

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO



**INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
ÁREA ACADÉMICA DE QUÍMICA**

**Obtención de pulpa de celulosa a partir de residuos de agavaceas:
potencial elaboración de papel tipo artesanal”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES**

PRESENTA:

EDITH JIMÉNEZ MUÑOZ

DIRECTOR: DR. FRANCISCO PRIETO GARCÍA

CODIRECTORA: DRA. JUDITH PRIETO MÉNDEZ

Mineral de la Reforma, Hidalgo.

Agosto 2017

AGRADECIMIENTOS

Al creador:

Por concederme la vida.

A mi familia:

A mis padres **Teresa** y **Cornelio** por mostrarme el buen camino, los amo demasiado, muchas gracias por todo, no existen palabras exactas en este planeta para expresar todo lo que siento por ustedes.

A mis hermanos **Oscar**, **Eruvey** y **Lucero** por ser y estar siempre en los momentos importantes y por orientarme y darme la mano, gracias los amo.

A mis hermosos sobrinos **Axel** y **Carlitos** lo amo con todo mi ser.

A mis amigos y guías:

Muchas gracias amigos y guías por siempre estar en los momentos correctos para apoyarme y escucharme, mil gracias, me encantaría mencionarlos a todos, pero en esas líneas no es posible, sin embargo, estoy haciendo un escrito especial para ustedes, gracias a todos.

A mis asesores:

A mi asesor Dr. **Francisco Prieto** de tesis muchas gracias por dirigir mi proyecto de investigación y por todo su apoyo y muchas gracias también a su esposa **Mari** por tanto consejos positivos.

A los miembros de mi consejo tutorial Dr. **Otilio Acevedo**, Dra. **Judith Prieto** y Dr. **Rodrigo Laguna** gracias por sus valiosos comentarios

Esta tesis se llevó a cabo en el Laboratorio de Pruebas del Centro de Investigaciones en el Área Académica de Química del Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Dirigido por: Dr. Francisco Prieto García, Dra. Judith Prieto Méndez

Este trabajo fue realizado con recursos propios.

El CONACYT otorgó la beca de Doctorado (Núm. de CVU 556232), que sirvió de apoyo para culminar este trabajo y obtener el grado.



DEDICATORIA

Para la niña que siempre quiero ser:

Edith Jiménez Muñoz

Por caer y levantarme, por reír y llorar, por avanzar y avanzar

Por compartir

Por aprender

Por hoy

“Life can only be understood backwards; but it must be lived forwards.”

Søren Kierkegaard

ÍNDICE

	Página
ÍNDICE	I
ÍNDICE DE FIGURAS	V
ÍNDICE DE TABLAS	X
RESUMEN	XIII
ABSTRACT	XIV
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	4
2.1. La celulosa de la madera	4
2.2. Las fibras de celulosas y sus fuentes	6
2.3. Biosíntesis y degradación de la celulosa	7
2.4. Usos y aplicaciones de la celulosa	8
2.5. Formas y tipos de celulosas	10
2.6. Potencialidad de los agaves tequilero, mezcalero y pulquero para la obtención de pulpa de celulosa	12
2.7. Los agaves, especies y/o variedades	16
2.7.1. <i>Agave lechuguilla</i> Torr.	19
2.7.2. <i>Agave angustifolia</i> Haw	20
2.7.3. <i>Agave tequilana</i> Weber, Var. Azul	21
2.7.4. <i>Agave americana</i> L	22
2.7.5. <i>Agave salmiana</i> Otto ex Salm	23
2.7.6. <i>Agave mapisaga</i> Trel	24
2.8. Los agaves pulqueros, mezcaleros y tequileros	25

3. JUSTIFICACIÓN	28
4. OBJETIVOS	30
4.1. Objetivo general	30
4.2. Objetivos específicos	30
5. MATERIALES Y MÉTODOS	32
5.1. Zona de estudio	32
5.2. Preparación de las muestras	32
5.2.1. Bloque botánico	33
5.2.2. Bloque físico	34
5.2.3. Bloque químico	34
5.3. Obtención de pulpas de celulosa	37
5.3.1. Método de pulpeo alcalino a la sosa	38
5.3.2. Método de pulpeo ácido. Método organosolv	38
5.3.3. Optimización de los métodos. Diseño de experimentos	39
5.3.4. Experimentos confirmatorios	41
5.4. Blanqueo de las pulpas obtenidas	41
5.5. Caracterización de precursores y pulpas obtenidas y blanqueadas	41
5.6. Elaboración de papel artesanal	42
5.6.1. Caracterización de las muestras de papeles obtenidas	43
5.6.1.1. Contenido de humedad	43
5.6.1.2. Resistencia a la tensión	44
5.6.1.3. Gramaje	44

5.6.1.4. Calibre	45
5.7. Análisis estadístico	45
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
6.1. Bloque botánico	46
6.1.1. Clasificación taxonómica de los agaves en estudio	46
6.1.1.1. Clasificación fenológica de agaves en estudio	46
6.1.1.2. Clasificación etnobotánica de agaves en estudio	54
6.2. Bloque físico	56
6.2.1. Caracterización física de los agaves en estudio	56
6.2.1.1. <i>Agave tequilana</i> Weber, Var. Azul	56
6.2.1.2. <i>Agave salmiana</i> B. Otto ex Salm-Dick	60
6.2.1.3. <i>Agave angustifolia</i> Haw	63
6.2.1.4. <i>Agave lechuguilla</i> Torr.	67
6.2.2. Caracterización física de precursores y pulpas	70
6.2.2.1. Microscopía electrónica (MEB)	70
6.2.2.2. Espectroscopía infrarroja (FTIR)	71
6.2.2.3. Análisis térmicos (TGA/DTGA)	72
6.3. Bloque químico	82
6.3.1. Composición química	82
6.3.1.1. Contenidos solubilizables y cenizas	83
6.3.1.2. Azúcares totales	88
6.3.1.3. Grasas	88
6.3.1.4. Lignina	89

	Índice
6.3.1.5. Holocelulosa	91
6.3.1.6. Alpha, beta y gamma celulosa	92
6.4. Procesos de pulpeo	96
6.4.1. Pulpeo alcalino (NaOH) Pulpeo Organosolv (CH ₃ COOH)	98
6.4.1.1. <i>Agave salmiana</i>	98
6.4.1.2. <i>Agave tequilana</i>	106
6.4.1.3. <i>Agave lechuguilla</i>	112
6.5. Blanqueo	119
6.6. Elaboración de hojas de papel artesanal	129
6.7. Características físicas del papel	131
6.7.1. Contenido de humedad	131
6.7.2. Resistencia a la tensión	136
7. CONCLUSIONES	138
8. REFERENCIAS	140
9. ANEXOS	155

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	La celulosa y sus fuentes	2
2	Composición química aproximada de la mader	5
3	Códice Techialoyan-Chalco	14
4	<i>Agave lechuguilla</i>	20
5	<i>Agave angustifolia</i> Haw	21
6	<i>Agave tequilana</i> Weber, Var. Azul	22
7	<i>Agave americana</i>	23
8	<i>Agave salmiana</i>	24
9	<i>Agave mapisaga</i>	25
10	Ubicación geográfica de las regiones productoras de mezcal.	27
11	Ubicación de los estados de la república donde se tomaron las muestras de agaves	33
12	Toma de muestras de <i>Agave tequilana</i> Weber, Var. Azul en el municipio de Tequila, estado de Jalisco	58
13	Distribución y tamaños de partículas secas de la fracción minoritaria (<0.5 mm) de hojas de <i>Agave tequilana</i> Weber, Var. Azul en el municipio de Tequila, estado de Jalisco	59
14	Distribución y tamaños de partículas secas de la fracción 0.5-2.0 mm de hojas <i>Agave tequilana</i> Weber, Var. Azul en el municipio de Tequila, estado de Jalisco	59
15	Toma de muestras de <i>Agave salmiana</i> B. Otto ex Salm-Dick en el municipio de Epazoyucan, estado de Hidalgo	62
16	Distribución y tamaños de partículas secas de la fracción minoritaria (<0.5 mm) de hojas de <i>Agave salmiana</i> B. Otto ex Salm-Dick, tomada en el municipio de Epazoyucan, Hidalgo	62

17	Distribución y tamaños de partículas secas de la fracción 0.5-2.0 mm de hojas de <i>Agave salmiana</i> B. Otto ex Salm-Dick, tomada en el municipio de Epazoyucan, Hidalgo	63
18	Toma de muestras de <i>Agave angustifolia</i> Haw., tomada en el municipio de Zimatlán, Oaxaca	65
19	Distribución y tamaños de partículas secas de la fracción minoritaria (<0.5 mm) de hojas de <i>Agave angustifolia</i> Haw., tomada en el municipio de Zimatlán, Oaxaca	66
20	Distribución y tamaños de partículas secas de la fracción 0.5-2.0 mm de hojas de <i>Agave angustifolia</i> Haw., tomada en el municipio de Zimatlán, Oaxaca	66
21	Toma de muestras de <i>Agave lechuguilla</i> Torr., tomada en el municipio de San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo	69
22	Distribución y tamaños de partículas secas de la fracción mayoritaria (<0.5mm) de hojas de <i>Agave lechuguilla</i> Torr., tomada en el Municipio de San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo	69
23	Distribución y tamaños de partículas secas de la fracción 0.5-2.0 mm de hojas de <i>Agave lechuguilla</i> Torr., tomada en el municipio de Zimatlán, Oaxaca	70
24	Microfotografías que muestran las morfologías de las fibras de hojas de agaves secadas, previo a la molienda. a) <i>A. angustifolia</i> , b) <i>A. salmiana</i> , c) <i>A. tequilana</i> y d) <i>A. lechuguilla</i>	73
25	Microfotografías que muestran las morfologías de las fibras obtenidas por proceso de molienda y tamizaje en hojas para las cuatro especies de agaves en estudio a) <i>A. angustifolia</i> , b) <i>A. salmiana</i> , c) <i>A. tequilana</i> y d) <i>A. lechuguilla</i>	73
26	Espectros FTIR en pastillas de KBr de las hojas de agave secadas y trituradas	74
27	Análisis térmicos de las fibras de <i>A. angustifolia</i>	74
28	Análisis térmicos de las fibras de <i>A. lechuguilla</i>	75
29	Análisis térmicos de las fibras de <i>A. salmiana</i>	75

