficie y Oaxaca el 35%, con 4130.3 ha, sumando en conjunto el 84% del total de la producción de hule (CMH, 2000). En cuanto a sus características, se ha comprobado su uso en la fabricación materiales compuestos con buenas propiedades mecánicas, baja susceptibilidad a la fractura por tensión, excelente resistencia a medios alcalinos y resistencia a grandes cargas dinámicas. Para este estudio se adquirieron dos tipos de látices cremados en forma líquida (Figura 4-4). El primer tipo, látex de campo, no contiene conservadores ni aditivos, es látex natural extraído del árbol y disuelto en amoníaco y agua. El segundo tipo, látex centrifugado con un porcentaje aproximado de 62% de sólidos totales. El látex se adquirió en el centro de acopio LEYMAD S.A. de C.V., ubicado en de San Juan Bautista, Tuxtepec, Oaxaca. Ambos tipos de látex presentan diferencias físico químicas (viscosidad y consistencia), sin embargo no son apreciables a la vista.



Figura 4-4. Tipos de látex utilizados (natural y centrifugado).

El porcentaje de sólidos se determinó, para los dos tipos de látex, mediante el método descrito en la norma ASTM D1076-02, la cual refiere al siguiente procedimiento:

- La norma establece el uso de platos de vidrio, cerámica o metal.
- Se utilizaron cajas Petri (Figura 4-5)
- Las cajas se limpiaron con un algodón, no se tocaron directamente con las manos, se utilizaron guantes de látex para su manejo.
- Las cajas se pesaron en la balanza analítica marca Denver Instrument Company, modelo AA – 200, con una precisión de +0,01 g.
- Para calcular el % de sólidos totales se utilizó la ecuación 4-1.

$$\% \text{ sólidos} = [(W_{\text{total}} - W_{\text{caja}})/(W_{\text{ms}})] \times 100 \quad (4.1)$$

Donde:

W_{total} = Peso de la muestra más el peso de la caja de cristal (g)

W_{caja} = Peso de la caja de cristal (g)

W_{ms} = Peso del látex a secar en la estufa (g)



Figura 4-5. Muestras de látex utilizadas en laboratorio.

Viscosidad.- La determinación de la viscosidad se realizó mediante dos paralelas, según el método descrito en la norma ASTM D 1076-02.

Potencial de hidrógeno.- La determinación del pH se realizó, mediante el procedimiento especificado en la norma ASTM D 1076-02. La medición se realizó a 24°C.

Análisis de cenizas de los dos tipos de látex.- Para determinar las diferencias entre las cargas inorgánicas de los dos látices, se calcinaron las muestras. Se colocaron las secciones del látex obtenido en un crisol tarado hasta completar aproximadamente 5 g. Las muestras carbonizadas se colocaron en una mufla a 600°C durante 2 h. Los crisoles con las muestras se colocaron en un desecador de sílice.

Pruebas preliminares para curado del látex.- En esta prueba, lo que se busca obtener es el tiempo para el curado del látex a una temperatura. Estas pruebas se realizaron con látex natural y centrifugado, únicamente se realizó a temperatura ambiente ($24 \pm 1^\circ \text{C}$). Por separado, en cajas Petri se colocó 20 ml de látex centrifugado y látex natural. Se registró el tiempo, utilizando un cronometro, hasta que el látex formo una capa. En la Tabla 4-1 se presentan los tiempos registrados para obtener el curado del Látex.

Tabla 4-1. Tiempo registrado hasta llegar al curado del látex, en horas.

Látex	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	X
Centrifugado	71.5	73	70	76	73.5	67	75	69	71	73.5	71.95
Natural	77	73.5	70	71.5	78	66	73	75	67.5	74	72.55

M: número de muestra; **X:** tiempo promedio

4.4. Desarrollo del material compuesto

Para elaborar el material compuesto, las fibras se acondicionaron por medio de un molido y tamizado (Figura 4-6), y se establecieron dos rangos de partículas. Las fibras del primer rango (Figura 4-7) pasaron la malla No. 30; pero fueron retenidas por la malla No. 50, y las fibras del segundo rango (Figura 4-8) pasaron la malla No. 50; pero fueron retenidas por la malla No. 80, las fibras más pequeñas no se utilizaron. El tamaño de la partícula obtenida en cada una de las mallas se especifica en el capítulo anterior, en la Tabla 3-3.



Figura 4-6. Molienda y tamizado de las fibras de bagazo de agave.



Figura 4-7. Tamaño de partícula de fibra, rango uno (TPR1)



Figura 4-8. Tamaño de partícula de fibra, rango dos (TPR2)

4.4.1 Mercerizado de las fibras del bagazo cocido

El mercerizado es un tratamiento que se realiza sobre las fibras celulósicas, para mejorar las propiedades de estabilidad dimensional y accesibilidad. Este efecto se produce al sumergir las fibras en una concentración de hidróxido de sodio (NaOH) con agua destilada. Este tratamiento ha sido aplicado industrialmente durante muchos años, sobre las fibras de celulosa, ya que produce cambios en su estructura que mejoran las propiedades de accesibilidad y estabilidad dimensional en función de las condiciones del tratamiento (concentración de NaOH, temperatura, tiempo y tipo de celulosa). Los resultados experimentales indican que se produce una disminución progresiva de las propiedades mecánicas hasta una concentración 4.18 M de NaOH, manteniéndose constante el comportamiento a partir de este valor. Esta modificación en el comportamiento es consecuencia de los cambios estructurales y de cristalinidad producidos en la fibra (Carrillo *et al.*, 2002). En este caso, la mercerización se hizo con una disolución de NaOH con una concentración del 0.5 M (Figura 4-9). La fibra se sumergió (Figura 4-10) por un periodo de 6 h, posteriormente se lavó con agua destilada y se secó en un horno (Figura 4-11) a 93 °C por un periodo de 8 h.



Figura 4-9. Disolución de NaOH, en una concentración de 0.5 M



Figura 4-10. Fibra en proceso de mercerización



Figura 4-11. Secado de fibra mercerizada

4.4.2 Elaboración del material compuesto

Para la elaboración de las películas se colocó la cantidad fibra requerida en las cajas de cristal (Figura 4-12) de 15x15 cm, se utilizaron partículas en dos rangos de tamaño, el primero denotado como Tamaño de Partícula Rango 1 (TPR1) y el segundo denotado como Tamaño de Partícula Rango 2 (TPR2), y se consideraron los tratamientos establecidos. Los tratamientos se especifican a continuación en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2. Características de los tratamientos evaluados

		Tr1	Tr2	Tr3	Tr4
Tipo de látex	Natural	x	x		
	Centrifugado			x	x
Tamaño de fibra	300 < TPR1 < 600 (μm)	x		x	
	180 < TPR2 < 300 (μm)		x		x
Fibra con mercerizado	Si		x		X
	No	x		x	

Tr: número de tratamiento; TPR1: tamaño de partícula rango uno



Figura 4-12. Elaboración de las películas del material compuesto

El látex se agregó por gravedad. El curado se realizó bajo condiciones ambientales del laboratorio (24 °C y 38% HR), durante 72 h. Las películas del material compuesto obtenido se pueden observar en la Figura 4-13.



Figura 4-13. Película obtenida de material compuesto

4.5. Caracterización del material compuesto

Las pruebas realizadas al material compuesto son:

- Análisis de superficie.
 - Microscopia de fuerza atómica (AFM)
 - Microscopia electrónica de barrido (SEM)
 - Microscopia confocal de barrido láser (MCBL)
- Pruebas térmicas
 - Análisis termo gravimétrico (TGA)
 - Calorimetría de barrido diferencial (DSC)
- Prueba física
 - Absorción de humedad e hinchamiento
- Prueba mecánica
 - Resistencia a la tensión

4.5.1 Análisis de superficie.

- Microscopia de fuerza atómica (AFM)

Para realizar este análisis de superficie se utilizó un microscopio de fuerza atómica Mod. Multimode V (Instrument AF Microscope. Veeco, USA). Con el software Nanoscope 7.3 en modo contacto intermitente (con fuerzas en la punta entre 1 y 10 nN). Se escanearon regiones en tres ejes y se captaron imágenes en 2 y 3 dimensiones con tamaños de 4 a 25 mm². Todas las muestras fueron escaneadas en un área transversal mínima de 4 mm².

- Microscopia electrónica de barrido (SEM)

Para el estudio de microscopía electrónica, las muestras fueron montadas en postes de latón utilizando cinta de carbono. No se realizó ningún sombreado con algún recubrimiento debido a que las muestras son no conductoras. Las muestras se analizaron con el equipo Quanta 3DFEG–FEI y el microscopio electrónico de barrido JSM 7800 (JEOL, Japón) a 15 keV, habilitado con un espectrómetro de rayos X (EDAX Pegasus EDS & EBSD System, Ametek Inc., USA).

- Microscopia confocal de barrido láser (MCBL)

Este análisis se realizó con un MCBL, modelo LSM 710 (Carl Zeiss, Alemania), el cual emplea una técnica óptica de imagen para incrementar el contraste y/o reconstruir imágenes tridimensionales utilizando un "pinhole" espacial para eliminar la luz desenfocada o destellos de la lente en especímenes que son más gruesos que el plano focal. El pinhole es una apertura localizada delante del fotomultiplicador que evita el pasaje de fluorescencia de las regiones de la muestra que no están en foco, la luz que proviene de regiones localizadas por encima o por debajo del plano focal no converge en el pinhole y no es detectada por el fotomultiplicador.

4.5.2 Pruebas térmicas

- Análisis termogravimétrico (TGA). Se realizó con un analizador Q5000 V3.10 Build 258. Las condiciones experimentales fueron: nitrógeno (50 ml/min) en el intervalo de 25 - 500 °C y aire (50 ml/min) en el intervalo de 25 - 700 °C, con un rango de calentamiento de 20 °C/min.
- Calorimetría de barrido diferencial (DSC). Para realizar esta prueba se utilizó un equipo TA Instruments, modelo Q2000, en el rango de 50-400 °C, con velocidad de calentamiento de 10°C/min, en una atmósfera de nitrógeno con presión de 104 Pa. Este análisis DSC (calorimetría de barrido diferencial) permite identificar las transiciones y modificaciones de la estructura de la fibra, a partir de sus características térmicas, en función de tratamientos combinados de calor y humedad.

4.5.3 Absorción de agua e hinchamiento

Esta prueba se realizó según la norma ASTM D1037-38, los compuestos se analizaron bajo condiciones experimentales por inmersión en agua destilada (Figura 4-14), a diferentes temperaturas y en distintos intervalos de tiempo.



Figura 4-14. Equipo utilizado para la prueba de absorción e hinchamiento

La prueba se realizó en una habitación con humedad relativa constante de 35%, y temperatura de 25 °C. Se utilizaron probetas de 3 x 3 cm (Figura 4-15).



Figura 4-15. Probetas analizadas para en absorción de agua e hinchamiento

Las muestras fueron previamente secadas y pesadas (Figura 4-16) para cada uno de los tratamientos. También se midió el espesor para conocer el hinchamiento debido a la absorción de agua. El resultado que se reporta es el promedio de cuatro repeticiones.



Figura 4-16. Medición del peso de las probetas

4.5.4 Prueba mecánica

- Resistencia a la tensión

Los ensayos se realizaron en el laboratorio de pruebas mecánicas de materiales biológicos de la Universidad Autónoma Chapingo, se utilizó una máquina Instron (modelo 3382) con una carga media mínima de 0,05 N y máxima de 2,25 N a temperatura ambiente ($24\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1$), y humedad relativa de $38\% \pm 2$. Debido a la variación en el diámetro de las fibras, solo se consideró el diámetro medio $501\text{ }\mu\text{m}$. Se probaron 50 muestras en total. Las gráficas de esfuerzo-deformación se obtuvieron utilizando una velocidad de la cruceta de 5 mm/min . Para cada fibra se obtuvo el valor de la resistencia a la tracción última (UTS), el módulo de Young (YM), y el porcentaje de deformación unitaria (ϵ).

4.6. Análisis de resultados

4.6.1 Análisis de superficies

- Microscopia de fuerza atómica (AFM)

El microscopio de fuerza atómica es un instrumento mecánico-óptico capaz de detectar fuerzas del orden de los nanonewtons (nN), y de registrar continuamente la topografía de una muestra mediante una sonda o punta afilada de forma piramidal o cónica. La sonda va acoplada a un listón o palanca microscópica muy flexible de alrededor de $200\text{ }\mu\text{m}$. Las imágenes o micrografías se analizaron con el programa Nanoscope Analysis Veeco 2010, versión 1.20, USA, con ello se obtuvo información sobre la topografía, magnetismo, potencial eléctrico y fases presentes.

Las Figuras 4-17a, 4-17b, 4-17c y 4-17d muestran las fotomicrografías del compuesto desarrollado con fibras de agave y látex natural. Las imágenes 3D muestran irregularidades sobre la superficie, posiblemente debido a que la estructura y la morfología del compuesto está determinada por el nivel de disrupción y fusión del gránulo de las fibras con el plastificante y los procesos de envejecimiento (Van Soest y Knooren, 1997).

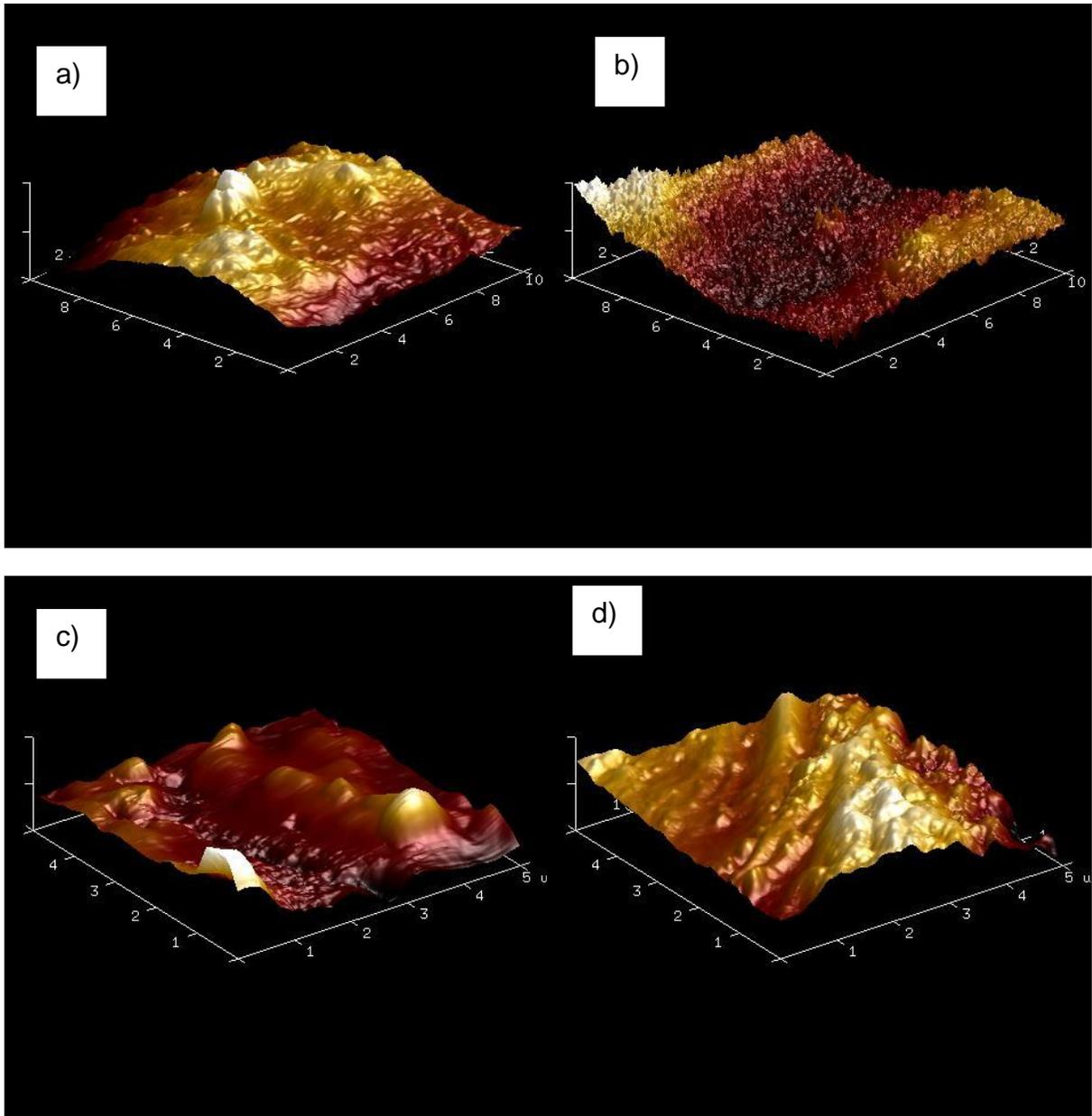


Figura 4-17. Imágenes de microscopia de fuerza atómica tridimensionales de $1\mu\text{m}$ para cortes transversales de biopelículas: a) Tr1; b) Tr2; c) Tr3; d) Tr4

En las dos últimas muestras, los gránulos sufrieron cambios fisicoquímicos por la mercerización de la fibra. Las superficies de las Figuras 4-18a, 4-18b presentan mayor rugosidad promedio comparadas con las superficies 4-18c y 4-18d. Estas

diferencias están relacionadas con el tamaño de la fibra y el tratamiento utilizado, así como la cantidad de látex. La presencia de regiones lisas está relacionada con una fase rica en amilosa extra-granular. Se obtuvieron rugosidades promedio de 90.1\AA , 49.4\AA , 120.7\AA y 69.4\AA , respectivamente.