30	Análisis térmicos de las fibras de <i>A. tequilana</i>	76
31	Análisis térmicos de Celulosa pura	76
32	Estructura de molecular de la lignina	89
33	Estructura molecular de la hemicelulosa. Se observa el Arabinoxilano característico	80
34	Estructura de molecular de la celulosa. a) Molécula de celulosa b) Detalle de la configuración estereoquímica β de las D-glucopiranosas	81
35	Composición química de especies vegetales	83
36	Curva de calibración para determinación de azúcares totales (AT) en la fracción solubilizable en agua caliente	86
37	Reactores de pulpeo (Proceso de pulpeo alcalino (NaOH) de <i>Agave salmiana</i> , muestra por triplicado)	97
38	Efecto promedio de las interacciones entre factores de control y factores de ruido sobre el nivel medio de rendimiento de pulpeo de la especie <i>Agave Salmiana</i> con el método de pulpeo alcalino (NaOH)	100
39	Efecto promedio de la relación señal/ruido sobre el valor medio del rendimiento de pulpa de celulosa de la especie <i>Agave salmiana</i> con el método de pulpeo alcalino (NaOH)	101
40	Efecto promedio con los valores medios. <i>Agave salmiana</i> con el método de pulpeo alcalino (NaOH)	102
41	Efecto promedio de las interacciones entre factores de control y factores de ruido sobre el nivel medio de rendimiento de pulpeo de la especie <i>Agave Salmiana</i> con el método de pulpeo Organosolv (CH ₃ COOH)	103
42	Efecto promedio de la relación señal/ruido sobre el valor medio del rendimiento de pulpa de celulosa de la especie <i>Agave salmiana</i> con el método de pulpeo Organosolv (CH ₃ COOH)	104
43	Efecto promedio con los valores medios. <i>Agave salmiana</i> con el método de pulpeo Organosolv (CH ₃ COOH)	105

44	Efecto promedio de la relación señal/ruido sobre el valor medio del rendimiento de pulpa de celulosa de la especie <i>Agave tequilana</i> con el método de alcalino (NaOH)	109
45	Efecto promedio de la relación señal/ruido sobre el valor medio del rendimiento de pulpa de celulosa de la especie <i>Agave tequilana</i> con el método de pulpeo Organosolv (CH ₃ COOH)	110
46	Efecto promedio de la relación señal/ruido sobre el valor medio del rendimiento de pulpa de celulosa de la especie <i>Agave lechuguilla</i> con el método de alcalino (NaOH)	114
47	Efecto promedio de la relación señal/ruido sobre el valor medio del rendimiento de pulpa de celulosa de la especie <i>Agave lechuguilla</i> con el método de pulpeo Organosolv (CH ₃ COOH)	116
48	Pulpa de celulosa obtenida mediante a) pulpeo alcalino (NaOH) y b) blanqueada con clorito de sodio (NaClO ₂)	120
49	<i>A. salmiana</i> , precursor (línea negra) y pulpa de celulosa a la sosa y blanqueada (línea roja)	121
50	<i>A. tequilana</i> , precursor (línea negra) y pulpa de celulosa a la sosa y blanqueada (línea roja)	122
51	<i>A. lechuguilla</i> , precursor (línea negra) y pulpa de celulosa a la sosa y blanqueada (línea roja)	123
52	Comparación de las pulpas de celulosa obtenidas por pulpeo a la sosa y blanqueada para las tres especies en estudio y su comparación con la pulpa de celulosa pura	124
53	Pulpa de celulosa obtenida mediante a) pulpeo ácido (CH ₃ COOH) y b) blanqueada con clorito de sodio (NaClO ₂)	125
54	<i>A. salmiana</i> , precursor (línea roja) y pulpa de celulosa al Organosolv y blanqueada (línea negra)	126
55	<i>A. tequilana</i> , precursor (línea roja) y pulpa de celulosa al Organosolv y blanqueada (línea negra)	126
56	<i>A. lechuguilla</i> , precursor (línea roja) y pulpa de celulosa al Organosolv y blanqueada (línea negra)	127

57	Comparación de las pulpas de celulosa obtenidas por pulpeo al método Organosolv y blanqueada para las tres especies en estudio y su comparación con la pulpa de celulosa pura	127
58	Difragtogramas de las pulpas de celulosas obtenidas por los dos métodos de pulpeo y blanqueadas. A) Pulpa a la sosa blanqueada. B) Pulpa al Organosolv blanqueda	128
59	Hojas de papel artesanal	130
60	Típica relación entre el contenido de humedad de papel base celulosa con la humedad relativa del ambiente	131
61	Porcentaje de humedad absorbida (25 °C y 24 % humedad ambiente)	134
62	Porcentajes de humedad acumulada en hojas de papel elaboradas a partir de pulpa de celulosa obtenida del proceso de pulpeo alcalino	134
63	Porcentajes de humedad acumulada en hojas de papel elaboradas a partir de pulpa de celulosa obtenida del proceso de pulpeo ácido	135

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página
1	Composición química promedio de las diferentes fracciones de <i>A. tequilana</i> Azul	16
2	Localización geográfica de los puntos de toma de muestras de agaváceas	32
3	Matriz de variables por niveles. Pulpeo a la sosa	39
4	Matriz de variables por niveles. Pulpeo (Organosolv)	39
5	Matriz del diseño experimental L9(3 ⁴)	40
6	Evaluación morfológica y caracterización física de <i>Agave tequilana</i> Weber, Var. Azul, tomada en el municipio de Tequila, Jalisco	57
7	Evaluación morfológica y caracterización física de <i>Agave salmiana</i> B. Otto ex Salm-Dick, tomada en el municipio de Epazoyucan, Hidalgo	61
8	Evaluación morfológica y caracterización física de <i>Agave angustifolia</i> Haw, tomada en el municipio de Zimatlán, Oaxaca	64
9	Evaluación morfológica y caracterización física de <i>Agave lechuguilla</i> Torr., tomada en el municipio de San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo	68
10	Caracterización termogravimétrica de los hojas secadas y trituradas de los agaves en estudio	77
11	Resultados de análisis proximales de las hojas de agaves en estudio	85
12	Comparativo de material solubilizable en agua caliente (método fotocolorimétrico y gravimétrico)	87
13	Resultados sobre porcentaje de azúcares totales de las cuatro especies de agaves. Entre paréntesis, los valores de desviación estándar	88

14	Resultados sobre porcentaje de grasas. Entre paréntesis, los valores de desviación estándar	89
15	Contenido de lignina en especies de agaves reportados en la literatura y en el presente estudio. Entre paréntesis, los valores de desviación estándar	91
16	Resultados sobre porcentaje de contenido de holocelulosa. Entre paréntesis, los valores de desviación estándar	92
17	Resultados sobre porcentaje de contenido de alpha celulosa. Entre paréntesis, los valores de desviación estándar	94
18	Resultados sobre porcentaje de contenido de beta celulosa. Entre paréntesis, los valores de desviación estándar	94
19	Resultados sobre porcentaje de contenido de gamma celulosa. Entre paréntesis, los valores de desviación estándar	95
20	Correlación de Pearson entre variables (alpha, beta, gamma celulosa)	95
21	Rendimientos (% p/p) de pulpa de celulosa de la especie <i>Agave salmiana</i> obtenidos mediante el método de pulpeo a alcalino (NaOH)	99
22	Rendimientos (% p/p) de pulpa de celulosa de la especie <i>Agave salmiana</i> obtenidos mediante el método de pulpeo Organosolv (CH ₃ COOH)	99
23	Efecto promedio de las interacciones de los factores sobre el rendimiento de pulpa de celulosa de la especie <i>Agave salmiana</i> con el método de pulpeo alcalino (NaOH)	102
24	Respuesta promedio con los valores medios bajo el efecto promedio de las interacciones de la especie <i>Agave salmiana</i> con el método de pulpeo Organosolv (CH ₃ COOH)	104
25	Rendimientos (% p/p) de pulpa de celulosa de la especie <i>Agave tequilana</i> obtenidos mediante el método de pulpeo a alcalino (NaOH)	107

26	Rendimientos (% p/p) de pulpa de celulosa de la especie <i>Agave tequilana</i> obtenidos mediante el método de pulpeo Organosolv (CH ₃ COOH)	107
27	ANOVA <i>Agave tequilana</i> método alcalino (NaOH)	108
28	ANOVA <i>Agave tequilana</i> método ácido (CH ₃ COOH)	110
29	Rendimientos (% p/p) de pulpa de celulosa de la especie <i>Agave lechuguilla</i> obtenidos mediante el método de pulpeo a alcalino (NaOH)	112
30	Rendimientos (% p/p) de pulpa de celulosa de la especie <i>Agave lechuguilla</i> obtenidos mediante el método de pulpeo Organosolv (CH ₃ COOH)	112
31	ANOVA <i>Agave lechuguilla</i> método alcalino (NaOH)	113
32	ANOVA <i>Agave lechuguilla</i> método ácido (CH ₃ COOH)	115
33	Rendimientos (%) de pulpa de celulosa de <i>Agave salmiana</i> , <i>Agave tequilana</i> y <i>Agave lechuguilla</i> por dos métodos	119
34	Comparativo de características físicas de hojas de papel	136

RESUMEN

La producción de pasta de celulosa a partir de la madera es conocida en todo el mundo. Hoy en día, se están investigando nuevas fuentes de celulosa. El objetivo principal de este trabajo es obtener pulpa de celulosa de *Agave lechuguilla*, *Agave salmiana*, *Agave tequilana* por métodos de pulpa ácida y alcalina. La pasta de celulosa se caracterizó por técnicas espectroscópicas. La cristalinidad de celulosa blanqueada se determinó mediante DRX. Se encontraron rendimientos de pulpa de celulosa de 50-70% para el método ácido y de 40-50% para el método alcalino. Los patrones de XRD de la pulpa de celulosa mostraron una cristalinidad del 49,88% para el método alcalino y del 48,43% para el método ácido. Además, se determinaron contenidos bajos en hemicelulosa y lignina. Estos resultados mostraron que la pulpa alcalina fue la más eficaz para obtener altos rendimientos de pulpa de celulosa, alta cristalinidad y bajo porcentaje de lignina.

ABSTRACT

The production of cellulose pulp from wood is known worldwide. Currently, new cellulose sources are being investigated. The main objective of this work is to obtain cellulose pulp from *Agave lechuguilla*, *Agave salmiana*, *Agave tequilana* by acid and alkaline pulping methods. Cellulose pulp was characterized by Spectroscopic techniques. The bleached cellulose crystallinity was determined by XRD. Cellulose pulp yields of 50-70% for the acid method and 40-50% for the alkaline method were found. XRD patterns of cellulose pulp shown a cristalinity of 49.88% for alkaline method and 48.43% for acid method. Additionally, low hemicellulose and lignin contents were determined. These results showed that the alkaline pulping was the most effective to obtain high cellulose pulp yields, high crystallinity and low percentage of lignin.

1. INTRODUCCIÓN

La lignocelulosa es el material más abundante en el planeta (Kong et al., 2005) y fuente natural renovable, con una tasa de síntesis de 4×10^9 toneladas anuales, se compone de celulosa, hemicelulosa y lignina, con proporciones que varían en: 20-55% de celulosa, 16-85% de hemicelulosa y de 15-40% de lignina (Howard et al., 2003; Tirado, 2004; González et al., 2005).

La celulosa es el principal componente de la pared celular de las plantas, este componente es un polisacárido $(C_6H_{10}O_5)_n$, formado por moléculas de cadenas lineales de (1,4)- D-glucopiranosas, estas moléculas tienden a formar microfibrillas con diámetros que van de valores de 1 a 2 o de 4 a 10 nanómetros y con longitudes de 25 nm. Aparentemente el diámetro de las microfibrillas de celulosa depende del contenido de agua de la porción que sea examinada (Evert, 2006; Kurita, 2006). La celulosa es el polímero más abundante de la naturaleza, asimismo tiene un papel fundamental biológico. Además, este compuesto orgánico es utilizado como materia prima en industrias de madera, papel y textil (Biermann, 1996; Franco et al., 2009). La celulosa se encuentra en la naturaleza como material de sostén en árboles, arbustos, hierbas entre otras. A estas celulosas naturales se les llaman celulosas nativas (Figura 1).

Entre los componentes de la lignocelulosa también se encuentra la hemicelulosa, estructura de hidratos de carbono formada por polímeros como pentosas (xilosa y arabinosa), hexosas (glucosa, manosa y galactosa), y ácidos urónicos. Su peso molecular es más bajo con respecto al peso de la celulosa (Bayer et al., 1998; Evert, 2006).

Otro componente del material lignocelulósico es la lignina, polímero generado por la condensación al azar de los radicales libres de alcoholes aromáticos. Su estructura es difícil de definir ya que es compleja, sin embargo, se sabe que contiene fundamentalmente tres alcoholes: coniferílico, sinapílico y p-cumarílico. También debe contener ácidos fenólicos, tales como cumárico y ferúlico, que están esterificados con los grupos alcohol (Howard et al., 2003; González et al., 2005). Su degradación es complicada y protege a la celulosa y hemicelulosa de la hidrólisis enzimática, por ende, es considerada como un compuesto recalcitrante (Idarraga et al., 1999; Boudet et al., 2003).

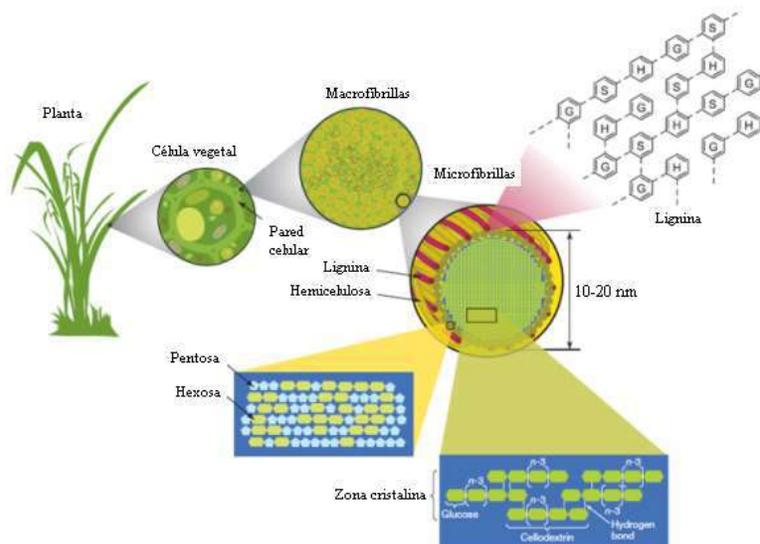


Figura 1. La celulosa y sus fuentes. Fuente: modificado de Moran-Mirabal, 2013.

Vargas y Kolver, 1997; Bayer et al., 1998; Idarraga et al., 1999; Lynd et al., 2002, mencionan que los materiales lignocelulósicos tienen un alto potencial para la obtención de celulosa en forma de pulpa utilizada en la industria papelera, debido a su abundancia en la naturaleza y bajo costo; también señalan que la tendencia actual, es lograr un bioproceso consolidado en el cual se lleven a cabo conjuntamente la producción de enzimas celulolíticas, la hidrólisis de la biomasa y la fermentación de los azúcares, generando productos deseados en un solo paso, al respecto se reporta que los hongos Lignocelulósicos, (hongos de la pudrición blanca de la madera) tienen la capacidad de degradar la lignina (Ponce et al., 2012).

La peculiar irregularidad estructural del polímero de lignina hace que estas enzimas se caractericen por tener mecanismos de acción poco específicos que oxidan los anillos aromáticos constitutivos de dicho polímero. Las enzimas que participan en este proceso son la lignina peroxidasa, la peroxidasa dependiente de manganeso y la lacasa, una fenoxidasa que contiene principalmente cobre en su sitio activo.

En la actualidad, la biomasa lignocelulósica y en especial los subproductos agroindustriales han dejado de ser productos desecho-problema, para convertirse en materia prima potencial en

diversos procesos tanto de tipo agrícola como industrial (Sánchez et al., 2010; Heredia et al., 2014).

Mundialmente es conocida la producción y obtención de celulosa, principalmente a partir de fuentes maderables. No obstante, hoy en día existe una tendencia sobre la obtención de celulosa a partir de fuentes no maderables, residuos agrícolas y otras; esta tendencia surge con la finalidad de reducir impactos negativos sobre el medio ambiente. (Pandey, 2002).

En este tenor, Idarraga y colaboradores (1999) realizaron una investigación sobre elaboración de papel a base de residuos de agave, utilizaron el bagazo de *Agave tequilana* (residuo de industrias tequileras) y lo procesaron mediante técnicas de pulpeo mecánicas, químicas y biológicas. El estudio demostró ser viable, sin embargo, cabe mencionar que en cuanto a propiedades físicas la resistencia del papel fue baja.

Recientemente, Parra y colaboradores (2010) realizaron una investigación para la elaboración de papel a partir de fibras de seis especies de agave (maguey); tres de hoja angosta (*Agave lechuguilla*, *A. angustifolia* y *A. tequilana*) y tres de hoja ancha (*Agave americana*, *A. salmiana* y *A. mapisaga*), utilizando diferentes métodos para la extracción de fibras. Los resultados señalan que *A. salmiana* y *A. mapisaga* fueron las especies que presentaron mejores características para la posible elaboración de papel, aunque estos autores sólo presentaron resultados de artesanías elaboradas a base de fibras que fueron obtenidas. En su metodología plantean la obtención de fibras y probable obtención de pulpa de celulosa a partir de las pencas u hojas, ya que la mayoría de los trabajos reportados se refieren al residuo del bagazo obtenido de la piña.

2. ANTECEDENTES

2.1. La celulosa de la madera

Las fibras celulósicas se disponen en el interior de la madera, formando regiones cristalinas unidas entre sí por medio de fibras sobresalientes, conformando zonas amorfas de unión y zonas cristalinas. Las propiedades idóneas de las fibras celulósicas utilizadas para la confección de papel son las siguientes (Biermann, 1996):

- Un elevado grado de resistencia mecánica a la tensión
- Muy buena flexibilidad, tanto natural como adquirida
- Elevada resistencia a la deformación plástica
- Es insoluble en agua (la fibra)
- Un amplio rango de dimensiones
- Tiene facilidad inherente a enlazarse
- Facilidad para absorber aditivos modificantes
- Es estable químicamente
- Resulta relativamente incolora

Como se menciona con anterioridad la madera está constituida por fibras de celulosa y hemicelulosa, las cuales están unidas entre sí por medio de la lignina, que actúa como pegamento manteniendo unidas al conjunto de fibras, además proporciona consistencia y rigidez a las plantas.

La lignina se sitúa formando una capa externa alrededor de las fibras, y dicha capa externa se une a la existente en las demás fibras, por medio de enlaces covalentes y de puente de hidrógeno. La estructura química de la lignina se basa en la unión tridimensional de unidades de fenilpropano, cuyos sustituyentes varían en función de la planta considerada. Las uniones entre los monómeros deben romperse para poder separar las fibras celulósicas necesarias en la obtención de la pulpa. Asimismo, en la composición química de la madera existen pequeñas cantidades de terpenos, resinas, fenoles ácidos grasos, entre otros, los cuales son factiblemente extraídos durante el proceso de la pasta de papel; su porcentaje se encuentra en un rango de 2 a 8%, por los porcentajes tan bajos en los que se encuentran en la madera no representan un problema cuando se retirar de la madera durante el proceso de pulpeo.

Por otra parte, las maderas pueden clasificarse en maderas duras y maderas suaves, dicha clasificación se basa en la estructura interna de la madera (Figura 2), específicamente por la densidad y la longitud de la fibra (Biermann, 1996; Evert, 2006). En cuanto a las características químicas de los tres componentes principales de la madera (celulosa, hemicelulosa y lignina), son muy diferentes, y, en consecuencia, su comportamiento ante agentes químicos y procesos mecánicos es diferenciado, y precisamente, aprovechando estas diferencias, se establecen los procesos de separación, que dan como resultado la obtención de la pulpa. Por ejemplo, la celulosa es altamente hidrofílica, debido a la presencia de grupos polares (grupo hidroxilo); cuando las cadenas de celulosa se ponen en contacto con el agua, las fibras absorben moléculas de agua (se hidratan) y aumentan su volumen, mejorando simultáneamente su flexibilidad y la capacidad de enlace con otras fibras adyacentes. La absorción de agua es más eficiente en las zonas amorfas de la celulosa que en las zonas cristalinas.