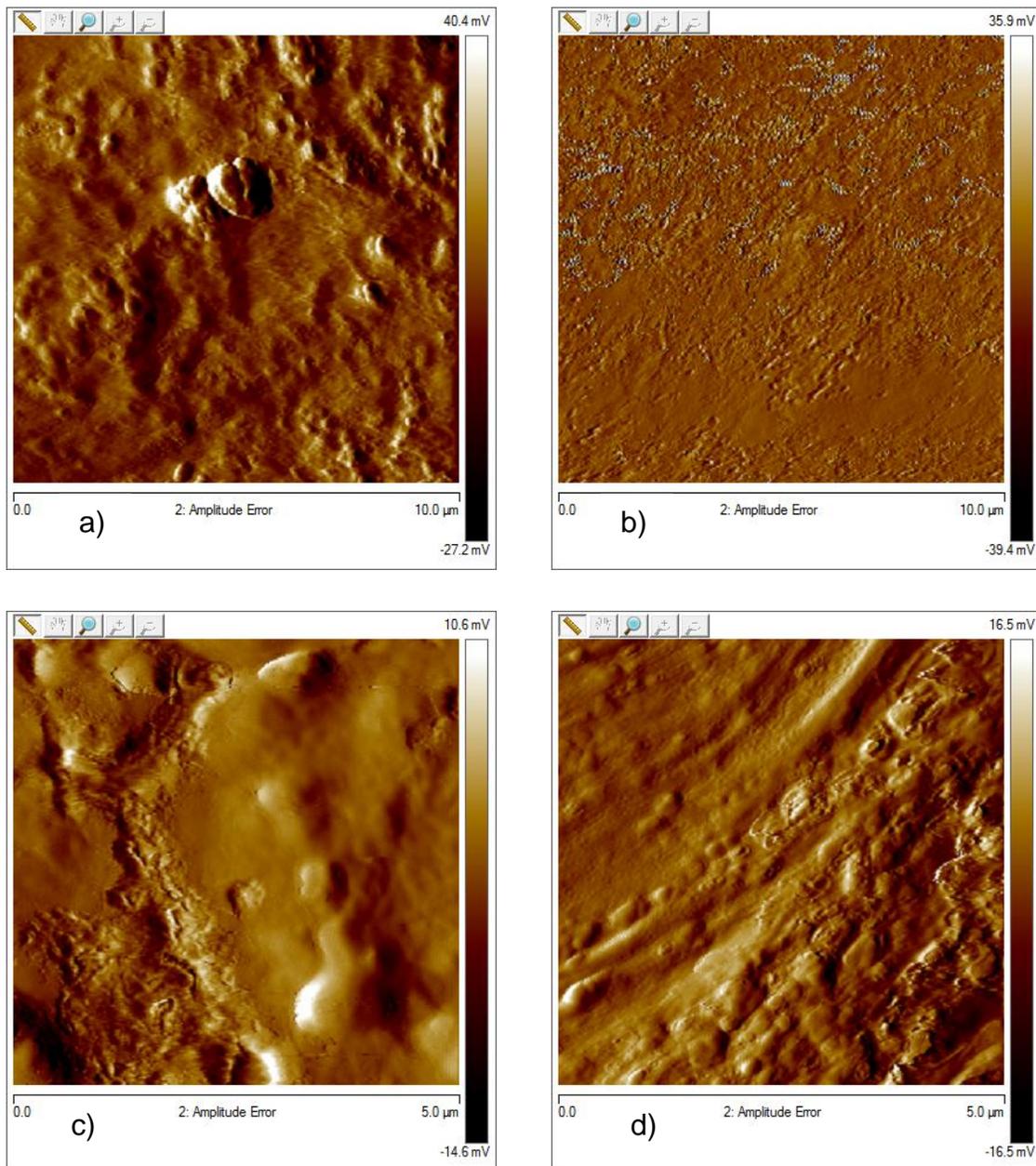


Figura 4-18. Imágenes de microscopía de fuerza atómica “Amplitude Error” para: a) Tr1; b) Tr2; c) Tr3; d) Tr4

La diferencia de rugosidad, se relaciona con el tamaño de los gránulos de fibra de agave y con el contenido y tipo de látex utilizado. Estos resultados concuerdan con otros trabajos, que plantean diferencias de rugosidad por la forma y el tamaño del gránulo (García *et al.*, 2000; Kuutti *et al.*, 1998). La rugosidad del material medida a escala nanométrica, depende de la naturaleza química y física de las moléculas, de las modificaciones realizadas al gránulo de la fibra antes y durante el proceso de termo-plastificación y en particular, de la rigidez estructural de las moléculas del látex. Sin embargo, la rugosidad también depende de los cambios generados al interior de la matriz polimérica, por el reordenamiento y la recristalización de moléculas bajo las condiciones de almacenamiento (Forsell *et al.*, 1999).

Al analizar las mezclas se observó una disminución en la rugosidad y un incremento de las áreas lisas. Las fotomicrográficas de las Figuras 4-19, mostraron cambios superficiales en los compuestos medidos por AFM.

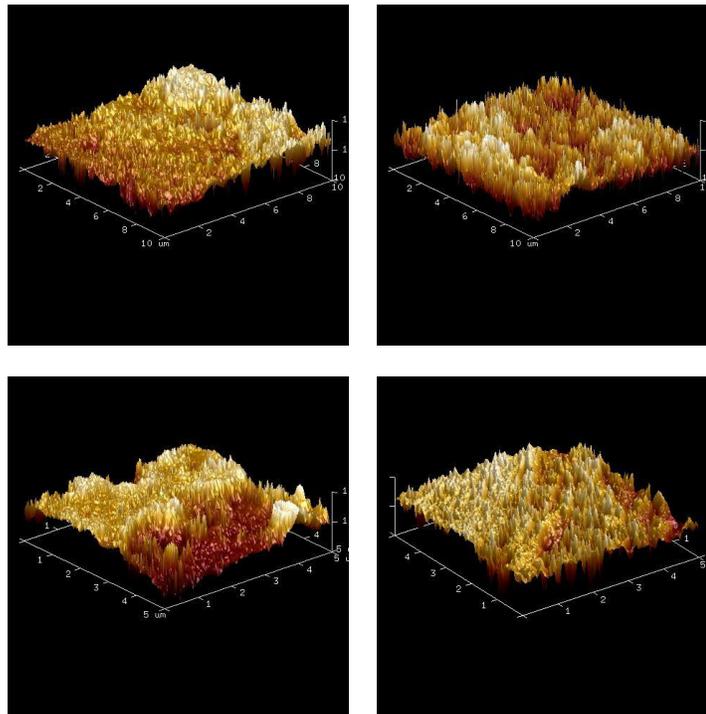


Figura 4-19. Imágenes de microscopia de fuerza atómica tridimensionales de 1µm, “Phase” en 3D para los tratamientos a) Tr1; b) Tr2; c) Tr3; d) Tr4

- Microscopia electrónica de barrido (SEM)

El Microscopio electrónico de barrido utiliza un haz de electrones para formar imágenes de alta resolución donde se pueden observar las características más ínfimas de la muestra con gran amplificación. Generalmente, las muestras se recubren con una capa de carbono o de un metal, como el oro, para conferirle carácter conductor, en este caso no se realizó ninguna preparación a las muestras. La superficie se barre con electrones acelerados que viajan a través del cañón, y un detector mide la cantidad e intensidad de electrones que devuelve la muestra, formando figuras mediante imagen digital.

La figura 4-20 muestra una microfotografía de la superficie de una película del material elaborado con fibras de agave y látex. Las fibras no tienen ningún tratamiento.

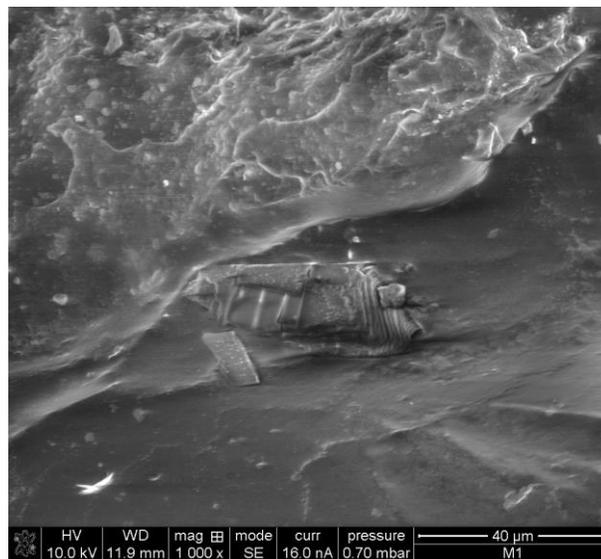


Figura 4-20. Fotografía del material obtenido con fibras de agave sin tratamiento y látex.

El microscopio utilizado está equipado con un detector de energía dispersiva EDS (Energy Dispersive Spectrometer), el cual permite coleccionar los Rayos X generados por la muestra y realizar diversos análisis semicuantitativo y de distribución de elementos en superficies.

La figura 4-21 muestra las microfotografías del análisis realizado con el detector de energía dispersiva. Se observan las regiones en distintos colores de acuerdo a los elementos que presenta: en verde oxígeno, en rojo carbono, en azul calcio y en amarillo silicio.

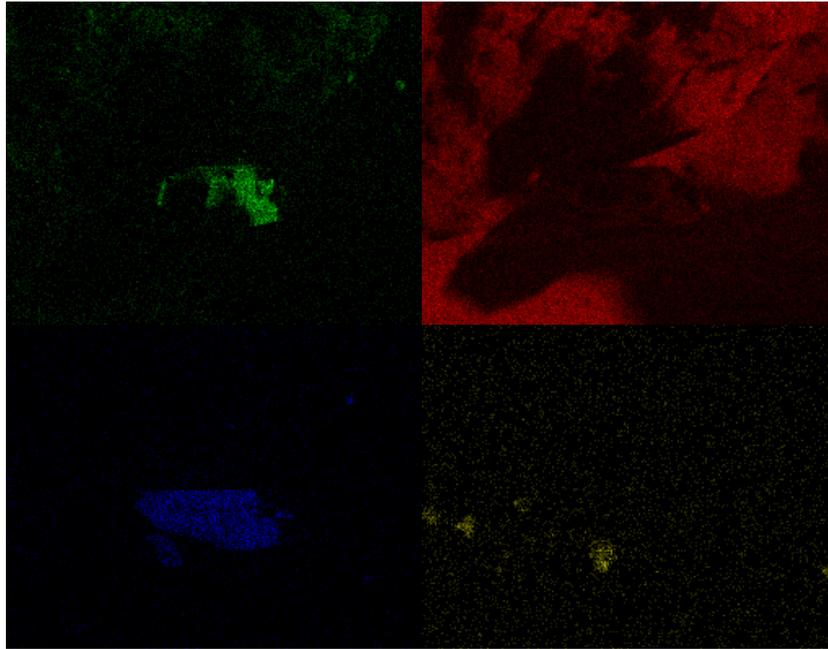


Figura 4-21. Microfotografías obtenidas del análisis EDS, elementos O, C, Ca y Si.

La figura 4-22 muestra una microfotografía de la superficie de una película del material elaborado con fibras de agave mercerizadas y látex. La figura 4-23 muestra las microfotografías del análisis realizado con el detector de energía dispersiva. Esta muestra no presenta el color amarillo que corresponde a silicio; sin embargo se puede observar que los restantes tres colores están más marcados que en la muestra anterior.

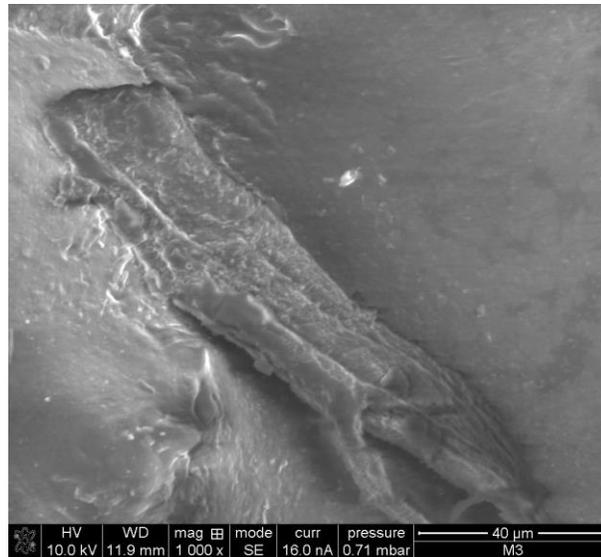


Figura 4-22 Microfotografía del material compuesto obtenido.

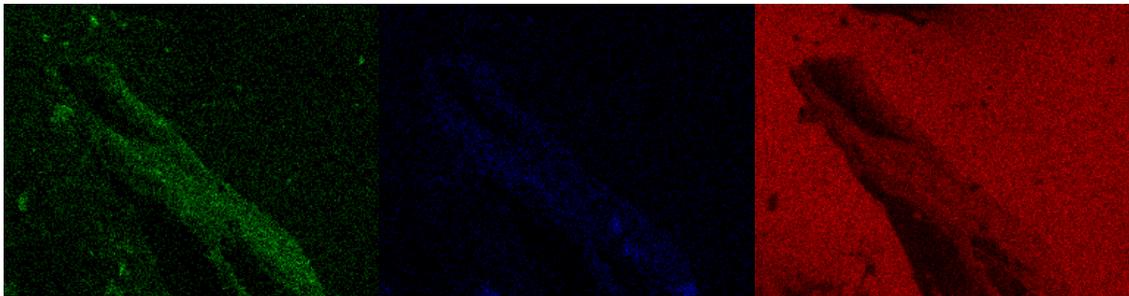


Figura 4-23. Microfotografías obtenidas del análisis EDS, elementos O, Ca y C.

- Microscopia confocal de barrido láser (MCBL)

Una de las mayores ventajas de la microscopía confocal es la posibilidad de estudiar tridimensionalmente la muestra a partir de secciones ópticas de la misma. Para ello se fija la posición de barrido del microscopio en un extremo de la estructura a medir y se van tomando imágenes, correspondientes a diferentes secciones de la misma, hasta llegar al otro extremo. En la Figura 4-24 puede observarse un conjunto de 30 secciones ópticas del material desarrollado. La distancia entre secciones es de 5 µm.

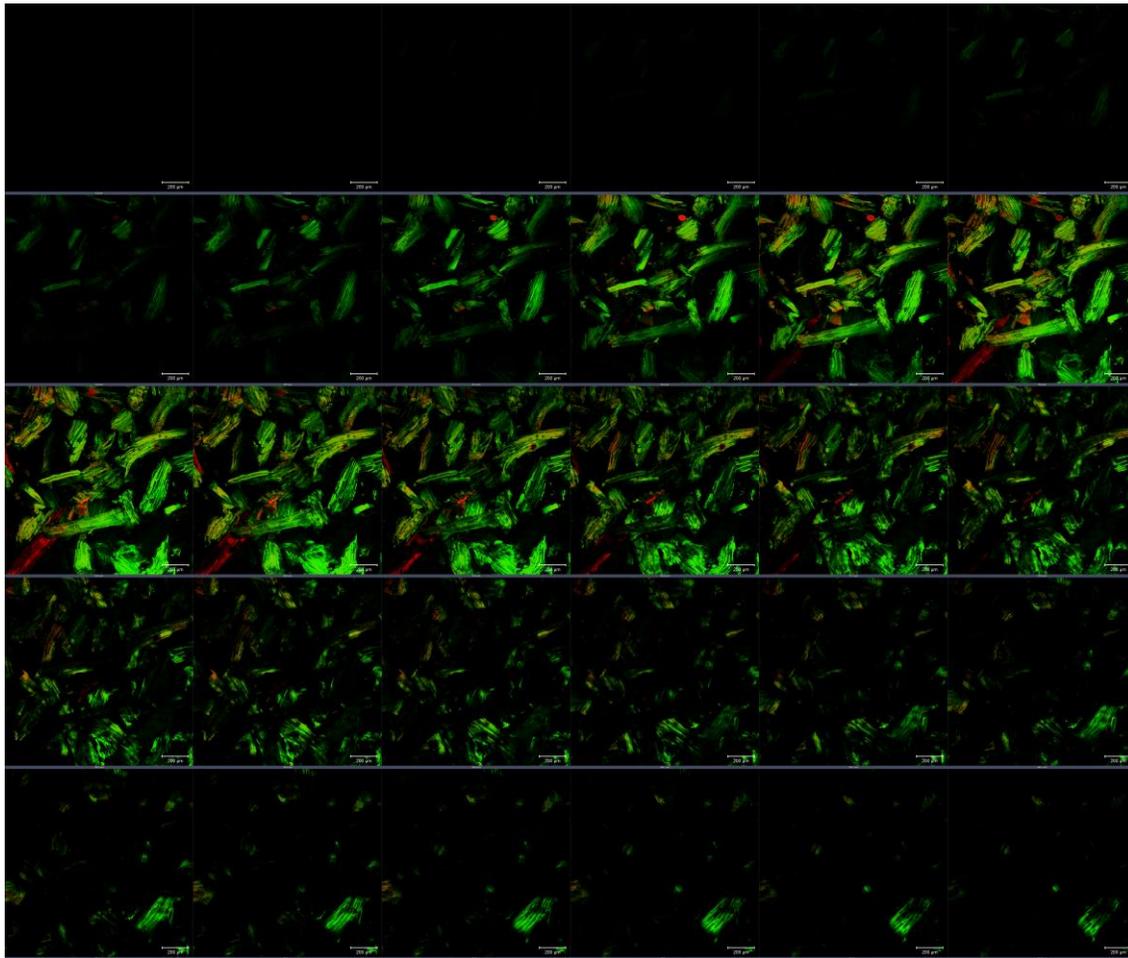


Figura 4-24. Conjunto de 30 secciones ópticas del material desarrollado. Separación entre secciones = 5 μm

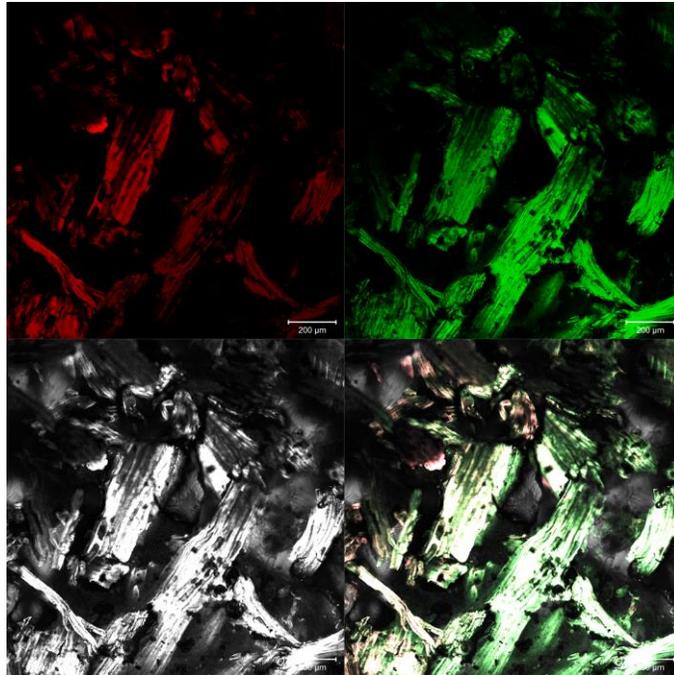


Figura 4-25. Imagen “extended focus” obtenida a partir de las secciones de la imagen anterior

4.6.2 Pruebas térmicas

- Análisis termo gravimétrico (TGA)

En la Figura 4-26a, 4-26b, 4-26c, 4-26d, se muestran las gráficas del análisis termogravimétrico para cada una de las muestras analizadas. El peso de la fibra se pierde a diferentes temperaturas, pero se comporta de manera estable hasta una temperatura promedio de 250 °C, donde inicia a de manera gradual la pérdida de peso. El comportamiento de la muestra M1 (Figura 4-26a) y M2 (Figura 4-26b) es prácticamente similar, mostrando en ambos casos un pico en una temperatura de 378.93 °C, con una pérdida de 1.53%/°C y 1.37%/°C respectivamente.

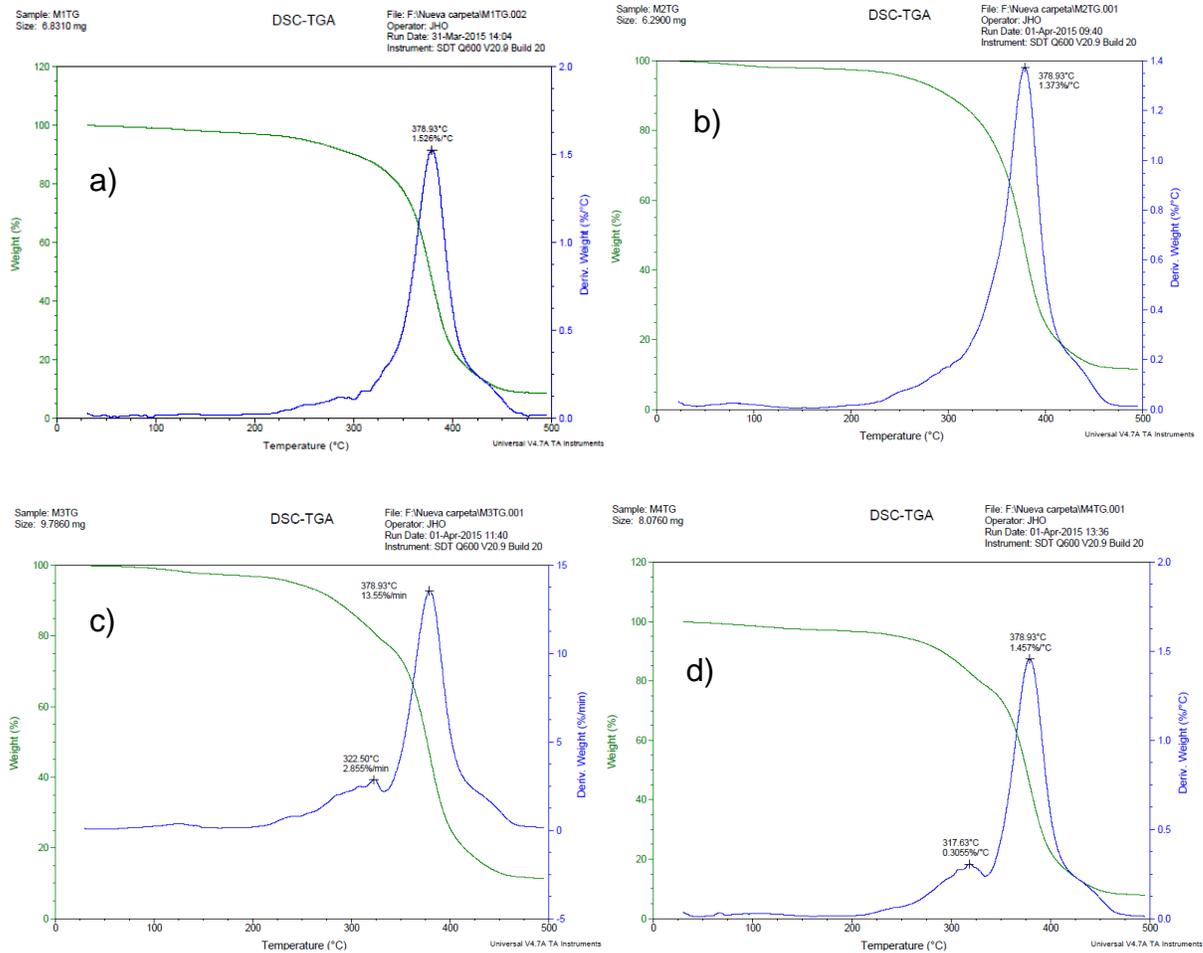


Figura 4-26. Análisis termogravimétrico a) muestra M1, b) muestra M2, c) muestra M3 d) muestra M4.

Se puede observar que entre 25 y 230 °C, todas las muestras fueron térmicamente estables, lo que sugiere que se pueden utilizar los compuestos de forma segura hasta una temperatura máxima de 230 °C. También se observa que las muestras perdieron peso con temperaturas de más de 250 °C y hasta 470 °C. Finalmente, se observan residuos de aproximadamente ~2.5%, los cuales muy probable sean de carácter mineral presentes en los elementos del compuesto.

○ Calorimetría de barrido diferencial (DSC)

El contenido de agua libre se midió por las temperaturas de vaporización y obtuvo por medio del estudio de DSC. En este caso, la Figura 4-27a, 4-27b, 4-27c y 4-27d, muestra las gráficas de las cuatro muestras del material compuesto. Se observa presentan un pico endotérmico, a 240.97 °C, 237.97 °C, 220.94 °C y 175.96 °C, mismos que corresponden a la deshidratación y descomposición del compuesto fibroso celulósico. La cantidad de energía utilizada para evaporar el agua fue en promedio de $\Delta H = 19,73 \text{ J/g}$, respectivamente.

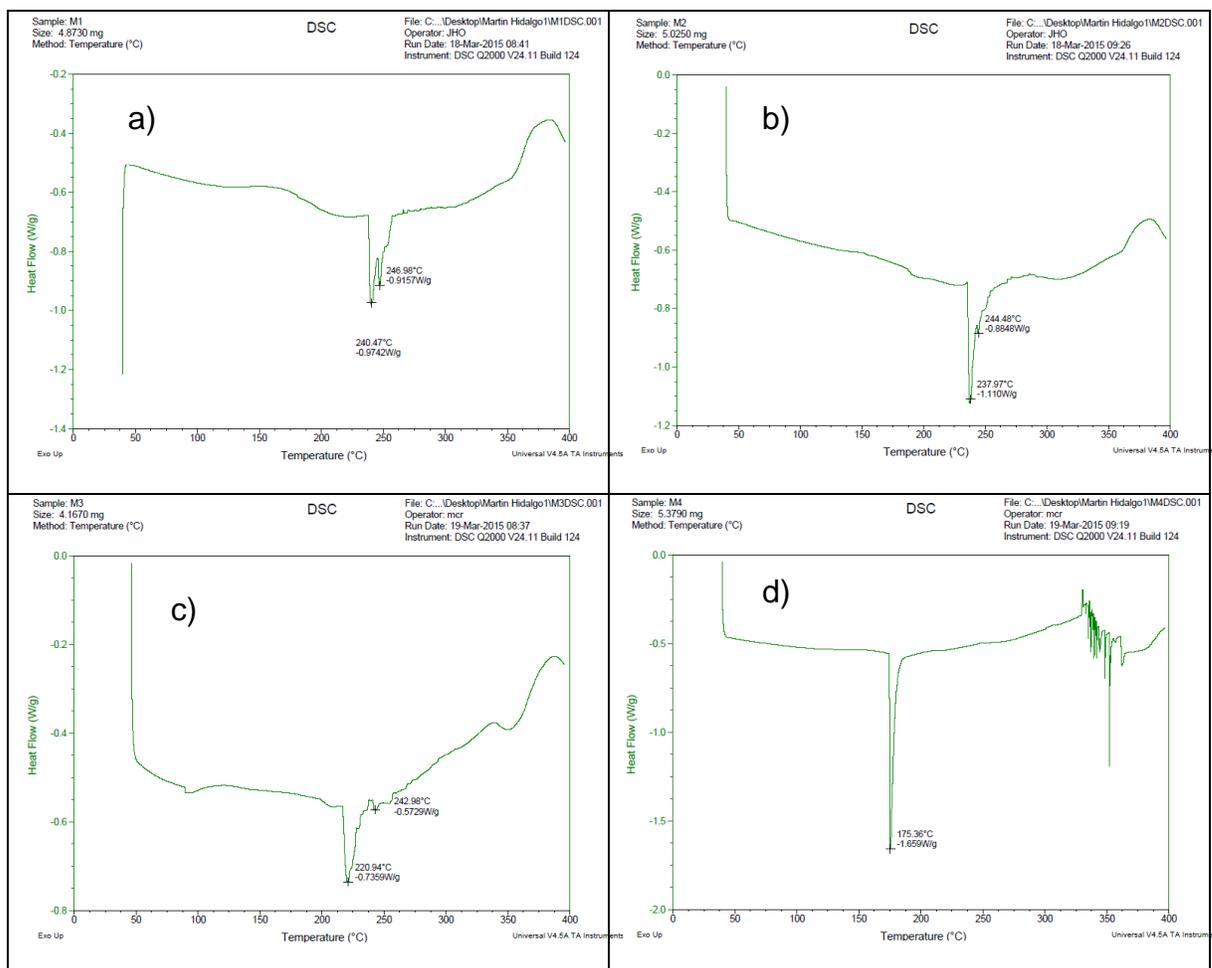


Figura 4-27 Gráfica del análisis de DSC de las muestras del material compuesto

4.6.3 Absorción de humedad e hinchamiento

La Tabla 4-3 muestra los resultados de las pruebas de absorción de agua de los materiales compuestos de fibras con y sin mercerización. Los resultados muestran que el tratamiento de mercerizado modifica la capacidad hidrofílica de las fibras, permitiendo aumentar su capacidad de absorción. En este sentido, el mercerizado es un buen tratamiento, pero solo para agregar el látex; sin embargo, lo que realmente se busca de una fibra es que reduzca su capacidad hidrofílica y esto se puede lograr mediante un tratamiento de acetilación (Rana *et al.*, 1999) o bencilación (Ferreira *et al.*, 2003). Sobre todo en aplicaciones que implican contacto con humedad, la reducción en la capacidad de absorción de agua es muy importante ya que provoca reducción de las propiedades mecánicas y el material se vuelve susceptible de ataque por hongos.

Tabla 4-3 Absorción de humedad en los compuestos desarrollados

Tratamiento		Tr1	Tr2	Tr3	Tr4				
Temperatura (°C)	Tiempo (min)								
	15	0.61	0.47	0.60	0.50	0.75	0.89	0.85	0.82
70	30	0.50	0.53	0.52	0.63	0.85	0.77	0.78	0.84
	60	0.36	0.48	0.50	0.59	0.78	0.78	0.81	0.81
	15	0.48	0.41	0.69	0.70	0.70	0.88	0.75	0.85
80	30	0.50	0.49	0.68	0.71	0.78	0.85	0.78	0.78
	60	0.53	0.50	0.66	0.70	0.79	0.90	0.80	0.89
	15	0.58	0.58	0.51	0.58	0.52	0.47	0.46	0.49
90	30	0.83	0.77	0.73	0.84	0.71	0.67	0.64	0.58
	60	0.83	0.80	0.74	0.89	0.75	0.75	0.86	0.77

Tr: tratamiento

La tabla 4-3 muestra los resultados de la absorción de humedad de los compuestos en función del contenido en porcentaje de fibra de *Agave angustifolia*, del tamaño de partícula, del tipo de látex y del tratamiento a la fibra. Se observó que la absorción de humedad varía principalmente con respecto al tratamiento que se le hizo a la fibra. Al parecer el tamaño de las partículas de fibra no influye tan directamente en la absorción de agua.

En general se observa una absorción de humedad muy bajo para todos los tratamientos desarrollados con diferentes contenidos en porcentaje de fibra y diferente tamaño de partícula, lo anterior aunado en la mejora de las propiedades de mecánicas dan como resultado características excelentes para utilizar estas fibras en unión con el látex natural y formar un compuesto con varias alternativas de aplicación.

De manera general se observa que el incremento en la densidad del material compuesto con fibras de agave y látex provoca una disminución de la absorción de humedad para cada tamaño de partícula, es decir, que a mayor compactación del material (con tamaño de fibras más pequeñas) los espacios porosos se reducen y al mismo tiempo el área de contacto con el látex aumenta provocando como consecuencia una menor absorción del material compuesto.

4.6.4 Resistencia a la tensión

En la Figura 4-28 se muestra la curva de esfuerzo-deformación del material compuesto. El comportamiento se aproxima a la forma típica de un material viscoelástico. Las principales propiedades de tracción fueron evaluadas usando estas curvas. El valor del esfuerzo ultimo de tracción (UTS) fue de 86.9 MPa, con una desviación estándar de 0.314; el valor módulo de Young (YM) fue de 2.509 MPa y presentó una desviación estándar de 0.721; y el valor promedio del porcentaje de deformación (ϵ) fue de 14.187 con una desviación estándar de 5.414. Esta propiedad no difiere significativamente con el diámetro a nivel de 0.05.

Finalmente, el valor medio esfuerzo de tracción (TS) obtenido en este estudio fue 224.16 MPa.

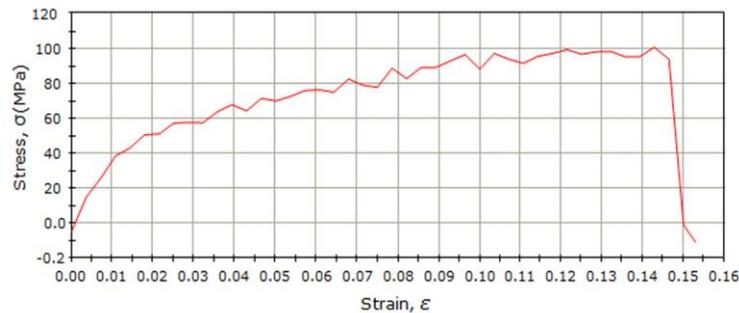


Figura 4-28. Curva esfuerzo-deformación del material compuesto fibras-látex.

4.7. Sumario

Es necesario considerar un cambio de los paradigmas para hacer uso de nuevos materiales dentro de los procesos productivos, sobre todo materiales renovables y aprovechar los residuos de aquellos cultivos que, en función de sus características y condiciones, representen una aplicación potencial. La trascendencia de esta investigación radica en encontrar aplicaciones alternativas para estas fibras, mismas que hasta hoy día, solo han sido consideradas como un residuo del proceso de elaboración de mezcal. Este trabajo es pionero en realizar estudios sobre la caracterización física y química de las fibras de bagazo cocido y en proponer un material compuesto con estas fibras y un polímero natural (látex), representando una solución específica a manera de modelo teórico-metodológico para ser aplicado en trabajos futuros.

4.8. Referencias bibliográficas.

- ASTM (1982). Standard methods of evaluating the properties of wood-base fiber and particle panel materials. ASTM D1037-38. Palatine, IL.
- ASTM (2002). Standard Specification for Rubber—Concentrated, ammonia preserved, creamed, and centrifuged natural latex. ASTM D1076-02.
- Bledski A., Reihmane S. and Gassan J. (1996). Properties and modification methods for vegetable fibers for natural fiber composites. *Journal of Applied Polymer Science* **(59)**:1329-1336.
- Carrillo F., Colom X., Garriga M., Naik A., Lis M., González F. y Valdeperas J. (2002). Efectos del mercerizado en las propiedades mecánicas de hilos de fibras celulósicas regeneradas obtenidas por hilatura en óxido de n-metilmorfolina. *VIII Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas de Sólidos*. Gandia, España. Pp 883-888.
- CMH -Consejo Mexicano del Hule A.C.- (2000). Manual para el cultivo del hule: *Hevea brasiliensis* en México. México, D.F. 168 p.
- Ferreira F.C., Curvelo A.A.S. y Mattoso L.H.C. (2003). Preparation and characterization of benzylated sisal fibers. *Journal of Applied Polymer Science*. **89**: 2957-2965.
- Forssell, P., J. Mikkilä., G. Moates. y R. Parker. (1997). *Phases and glass transition behaviour of concentrated barley starch-glicerol-water mixtures, a model for thermoplastic starch*, Carbohydrate Polymers, 34, 275-282.
- García, M. A., M. N. Martino y N. E. Zaritzky. (2000). *Microstructural Characterization of Plasticized Starh-Based Film*, Starch/Stärke **4**: 118-124.
- Gómez J.L., Jarones C. y Gañan P. (1998). Refuerzos naturales para materiales plásticos. *Revista de Plásticos Modernos* **(76)**: 183.
- Herrera-Franco P.J. y Valadez-González A. (2005). A study of the mechanical properties of short natural-fiber reinforced composites. *Composites part B: engineering* **(36)**:597-608

- Joseph K., Varghese S., Kalaprasad G., Thomas S., Prasannakumari L., Koshy P. and Pavithran C. (1996). Influence of interfacial adhesion on the mechanical properties and fracture behaviour of short sisal fibre reinforced polymer composites. *European Polymer Journal* **(32)**:1243-1250.
- Kuutti, L., J. Peltonen., P. Mylläniren., O. Teleman. y P. Forssell. (1998). *AFM in studies of thermoplastic starches during ageing*, Carbohydrate Polymer **37**:7-12
- Martínez Gutiérrez G., Íñiguez Covarrubias G., Ortiz-Hernández Y., López-Cruz J. y Bautista Cruz M. (2013). Tiempos de apilado del bagazo del maguey mezcalero y su efecto en las propiedades del compost para sustrato de tomate. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* **29 (3)**:209-216.
- Monserrate M. (2005). Materiales Compuestos. Proceso de fabricación de embarcaciones. <http://www.edicionsupc.es/ftppublic/pdfmostra/NA01201M.pdf> [Consulta: 23.06.14].
- Nabi S.D. y Jog J. (1999). Natural fiber polymer composites: A review. *Advances in Polymer Technology* **(18)**4: 351-363.
- Rana A.K., Mitra B.C. y Bannerjee A.N. (1999). Effect of acetylation on dimensional stability, mechanical and dynamic properties of jute board. *Journal of Applied Polymer Science*. **72**:935-944.
- Silva-Santos L. y Caballero-Caballero M. (2004). Informe técnico final. Desarrollo de tecnologías adecuadas para el proceso de fabricación del mezcal en el estado de Oaxaca. Proyecto clave CGPI-IPN: 20020524- 20031488
- Tomczak F., Sydenstricker T.H.D. y Satyanarayana K.G. (2007). Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. P-II: Morphology and properties of Brazilian coconut fibers. *Composites Part A: App. Sci. and Manufacturing* **38**:1710-1721.
- Van Soest, J. J. G. y Knooren. N. (1997). *Influence of glycerol and water content on the structure and properties of extruded starch plastic sheets during aging*, J. Appl. Polym. Sci., **64**, 1411-1422
- Wang W. y Huang G. (2008). Characterization and utilization of natural coconut fibres composites. *Materials & Design* **11 (2)**: 1

CAPÍTULO 5.