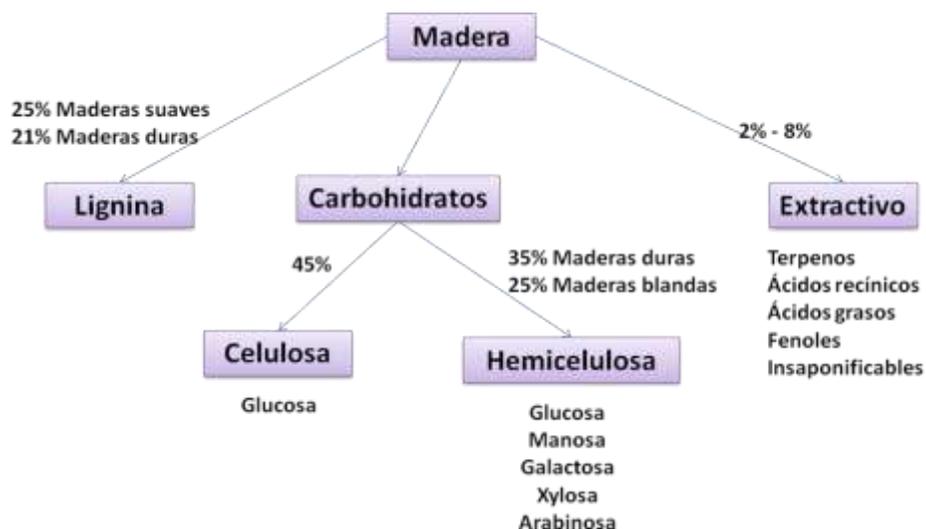


Figura 2. Composición química aproximada de la madera

Las hemicelulosas presentan cualidades mecánicas más débiles que la celulosa, y durante el proceso de obtención de pulpa, sus propiedades son modificadas drásticamente. Además, son fácilmente solubles en gran cantidad de disolventes, pues su estructura no les confiere marcadas características hidrofílicas o hidrófobas. Debido a esto, una gran proporción de las hemicelulosas iniciales son retiradas durante el proceso de pulpeo.

Por su parte, la lignina es un compuesto básicamente hidrófobo, característica frecuente en los compuestos aromáticos. Por ello, no puede ser disuelto en un medio acuoso, a no ser que se introduzcan en su estructura grupos sustituyentes polares mediante reacciones químicas, los cuales sean capaces de estabilizar las disoluciones de lignina en agua. Este procedimiento se lleva a cabo en ocasiones, haciendo reaccionar la lignina con compuestos derivados del azufre, que introducen sustituyentes sulfonados en la estructura de la lignina, haciéndola entonces soluble.

Para la obtención de pulpa es necesario separar eficientemente las fibras celulósicas de la lignina sin modificar las características iniciales de la celulosa, ya que durante el proceso de pulpeo la celulosa puede ser alterada; así la resistencia mecánica del papel elaborado depende en gran medida del tamaño de fibra, son más resistentes los papeles de fibra larga. Es pertinente mencionar que la eficiencia de la unión entre fibras depende de la cantidad de lignina que permanece después del proceso de pulpeo, así mismo también influye el estado de las fibras, esto influye directamente en las características de calidad del papel (calibre, gramaje, resistencia a la tensión entre otras).

2.2. Las fibras de celulosas y sus fuentes

Las fibras de celulosa se pueden clasificar de la manera siguiente:

Fibras maderables

Fibras cortas: Se obtienen a partir de especies clasificadas como maderas duras (eucalipto) y de algunas especies de frondosas (abedul, chopo, arce o haya); la longitud de las fibras de estos árboles está comprendida entre los 0,75 mm y los 2 mm de largo.

Fibras largas: Derivadas de maderas blandas principalmente coníferas (*Pinus* y *Abies*) la longitud de las fibras de estos árboles está comprendida entre los 3 y 5 mm.

Fibras no maderables: Son originarias de diferentes especies de arbustos. En los países industrializados se utilizan para producir papeles especiales, sin embargo, en otros países son la principal materia prima para la fabricación de papel (en China suponen el 60% de las fibras utilizadas para la producción de papel) (Biermann, 1996; Rodríguez, 2006). Estas fibras

presentan un gran potencial de desarrollo para sustituir a las fibras madereras. Las especies más utilizadas son:

Algodón: Cuyas fibras tienen una longitud superior a los 12 mm y se utilizan en la fabricación de papeles finos de escritura.

Cáñamo: Con fibras de longitud superior a los 5 mm, procedentes de cordeles viejos y otros desperdicios. Sirven como materia prima para la producción de papel de fumar.

Lino: Sus fibras tienen una longitud entre 6 y 60 mm y se usan para fabricar papel moneda.

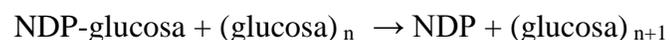
Paja de cereales: Cuyas fibras se utilizan en la producción de envases para huevos, botes y tubos de papel.

Kenaf: Las fibras de la corteza son consideradas fibra larga por sus dimensiones, mientras que las fibras leñosas o del tallo son inferiores en longitud 5 mm y diámetro 1 mm con respecto a los maderas duros (Pérez et al., 2000). Puede alcanzar rendimientos promedios entre 12 - 25 t de celulosa/ha. Por sus contenidos en celulosa (53%) y relativamente bajos contenidos de lignina (18%).

Fibras recuperadas: Se obtienen a partir de papel y cartón usados y son procesadas para recuperar fibras de celulosa, sin embargo, cabe mencionar que este proceso no se puede repetir excesivamente ya que las fibras recuperadas pierden resistencia.

2.3. Biosíntesis y degradación de la celulosa

La celulosa se sintetiza en las plantas a partir de la GDP-glucosa o la UDP-glucosa por acción de la celulosa-sintasa:



La mayor parte de mamíferos no poseen enzimas capaces de hidrolizar los enlaces (1-4) de la celulosa por lo que no pueden digerirla. Sin embargo, los rumiantes pueden utilizar la celulosa como alimento ya que tienen en el rumen microorganismos productores de enzima celulasa, que hidroliza la celulosa a D-glucosa (Merrit, 2010). La celulosa es un precursor importante que utiliza para obtener una amplia gama de productos como pueden ser combustibles orgánicos, compuestos químicos, fibras, papel, pulpa entre otros (Eriksson, 1989; Lynd et al., 1999).

Resiste a la fermentación, no significa que no se puede hidrolizar, ya que existen microorganismos celulolíticos encargados de la degradación de la celulosa que producen múltiples enzimas (celobiohidrolasas y las endoglucanasa) que actúan en sinergismo directamente y que se encargan de su degradación (Nidetzky et al., 1994; Murashima et al., 2003).

2.4. Usos y aplicaciones de la celulosa

Anselmo Payen estableció que el componente fibroso de todas las células vegetales tiene una única estructura química y fue el primero en utilizar el término de celulosa en 1838 (Dufresne, 2012).

La celulosa constituye la materia prima del papel y cartón y de los tejidos de fibras naturales. También se utiliza en la fabricación de explosivos (el más conocido la nitrocelulosa o "pólvora para armas"), celuloide, seda artificial, barnices y se utiliza como aislamiento térmico y acústico, como producto derivado del papel reciclado triturado, paneles de yeso en la construcción, rellenos aislantes, aglomerados, en compostaje, para cintas adhesivas, en la industria textil, papel tapiz, carpintería, como almidón en la fabricación de pan, repostería, pegamentos, aglomerantes, alimentación, salsas como espesante, cosmética, entre otros (Dufresne, 2012).

Actualmente a nivel mundial la protección del medio ambiente ha cobrado una gran importancia la protección del medio ambiente creándose así organizaciones no gubernamentales que, preocupados por el deterioro de la naturaleza, han contribuido con investigaciones para solventar este problema; investigaciones que en parte se han centrado en el estudio de la celulosa y el hongo *Trichoderma reesei* productor de celulosa (Centeno et al., 2015).

La celulosa se obtiene a partir de la separación de las fibras naturales, unidas en la estructura de las plantas por un polímero denominado lignina. Estas fibras pueden ser separadas mediante procesos mecánicos, biológicos o químicos (Biermann, 1996). La pulpa de celulosa es utilizada en distintas aplicaciones, entre las cuales se mencionan las siguientes:

Elaboración de papel periódico, utilizando de 20 - 25 % de celulosa (pasta química) y de 75 - 80 % de pasta mecánica. Para aumentar la facilidad de impresión en este papel se le añade caolín. Para hacer el papel más resistente a las tensiones de las máquinas rotativas, se le encola con vidrio soluble y sulfato de aluminio.

Elaboración de papel de imprenta, utilizando 90 - 95 % de celulosa y de 5 – 10 % de pasta mecánica. Para obtener una mejor calidad en la impresión de grabados, se extiende sobre el papel una papilla de sulfato bórico con cola. Las bandas de papel se secan con aire caliente y después se aíslan en una calandria.

Elaboración de papel de filtro, utilizando trapos de algodón o con celulosa de madera purificada. Este tipo de papel no se le encola, ni se le agrega algún aditivo. Análogamente a los papeles de filtro, los papeles secantes son también sin encolar a fin de asegurar un buen poder absorbente. Se fabrican con trapos o celulosa pura. Las bandas de papel se prensan sólo ligeramente, para obtener un papel grueso, blando y muy poroso, que absorbe la humedad rápidamente.

Como se ha descrito anteriormente la celulosa que se obtiene a partir de fuentes maderables tiene una gran utilidad en la industria papelera, asimismo existen fuentes no maderables (algodón, lana y seda) que tienen un potencial considerable en la elaboración de papel, esto debido a sus altos contenidos de celulosa.

2.5. Formas y tipos de celulosas

Dependiendo del proceso de obtención y producción, las celulosas se dividen en:

- Celulosa Química. Se obtiene a partir de un proceso de cocción química de la madera u otros vegetales a altas temperaturas y presiones, cuyo objetivo es disolver la lignina contenida en la madera o vegetal con una disolución alcalina, liberando las fibras. La celulosa química se caracteriza por un rendimiento total relativamente bajo, es decir, sólo entre un 40% y un 60% del material original (madera o vegetal) queda en el producto final (fibras), el resto (lignina), se disuelve en la solución alcalina para ser posteriormente quemada y generar la energía térmica y eléctrica necesaria en los procesos productivos. Estas celulosas son más resistentes, ya que las fibras quedan intactas, son más fáciles de blanquear y menos propensas a perder sus cualidades en el tiempo (Pandey, 2002).
- Celulosa Mecánica. Se obtiene a partir de un proceso por el cual la madera o los vegetales son molidos y triturados mecánicamente, siendo sometida a altas temperaturas y presiones. Posteriormente la pasta es clasificada, lavada y eventualmente blanqueada. Este proceso requiere un alto consumo energético. La celulosa mecánica, se caracteriza por tener un alto rendimiento, normalmente entre el 85 – 95 %, pero la lignina remanente en el producto puede oxidarse generando el color amarillo que caracteriza a los papeles viejos. Las principales aplicaciones son la fabricación de papel para periódicos y papeles para impresión y escritura de menor calidad. Esta celulosa es menos resistente que la química, no por la presencia de esta lignina sino porque las fibras que en ella están contenidas han sido cortadas en el proceso de fabricación. Para tener una idea de la producción a nivel mundial en 1998 (175 millones de toneladas de celulosa) un 76 % correspondieron a celulosas químicas y sólo el 24 % a celulosas mecánicas (Pandey, 2002).

Otra forma de clasificar la celulosa es a partir de la materia prima usada para su fabricación. Dependiendo de ella existen celulosas de fibra larga y celulosas de fibra corta. Difieren principalmente en su resistencia, ya que ésta depende básicamente de las uniones moleculares que se establecen entre las fibras. La celulosa de fibra larga genera en los papeles una red de

uniones más resistentes que las de fibra corta. La longitud de las fibras largas fluctúa entre 2.5 y 4.5 mm, contra los 0.7 a 1.8 mm de las fibras cortas (Peñaloza, 2004).

Dentro de la celulosa de fibra larga, destacan:

- Celulosa NBSKP (“Northern Bleached Softwood Kraft Pulp”) producida principalmente en Canadá y los países escandinavos en base a coníferas de bosques naturales y de crecimiento lento. Su principal característica es la resistencia, debida a la longitud de las fibras que la constituyen. En el mercado es valorada con un mayor precio.
- Celulosa BSKP (Base pino) producida en el sur de Estados Unidos y norte de Argentina usando pinos de crecimiento rápido cuya calidad de resistencia es menor que la KBSKP.
- Celulosa BSKP (Base pino) producida en Chile y Nueva Zelanda, es calificada en el mercado como un producto intermedio entre las dos anteriores. La materia prima utilizada son las plantaciones de pino radiata de crecimiento rápido (Peñaloza 2004).

Dentro de la celulosa blanca de fibra corta, destacan:

- Celulosa BEKP (Bleached Eucalyptus Kraft Pulp) producida a partir de plantaciones de crecimiento rápido de eucaliptos. Los principales productores son Brasil, Chile, Península Ibérica, Australia y Nueva Zelanda.
- Celulosa Birch producida con abedules del norte de Europa, los principales productores son Finlandia y Suecia.
- Celulosa NMHW (Northern Mix Hard wood) producida por una mezcla de varias especies de madera dura principalmente en Canadá, Francia, Japón, Corea y este de Europa.
- Celulosa MTH (Mix Tropical Hardwood) producida con una mezcla de varias especies tropicales de madera dura de Indonesia.

- Celulosa SMHW (Southern Mix hard wood) producida con una mezcla de varias especies de madera dura en el sur de Estados Unidos. En el mercado es valorada con un mayor precio (Peñaloza 2004).

En la industria de alimentos, la celulosa es sometida a modificaciones generando una serie de compuestos que poseen múltiples propiedades funcionales, algunas celulosas modificadas son:

- ❖ *Carboximetil celulosa* que se utiliza como espesante.
- ❖ *Celulosa microcristalina* que se obtiene por hidrólisis ácida de la celulosa, es un polvo blanco, fino, y es usado como anticompactante y en la industria farmacéutica para elaborar tabletas.
- ❖ *Hemilcelulosa*.
- ❖ *Éteres de celulosa* que forman geles en caliente y son usados en productos que se verán sometidos a la fritura.

2.6. Potencialidad de los agaves tequilero, mezcalero y pulquero para la obtención de pulpa de celulosa

México es el país privilegiado debido a la diversidad de agaves que posee; es el centro de origen y diversidad natural, además este grupo de plantas ha brindado una amplia gama de productos (alimentación, habitación, espiritual, recreación entre otras). Se han encontrado piezas arqueológicas como cucharas de piedra, utilizadas para obtener aguamiel de los magueyes, las cuales tienen 12,000 años de antigüedad (Colunga et al., 2007).

En México antes de la Revolución Mexicana las tres industrias más importantes de pulque, tequila y cuerdas de fibras naturales basaban su producción en los agaves. Hace más de cien años se producían en México 300 millones de litros de tequila, una cantidad mayor a la que se produce actualmente (CRT, 2008); sin embargo, de pulque se producía el doble: 600 millones de litros anuales y en cuanto el 60 % de las cuerdas de todo el mundo estaban fabricadas con henequén mexicano, actualmente la agroindustria de la producción de fibra se encuentra en franca decadencia y ha disminuido drásticamente en los últimos años (Colunga, 2007). Como testimonio

de dicha grandeza queda un gran número de lujosísimas haciendas pulqueras en Puebla, Tlaxcala, Hidalgo y henequeneras en Yucatán, y una importante industria tequilera.

Desde la época prehispánica, el agave (Figura 3) era venerado por los pobladores de América Septentrional, debido a que esta planta brindaba innumerables beneficios para ellos.

El agave representaba a la Diosa de la fertilidad de cuatrocientos pechos (Mayahuel). Todas las partes del agave eran aprovechadas por los pobladores. Las hojas o pencas eran usadas para la elaboración de techos y producción de combustible, las cenizas de las hojas residuos de la combustión eran usadas como jabón, la savia era utilizada para curación de heridas y piquetes de insectos, las fibras del maguey se usaban para la confección de vestimentas, cuerdas, papel y recipientes, los escapos o quiotes eran utilizados como vigas para sostener techos de corrales, las espinas eran usadas como agujas y clavos. De la piña obtenían aguamiel, que posteriormente era sometida a un proceso de fermentación para la elaboración de pulque. El término agave significa “admirable” (Granados, 1999).

Históricamente el agave ha formado parte de la cultura productiva de miles de comunidades en México, sin embargo, no han desarrollado todo su potencial. Su importancia económica, social y cultural, se ha expresado por su amplia gama de usos y virtudes; entre las cuales se destacan la producción de bebidas como el tequila, el pulque y el mezcal, la elaboración de fibras, vestidos, calzados, papel artesanal y piezas artesanales; además se aprovecha para la preparación de productos medicinales, y fabricación de tabiques y adobes, entre otros (Granados, 1999; Colunga et al, 2007). debido a su alto contenido de azúcares y celulosa, los agaves constituyen una importante alternativa como fuente de obtención de pulpa de celulosa no maderera. Se ha reportado por ejemplo el uso potencial del bagazo de cocuy (*Agave Cocui Trelease*) para su utilización como materia prima en la elaboración de pulpa para papel (Veroes, 2004).

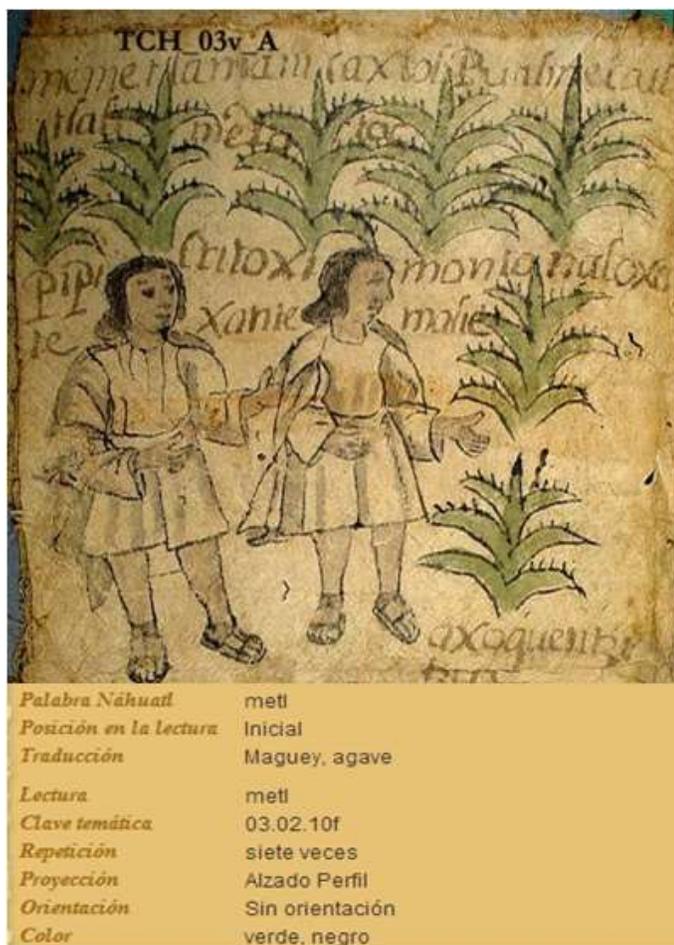


Figura 3. Códice Techialoyan-Chalco. Agave (metl), siete repeticiones. Fuente: Tomado de http://www.tetlacuilolli.org.mx/glifos.php?id_comp_glifico=1236721625&act=ant&ord_glifo=1288214987

También se han realizado investigaciones referentes a la obtención de pulpa de bagazo de *Agave tequilana* para la elaboración de papel, para lo cual se utilizaron técnicas de pulpeo mecánica, químicas y biológicas. El estudio demostró que es viable esta aplicación sin embargo la resistencia del papel fue baja (Idarraga, 1999). Esto indica que aún a la fecha los estudios no resultan concluyentes.

Escoto-García y colaboradores (2006) realizaron una investigación en la que proponen una alternativa para el uso de este subproducto (residuo o bagazo de agave) como papel hecho a mano, en el cual se somete al bagazo a un tratamiento fermentativo-químico-mecánico para promover la flexibilización de la estructura interna del haz fibroso, provocar el ablandamiento de la lignina en la pared celular y la separación de los haces fibrosos, así como la fibrilación interna

y externa de la pared celular de las fibras de agave. A partir de este tratamiento se obtuvo un papel hecho a mano con una buena textura. Sin embargo, tampoco se hace referencia a que se haya podido obtener propiamente una pulpa de celulosa de calidad competitiva para elaborar papel de calidad.