DISEÑO CONCEPTUAL DE UN ENVASE PARA PAPAYA

CAPITULO 5. DISEÑO CONCEPTUAL DE UN ENVASE PARA PAPAYA.

5.1. El proceso de diseño

El proceso de diseño se refiere a una serie de etapas o pasos consecutivos, que tienen como objetivo detectar, plasmar y dar forma a una idea hasta obtener un producto deseado (Yang y El-Haik, 2003). A continuación se describen los pasos seguidos para llevar a cabo el diseño de un envase para frutos de papaya, considerando como material a utilizar, el compuesto con látex y fibras del bagazo cocido de agave.

5.2. Planteamiento del problema

En el estado de Oaxaca existen varios procesos productivos de gran importancia dentro de la actividad económica, como casos específicos se pueden citar la elaboración de mezcal, la producción de látex y la producción de papaya; sin embargo, existen condiciones en tales procesos que limitan el aprovechamiento integral de los productos y subproductos. En este sentido, respecto a la industria del mezcal, se sabe de la enorme disponibilidad de fibras residuales que no son aprovechadas, mientras que en la producción de papaya, el estado de Oaxaca a pesar de ser uno de los principales productores, dentro de proceso de producción no se obtiene el mayor beneficio, ya que solo se comercializa a granel. Una situación similar sucede en la producción de látex, puesto que en general, el látex solamente se comercializa como materia prima y no se desarrolla ningún producto. Considerando lo anterior, se plantea desarrollar un compuesto utilizando la fibra del bagazo cocido de agave junto con látex natural y posteriormente diseñar un envase para frutos de papaya. Este trabajo presenta un modelo generado a partir del diseño conceptual, en el que se definen los requerimientos funcionales que pueden servir como base para continuar con el proceso de diseño. La esencia del diseño se basa en brindar satisfacción a las necesidades del cliente, en este

sentido, el diseño del envase considera entre otras características lo siguiente: manejo eficiente y simple, estéticamente llamativo, fácil de ensamblar, buena rigidez y resistencia.

5.3. Diseño conceptual de un prototipo de envase para papaya

El diseño conceptual se realizó tomando como eje principal, a manera de guía, un envase construido con láminas de cartón corrugado. Como punto de inicio, se tomaron algunas características generales que debía cumplir el envase, a saber: resistencia mecánica suficiente para proteger el contenido durante el transporte, ser un envase adecuado en cuanto a funcionalidad y manejo, y en este caso específico, el envase debe ser fabricado considerando el material compuesto desarrollado, es decir, un material biodegradable.

Durante las fases de diseño del envase se realizaron varias pruebas, de tal forma que las propuestas fueran prácticas para el usuario, considerando las funciones principales de cualquier envase: protección, conservación, transportación y/o presentación del producto. En este proceso de diseño se consideraron las características del compuesto en sus distintas combinaciones, todas ellas desde varios puntos de vista, como son las propiedades químicas, mecánicas, técnicas y estéticas a fin de conjugar y obtener los mejores resultados para satisfacer las necesidades físicas reales en el mercado.

En la etapa de diseño conceptual se establecen los atributos que el usuario desea y sobre todo, que debe cumplir el envase para que satisfaga las funciones y al mismo tiempo las necesidades del cliente. En este sentido, los atributos se clasifican en primarios, secundarios y terciarios. Los primarios son aquellos que cumplen la función principal del envase. Los secundarios se refieren a las características enfocadas a la relación hombre-envase, y los terciarios son los

atributos que brindan un valor atractivo al envase; pero no son necesarios para su función. En este caso, los atributos que se detectaron considerando las necesidades del usuario son: Primarios, contener y proteger al producto. Secundarios, de fácil manejo y maniobrabilidad. Terciarios, color y diagramación del envase. Una vez identificados los atributos, se construye un árbol de objetivos para analizar y desplegar, a través de una representación esquemática, los parámetros de diseño que debe cumplir el envase. Posteriormente, se hace un análisis de funciones mediante una tabla que identifica las entradas y salidas del sistema, describiendo el problema y dividiéndolo en funciones de manera que se disminuyan los niveles de complejidad y dando la oportunidad de que sea más fácil llevar a cabo el diseño. Es importante encontrar los principios de funcionamiento, mismos que deben estar basados en el efecto físico necesario para alcanzar dicho funcionamiento, siempre basándose en toda la información requerida para cada función. No se debe soslayar que cada función se puede lograr de diferentes formas. Una herramienta muy importante puede ser un catálogo de diseño o carta morfológica para su selección. De ahí surgen los conceptos que posteriormente serán analizados, evaluados y finalmente dará la pauta para que la mejor opción de diseño sea elegida. Para realizar la evaluación de los conceptos generados, se utiliza alguna metodología tal como la metodología de la casa de calidad. El primer paso es analizar los atributos y especificaciones en un sistema ideal. Posteriormente se evalúan las casas de calidad de cada uno de los conceptos y los resultados se comparan con el diseño ideal, se selecciona el diseño óptimo cuyo resultado sea más cercano al ideal (Pugh, 1991; Ullman, 1992; Ulrich y Eppinger, 2003)

Comúnmente, las cajas utilizadas como envases para frutos de papaya, llevan una unión en las aristas laterales, y frecuentemente el método empleado para hacer la unión, es utilizando un adhesivo resistente al agua para pegarla. Un segundo método de unión se realiza mediante grapas, el material se dobla para formar los

laterales y cubierta de la caja. El principal problema en el diseño de este envase, es la falta de una sección que sirva para sujetarse, lo cual hace que este envase sea de difícil manejo, no cuenta con orificios para permitir la ventilación del fruto, y tampoco tiene un sistema de embalaje interior que proteja el fruto.

5.3.1 Parámetros de diseño

La función del envase es proteger el producto (papaya) de los daños durante su manipulación, almacenamiento y transporte; además de brindar beneficios adicionales como resistir el apilamiento y mantener el producto bajo diferentes condiciones ambientales (contenido de humedad, temperatura). Este diseño considera el tipo de producto, en términos de sus características físicas y químicas, principalmente. Para definir las dimensiones tanto exteriores como interiores del envase, se toma en cuenta el material a utilizar en la elaboración, y la resistencia propia del diseño estructural.

En este caso, en el diseño conceptual del envase se consideraron las medidas indicadas por la norma oficial, NMX-EE-096-1981. Envase, cartón de corrugado, en cajas para envasar manzanas y peras en estado fresco, debido a que en la práctica se maneja un tipo de caja estándar para productos hortofrutícolas con las mismas características y especificaciones.

5.3.2 Requerimientos de un envase para frutos de papaya

Respecto al envasado, la norma del Codex Alimentarius (Codex Stan 183-1993) establece que las papayas deberán envasarse de tal manera que el producto quede debidamente protegido. Los envases deberán satisfacer las características de calidad, higiene, ventilación y resistencia para asegurar una manipulación, transporte y conservación apropiados de las papayas. Además, los envases deberán estar exentos de materias y olores extraños.

El material utilizado en el interior de los envases deberá ser nuevo, estar limpio y ser de calidad tal que evite daños externos o internos al producto. Se permite el uso de materiales, en particular papel o sellos, que lleven las especificaciones comerciales, siempre y cuando estén impresos o etiquetados con tinta o pegamento no tóxicos. Las papayas deberán disponerse en envases que se ajusten al Código de Prácticas para el Envasado y Transporte de Frutas y Hortalizas Tropicales Frescas (CAC/RCP 44-1995).

Con respecto a la presentación, la norma establece que el contenido de cada envase deberá ser homogéneo y constar únicamente de papayas del mismo origen, variedad, calidad y calibre. Para la categoría «Extra», el color y la madurez también deberán ser homogéneos. La parte visible del contenido del envase deberá ser representativa de todo el contenido.

Para los consumidores finales, además de los requisitos de la norma general del Codex para el etiquetado de alimentos pre envasados (Codex Stan 1-1985), si el producto no es visible, cada envase deberá llevar una etiqueta con el nombre del alimento, pudiendo etiquetarse también con el nombre de la variedad. Para envases no destinados a la venta al por menor, cada envase deberá llevar las siguientes indicaciones en letras agrupadas en el mismo lado, marcadas de forma legible e indeleble y visibles desde el exterior, o en los documentos que acompañan al lote. En el caso de productos transportados a granel, estas indicaciones deberán aparecer en un documento que los acompañe:

- Identificación: exportador, envasador y/o expedidor.
- Nombre del producto: cuando el contenido no es visible desde el exterior.
- Nombre de la variedad o del tipo comercial: si procede.
- Origen: país de origen, región, nombre nacional, regional o local.
- Identificación comercial: categoría, calibre, número de unidades, peso neto
- Marca oficial de inspección (facultativo)

5.3.3 Especificaciones

La funcionalidad de este prototipo se considera a partir de los resultados obtenidos de resistencia a la tracción y de la humedad que es capaz de retener el material compuesto desarrollado, sin embargo, es posible que estos resultados solo marquen la pauta para el aumento o disminución de la carga que soportará esta caja durante su manejo ya en la práctica.

5.4. Diseño preliminar.

En esta fase, llamada de diseño preliminar, se requiere hacer un estudio de factibilidad de distintas alternativas de solución. Posteriormente, se analiza el conjunto de soluciones para establecer las ventajas y desventajas de cada una de ellas. El propósito fundamental de esta fase es establecer cuál de las alternativas propuestas corresponde al mejor concepto de diseño. En términos de ingeniería es necesario hacer una revisión y evaluación de todos los antecedentes teóricos de preparación y construcción de láminas de cartón, en este caso se realizó considerando el desarrollo del material compuesto con fibras de agave y un polímero natural, con ello se da pauta al inicio del diseño preliminar (French, 1981).

La primera alternativa de diseño que se plantea es una caja de cierre propio. Estas cajas son las más comunes en el mercado. También se les denomina “caja americana” o “caja B1” y se forman generalmente de una pieza con una unión hecha mediante grapas (grapada) o utilizando algún tipo de pegamento (encolada). Este modelo de cajas se cierra mediante unas solapas superiores e inferiores y son ideales para el cierre con precinto o cinta adhesiva. Su gran versatilidad y resistencia hace que sean las más utilizadas. El diseño es muy simple y aporta una excelente relación calidad/precio. También se caracterizan por ser cajas plegables. Se pueden fabricar en múltiples medidas, calidades,

cantidades e impresiones. Incluso ofrecen la posibilidad de diseñar un interior para sujetar un producto. Su forma es completamente rectangular y de menos altura, el diseño permite armarlas completamente por ensamble (Figura 5.1).



Figura 5-1. Caja de solapas o americana de cierre propio

Tomada de la red <http://www.cervabox.es/productos/caja%20B-1%20CUATRO%20SOLAPAS%20O%20AMERICANA.jpg>

Como segunda alternativa de diseño se plantea una caja para embalaje, denominada caja telescópica (parcial o total). Estas cajas representan un elemento elegante hecho de diversos materiales, lo cual realza la presentación de los productos. La caja es alto regulable, es decir, protege los productos con la altura justa. Es muy resistente por su forma física, da mayor rigidez debido al doble grosor del cartón en los lados más estrechos. Así mismo, la caja ofrece una apertura fácil y rápida gracias a la lengüeta de la tapa. Se fabrica en cartón ondulado, con canal simple recubierto de kraft blanco. Tiene la ventaja de ser fácil de ensamblar y manipular, además ostenta la más alta resistencia al apilado, lo cual evita en mayor medida el combado de las mismas en una estiba; sin embargo, todas las ventajas que muestran se ven un tanto mermadas en el ámbito económico, ya que también son las más costosas. (Figura 5.2)



Figura 5-2. Caja telescópica total

Tomada de la red: <http://www.corrugadosespecialesizcalli.com/imgs/img-servicios-cajas-telescopicas.png>

Como tercera alternativa se propone una caja convencional (Figura 5.3), la cual muestra una gran variedad de recipientes comúnmente usados. Las dimensiones pueden modificarse para adaptarse a las necesidades del usuario.

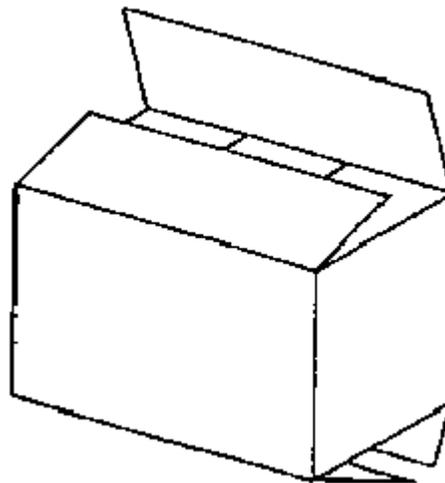


Figura 5.3: Caja convencional o de una pieza

Entre las propuestas de solución o alternativas planteadas para la optimización de un diseño conceptual del envase para frutos de papaya, se realizaron las posibles combinaciones de sus distintas características, y se analizaron los conceptos para compararlos entre ellos. Las combinaciones se realizaron de acuerdo a lo expuesto a continuación en la tabla 5-1.

Tabla 5-1. Características del conjunto de soluciones útiles

Propuestas de solución	Diseño y fabricación	Costo	Tipos de diseños
1 Caja telescópica	Poco accesible	Alto	Diseño de dos piezas. Utiliza más papel. Diseños muy rígidos. Altura variable.
2 Caja cierre propio	Accesible	Mediano	Diseño es de una sola pieza. Con cierre propio y sin tapas.
3 Caja convencional (De una pieza)	Muy accesible	Bajo	Diseño de una sola pieza. Incluye tapa superior e inferior. Sellado con cinta o grapas.

5.5. Selección del mejor concepto de diseño

De las tres propuestas de diseño mencionadas, se seleccionó la última con base en la metodología de la casa de calidad, así como los principios generales de diseño, como son: diseño simple, funcional, fácil mantenimiento, versátil fiabilidad, seguridad, simplicidad y bajo costo por lo que se obtuvieron los siguientes resultados.

El éxito de un producto depende de las decisiones que se tomen en la fase conceptual. No solo se considera la funcionalidad y la originalidad de la solución adoptada, si no el impacto significativo en el costo, y en este caso en específico, el los materiales que componen el producto, además también se considera el sitio objetivo donde realmente se requiere. A partir de las características mostradas en la tabla 5-1, se seleccionó el mejor concepto de diseño, el cual corresponde a la propuesta 3. Esta alternativa se presenta como la más viable debido a su diseño de una sola pieza. En este caso, el diseño del envase en una sola pieza es de gran importancia.

El mejor concepto de diseño contiene las características del diseño y el plan de manufactura y/o fabricación en función de la infraestructura y equipamiento del lugar donde se realizará el prototipo seleccionado, también hace énfasis en las siguientes condiciones:

- Diseño con buena funcionalidad
- Diseño con materiales de fácil adquisición
- Diseño de bajo costo.
- Diseño de fácil ensamble
- Diseño de fácil manejo
- Seguridad para el producto

El material considerado para la fabricación del envase es el material compuesto obtenido según el procedimiento expuesto en el capítulo 4, el cual fue evaluado bajo los parámetros siguientes: costo, resistencia, durabilidad, manejo, peso, entre otros.

Tabla 5-2. Evaluación del material compuesto utilizado en la construcción del envase

Prototipo	Características	Cantidad	1	2	3	4	Evaluación
Cuerpo del envase	Compuesto de fibras de agave y látex	1	√	√	√	√	√

5.6. Consideraciones adicionales del diseño conceptual

El diseño publicitario.- No se debe soslayar el hecho de que un envase es el elemento principal de persuasión para la compra de un producto, por lo tanto, también se debe considerar como un diseño publicitario. En este sentido, el diseño del envase considera la dimensión pragmática (los signos empleados), la dimensión sintáctica (la relación de los signos con la superficie del envase) y la dimensión semántica (el significado final que los signos originan en la mente del receptor).

En la práctica, el proceso publicitario se manifiesta a través de la conceptualización de la idea con métodos poco formales, hasta alcanzar una formalización gráfica completa. El proceso del diseño publicitario en su forma operativa, implica tres fases importantes: rough, boceto y layout (Reinoso, 2003).

Rough: “Boceto preliminar cuya única función es graficar una idea en pocos trazos”. También llamado pre-boceto, borrador o pequeño bosquejo; es un dibujo esquemático, un modelo artístico para dar una forma visual básica a una idea. Estos trazos conforman la conceptualización de la idea y pasan a ser el punto de partida para la consecución de un boceto.

Boceto: Es una representación gráfica de la idea, emplea elementos más cercanos a lo que se desea representar, formaliza la composición gráfica hasta un punto muy aproximado al dibujo final.

Layout: Es un diagrama de la idea a un 100% del tamaño de la pieza publicitaria final, pero su calidad de conceptualización ya debe ser corregida y lista para ser reproducida exactamente en el producto final del diseño.

Según Vidales (2003), en el diseño publicitario existen los siguientes principios:

- El principio Gestáltico o principio estructural se encarga de la estructura de la forma, donde cada elemento gráfico, signos, símbolos, y el conjunto, deberán funcionar en el concepto general del mensaje.
- El principio Sinérgico donde la estructura de los signos que conforman el aviso, es fecundada en una serie de interacciones dinámicas para constituir un mismo concepto.
- El Principio Cromático es donde el color juega un papel notablemente señalético y también emocional, debe ser tratado a nivel técnico y psicológico.
- El principio Simbólico constituye el universo de los signos y símbolos empleados en la conceptualización del diseño, considerando el significado de los elementos.
- El principio de la Universalidad representa tres vertientes: la universalidad temporal, sujeta a una época específica en el tiempo; la universalidad espacial, sujeta a una zona geográfica determinada y la universalidad psicológica, sujeta a la forma de pensar del grupo objetivo.