Por otra parte, cabe destacar que los agaves presentan características importantes que les confieren ventajas económicas, sociales, ecológicas y ambientales sobre otras especies. A continuación, se enlistan distintas ventajas competitivas sobresalientes de los agaves (Rigal, 1997; Idarraga, 1999; García-Mendoza, 2007; Kestur et al., 2013) con respecto a otras especies vegetales que puedan aportar azúcares y fibras:

- Especies xerófitas, adaptadas a crecer en condiciones climáticas desfavorables, con largos periodos de sequía y altas temperaturas.
- Amplia adaptabilidad en ecosistemas diversos (poseen estrategias para sobrevivir en ambientes secos o periódicamente secos).
- Tienen a limitar la pérdida de agua por transpiración y la acumulan en tejidos especializados.
- Poseen un sistema radical superficial, por ende, facilita la absorción de agua de lluvia.
- Tienen un metabolismo especializado ácido crasuláceo (CAM). Es decir, abren sus estomas durante la noche para evitar la pérdida de agua.
- Contienen altos porcentajes de azúcares y de celulosa además posee fibras de alta calidad, y bajos contenidos de lignina.
- Proporcionan altos rendimientos en las cosechas.
- Producción masiva, sus cosechas pueden ser mecanizadas.
- Pocos requerimientos para el cultivo (riego, fertilización, cosecha).
- Bajo costo de producción, lo cual los hace rentables.
- Diversos usos que presentan una alternativa de negocio.
- Con respecto a especies madereras, su período de regeneración es más corto (entre 5 y 7 años, a diferencia de especies arbóreas que tardan de 15 a 30 años).
- Ventajas de tipo ecológico y ambiental ya que manifiestan conservación de suelos al evitar procesos erosivos.

Montañéz y colaboradores (2011) reportaron que la composición química de las hojas de agaves es la siguiente: contenido de humedad, cenizas, lípidos, proteínas y fibra cruda es mayor en las puntas de las hojas y disminuye hacia la cabeza de la planta; el contenido de carbohidratos es alto en la cabeza y decrece en dirección a las puntas de las hojas. No se detecta diferencia significativa ($P \leq 0,05$) en el contenido de humedad en las bases y en las puntas de las hojas (Tabla 1). Tampoco en el contenido de lípidos y proteínas entre la base de las hojas y cabeza o piña del agave (estos resultados son de hojas consideradas como residuos de la explotación de estas plantas en y durante la elaboración de tequila, mezcal y/o pulque).

Tabla 1. Composición química promedio de las diferentes fracciones de *A. tequilana* Azul (Montañéz et al., 2011)

Análisis químico (% en base húmeda)						
Fracción	Humedad	Ceniza	Lípidos	Proteína	Fibra cruda	Carbohidratos
Punta de hoja	81.13 a	2.68 a	0.26 a	0.96 a	9.86 a	5.11 a
Base de hoja	79.41 a	1.76 b	0.12 b	0.64 b	6.24 b	11.83 b
Cabeza	71.10 b	1.16 c	0.10 b	0.62 b	4.00 c	23.02 c

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas según la prueba de Duncan ($P \leq 0,05$)

2.7. Los agaves, especies y/o variedades

Los agaves han tenido y tienen una gran importancia social, cultural, ecológica y ambiental, además cabe resaltar que son pocas las especies que proporcionan al hombre casa, vestido, sustento y salud. Por estas razones, el maguey ha sido calificado como excepcional (Gentry, 1982; Granados, 1999; Colunga et al., 2007; García-Mendoza, 2007).

El género *Agave* es endémico de América. México es el centro de origen de la familia Agavácea, a la cual pertenecen ocho géneros, entre ellos el género *Agave*. De las 273 especies descritas de esta familia que se distribuyen en el continente americano desde Dakota del Norte, EUA, hasta Bolivia y Paraguay, en México se encuentra la mayor diversidad con 205 especies, de las cuales 151 son endémicas (García-Mendoza 2007).

Los agaves tienen una distribución amplia en ambientes limitantes (suelos someros, infértiles y secos), ya que son plantas xerófilas, adaptadas a vivir en condiciones climáticas desfavorables,

con largos períodos de sequías y altas temperaturas (Alfaro et al., 2007; Colunga et al., 2007; García-Mendoza, 2007).

Las especializaciones morfológicas a las condiciones adversas consisten en modificaciones en la estructura básica de una planta como respuesta a las presiones del ambiente. Los agaves poseen estrategias para sobrevivir en ambientes muy secos, periódicamente secos, especialmente en suelos, con fuertes fluctuaciones de temperatura entre el día y la noche, las cuales tienden a limitar la pérdida de agua por transpiración y a acumular en tejidos especializados (Granados, 1999; Colunga et al., 2007).

El desarrollo de succulencia en las hojas es una de sus adaptaciones más conspicuas, ya que el agua almacenada durante la época de lluvias permite que las plantas sobrevivan durante algún tiempo en ausencia de suministro de agua del exterior, lo que ocurre cuando las condiciones del suelo son tales, que la raíz ya no es capaz de extraerla de él (García-Mendoza, 2007). El sistema de la raíz de los agaves es superficial, lo cual facilita la absorción de agua de lluvia, generalmente escasa en las zonas más áridas, que sólo humedecen la superficie del suelo; de tal manera que la probabilidad de supervivencia de una roseta que forma la planta, en sequías prolongadas, depende del volumen de agua y de los carbohidratos almacenados durante las épocas favorables.

Asimismo, en época seca el agua almacenada ayuda a mantener las reacciones bioquímicas y la apertura de estomas para la asimilación de carbono (CO_2), aún en condiciones prolongadas de sequía, que pueden durar hasta siete años. El abundante desarrollo de fibras en los tejidos de las hojas o pencas (nombre con el cual también se le conoce) mantiene su rigidez durante los periodos de pérdida de agua, logrando con esto que no se deformen los tejidos; esta función se complementa con la presencia de espinas laterales (hojas dentadas) en ambos bordes de las hojas y una espina apical o terminal (García-Mendoza, 2007; 2010).

Los estados más ricos en número de especies de agave son Oaxaca, Chihuahua, Sonora, Coahuila, Durango y Jalisco. De las especies que se encuentran en México, más de 36 pertenecen a categorías intraespecíficas (es decir presentan autoploidia, que, en términos genéticos, se define como el fenómeno por el cual se originan células, tejidos u organismos con tres o más

juegos completos de cromosomas de la misma o distintas especies o con dos o más genomas de especies distintas) (García-Mendoza, 2007; González et al., 2011) lo cual contribuye a que se tenga un total de 186 taxones. De acuerdo con el planteamiento anterior se comprende que no existen otros lugares o especies más destacados que se encuentren fuera de México.

Entre los agaves que producen bebidas alcohólicas, además del *Agave tequilana* y el *A. angustifolia*, se encuentra el *A. atrovirens* Kawr, *A. lehmannii*, *A. cochlearis* y *A. laticoma jacobii*, de los cuales se obtiene aguamiel, ingrediente fundamental para la producción del pulque (Colunga et al., 2007).

Las evidencias arqueológicas indican que hace más de 10,000 años los grupos nómadas y seminómadas utilizaban distintos tipos de agaves para la extracción de fibras y como alimento. Hacia el año 200 a.C. el maguey se cultivaba en Tula, Tulancingo y Teotihuacan, donde se han encontrado raspadores de obsidiana (Colunga et al., 2007).

Nativo de la península de Yucatán, el henequén (*Agave fourcroydes*) es conocido en muchos países por su fibra. Los antiguos mayas fueron los primeros en utilizar esta especie, aprovechando sus fibras como cuerdas para atar unas a otras las vigas de las casas, preparar trampas para cazar y para tejer hamacas o redes. Pero no fue sino hasta el siglo XIX cuando su explotación adquirió gran importancia y se instalaron las primeras máquinas desfibradoras para producir a gran escala la cordelería para los barcos (Colunga et al., 2007).

El henequén se convirtió así en una de las principales fuentes de ingreso del estado de Yucatán. Sin embargo, al finalizar los años treinta, la prosperidad económica que vivía la región empezó a decaer debido a la drástica disminución de la demanda norteamericana de fibra, pues en varios países tropicales como Cuba, Jamaica, las Bahamas y Hawai se había empezado a cultivar el henequén. A partir de 1937 y hasta 1955, se realizaron en México varios intentos oficiales para reorganizar el sistema productivo del henequén. Se fundaron empresas que formaron ejidos henequeneros para controlar la producción y mejorar la comercialización, pero los resultados no fueron muy alentadores. La producción henequenera siguió decayendo hasta el punto de que,

desde hace más de una década, México importa fibra de sisal procedente de Brasil (Colunga et al., 2007).

Algunas especies de agaves de hojas angostas *Agave lechugilla*, *A. angustifolia* y *A. tequilana* Weber Var. azul y de hojas anchas *Agave americana*, *A. salmiana* y *A. mapisaga*, se describen a continuación:

2.7.1. *Agave lechuguilla* Torr.

Agave lechuguilla Torr: es una de las especies fibreras, de pencas pequeñas (aproximadamente un metro de largo) y de fibras más gruesas que las del henequén. Distribuido ampliamente en el noreste y centro de México, en los estados de San Luis Potosí, Zacatecas, Coahuila, Nuevo León, Hidalgo y Tamaulipas. La fibra de sus cogollos llamada ixtle es utilizada en la elaboración de objetos de jarcería, cestería y cordelería. Su altura es de 50 cm, hojas lanceoladas de 20 cm a 35 cm de largo y 1.5 cm a 4 cm de ancho, color verde que varía de claro a oscuro según el medio; forma colonias de plantas (Gentry 1982; Granados 1999). Esta planta representa una de las pocas fuentes de supervivencia para numerosas comunidades de regiones que sufren escasez de lluvia y suelos poco fértiles en los estados de Nuevo León, Chihuahua, Coahuila, Durango, San Luis Potosí, Zacatecas e Hidalgo (Gentry 1982; Granados 1999).

Agave lechuguilla (Figura 4) en el ámbito industrial es aprovechado principalmente por estados como Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas y Zacatecas, para la fabricación de costales para maíz, café entre otros productos agrícolas; los desperdicios se aprovechan como abrasivos en la industria del vidrio, y en la elaboración de filtros para automóviles, tapetes y alfombras. La manufactura de la lechuguilla se realiza principalmente por la empresa Forestal FCL, que agrupa a más de 600 cooperativas ejidales de estos estados, cuenta con plantas procesadoras y exporta a varios países (Gentry, 1982; Granados, 1999).



Figura 4. *Agave lechuguilla*: Tomado de: <http://3.bp.blogspot.com/-YIfVkoHIqrM/Tl-knMtyz1I/AAAAAAAAAGs/z6Xsco2PrA0/s1600/agave+lechuguilla1.jpg>

2.7.2. *Agave angustifolia* Haw

Agave angustifolia Haw es considerado como el ancestro común de todas las especies de hoja angosta, por lo que es la especie más distribuida en todo México, cambiando de nombre común dependiendo la región (Figura 5). Del destilado de sus jugos cocidos se obtiene “Mezcal” y de su piña cocida el dulce llamado también mezcal o quiote. Las plantas son altas variando de 1.2 m a 1.8 m, hojas de 80 cm a 130 cm de largo y 3 cm a 5 cm de ancho, color verde claro o glauco (Gentry, 1982; Granados, 1999).