Finalmente, el color y la diagramación también forman parte del diseño. En su función práctica, el color distingue, identifica y designa en un rango de status. En su función simbólica, refleja emociones o advertencias, y en su función señalética es aplicado a señales informativas, prohibitivas y de advertencia. El color se usa para crear condiciones visuales de unificación, diferenciación, secuencia y carácter. Con el color es posible generar sentimientos, sugerir acciones y crear efectos, logrando la integración total del diseño.

Por otro lado, la diagramación es un sistema que organiza la información mostrada en el envase y depende totalmente de su forma, siempre considera la ubicación del producto en anaquel y su contacto con el consumidor, además ubica el nombre de la marca y del productor en todas las direcciones en las que pueda orientarse el observador. La diagramación y el diseño del envase son factores muy importantes para diferenciarlo productos similares.

5.7. Desarrollo de la caja

La propuesta de diseño para fabricar la caja con el material compuesto a partir de la fibra de agave y látex será de armado sencillo, al final se propone la sujeción de la misma mediante una cinta o grapas en lo que corresponde a la parte inferior y a la parte lateral, este método de unión se utiliza normalmente para construir cajas que sean resistentes a los esfuerzos mecánicos. El envase tiene un sistema de ventilación, debido a la consideración de que los productos a envasar son productos hortofrutícolas que continúan con un proceso biológico a pesar de haber sido desprendidos de la planta. Esta propuesta de diseño protegerá la papaya, manteniéndola inmóvil debido al sistema de embalaje que se creó en el interior de la caja. (Ver Figura 5-4)

Selección del material. Para la fabricación del envase se seleccionó el compuesto formado con un material de refuerzo (fibras de bagazo de agave) y una matriz polimérica (látex). Considerando que se va a utilizar cinta o grapas para el sellado del envase en la parte inferior y lateral.

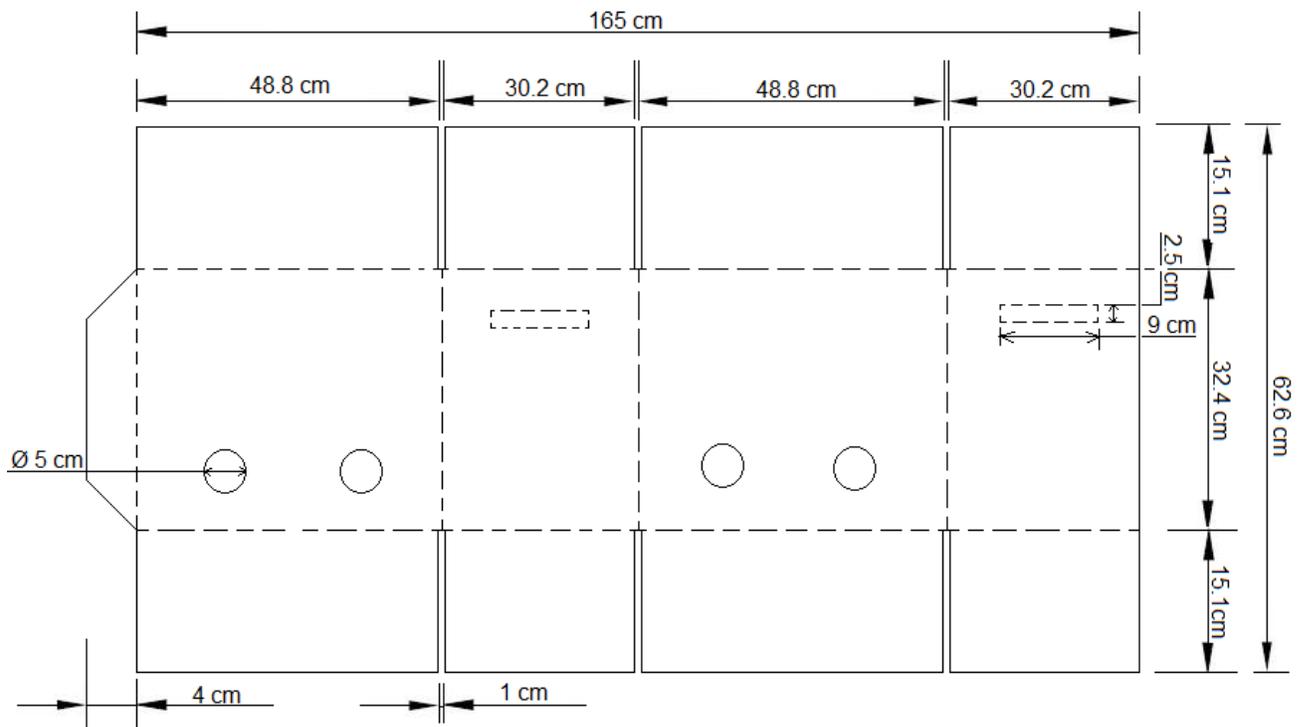


Figura 5-4. Diseño del desarrollo de la caja

5.7.1 Proceso de construcción del envase para papaya

Después de realizar las fases de diseño conceptual y de diseño de detalle del envase, la siguiente fase en el proceso de diseño de un producto corresponde a la construcción del mismo. A partir de los procedimientos establecidos en el capítulo cuatro para la elaboración del compuesto, se llega a la obtención de láminas de material, las cuales deberán ser capaces de garantizar la totalidad del área requerida para el desarrollo de la caja, de acuerdo al diseño conceptual y al diseño de detalle.

Una vez obtenida la hoja, se corta la según el área requerida (Figura 5-4). Para ello, se hace la medición correspondiente y luego se procede a realizar el corte de acuerdo con las dimensiones especificadas para la construcción. No se debe olvidar que el diseño está basado en las mismas características de construcción utilizadas para envases de cartón corrugado, es decir, el material compuesto tiene tres capas dos láminas exteriores y una placa en canaletas al centro.

Cuando se tienen las laminillas compuestas se procede a realizar el marcado, el troquelado y el corte de la lámina del material compuesto, lo que se obtiene es el desarrollo de la misma. Posteriormente, se procede a realizar el doblado de acuerdo a las especificaciones del proceso de diseño, es decir, se hace el ensamble para al fin obtener el envase. Al final del ensamble se hace la unión utilizando una cinta o grapas en la parte superior e inferior. A continuación se presentan los pasos a seguir para realizar el armado del envase diseñado, todo a partir del desarrollo del envase.

Paso 1: Doble inicial. Para iniciar con el armado del envase, se realiza el primer doblado tal como se observa en la Figura 5-5.

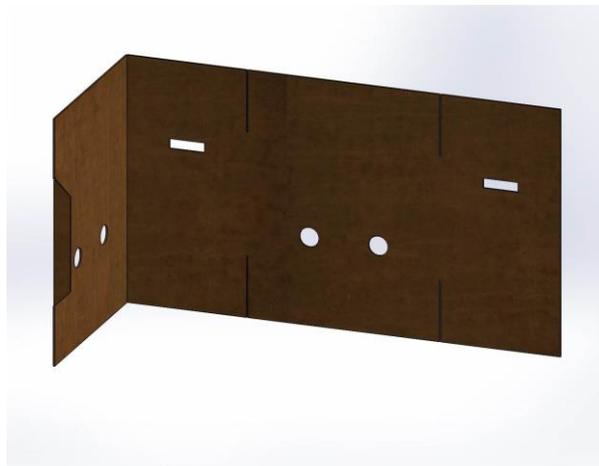


Figura 5-5. Doble inicial para el armado del envase

Paso 2: Dobleces del cuerpo de la caja. Tal como se observa en la Figura 5-6, se realizan los dobleces de las partes que formaran los costados de la caja.



Figura 5-6. Dobleces del cuerpo de la caja

Paso 3: Dobleces de la parte inferior de la caja. A continuación, se realizan los dobleces de la parte inferior (Figura 5-7) de la caja, quedando lista para ser utilizada como envase para los frutos de papaya.

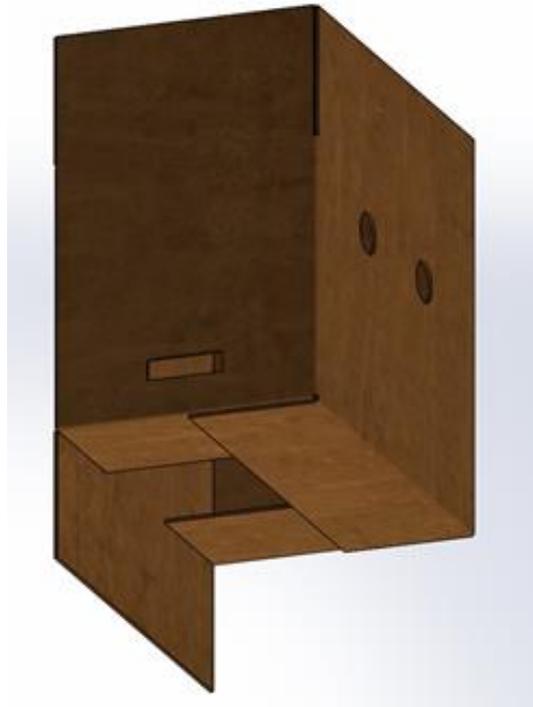


Figura 5-7. Doblez de la parte inferior

Paso 4: Doblez de la tapa superior. Al final, una vez que el envase ha sido ocupado por los productos, se realiza el cierre de las tapas superiores, doblándose tal como lo muestra la Figura 5-8.



Figura 5-8. Doblez de las tapas superiores

5.8. Evaluación de la funcionalidad del envase para papaya

Una prueba que se debe realizar al envase desarrollado se refiere a evaluar el peso de la estructura y su relación con la resistencia Mullen. Dado que este análisis se realiza en envases de cartón corrugado conforme al IMPEE (Rodríguez Tarango, J. A. 2009), se puede establecer que los resultados obtenidos no son de carácter universal. Así mismo, el IMPEE propone una fórmula para el cálculo de la prueba de compresión de canto o ECT por sus siglas en inglés (Edge Crush Test), misma que se utiliza para medir la capacidad de una caja para soportar la compresión de la hoja corrugada (medium), a lo largo del eje de las flautas, y las hojas planas (liners) de los extremos al médium, la cual queda establecida en la ecuación 5-1.

$$\text{ECT (Lb/pulg)} = 3.656 + 2.068 \times \text{MULLEN (Kg/cm}^2\text{)} \quad (5.1)$$

Existe una evaluación llamada prueba Mullen (Bursting Strength Test), la cual se emplea para medir la resistencia al estallamiento o a la perforación de un empaque corrugado y se expresa en Kg/cm² o en psi. El papel compacto (linerboard) proporciona la fuerza contra el estallamiento o la perforación de una lámina de cartón corrugado. El peso del papel se expresa en libras por 1,000 pies cuadrados (lbs/1000 sq. ft.) y determina en forma directa la fuerza del papel. La prueba de Mullen no debe de ser aplicada a cartón corrugado triple y proporciona resultados de poca confiabilidad cuando se aplica a cartón doble corrugado.

Otra prueba es la fórmula de McKee, la cual estima la resistencia a la compresión de la caja de cartón corrugado o la máxima carga que esta caja puede soportar por un momento. El análisis matemático utiliza como variables el calibre del cartón corrugado, el perímetro de la caja y el ECT de la lámina. El valor que proporciona la fórmula de McKee no toma en consideración factores tales como: humedad y

envejecimiento del cartón corrugado. Para el valor de resistencia a la compresión se utilizan los valores de ECT, calibre del cartón corrugado y largo, ancho y alto de la caja. La resistencia a la compresión de una caja de cartón corrugado es la cantidad de carga o presión que puede soportar la caja antes de que alguno de sus lados ceda ante la carga. La fórmula de McKee es una herramienta que ayuda a estimar cuantos kilos puede soportar una caja de cartón corrugado, y queda expresada en la ecuación 5-2.

$$C=5.874 (ECT) GXP \quad (5-2)$$

Dónde:

C= Compresión total de la caja (kg)

ECT= Resistencia a la compresión de canto de una muestra (kg/cm)

G= Grosor del cartón (cm)

P= Perímetro de la base de la caja 2 largos + 2 anchos (cm)

5.9. Sumario

5.10. Referencias Bibliográficas.

- CAC/RCP 44-1995. (1995). “Código internacional recomendado de prácticas para el envasado y transporte de frutas y hortalizas fresca”
- Codex Stan 1-1985. Rev.1-1991. V-1. Codex Alimentarius. Requisitos Generales.
- Codex Stan 183. 1993. “Norma Internacional de los alimentos. Papaya”.
- French, M., 1981, “Engineering Design, The conceptual Stage”, London: Heneiman
- Godoy L. (2009). Fabricación de Materiales Compuestos. <http://www.uprm.edu/civil/circ/newsite/webresearchers/LuisGodoy/courses/INCI6017/10%20Materiales/Compuestos%20Fabricacion.pdf> [Consulta: 10.06.14]
- NMX-EE-096-1981. Envase. Cartón corrugado. Cajas para envasar manzanas y peras en estado fresco. Especificaciones. Normas Mexicanas. Dirección General de Normas.
- Pugh, Stuart. (1991). Total design: integrated methods for successful product engineering, Wokingham: Addison-Wesley
- Ullman, David G. (1992). The mechanical design process, New York: McGraw-Hill International
- Ulrich, K., and Eppinger S., 2003, “Product Design and Development”, New York: Mc Graw Hill International.
- Yang, K., y El-Haik, B. (2003). Design for Six Sigma: A Roadmap for Product Development, USA: Mc Graw Hill.

CONCLUSIONES.

- La caracterización de las fibras del bagazo cocido de agave proporciona resultados de gran utilidad para propiciar la generación de aplicaciones alternativas que se puedan dar a dicho material residual.
- Una de las posibilidades de uso para las fibras estudiadas es su aplicación en el desarrollo de materiales compuestos.
- La necesidad de proteger y cuidar el medio ambiente, aprovechando los recursos biodegradables hace necesario el desarrollo de investigaciones sobre materiales residuales disponibles, en este caso, se elaboró un material compuesto, en forma de película, a partir de la combinación de un polímero natural y las fibras de agave.
- Es importante hacer un uso integral de los recursos, para el caso del agave en el Estado de Oaxaca, se concluye que es posible desarrollar una innovación tecnológica efectiva en la elaboración de un envase para la protección y manejo de frutos de papaya, pero incluso puede ser utilizado en diferentes productos hortofrutícolas.
- Es necesario realizar investigaciones sobre las propiedades mecánicas y propiedades de barrera del biomaterial desarrollado, ya que a partir de estas se obtiene una vasta cantidad de información para definir múltiples aplicaciones.
- A pesar de que las comparaciones entre distintos materiales son complicadas y algunas veces no posibles, es necesario hacer estudios a las fibras sobre parámetros específicos considerando los estudios realizados a fibras lignocelulósicas similares que han sido analizadas más a fondo.
- El material desarrollado debe ser analizado para determinar sus características antimicrobianas, ya que la película obtenida también podría utilizarse dentro de las plantas de alimentos, en superficies de maquinaria, recipientes en contacto con alimentos, así como para limpieza de superficies.

- En cuanto al diseño del envase se puede concluir que tiene mucho potencial de aplicación en la agroindustria. Pero existen pocos logros comerciales. Los que se deben reglamentar para su desarrollo.

RECOMENDACIONES PARA INVESTIGACIONES FUTURAS

A la vista de los resultados obtenidos queda claro que existen vacíos de investigación sobre puntos de interés que no han sido abordados en el presente trabajo, por lo tanto, permanecen abiertos a posibles trabajos futuros. Tomando en cuenta lo anterior se plasman las siguientes recomendaciones:

- Realizar un estudio general sobre la cantidad disponible de fibras en el estado de Oaxaca, para obtener el dato exacto al respecto de este material residual.
- Desarrollar una técnica para acondicionar las fibras residuales. Es necesario diseñar una línea de limpieza, es decir, un proceso que incluya los equipos para eliminar la medula, las vinazas, y todos los agentes contaminantes presentes en el bagazo cocido de agave, a fin de obtener fibras limpias.
- A partir de los resultados obtenidos de la caracterización física y química de las fibras se observa que es necesario promover el desarrollo de materiales compuestos utilizando fibras de agave, de tal forma que se amplíen las áreas de aplicación de este material.
- Definir y validar diferentes combinaciones de materiales compuestos (fibras-látex), para impulsar posibles aplicaciones de dichos materiales de acuerdo a las características obtenidas.
- Realizar la fabricación de un prototipo de envase y hacer las pruebas pertinentes, para verificar su factibilidad en esta aplicación específica.
- La adsorción de agua en las mezclas induce a una reducción drástica de las propiedades mecánicas (plastificación), por lo tanto es necesario estudiar el

efecto del tiempo en cuanto al proceso de fabricación y almacenamiento de las películas antes de estudiar sus propiedades.

- Al realizar las pruebas mecánicas se recomienda emplear probetas con geometría tipo cuello de botella, ya que la probeta tipo rectangular se rompe sobre las mordazas y no permite realizar el experimento de manera adecuada.
- Los ensayos de tensión-elongación realizados en este trabajo, para estudiar el comportamiento mecánico de los compuestos, fueron llevados a cabo a temperatura ambiente. Sería conveniente obtener información más precisa sobre el comportamiento mecánico realizando ensayos a los compuestos a diferentes temperaturas para determinar la posibilidad de ser utilizados en maquinaria de termo-conformado.
- Se debe hacer un análisis profundo de las propiedades físicas y de barrera de las películas a base fibras de agave y látex, para determinar mediante ensayos de aplicación de estas películas su factibilidad de uso en el recubrimiento de alimentos durante el almacenamiento.
- Evaluar la película del compuesto desarrollado a fin de verificar sus cualidades antimicrobianas del material como barrera de alto desempeño.
- Caracterizar la película para saber si hay o no cambios en la estructura de los materiales de estudio en las diversas etapas de procesamiento o al final la composición de la película, a través de un estudio de espectroscopia y un análisis de difracción de rayos X; sin embargo, las altas temperaturas de este ensayo limitan la realización de este estudio.
- Se recomienda realizar un estudio sistemático y bien fundamentado sobre la biodegradación de la película.
- Finalmente, se observa que las fibras de bagazo de agave representan un área de oportunidad que aún no ha sido estudiada, se desconocen muchas de sus características y por lo tanto de sus aplicaciones potenciales., por lo tanto se recomienda formar un grupo de investigación interdisciplinario e interinstitucional para realizar investigaciones en esta área.

3er Congreso Internacional de
energías
alternativas

EL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
Y EL CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIA APLICADA
Y TECNOLOGÍA AVANZADA UNIDAD QUERÉTARO

Extiende el Presente

RECONOCIMIENTO

A:

Martín Hidalgo Reyes, Lilia Leticia Méndez Lagunas, Oscar Ayala
Luna, Noé Martínez López, Erick López Vidaña

Por la presentación del poster titulado:

“Comportamiento del flujo de aire en un deshidratador”

Santiago de Querétaro, 31 de mayo al 3 de junio de 2011.


Dr. Martín de Jesús Nieto Pérez
Comité Organizador


Dr. Jorge Adalberto Huelta Ruelas
Director



“La Técnica al Servicio de la Patria”



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
Centro Interdisciplinario para el Desarrollo Integral Regional

1er. CONGRESO NACIONAL CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS PARA LA VIDA
Foro Regional de Soberanía Alimentaria
VII Jornadas Politécnicas

del 12 al 15 de septiembre de 2011, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca



OFICIO: SAI/DI/420/2011
FECHA: 12 de agosto de 2011
ASUNTO: Dictamen de ponencia

M.C. Hidalgo Reyes Martín
CIIDIR UNIDAD OAXACA

A nombre del Comité Organizador me complace en notificarle que su contribución intitulada: Análisis de la eficiencia de secado de nopal en un deshidratador de energías combinadas (solar - gas), ha sido **ACEPTADA** en la modalidad de **CARTEL** para participar en el eje temático **F2. Producción y preservación de la calidad alimentaria**

El día y hora de su participación podrá consultarla a partir del 19 de agosto en la página web del evento <http://intranet.cidiroax.ipn.mx/eventos/jornadas2011/>.

Esperamos saludarle personalmente en su visita, y que juntos hagamos de este evento una experiencia académica de amplios alcances.

Atentamente


Dr. Sadoth Sandoval Torres
Responsable Académico



INSTITUTO POLITÉCNICO
NACIONAL
CIIDIR UNIDAD OAXACA

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ORIZABÁ

CIM-2012

COLOQUIO DE INVESTIGACIÓN MULTIDISCIPLINARIA

Otorga el presente:

Reconocimiento

a:

**Oscar Ayala Luna, Karina García Lucas, Juan Rodríguez Ramírez, Lilia Méndez
Lagunas and Martin Hidalgo Reyes**

Por la presentación de la ponencia
"Isotermas de sorción de mucilago de pitaya secada por aspersión"
En el Coloquio de Investigación Multidisciplinaria,
Evento Internacional CIM-2012.

Área: IQ

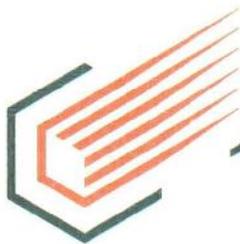
Ponencia:193



Ing. Rogelio García Camacho
Director

26 de Octubre del 2012
Orizaba, Veracruz.





del 26 al 30 de noviembre del 2012

**16 CONVENCIÓN CIENTÍFICA
DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**
PALACIO DE CONVENCIONES DE LA HABANA

El Comité Organizador
de la XVI Convención Científica
de Ingeniería Y Arquitectura
otorga el presente

CERTIFICADO

a: *MARTÍN HIDALGO REYES, MAGDALENO
CABALLERO CABALLERO, PEDRO CRUZ MEZA*

Por la presentación del trabajo titulado:

**Análisis comparativo del uso de Agave Tequilana Weber y Agave
Angustifolia Haw**

En el marco del:

**CONGRESO CUBANO DE LAS FIBRAS NATURALES,
FIBRATEC**

2012

**TALLER INTERNACIONAL DE LA MORINGA, FIBRAS
SOLUBLES Y MAS**

Dra. Alicia Alonso Becerra
Presidenta del Comité Organizador
Rectora del Instituto Superior Politécnico
José Antonio Echeverría

La Habana, Cuba

Ponente

48
ANIVERSARIO
cujae
2012



XV Congreso Nacional y I Internacional de Ciencias Agronómicas



del 24 al 26 de Abril del 2013

Otorga la presente

CONSTANCIA

MARTIN HIDALGO REYES

por su participación como

PONENTE

de la exposición

DISEÑO Y PRUEBA DE UN DISPOSITIVO MECANICO PARA DETERMINAR
LA RESISTENCIA AL CORTE, POR CIZALLAMIENTO, EN PROBETAS DE
Agave angustifolia Haw.

cuyos autores son

Pérez del R., R.; Hidalgo R., M.; Montes B., J. L.; Caballero C., M.

Chapingo, México. 24 al 26 de abril de 2013



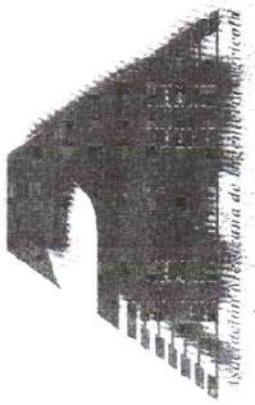
Dr. Juan Martínez Solís

Presidente



Dra. María del Rosario García Mateos

Secretaria



XXII Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola 1er. Congreso Internacional de Ingeniería Agrícola

Constancia

a:

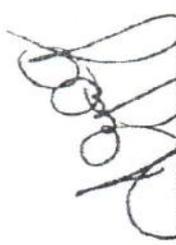
Martín Hidaigo Reyes, Magdalena Caballero Caballero, Luis Héctor Hernández Gómez y Oscar Ayala Luna.

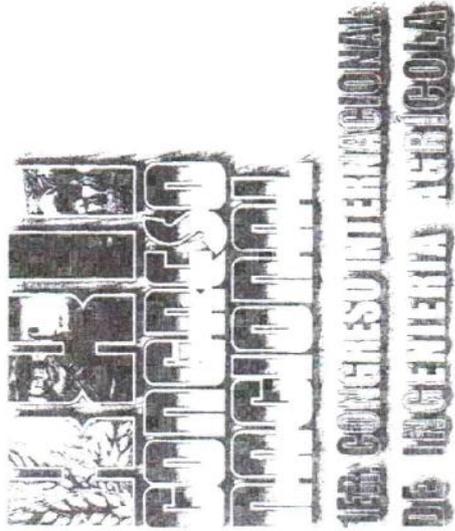
Por su Participación con la Ponencia:

DETERMINACIÓN DE ISOTERMAS DE SORCIÓN DE BAGAZO DE Agave Angustifolia Haw.

Coatlincán, Texcoco Estado de México, 18, 19 y 20 de septiembre de 2013.


Dr. Salvador García Barrón
Presidente de la AMLA


Dra. Aleana Yelva Ayala Garay
Directora del OCIMA-INIFAP





Universidad Veracruzana

Universidad Veracruzana

Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias



Otorga la presente constancia a:

C. Hidalgo Reyes M., Caballero Caballero M. y Solano Gómez R.

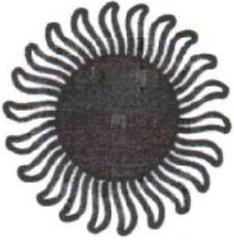
Por su participación como **PONENTE** en el **SIMPOSIUM AGRONOMIA Y AGRONEGOCIOS INTERNACIONALES** con el trabajo titulado: **"Aprovechamiento de las fibras de *Agave angustifolia* Haw, usos alternativos"**. Realizado en la Ciudad de Tuxpan de R. Cano, Ver. del 25 al 27 de septiembre de 2013.

Arturo Serrano Solís

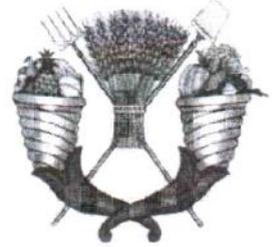
Dr. Arturo Serrano Solís
Director de la Facultad

Luz Hernández Sánchez

Mtra. Ma. de la Luz Hernández Sánchez
Coordinadora de Simposium



II Congreso Internacional y XVI Congreso Nacional de Ciencias Agronómicas



Otorga la presente

CONSTANCIA

A

Martin Hidalgo Reyes

por su participación como

PONENTE

de la exposición

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES QUÍMICAS EN FIBRAS DE *Agave
angustifolia*

cuyos autores son

Hidalgo R., M.; Caballero C., M.; Solano G., R.; Hernández G., L. H.

Chapingo, México. 23 al 25 de abril de 2014.

Dra. María del Rosario García Mateos
Presidenta

Dra. María Teresa Martínez Damián
Vicepresidenta



M. en C. Martin Hidalgo Reyes

Por este conducto tengo el gusto de informar a Usted que su artículo titulado *Chemical and morphological characterization of Agave angustifolia bagasse fibers*”, con registro #250, ha sido aceptado para su publicación en *Botanical Sciences*.

Estimo que en el mes de junio este será publicado Online y tendrá un número DOI (*Digital object identifier*). Ese será la fecha oficial de publicación.

Sin otro particular, hago propicia esta ocasión para enviarle un cordial saludo.

Atentamente
México, Distrito Federal, a 12 de marzo de 2015.

Juan Núñez-Farfán
Editor in Chief

Chemical and morphological characterization of *Agave angustifolia* bagasse fibers

Martin Hidalgo-Reyes^{1,3}, Magdaleno Caballero-Caballero¹, Luis Héctor Hernández-Gómez² and Guillermo Urriolagoitia-Calderón²

¹ Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, Oaxaca, Mexico

² Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Zacatenco, México, D.F., Mexico

³ Corresponding author: hogladi@hotmail.com

Abstract

The main aim of this study was to characterize cooked bagasse fibers from *Agave angustifolia* Haw. The fibers were characterized using scanning electron microscopy, differential scanning calorimetry, thermogravimetric analysis, X-ray Diffraction and chemical analysis. The tensile strength was also tested using fibers with a uniform length (30 mm). The fibers were light brown in color, with a mean diameter and length of 501 μm and 144 mm, respectively. Scanning electron microscopy images revealed elliptically shaped cells with varying lumen size. Holocellulose content was approximately 82.12%, and total lignin content was approximately 20.69%. Due to the crystallinity and lignin content, the fibers proved to be thermo-stable until 220 °C. The mean values of tensile strength, Young's modulus, % strain (ϵ), and ultimate tensile strength were determined via mechanical tests. The results are comparable to those of other common lignocellulosic fibers, confirming their potential use as a reinforcing element in a polymer matrix to form a new biodegradable composite.

Keywords: chemical composition, crystallinity, mechanical tests, morphology, thermal analysis

Resumen

El objetivo principal de este estudio fue caracterizar las fibras de bagazo cocido de *Agave angustifolia* Haw. Las fibras fueron caracterizadas a través de microscopía electrónica de barrido, calorimetría diferencial de barrido, análisis termogravimétricos, difracción de rayos X y análisis químico. También se realizaron pruebas de resistencia a la tracción usando fibras de longitud constante (30 mm). Las fibras presentaron un color marrón claro, con diámetro medio de 501 μm y longitud media de 144 mm. Las imágenes del microscopio electrónico de barrido mostraron células de forma elíptica con diferente tamaño de lumen. El contenido de holocelulosa fue alrededor de 82.12% y el contenido total de lignina de aproximadamente 20.69%. La fibra resultó ser térmicamente estable hasta 220 °C debido a la cristalinidad y el contenido de lignina. El esfuerzo de tensión, el módulo de Young, el porcentaje de deformación (ϵ) y el esfuerzo último de tensión fueron obtenidos de las pruebas mecánicas. Los resultados son comparables a los de otras fibras lignocelulósicas comunes, lo cual confirma que estas fibras tienen potencial como refuerzo en una matriz polimérica para formar un nuevo compuesto biodegradable.

Palabras clave: análisis térmico, composición química, cristalinidad, morfología, pruebas mecánicas.

Recently, research on plant fibers has been increasing due to the abundance of these materials and their status as renewable resources (Joseph *et al.*, 1999; Ghali *et al.*, 2006; Lucena *et al.*, 2009; Ku *et al.*, 2011; Kestur *et al.*, 2013). Consequently, this focus has led to further research on the specific characterization of individual plant fibers such as bamboo, okra, sisal, and henequen (Mishra *et al.*, 2004; Béakou *et al.*, 2008; De Rosa *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2012; Arakhiz *et al.*, 2013) and studies on composite materials (Mohanty *et al.*, 2002; Herrera-Franco and Valadez-González, 2005; Faruk *et al.*, 2012). However, fibers from *Agave* plants have been little studied: of the 256 recorded species, only a handful have been thoroughly analyzed, most notably *A. fourcroydes*, *A. salmiana*, *A. sisalana*, and *A. tequilana* (Li *et al.*, 2000; Piven *et al.*, 2001; Iñiguez-Covarrubias *et al.*, 2005; Velázquez-Jiménez *et al.*, 2013).

In general, information reported regarding the harvesting of the agave, using the by-products and plant parts, and characterizing the plant is very limited. Hence, many areas still need to be investigated. Although studies on *Agave angustifolia* are scarce (Vera Guzmán *et al.*, 2009; Esqueda *et al.*, 2011; Mejía-Franco and Arzate-Fernández, 2011; Bautista and Smit, 2012; Martínez Gutierrez *et al.*, 2012; Cruz *et al.*, 2013; Allsopp *et al.*, 2013), the potential benefits of this lignocellulosic material cannot be ignored. Additional research on its properties is needed so that future alternative uses may be identified and contribute to economic activity by increasing development opportunities, as has occurred with other species (Iñiguez-Covarrubias *et al.*, 2001; Piven *et al.*, 2001; Gil-Vega *et al.*, 2006; Bessadok *et al.*, 2008; Velázquez-Jimenez *et al.*, 2013).

Cooked *Agave angustifolia* bagasse is a material with numerous fibers and is a largely underutilized waste material from the mezcäl (alcoholic beverage) industry; however, these fibers, similar to other plant fibers, are lignocellulosic materials with technical, economic and ecological potential and therefore could be used in different industries. This agave, known as “maguey espadín,” is native to Mexico and is characterized by its spiral-shaped buds that extend radially. Its leaves are rigid, fibrous, linear to lance-shaped and fleshy, with an ascendant horizontal form, pale green to greenish grey in color, flat or rounded at the top, convex at the bottom, narrow and thick toward the base with lateral spines of 2 to 5 mm in length. The stem length ranges from 70 to 90 cm, with mature leaf length ranging from 110 to 130 cm and width from 8 to 10 cm (Chagoya, 2004). Commercially, the stem or “piña” is the most important part of the plant because it is the only part used in the production of mezcäl, which is the famous traditional alcoholic beverage in Oaxaca, Mexico. The agave is harvested, on average, eight years after being planted. It is then taken to an artisanal production plant, locally referred to as “palenque,” where the piñas undergo an artisanal process that involves cutting them into small chunks and then cooking, grinding, fermenting and distilling them. Bagasse is a waste product of this mezcäl production process. It is mainly composed of heterogeneous fibers that vary in length and non-fibrous organic material in the form of fine particles (Iñiguez-Covarrubias *et al.*, 2001). The bagasse is placed in piles (Figure 1) and later moved to agricultural fields for composting.

The mezcäl industry in Oaxaca annually produces 122,696 tons of bagasse, an underutilized waste product that is incinerated or dumped into rivers and streams, causing environmental problems (Martínez Gutiérrez *et al.*, 2013). Its natural degradation causes several problems such as soil pH modification, landscape impairment, odor generation, and an increased concentration of vermin, such as rodents, insects and pathogens; moreover, it is burned in some cases, resulting in environmental damage. However, bagasse fibers are renewable organic matter that have the potential to be used in composite materials to form alternative products and increase the value of the fibers. Because plant fiber characterization is essential to determine bagasse's specific properties and how they are affected by physical, chemical, and anatomical characteristics, the present study aims to characterize *Agave angustifolia* Haw bagasse fibers to determine their chemical, morphological and mechanical properties. The results reported herein provide information about the properties of this lignocellulosic material to determine potential alternative uses for these fibers. In summary, it is clear (i) that cooked bagasse is a byproduct of the mezcäl production process and that its disposal poses an environmental problem, (ii) that the enormous amount of lignocellulose in cooked bagasse has yet to be used to its full potential, and (iii) that reported data on the characteristics and economic potential of these fibers is scarce and widely dispersed.

Materials and methods

Sampling. Cooked bagasse was collected in San Baltazar Chichicapam (W L 96° 29' and N L of 16° 46' at 1,540 m.a.s.l.), which is located 56 km south of Oaxaca City, Oaxaca, Mexico (Anon., 2013). A 25 kg amount of bagasse was collected 3 d after distillation, and the quartering method was used. The bagasse was then washed with water to eliminate the remainder of the pith and other impurities. The fibers were manually selected and then dried at ambient conditions (relative humidity: 38% and temperature: 24 °C) for at least 72 h. Finally, 2.5 kg of fibers were obtained for testing.

Morphology. The fibers' diameter was measured via projection using a Leica DM500 optical microscope with an ICC50 digital camera. The diameter was measured over 100 fibers and measurements were taken at 10 points along the length of each fiber using the LAS EZ software. However, to determine the length of the fiber bundle, a total of 1,000 fibers were measured using a Mitutoyo ruler (No.182-307). For the scanning electron microscopy (SEM) study, the fiber specimens were mounted on cylindrical brass studs with carbon tape and a gold coating was applied using a Fine Coat Ion Sputter JFC 1100 metalizer (JEOL, USA). The fiber samples were observed with a JSM 6390 scanning electron microscope (JEOL, Japan), equipped with an EDAX INCA X-ACT x-ray spectrometer (Oxford Instruments, UK), at 15 keV.

Density. The density was determined from the green volume and the oven-dry weight of the fiber sample. In a vacuum atmosphere, the fibers were saturated with distilled water and the green volume of each sample was obtained using the immersion method. The samples were subsequently dried in a vacuum oven (Mod. 3618, Barnstead International, USA) at 103 ± 2 °C for 8 h. Then, the samples were cooled over silica and weighed again to obtain the weight of the oven-dry sample. The basic density was calculated with equation 1.

$$D_b \text{ (g/cm}^3\text{)} = P_0 / V_v \quad (1)$$

where D_b is the basic density, P_0 is the oven-dry weight of the fiber sample (g) and V_v is the green volume of the fiber sample (cm³).

Chemical characterization. The fibers were ground and sieved, the moisture content was determined, and then the fibers were chemically characterized with the following determinations: soluble products in hot/cold water, solubility in 1% NaOH solution, percentage of products traceable in an ethanol/toluene solution, the amount of extractables, soluble and insoluble lignin (Klason lignin) content, holocellulose and cellulose content, α -cellulose fraction, and finally, ash content. All of the tests were conducted in triplicate, and the values presented are the mean values.