Figura 5. *Agave angustifolia* Haw: Tomado de <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/879Agave%20angustifolia.pdf>

2.7.3. *Agave tequilana* Weber, Var. Azul

Agave tequilana Weber, Var. Azul, se localiza principalmente en los estados que tienen la denominación de origen del Tequila: Jalisco, Nayarit, Michoacán, Guanajuato y Tamaulipas (Figura 6). Sus fibras son utilizadas sólo después de pasar por el proceso de producción de tequila, a las cuales se les llama bagazo o marrana y son utilizadas para composta, y eventualmente para relleno de colchonería y paneles para construcción. Sus plantas son parecidas a la especie *A. angustifolia*, antes descrita, variando principalmente en su color azul característico y un poco en la suavidad de sus hojas y en su porte más bajo (Gentry 1982; Granados 1999; Colunga et al., 2007; García-Mendoza 2007).



Figura 6. *Agave tequilana* Weber, Var. Azul: Tomado de <http://www.google.com.mx/imgres?um=1&sa=N&rls=com.microsoft:es-mx>.

2.7.4. *Agave americana* L

Agave americana (maguey cenizo o blanco) se distribuye en los estados del centro del país, entre sus principales usos destacan el ornamental, extracción de aguamiel, forraje para ganado (Figura 7). En el sur del estado de Guanajuato se ha encontrado evidencia de que de él se obtenían fibras muy resistentes utilizadas para hacer sogas, hondas y ayates. Esta especie mide entre 1.0 m a 1.4 m de altura, presenta hojas de 80 - 120 cm de largo y de 15 - 20 cm de ancho, color verde glauco claro o grises. Sus hojas carnosas son características específicas de esta especie, y lisas o suaves al tacto (Gentry 1982; Granados 1999).



Figura 7. *Agave americana*: Tomado de <http://images.latin-wife.com/colombia/images/agave-americana.jpg>

2.7.5. *Agave salmiana* Otto ex Salm

Agave salmiana esta es la especie de hoja ancha con un ámbito de distribución más amplio en México, y se le considera el ancestro común de todas las especies de hoja ancha. Esta especie se aprovecha para la producción de aguamiel y pulque, también es utilizado como forraje para ganado, elaboración de barbacoa y extracción de mixiote (Figura 8). Sus fibras fueron utilizadas para la elaboración de ayates, morrales y cordeles, entre otros. Esta especie mide entre 1.5 - 2.5 m de altura, presenta hojas de 1.2 - 1.8 m de largo y de 20 - 40 cm de ancho, su color varía de verde oscuro a verde glauco (Gentry 1982; Granados 1999).



Figura 8. *Agave salmiana*: Tomado de http://www.medicinatradicionalmexicana.unam.mx/images/atlas/Agave_salmiana2.jpg

2.7.6. *Agave mapisaga* Trel

Agave mapisaga, se encuentra distribuido en los estados del Centro de México (Figura 9). Conocido comúnmente como maguey jilote, penca larga, manos largas o mano de chango, es el de mayor producción de aguamiel, aunque de menor calidad que el de *A. salmiana*. Sus hojas son utilizadas como forraje y sus fibras en la elaboración de ayates y piezas de uso diario como hondas, morrales, cordeles, etc. En varios estados del centro llegan a ser plantas gigantes mayores de 2.5 m de altura, con hojas suculentas gruesas mayores de 2 m de largo, y con ancho de 12 - 20 cm, éstas tienden a curvarse hacia adentro en la parte final, y varían de verde glauco a verde oscuro (Gentry 1982; Granados 1999).



Figura 9. *Agave mapisaga*: Tomado de <http://pics.davesgarden.com/pics/2008/02/11/Equilibrium/1d4d47.jpg>

2.8. Los agaves pulqueros, mezcaleros y tequileros

En los valles centrales de Oaxaca, crecen varias especies de agaves mezcaleros como el *Agave angustifolia* y *A. korwinskii*. La primera es la más utilizada para la elaboración de este tipo de aguardiente muy característico de nuestro país, el mezcal (Pérez, 2007).

El mezcal de Oaxaca de gusano es por antonomasia propio de los mexicanos y en segundo plano es el mezcal de Guerrero. El panorama general de los mezcales en México es muy diverso; aproximadamente 18 de las entidades federativas de México (entre ellas, el estado de Hidalgo) producen algún tipo de mezcal: esto es, un destilado a partir de agaves (Colunga et al., 2007).

A nivel mundial el tequila es la bebida destilada más famosa obtenida del *Agave tequilana* Weber (agave azul); la denominación de origen fija la zona de producción en todo el estado de Jalisco

(sus 124 municipios), 30 municipios de Michoacán, 6 de Guanajuato, 8 de Nayarit y 11 de Tamaulipas (SIC, 2008).

El clásico mezcal de Oaxaca es obtenido del *Agave angustifolia Haw* (o espadín) y el de Guerrero es de *Agave cupreata*. Asimismo, hay mezcales en Sonora (el bacanora), en Tamaulipas, en San Luis Potosí (que fue importante exportador en el siglo XIX), en Michoacán, en Durango, en Coahuila, en Nuevo León, en Veracruz, en Puebla, en Querétaro y en Hidalgo (Colunga et al., 2007).

El procedimiento de elaboración del mezcal es similar al del tequila en ambos casos se incluyen cuatro procesos: cocimiento de la "piña", su machacado, fermentación y destilación. Sin embargo, la producción de mezcal sigue siendo muy rudimentaria, pues el cocimiento de la "piña" del maguey se realiza en un horno construido bajo tierra, el machacado se lleva a cabo con la ayuda de caballos o bueyes, la fermentación se realiza en barricas de roble, y mientras el tequila se destila dos veces, el mezcal se destila solamente una. Por eso, el mezcal recién destilado tiene más color y sabores más concentrados, mientras que el tequila sale del alambique blanco, transparente y con sabor más delicado (Colunga et al., 2007). En épocas recientes el mezcal empezó a incursionar en mercados internacionales como los de Francia, España, Singapur y Taiwan, entre 1994 y lo que va del presente año, la Asociación de Magueyeros de Oaxaca, que reúne 25 socios del distrito de Tlacolula, logró exportar a esos países más de 700 mil litros de mezcal de agave 100%, envasado de origen. La producción anual en el estado de Oaxaca es de aproximadamente 5 millones de litros, con lo cual se benefician alrededor de 5 mil familias que cultivan el maguey en un área de entre cinco y siete mil hectáreas.

Así como el tequila obtuvo oficialmente una denominación de origen, se sugirió que lo mismo debía otorgársele al mezcal. Actualmente se reconoce la existencia de una región mezcalera en el estado de Oaxaca, y ya existe la norma que señala las especificaciones físicas y químicas tanto para el mezcal 100 % de agave (el que contiene azúcares que proceden exclusivamente del agave), como para el que se denomina simplemente mezcal (y que puede contener hasta 40 % de azúcares de otros productos) (DOF 2003). Esta norma deberá aplicarse también en los estados que tienen especies productoras de mezcal como Guerrero, Durango, San Luis Potosí, Hidalgo y Zacatecas. Las fibras o llamado bagazo se desechan como un residuo sin utilidad.

Independientemente del valor comercial de los agaves, el beneficio ecológico que representan para la conservación de los suelos debería ser una más de las razones para su conservación. Pero los agaves, así como muchas otras plantas, son objeto de una explotación desmesurada. Una de las especies actualmente en peligro de extinción es *Agave victoriae-reginae*, planta endémica de México y con apenas unas cuantas poblaciones en los estados de Coahuila, Durango y Nuevo León (González-Elizondo, 2011). El pulque constituyó una de las riquezas del estado de Hidalgo, durante varios siglos y dejó a la posteridad la infraestructura de las grandes haciendas que hoy integran una ruta cultural de gran atractivo. En la región de Apan sobreviven las estructuras de media docena de haciendas pulqueras. En la figura 10 se muestra la ubicación geográfica de las regiones productoras de mezcal, el estado con mayor producción es Oaxaca con más del 60 % de la producción nacional. Ha aumentado su producción de 2 millones 875 mil litros en 1995 a cuatro veces más, es decir a unos 8 millones 400 mil litros en el 2000. En 1994 el 78 % de la producción fue destinada para el mercado nacional y el resto se exportó a diferentes países de América Latina y Asia. En el año 2000 el consumo nacional del mexcal Oaxaqueño representó el 44% y el restante se exportó a los destinos antes mencionados (Ramales et al., 2002; Baena, 2005; Secretaria de economía, 2009).



Figura 10. Ubicación geográfica de las regiones productoras de mezcal.

Fuente: Tomado de:

https://www.google.com.mx/search?q=zona+mezcalera&rlz=1C1AOHY_esMX712MX728&source=lnms&tbn=isc&sa=X&ved=0ahUKEwju0MTAvvDUAhUV24MKHVBVAawQ_AUICygC&biw=1024&bih=509#imgre=N8kP3koEu8LI0M:

3. JUSTIFICACIÓN

Misra, citado por Santiago y colaboradores (2000), señala que se han registrado producciones hasta de 64,000 toneladas de pulpa blanqueada de alta calidad de fibra larga obtenida de sisal (*Agave sisalana*) y agrega, que tiene una resistencia a la rotura excepcionalmente elevada, siendo el resto de sus propiedades de resistencia comparables a las pulpas de madera de coníferas (Parra y col. 2010).

La posibilidad de encontrar un aprovechamiento económico o valor agregado a los desechos de las agaváceas tequileras, pulqueras y mezcaleras, mismos que se derivan de la explotación y obtención de pulque, mezcal, tequila, aguamiel y otras, y conociendo que en estos residuos existe una cantidad apreciable de material celulósico constituyen un reto para incorporar una nueva fuente de materia prima para la industria fabricante de papel en México y en especial en la región central del país.

Es conocido que la base celulósica de la pulpa que emplea la industria papelera es base madera (obtenida de árboles maderables sistemáticamente y en detrimento del medio ambiente). Los árboles maderables son recursos naturales renovables que tardan varios años en su desarrollo y crecimiento (más de 20 años) en tanto que las agaváceas son cultivos de 7-8 años y de fácil manejo. En grandes extensiones de magueyales pueden llegar a recolectarse cientos de toneladas de desechos que servirían para la producción de pulpa de celulosa. Por otra parte, los problemas de erosión que presentan la mayoría de los suelos de zonas áridas, se verán beneficiadas por el desarrollo extensivo de los cultivos de estas especies de agaves.