Ground and sieved. – The fibers were ground with a Willy Mill (Arthur H. Thomas Type). The material was then sifted through sieves (ASTM E11) of different sizes (No. 40 and 60). The ground material passed through the 425 μ m sieve but did not pass through the 250 μ m sieve. For each test, ~2 g of ground fiber were used.

Moisture content. - The fibers' moisture content was determined using a Mettler Toledo HB43 humidity analyzer with an infrared halogen light and adjusting for standard drying with a response interval of 30 s and a drying temperature of 100 °C (at 2,200 m.a.s.l.).

Soluble products in cold/hot water. – The ASTM D1110-84R07 standard was followed to determine the content of soluble products in cold/hot water. The solubility was calculated with equation 2.

$$S \text{ (\%)} = [(W_1 - W_2) / W_1] \times 100 \quad (2)$$

where S is the percentage of soluble products in hot/cold water, W_1 is the sample's initial oven-dry weight and W_2 is the sample's oven-dry weight after the test.

Solubility in 1% NaOH solution. - To determine the solubility in 1% NaOH solution, the TAPPI T212 om-02 standard was followed.

Extractable products in ethanol/toluene solution. – The extractable products in the ethanol/toluene solution were determined in accordance with the ASTM D1107-96R07 standard. To calculate the extractives, an equation similar to equation 2 was used, but in this case, S (%) is the percentage of extractives in ethanol/toluene, W_1 is the oven-dry weight of the initial sample and W_2 is the oven-dry weight of the sample after ethanol/toluene extraction.

Klason Lignin. - To determine the acid insoluble lignin content, the ASTM D 1106-96 standard was followed. An extractive-free fiber sample was used. The calculations were made using equation 3.

$$L_K \text{ (\%)} = [P_{LKO} / P_0] \times 100 \quad (3)$$

where L_K (%) is a percentage of Klason lignin, P_0 is the oven-dry weight of the extractive-free fiber sample and P_{LKO} is the oven-dry weight of the Klason lignin.

Soluble lignin content. - To determine the content of acid soluble lignin, the TAPPI TUM 250 standard was followed. A sample (5 mL) of the hydrolyzed solution, obtained from the determination of the Klason lignin, was analyzed and a UV/vis spectrophotometer was used to measure the absorbance at 206 nm.

Holocellulose content and the α -cellulose fraction. - The holocellulose content was determined using the sodium chlorite method established by Rowell *et al.* (2005), and the α -cellulose fraction was determined following the ASTM D1103-60 standard.

Ash content. - The ash content was determined according to the ASTM D1102-84R07 standard and using equation 4.

$$\text{Ash (\%)} = (A_1 / A_2) \times 100 \quad (4)$$

where A_1 is the oven-dry weight of the ash and A_2 is the oven-dry weight of the sample.

X-Ray Diffraction (XRD) test. This test was conducted with a Bruker diffractometer, model D8-ADVANCE with $K\alpha_1$ Cu characteristic radiation and a Linx Eye device to capture diffracted simultaneous radiation at an interval of $3^\circ 2\theta$ with germanium monochromator, radiation ($\lambda = 1.540619 \text{ \AA}$), and in operating conditions of 40 keV and 20 mA. The regular diffraction method was used to determine the crystallinity of the fiber. A 100 mm^3 sample was used to obtain the best random distribution of the material to estimate the crystallinity index. The measurements were conducted with 1° openings. The crystalline index (CrI) was determined using equation 5 and according to the method proposed by Segal *et al.* (1959).

$$\text{CrI (\%)} = [(I_{002} - I_{am}) / I_{002}] \times 100 \quad (5)$$

where I_{002} is the intensity of the maximum crystalline spike at 2θ between 22° and 23° , I_{am} is the intensity of the minimum crystalline spike at 2θ between 18° and 19° .

Thermal analyses. To quantify the influence of drying on the agave fiber, thermogravimetric analyses (TGA) were conducted using a TGA Q5000 V3.10 Build 258 machine with a heating range of $20^\circ \text{C}/\text{min}$. The sample was analyzed in two atmospheres: one with nitrogen and the other with air/oxygen. The experimental conditions were nitrogen ($50 \text{ mL}/\text{min}$) at an interval of $25 - 500^\circ \text{C}$ and air ($50 \text{ mL}/\text{min}$) at an interval of $25 - 700^\circ \text{C}$. The differential scanning calorimetry (DSC) test uses the fiber's thermal characteristics as a function of combined moisture and heat treatments to identify transitions and structural modifications of the fiber. A differential scanning calorimeter TA-Instrument (model Q2000) was used in the $50 - 400^\circ \text{C}$ range with a heating speed of $10^\circ \text{C}/\text{min}$ and in a nitrogen atmosphere with a pressure of 10^4 Pa .

Tensile properties. Tensile strength testing was performed on individual fibers, considering the mean diameter value ($501 \mu\text{m}$) that was previously obtained. Fibers 30 mm in length were cut and clamped in a model 3382 universal testing machine (Instron, USA) with a 100 N testing capability load cell and loaded at a constant crosshead displacement rate of $5 \text{ mm}/\text{min}$ up to failure to obtain the stress-strain graphic. At least 50 samples were tested. The mean values of UTS, YM and ϵ were obtained from the stress-strain curves. All trials were conducted at an ambient temperature of $22 \pm 1^\circ \text{C}$ and a relative humidity of $38 \pm 2\%$.

Results

Fiber morphology. The fiber bundles were light brown in color. The histogram in figure 2 shows the frequency distribution of the fiber bundles' mean length. The length values range between 50 and 240 mm and 15 intervals were established. The results reveal a normal distribution with a standard deviation of 2.79 and a standard error of 0.0015 . The minimum and maximum length values were 53 and 232 mm , respectively. The highest frequency length was between 136 and 152 mm , and the mean fiber bundle length was 144 mm .

The results corresponding to the fiber bundles' diameter are presented in Table 1. The diameter varies along the fiber bundle. The mean fiber bundle diameter was $\sim 501 \mu\text{m}$. For each range, a similar variation trend was noticed with respect to the mean standard deviation. The standard deviations D_H and D_B are similar; however, a difference can be observed with respect to D_P .

Micrographs obtained by SEM show the transversal (Figure 3A) and longitudinal (Figure 3B) sections of the cellular structure of *Agave angustifolia* fiber bundles. The fiber bundle has a type C groove along the shaft and is grouping $\sim 190 - 210$ fibers (Figure 3A); they are separated by a middle lamella and are closely grouped. The fibers are oval and polygonal. The cell wall is thick and is composed of a primary and secondary wall, which are closely joined. The mean lumen of each fiber was $\sim 28.6 \mu\text{m}$ and mean wall thickness $\sim 2.4 \mu\text{m}$. The width of the lamella was $\sim 1.7 \mu\text{m}$. The width of the wall between two microtubes was $\sim 6.5 \mu\text{m}$, and almost at the periphery of the fiber bundle, intercellular spaces such as lumen of some parenchyma cells containing calcium oxalate crystals can be observed. The longitudinal disposition of a large quantity of individual fibers, and the internal structure of the microfibrils can be observed in Figure 3B. This view of the fiber bundle, indicates it is a vascular bundle where a scarce tracheal elements are appreciated. The remaining cells are walls of the fibers and outward from these, the short cells resembles parenchymal cells. The mean length and width of each fiber were $\sim 580.3 \mu\text{m}$ and $\sim 33.4 \mu\text{m}$, respectively. The external longitudinal surface of the fiber bundle is knotty and rough with transversal and longitudinal veins. An irregular grate pattern can be observed due to the grooves. Some damage can also be observed in Figure 3B as broken fiber walls; this is mechanical damage (ripped, scraped, and some fractures) that may be due to the mezcal-making process.

Density. The density determined for this fiber was $414.7 \text{ kg}/\text{m}^3$. Values have not been previously reported for this species, but the density values reported for the fibers of other species are as follows: $880 \text{ kg}/\text{m}^3$ for *A. tequilana* fibers (Kestur *et al.*, 2013), $740 \text{ kg}/\text{m}^3$ for *A. americana* fibers (Bessadok *et al.*, 2008) and $1450 \text{ kg}/\text{m}^3$ for *A. sisalana* fibers (Li *et al.*, 2000).

Chemical Composition. Table 2 summarizes the fiber's chemical analysis. It can be observed that the moisture content obtained (7.78%) is lower than that previously reported (10.1%) by Kestur *et al.* (2013). A similar situation was observed in almost all of the chemical analyses; for example, the solubility percentage values in cold/hot water ($2.66\% / 4.39\%$) are lower than values (not reported / 5.84%) documented by Iñiguez-Covarrubias *et al.* (2005) and values ($9.74\% / 10.64\%$) reported by Kestur *et al.* (2013), which were both from cooked *A. tequilana* material. However, the solubility value in the $1\% \text{ NaOH}$ solution obtained in this study was 20.22% , although in accordance with the TAPPI T212 om-02 standard, acceptable values are considered to be between 11.2% and 17.0% . In the case of the ethanol/toluene extracts, this value (1.54%) is lower than the 2.95% and 3.1% values reported for cooked *A. tequilana* material by Kestur *et al.* (2013) and Iñiguez-Covarrubias *et al.* (2005), respectively.

Similarly, the obtained value of Klason lignin (17.91%) is higher than that (7.2%) reported by Iñiguez-Covarrubias *et al.* (2005), whereas the obtained value of soluble lignin (2.78%) is lower than that (5.12%) reported by Kestur *et al.* (2013). Thus, some degree of similarity can be observed in total lignin content between the obtained value (20.69%) and that previously (21.1%) reported by Kestur *et al.* (2013); however, the total lignin content is higher than the values for raw fiber (16.8%) and cooked fiber (7.2%) reported by Iñiguez-Covarrubias *et al.* (2001b) and

reported by Iñiguez-Covarrubias *et al.* (2005), respectively. In relation to the α -cellulose content, the value obtained (55.03%) is higher than that reported (49.43%) by Kestur *et al.* (2013) and also higher than that reported (41.90%) by Iñiguez-Covarrubias *et al.* (2005) but is lower than that reported (64.9%) when raw material was used (Iñiguez-Covarrubias *et al.*, 2001a).

Finally, the ash content value (1.28%) is lower than the values (5.30% and 8.8%) reported by Kestur *et al.* (2013) and Iñiguez-Covarrubias *et al.* (2005), which were both from cooked *Agave tequilana* material.

X-ray diffraction analysis (XRD). Figure 4 shows the x-ray diffraction pattern of *Agave angustifolia* fibers. Various and repeated sharp peaks can be observed, indicating a crystalline phase. The diffraction pattern displays peaks corresponding to A-type amylose allomorph. This is characterized by a large spike at $2\theta = 16.5^\circ$ and a very large spike at $2\theta = 21.9^\circ$, which corresponds to the organic phase and the consequence of the specific reflection of their crystalline structure. The crystallographic information on the phases presented by the analyzed fibers, in relation to the qualitative analysis, shows that the crystalline phase corresponds to the compound calcium oxalate hydrate ($\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot (\text{H}_2\text{O})$) with a monoclinic crystalline system. The inorganic crystal structure database is 030782 and the values obtained from this analysis are as follows: space group: P 2₁/c; a = 6.29 Å; b = 14.58 Å; c = 10.11 Å; $\alpha = \gamma = 90^\circ$; $\beta = 109.46^\circ$; V = 874.9 Å³.

Thermal Studies. Figure 5 shows the graphics in two atmospheres: nitrogen and air, respectively. The lost fiber weight at three different temperatures: ~7.8% at 80 °C (fiber's humidity content), 59.8% at 298 °C, and finally, 22% at 618 °C. Between 80 and 225 °C, the sample was thermally stable, which suggests that these fibers are safe to use up to a maximum temperature of 225 °C. The lost sample weight showed temperatures greater than 220 °C and up to 620 °C. Moreover, a residue of approximately ~5% can be observed in Figure 5A and is most likely of a mineral nature.

The free water content was measured by the vaporization temperatures and obtained with the DSC study. In this case, the fibers present (Figure 5C) two endothermic peaks, one at 147.37 °C and the other at 203.83 °C, which correspond to fiber dehydration and cellulose decomposition, respectively, and the quantity of energy used to evaporate the water was $\Delta H = 3.8 \text{ J/g}$ and $\Delta H = 18.56 \text{ J/g}$, respectively.

Tensile properties. Figure 6 shows the typical stress-strain curve of *Agave angustifolia* fibers. The principal tensile properties were evaluated using these curves. The mean UTS value (86.9 MPa) presented a standard deviation of 0.314; the mean YM value (2.509 MPa) presented a standard deviation of 0.721; and the mean ϵ value (14.187) showed a standard deviation of 5.414. This property does not differ significantly with the diameter at the 0.05 level. However, the mean TS value obtained in this study was 44.167 MPa.

Discussion

All of the study results take into account that the field of lignocellulosic fibers is very broad and that their properties depend to a great extent on factors such as climate variation, plant age, experimental processes, and conditions during testing (John and Thomas, 2008).

Fiber morphology. In this case, the fiber bundles have a similar morphology to that of other plant fibers, such as *Agave sisalana* (Alves *et al.*, 2013) and *A. tequilana* (Kestur *et al.*, 2013) because all of them are composed of many fiber cells. Each fiber cell is united by the middle lamella, which consists of cellulose and lignin, but they differ by factors such as the number of fiber cells, the cell-wall size, the thickness of the secondary cell-walls, the real cross-section (the total area minus the lumen area), and the fiber bundle cross-section area. According to Alves *et al.* (2013), it is possible to correlate fiber morphology with tensile strength properties. Thus, each fiber bundle presents its own specific morphological characteristics and therefore its respective mechanical behavior. Fiber strength can be an important factor in selecting a specific natural fiber for a particular application, and changes in physical properties can be due to differences in fiber morphology. Major differences in structure, such as density and cell wall thickness, length and diameter, result in differences in physical properties (Faruk *et al.*, 2012).

Knowledge of fiber bundle length and width (diameter) is very important because it provides an indication of the possible strength properties of different types of natural fibers (Alves *et al.*, 2013). In this study, the fiber bundles show a wide variability in length, which corresponds to the standard deviation value (2.79). The mean length (144 mm) of the fiber bundle is longer than that reported (110 mm) by Kestur *et al.* (2013) for *Agave tequilana*. It could be due to factors such as the variety, maturity, and the analyzed part of the plant, but it also largely depends on the material extraction process. In this case, the process is purely manual; "piñas" are cut completely at random using machetes and axes, whereas other materials, such as *A. tequilana*, are processed in an industrial way (machine cut), and therefore, the differences between the results and those reported previously are understandable. A different situation occurs with respect to the diameter, despite varying along the fiber bundle, but the fiber extraction process does not have any influence on this variability. In addition, the mean diameter (501 μm) obtained is less than that reported (592.34 μm) by Kestur *et al.* (2013) for *A. tequilana* fiber bundles, but this variability could be due to irregular fiber growth as a result of plant growing conditions such as climate and soil type, harvest age, and plant species.

Density. It is important to know the different properties of each natural fiber, such as density, to be able to better exploit its potential. In this case, the obtained density value (414.7 kg/m^3) is lower than that reported for other species of Agave (Li *et al.*, 2000; Bessadok *et al.*, 2008; Kestur *et al.*, 2013). This may be due to differences between the species but also to the treatment of the fiber during the mezcalt production process. In this sense, it should be noted that the bagasse used in this study was subjected to physical and chemical conditions that caused a natural decomposition process that can also influence density. Biocomposites reinforced with natural fibers have been developed over the past several years because of their significant processing advantages, biodegradability, low cost, renewable nature, high specific strength, and low relative density (Faruk *et al.*, 2012). In addition, natural fibers are suitable for reinforcing polymeric matrix composites due to the characteristics mentioned above.

Chemical Composition. In addition to morphology, chemical composition can also have a bearing on the properties of natural fibers (Cedeño-Cruz and Alvarez-Jacobs, 1999). Due to the variety and reported data, the main comparison of this analysis was made with data from *Agave tequilana* previously reported by Kestur *et al.* (2013). Although they have almost the same physical characteristics and both are from the same genus, their chemical constituents show differences as observed in the results section. Hot water was used to extract tannins, rubber, sugar, starch, and colored materials. Generally, natural resins are thermally stable and insoluble, which could influence solubility in hot water values for the current study and in previous works. The solubility percentage in hot water (4.39%) is lower than the values (5.84% and 10.64%) reported by Iñiguez-Covarrubias *et al.* (2005) and Kestur *et al.* (2013) for cooked *A. tequilana* bagasse fibers. This may be because the processes are different. *Agave angustifolia* fibers are cooked, fermented, and distilled, which is an aggressive treatment, but *A. tequilana* fibers do not undergo a distillation process because they are only cooked, fermented, and squeezed.

In this study, the solubility value (20.22%) obtained in the 1% NaOH solution is higher than the acceptable value range (from 11.2 to 17.0%) established in the TAPPI T212 om-02 standard. Therefore, the value obtained suggests that the fibers were partially degraded, due to fermentation and distillation. This is most likely because the analyzed fibers were obtained from the waste of the mezcal production process. However, the value obtained is lower than that (35.73%) reported by Kestur *et al.* (2013), which could be due to the amount of time the bagasse is in the waste pile prior to being collected. As long as the material remains in the waste pile, its degradation process never stops. In this case, cooked bagasse was collected 3 d after distillation and tested 30 d thereafter.

Lignocellulosic material was analyzed to determine the extent of fungal attacks and the effect of other harmful agents, such as heat, light, and oxidation, among others. These data are important due to the natural humidity of this waste product and its high probability of deterioration. Raw *Agave* fibers impede decomposition, but cooked bagasse fibers can show signs of decomposition prior to testing. Thus, the time period prior to testing is a factor that affects the fibers' chemical composition. These tests were conducted 30 d after collection; fibers (clean and dry) were stored at a temperature of 23 ± 1 °C and a relative humidity of 38%. Therefore, fiber degradation as a result of fungi or bacteria is not likely to have occurred during this period.

The main component of fiber resistance is cellulose. Sisal fiber has a cellulose content of approximately 73% (Sydenstricker *et al.*, 2003), *Agave tequilana* has a cellulose content of 73.6% (Kestur *et al.*, 2013), jute has a cellulose content of 65% (Wang *et al.*, 2008), and the studied fiber has a cellulose content of 48%. Therefore, *A. tequilana* and sisal fibers may have higher resistance, not only because of their morphological characteristics but also because of their higher cellulose content. The total of the chemical components (cellulose + lignin + ash) is ~104%. In theory, the sum of all of the components identified using chemical analysis for lignocellulosic materials should be 100%; however, this value may vary due to the superposition and partial loss of some components such as the failure to consider the residues present in the material (Browning, 1967). Differences between the obtained data and previously reported data for the agave fibers of other species could be due to a variety of factors, including geographical location, harvesting, plant maturity, fiber extraction process, and applied methodology to identify properties (Iñiguez-Covarubias *et al.*, 2005; Parra *et al.*, 2010; Kestur *et al.*, 2013).

X-ray diffraction analysis (XRD). The crystalline index obtained for this fiber was 43%. It had a unique diffraction pattern that is typical in cellulose fibers. Some points suggest a highly organized crystalline material, most likely due to the concentration of the internal microcrystalline impurities observed in the fiber (Figure 3A). This confirms the sharp peaks observed in the diffractogram. The results of the x-ray diffraction study show various flat peaks, which can be associated with the crystalline character of the fiber and also due to a type of sugar or another substance added during the fermentation process (Tronc *et al.*, 2007). In this case, WinPLOTR software was used to trace and visualize the diffractogram corresponding to the diffraction profiles of the crystalline part, the dispersion of the amorphous part and data processing. The diffraction database provided by the Inorganic Crystal Structure Database was used to identify the phases.

Thermal Studies. One of the limiting factors in the use of natural fibers as a reinforcement in biocomposites is their low thermal stability. For this reason, the thermal stability of cooked bagasse fibers was determined using thermogravimetric analysis (TGA), which provides information about the thermal stability of the fibers and their composition in terms of volatile substances, organic compounds and inorganic residuals. The thermal studies were conducted in two atmospheres, nitrogen and air. The first atmosphere impeded combustion and allowed the decomposition of the components one by one. It is therefore possible to identify the decomposition regions of the fiber's components. In the second atmosphere, the reactions occurred simultaneously, and it is therefore not possible to separate the different decomposition processes of the fiber's components such as hemicellulose, cellulose and lignin (Tomczak *et al.*, 2007). In this study, the weight loss that occurred at temperatures higher than 220 °C and up to 620 °C may be attributed to the decomposition of the different cell types within the fiber. The above weight losses can be attributed to the oxidation of the fragments upon exposure to air. The sample was thermally stable, which suggests that these fibers are safe to use up to a maximum temperature of 225 °C. This temperature can be considered a thermal stability value for this fiber and is directly related to the high crystallinity values (43.0%) and the high lignin content (20.69%). Therefore, it can be concluded that the TGA curves indicate the fiber's humidity content, thermal stability and ash content.

The 7.8% water loss observed in the TGA curve is water recuperated as capillary water, which can be related to ambient humidity and temperature throughout the fiber. In fact, the value corresponds to the water content (7.8%) and is calculated as the difference between the weight of the fiber before and after drying at a constant temperature. It must be noted that even though the fibers were dried prior to testing, it is difficult to completely eliminate the fiber's water content due to its hydrophilic nature. Therefore, this water is recuperated by other components of the fiber (soluble and insoluble lignin, along with small quantities of amorphous cellulose). This is due to the fiber's high crystallinity.

It has been reported (Princi *et al.*, 2005) that the best estimation of the free water content in cellulosic materials is obtained using vaporization temperatures with DSC. In this case, the fibers show two endothermic peaks (at 147.37 and 203.83 °C), corresponding to fiber dehydration and cellulose decomposition, respectively. This is in contrast with *Agave tequilana*, where only one peak was observed at 89 °C (Kestur *et al.*, 2013) corresponding to fiber dehydration. The comparison of these results with those recently obtained for *A. tequilana* by Kestur *et al.* (2013) could be useful as the two fibers are chemically similar, although they differ in water content. In addition, they have different weight losses at similar temperatures, although such a comparison is not suitable due to differences in experimental conditions. Kestur *et al.* (2013) reported a spike and massive sample losses of 10.8% at 80 °C, 63.8% at 360 °C, and 20% at 620 °C, which were attributed to water elimination and cellulose and lignin degradation, respectively. Consequently, the findings of this study can be similarly understood, in relation to previously reported results for lignocellulosic materials, due to water elimination and cellulose and lignin degradation.

Tensile properties. The stress-strain curve (Figure 6) shows the typical behavior of a viscoelastic material, which is understandable due to the nature of this lignocellulosic fiber. A continual stress increase was observed until a maximum strain was reached, at which point the fiber failed. In this case, the curve obtained was similar to those reported for similar fibers such as those for *Agave tequilana* mentioned by Kestur *et al.* (2013). The values found for YM and TS show that these properties differ significantly with diameter at the 0.05 level. The values obtained present variability, as do the results of other natural fibers analyzed in previous studies. In this study, the fibers with the largest diameter had higher values, in terms of mechanical properties, and the fibers with the smallest diameter had lower values. The fiber's elongation demonstrates that it is a fragile material, and thus, its characteristics are similar to those of most reinforcements for composite materials. Theoretically, this fiber

stands out as an excellent substitute for natural and even synthetic fibers for applications in which criteria such as low cost, recyclability, weight, low density, and high specific strength are relevant.

In conclusion, the agave bagasse is a waste material from the mezcal process and has an abundant availability; therefore, knowledge of the properties of these cooked fibers provides alternatives, not only as a value addition to these residues but also to generate job opportunities in the particular region where the species grows. In addition the bagasse fibers of *Agave angustifolia* have the potential to be used in diverse applications because they are comparable with those reported for other common lignocellulosic fibers. Due to the fibers' thermal properties, low density, and high cellulose content, a future application could be their incorporation into a polymeric matrix to produce potential composite materials.

Acknowledgements

The senior author would like to thank the Universidad Autónoma Chapingo and particularly Marcos González Peña, Director of the Wood Technology Laboratory, for his invaluable help over the course of this research. Thanks are also extended to Greta Rosas Saito (Colegio de Postgraduados) for SEM technical assistance, to Yolanda Ortiz Hernández (CIIDIR-OAXACA) for her advice and criticisms of the manuscript, and two anonymous reviewers which help to clarify some ideas.

Literature cited

- Allsopp P., Possemiers S., Campbell D., Oyarzábal I.S., Gill C. and Rowland I. 2013. An exploratory study into the putative prebiotic activity of fructans isolated from *Agave angustifolia* and the associated anticancer activity. *Anaerobe* **22**:38-44.
- Alves-Fidelis M.E., Castro-Pereira T.V., Martins-Gomes O., deAndrade-Silva F. and Toledo-Filho R.D. 2013. The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers. *Journal of Materials Research and Technology* **2**:149-157.
- Anonymous, 2013. Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México. Ayuntamiento de San Baltazar Chichicapam. Gobierno del Estado de Oaxaca.
<<http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/EMM20oaxaca/municipios/20112a.html>> (accessed 25.05.14).
- Arrakhiz F.Z., El Achaby M., Malha M., Bensalah M.O., Fassi-Fehri O., Bouhfid R., Benmoussa K. and Qaiss A. 2013. Mechanical and thermal properties of natural fibers reinforced polymer composites: Doum/low density polyethylene. *Materials and Design* **43**:200-205.
- Bautista J.A. and Smit M.A. 2012. Sustentabilidad y agricultura en la "región del mezcal" de Oaxaca. *Revista Mexicana Ciencias Agrícolas* **3**:5-20.
- Beakou A., Ntenga R., Lepetit J., Atéba J.A. and Ayina L.O. 2008. Physico-chemical and microstructural characterization of "*Rhectophyllum camerunense*" plant fiber. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* **39**:67-74.
- Bessadok A., Marais S., Roudesli S., Lixon C. and Métayer M. 2008. Influence of chemical modifications on water-sorption and mechanical properties of Agave fibres. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* **39**:29-45.
- Browning BL. 1967. *Methods of Wood Chemistry*, Vol. 1, Interscience Publishers, New York.
- Cedeño-Cruz M. and Alvarez-Jacobs J. 1999. Production of tequila from agave: historical influences and contemporary processes. In: Jaques K.A., Kesal D.R. and Lyons T.P. Ed. *The Alcohol Textbook: A Reference for the Beverage, Fuel and Industrial Alcohol Industries*, pp. 223-245. Nottingham University Press, Nottingham, U.K.
- Chagoya-Mendez V.M., 2004. Diagnóstico de la cadena productiva del sistema producto maguey-mezcal. Consejo Oaxaqueño del maguey y mezcal A.C.
<<http://www.oedrus-oaxaca.gob.mx/Estudios/diagnostico/SPMM%20VERSION%20FINAL.swf>> (accessed 20.03.14)
- Cruz-García H., Enríquez-del Valle J.R., Velasco-Velasco A.V., Ruiz-Luna J., Campos-Ángeles G.V. and Aquino-García D.E. 2013. Nutrimientos y carbohidratos en plantas de *Agave angustifolia* Haw y *Agave karwinskii* Zucc. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* **6**:1161-1173.
- De Rosa I.M., Kenny J.M., Puglia D., Santulli C. and Sarasini F. 2010. Morphological, thermal and mechanical characterization of okra (*Abelmoschus esculentus*) fibres as potential reinforcement in polymer composites. *Composites Science and Technology* **70**:116-122.
- Esqueda M., Gutiérrez A., Palomino G., García-Mendoza A. and Terrazas T. 2011. Morphological characterization and variation in the total content of reducing sugars in wild populations of *Agave angustifolia* Haw. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences* **6**:462-468.
- Faruk O., Bledzki A.K., Fink H.P. and Sain M. 2012. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in Polymer Science* **37**:1552-1596.
- Ghali L., Zidi M. and Roudesli S. 2006. Physical and mechanical characterization of technical esparto (alfa) fibres. *Journal of Applied Science* **6**:2450-2455.
- Gil-Vega K., Díaz C., Nava-Cedillo A. and Simpson J. 2006. AFLP analysis of *Agave tequilana* varieties. *Plant Science* **170**:904-909.
- Herrera-Franco P.J. and Valadez-González A. 2005. A study of the mechanical properties of short natural-fiber reinforced composites. *Composites Part B: Engineering* **36**:597-608.
- Íñiguez-Covarrubias G., Acosta TN., Martínez CL., Parra J. and González O. 2005. Utilización de subproductos en la industria tequilera. Parte 7. Compostaje de bagazo de agave y vinazas tequileras. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* **21**:37-50.
- Íñiguez-Covarrubias G., Lange S.E. and Rowell R.M. 2001a. Utilization of byproducts from the tequila industry: Part 1: agave bagasse as a raw material for animal feeding and fiberboard production. *Bioresource Technology* **77**:25-32.
- Íñiguez-Covarrubias G., Diaz-Teres R., Sanjuan-Dueñas R., Anzaldo-Hernández J. and Rowell R.M. 2001b. Utilization of by-products from the tequila industry. Part 2: potential value of *Agave tequilana* Weber azul leaves. *Bioresource Technology* **77**:101-108.
- John M., and Thomas S. 2008. Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate Polymers* **71**:343-364.
- Joseph K., Tolêdo-Filho R.D., James B., Thomas S. and Hecker-deCarvalho L. 1999. A review on sisal fiber reinforced polymer composites. *Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental* **3**:367-379.
- Kestur G. S., Flores-Sahagun T.H.S., Dos Santos L.P., Dos Santos J., Mazzaro I. and Mikowski A. 2013. Characterization of blue agave bagasse fibers of Mexico. *Composites: Part A*. **45**:153-161.
- Ku H., Wang H., Pattarachaiyakoo N. and Trada M. 2011. A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering* **42**:856-873.
- Li Y., Mai Y.W. and Ye L. 2000. Sisal fibre and its composites: a review of recent developments. *Composites Science Technology* **60**:2037-2055.
- Liu D., Song J., Anderson D.P., Chang P.R. and Hua Y. 2012. Bamboo fiber and its reinforced composites: structure and properties. *Cellulose* **19**:1449-1480.
- Lucena M.P., Suarez A. and Zamudio I. 2009. Desarrollo de un material compuesto a base de fibras de bambú para aplicaciones aeronáuticas. *Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales* **S1**:1107-1114.

- Martínez-Gutiérrez G.A., Iñiguez-Covarrubias G., Ortíz-Hernández Y.D., López-Cruz J.Y. and Bautista-Cruz M.A. 2013. Tiempos de apilado del bagazo del maguey mezcalero y su efecto en las propiedades del compost para sustrato de tomate. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* **29**:209-216.
- Martínez-Gutiérrez G.A., Zárate-Altamirano G. and Urrestarazu M. 2012. Maguey bagasse waste as sustainable substrate in soilless culture by melon and tomato crop. *Journal of Plant Nutrition* **35**: 2135-2144.
- Mejía-Franco R. and Arzate-Fernández A.M. 2011. Capacidad embriogénica de callos inducidos en ejes embrionarios cigóticos de *Agave angustifolia* Haw. *Revista Fitotecnica Mexicana* **34**:101-106.
- Mishra S., Mohanty A.K., Drzal L.T., Misra M. and Hinrichsen G. 2004. A review on pineapple leaf fibers, sisal fibers and their biocomposites. *Macromolecular Materials and Engineering* **289**:955-974.
- Mohanty A.K., Misra M. and Drzal L.T. 2002. Sustainable bio-composites from renewable resources: opportunities and challenges in the green materials world. *Journal of Polymers and the Environment* **10**:19-26.
- Parra-Negrete L.A., del Villar-Quiñones P. and Prieto-Rodríguez A. 2010. Extracción de fibras de agave para elaborar papel y artesanías. *Acta Universitaria* **20**:77-83.
- Piven N.M., Barredo-Pool F.A., Borges-Argáez I.C., Herrera-Alamillo M.A., Mayo-Mosqueda A., Herrera-Herrera J.L. and Robert M.L. 2001. Reproductive biology of henequen (*Agave fourcroydes*) and its wild ancestor *Agave angustifolia* (Agavaceae). I. Gametophyte development. *American Journal of Botany* **88**:1966-1976.
- Princi E., Vicini S., Pedemonte E., Arrighi V. and McEwen I. 2005. Thermal characterization of cellulose based materials: investigation of water content. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* **80**:369-73.
- Rowell R.M., Pettersen R., Han J.S., Rowell J.S. and Tshabalala M.A. 2005. Cell wall chemistry. In: Rowell R.M. Ed. *Handbook of Chemistry and Wood Composites*, pp. 62-63, Taylor & Francis Group, Boca Raton.
- Segal L., Creely L., Martin A.E. and Conrad C.M. 1959. An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using X-ray diffractometer. *Textiles Research Journal* **29**:786-794.
- Sydenstricker T.H.D., Mochnaz S. and Amico S.C. 2003. Pull-out and other evaluations in sisal-reinforced polyester biocomposites. *Polymer Testing* **22**:375-380.
- Tomczak F., Sydenstricker T.H.D. and Satyanarayana K.G. 2007. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part II: Morphology and properties of Brazilian coconut fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* **38**:1710-1721.
- Tronc E., Hernández-Escobar C.A., Ibarra-Gómez R., Estrada-Monje A., Navarrete-Bolaños J. and Zaragoza-Contreras E.A. 2007. Blue agave fiber esterification for the reinforcement of thermoplastic composites. *Carbohydrate Polymers* **67**:245-255.
- Velázquez-Jiménez L.H., Pavlick A. and Rangel-Mendez J.R. 2013. Chemical characterization of raw and treated agave bagasse and its potential as adsorbent of metal cations from water. *Industrial Crops and Products* **43**:200-206.
- Vera-Guzmán A.M., Santiago-García P.A. and López M.G. 2009. Compuestos volátiles aromáticos generados durante la elaboración de mezcal de *Agave angustifolia* y *Agave potatorum*. *Revista Fitotecnica Mexicana* **32**:273-279.
- Wang W., Cai Z. and Yu J. 2008. Study on the chemical modification process of jute fiber. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics* **3**:1-11.

Table 1. Diameter of *Agave angustifolia* fiber bundle. SD: Standard deviation

Diameter	D ₁₁	D ₁₂	D ₁₃
Range (mm)	[0.20 - 0.39]	[0.40 - 0.59]	[0.60 - 0.80]
Min	0.245	0.408	0.603
Max	0.381	0.581	0.766
Mean	0.329	0.470	0.676
SD	0.047	0.054	0.048

Table 2. Comparison of chemical composition of cooked bagasse fibers in two *Agave* species. *Data from Kestur *et al.* (2013). Nr: Not reported.

Content	<i>A. angustifolia</i> (%)	<i>A. tequilana</i> * (%)
Moisture	7.78 ± 0.37	10.1 ± 0.05
Solubility in cold water	2.66 ± 0.12	9.74 ± 0.27
Solubility in hot water	4.39 ± 0.32	10.64 ± 0.26
Solubility in 1% NaOH	20.22 ± 0.27	35.73 ± 0.38
Ethanol/toluene extractives	1.54 ± 0.11	2.95 ± 0.17
Total extractives	5.30 ± 0.40	Nr
Klason lignin	17.91 ± 1.02	Nr
Soluble lignin	2.78 ± 0.35	5.12 ± 0.40
Total lignin	20.69 ± 0.97	21.10 ± 1.13
Holocellulose	82.12 ± 0.49	Nr
Cellulose	48.04 ± 1.36	73.6 ± 0.01
Hemicellulose	34.08 ± 1.03	Nr
α-Cellulose	55.03 ± 0.33	49.43 ± 0.54
Ash	1.28 ± 0.06	5.30 ± 0.07

FIGURES

Figure 1. A) Cooked *Agave angustifolia* bagasse piled up in a traditional “Palenque.” B) Close-up of bagasse fibers piled up.

Figure 2. Histogram of the length of *Agave angustifolia* bagasse fiber bundles.

Figure 3. Morphology of *Agave angustifolia* bagasse fiber bundle, A) Scanning electron micrograph of transversal section, B) Longitudinal section shows the cellular layout. Bar = 100 μm; * = crystal; ph = phloem.

Figure 4. X-ray diffraction pattern of *Agave angustifolia* fibers.

Figure 5. (a, b) Thermogravimetric analysis and (c) Differential scanning calorimetry curves of *Agave angustifolia* fibers.

Figure 6. Stress-strain curve of *Agave angustifolia* bagasse fiber bundles.