El maguey tequilero, pulquero y mezcalero es una planta de la familia de las agaváceas, que crece en una región del altiplano que se encuentra localizada entre los estados de Hidalgo, Estado de México, Tlaxcala, Puebla y Querétaro. Los cultivos ocupan terrenos donde el riego es difícil, tanto por la escasez de agua como por la topografía, con periodos de heladas, suelos duros y resacos, en general pobres. En el estado de Hidalgo debido a la destrucción masiva de áreas con cultivo de maguey, ahora sólo un 74 % de la superficie cultivada presenta graves problemas de

erosión del suelo; en 1960 había un total de 26,000 hectáreas sembradas de maguey y para 1970 disminuyó a 16 000 misma cifra registrada 24 años más tarde.

El pulque no representa una opción comercial como en el pasado, el nivel de consumo y su precio de venta a disminuido, la disponibilidad del aguamiel como materia prima ha decrecido. Sin embargo, el aguamiel constituye un sustrato rico para fermentación y para formulación de bebidas. De todas estas producciones que se derivan de estas variedades, incluidas las mezcaleras, se derivan grandes volúmenes de residuos de altos contenidos fibrosos ricos en celulosa.

El mercado internacional para el pulque, tequila, mezcal y otros derivados que se pretenden obtener y en particular en comunidades con presencia hispana tienen un poder de compra que sobrepasa con mucho el tamaño, volumen y precio del pulque como principal producto del maguey pulquero vendido en México. El incremento en precio de venta oscila entre 8 a 15 veces el valor de mercado de pulque fresco en la Ciudad de México. Además de lo mencionado con anterioridad, los residuos pueden ser utilizados como materia prima para la elaboración y desarrollo de la industria papelera, lo que conlleva a una investigación viable, interesante y productiva.

Se pretende desarrollar nuevos métodos o variantes de técnicas más eficaces y económicos para la obtención y caracterización de celulosa a partir de distintas especies de agaves cultivados en las regiones o municipios del estado de Hidalgo. Varias técnicas son espectroscópicas y serán desarrolladas y utilizadas como variantes para la caracterización, de diversos métodos analíticos que están involucrados dentro del proceso en general.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivos generales

1. Obtener muestras de cuatro especies de agaves (*Agave salmiana*, *Agave lechuguilla*, *Agave angustifolia* y *Agave tequilana*). Obtener fibras de celulosa a partir de tres de las especies de agaves seleccionadas (*Agave salmiana*, *Agave lechuguilla* y *Agave tequilana*) cultivados en las regiones pulqueras y mezcaleras de los estados de Hidalgo y Jalisco, con el máximo aprovechamiento económico y sustentable de dichas agaváceas.
2. Desarrollar métodos específicos con variantes en las técnicas eficaces y económicas para la obtención y caracterización de pulpa de celulosa a partir tres especies de agaves y la obtención de hojas de papel artesanal.

4.2. Objetivos específicos

- Recolectar y clasificar taxonómicamente tres especies de agaves pulqueros y mezcaleros de los estados de Hidalgo y Jalisco.
- Evaluar sus características fisicoquímicas y realizar determinaciones de fibra de celulosa en base seca, mediante diferentes métodos analíticos.
- Obtener pulpas de celulosa ($C_6H_8O_6$) por dos métodos o variantes de digestiones alcalinas (pulpeos alcalinos) en hojas maceradas (eliminación de lignina y hemicelulosa) de las especies mencionadas y mediante el método ácido conocido como Organosolv.
- Evaluar las características y eficacias en todos los casos y optimización de los procesos más factibles de obtención de pulpas de celulosa.

Objetivos

- Evaluar en las pulpas de celulosa obtenidas, las posibilidades de blanqueo y refinación mediante el empleo de clorito de sodio y ácido acético.
- Optimizar los procesos de pulpeo y blanqueo mediante un diseño experimental de optimización de variables por niveles.
- Caracterizar analíticamente las pulpas de celulosa obtenidas mediante técnicas de FTIR, DRX, TGA y otras técnicas espectroscópicas, que permitan comparar las calidades obtenidas y compararlas con pulpas industriales de celulosa obtenidas a partir de madera y en grado reactivo.
- Conformar a escalas de laboratorios hojas de papel (artesanal) con las pulpas de celulosa obtenidas y aplicar los rellenos más efectivos y evaluar algunos parámetros básicos en la calidad del papel.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Zona de estudio

Se realizó el muestreo de cuatro especies de agaváceas a evaluar en este estudio (Figura 11). El muestreo se efectuó en los estados de Hidalgo, Oaxaca y Jalisco. Se han muestreado las especies por lugares georeferenciados (Tabla 2). Es pertinente mencionar que la especie *Agave tequilana* Weber, Var. Azul no se encuentra distribuida en el estado de Hidalgo, lo que corresponde a lo reportado con Ruiz (2007), que sólo es cultivable en municipios de los estados de Jalisco, Guanajuato, Michoacán, Nayarit y Tamaulipas, a pesar de que se adapta a un amplio rango altitudinal. *Agave tequilana* se desarrolla óptimamente en el intervalo que va de 700 a 2000 msnm (Vargas, 2004) lo cual permite explicar por qué no es admisible en Hidalgo con altitudes comprendidas entre 2100 y 3500 msnm. Esta especie *A. tequilana* fue colectada en el municipio de Tequila, en Jalisco.

Tabla 2. Localización geográfica de toma de muestras de agavaceas

Especie	Municipio, Estado	Coordenadas	Altitud (msnm)
<i>Agave angustifolia</i> Haw.	Zimatlán, Oaxaca	16°45'05.4" N y 96°49'47.8" O	1654
<i>Agave lechuguilla</i> Torr.	San AgustínTlaxiaca, Hidalgo	20°05'26.5" N y 98°52'19.5" O	2853
<i>Agave salmiana</i> B. Otto ex Salm-Dick	Epazoyucan, Hidalgo	20°00'02.5" N y 98°36'28.9" O	2220
<i>Agave tequilana</i> Weber, Var. Azul	Tequila, Jalisco	21°12'30" N y 103°36'00" O	850

5.2. Preparación de las muestras

Para esta investigación el trabajo se dividió en bloques de especialidades: Bloque botánico, Bloque físico y Bloque químico.

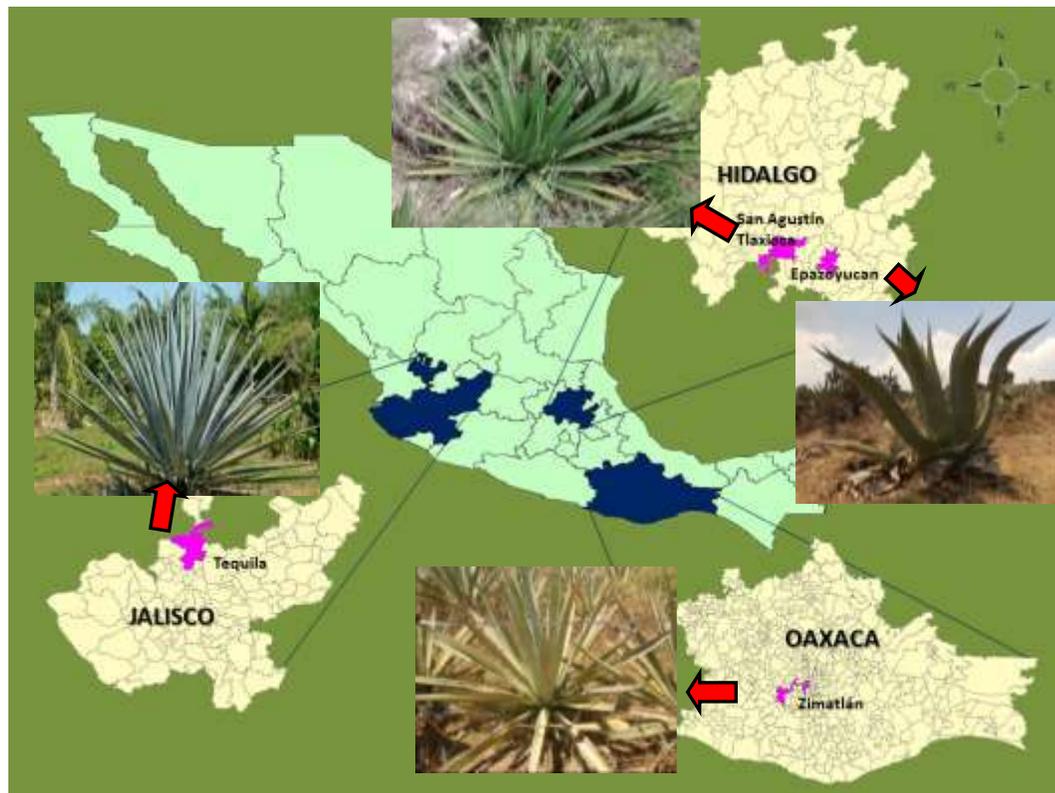


Figura 11. Ubicación de los estados de la república donde se tomaron las muestras de agaves

5.2.1. Bloque botánico

En el bloque botánico la clasificación taxonómica, ecológica y etnobotánica de las especies de agaves bajo estudio, se realizó en gabinete, mediante una revisión de bibliografía especializada (Gentry, 1982; García y Lot, 1994; Maiti, 1995; García, 2007; García et al., 2009). Se contó con el apoyo del Herbario Nacional de México (MEXU) del Instituto de Biología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). En los lugares cercanos a centros de población o núcleos humanos se entrevistó a los lugareños sobre la utilidad y origen de los magueyes observados, a través de conversaciones informales, con el fin de evitar el sesgo de las respuestas obtenidas (Camejo et al., 2003).

5.2.2. Bloque físico

En el bloque físico las muestras de especies de agaves fueron sometidas a determinación de humedad, posteriormente se procesaron en molienda, tamizaje y granulometría convenientes para posteriores procesos. Se caracterizaron en sus dimensiones y otras características foliares de las hojas y la planta. Además, también las muestras fueron analizadas por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) para precisar las morfologías de las fibras observables y analizadas en tamaños y distribución de fibras. Así mismo el material celulósico precursor fue analizado por espectroscopia infrarroja (FTIR); además, se realizó el análisis termogravimétrico (TGA) y derivativo (DTGA).

El análisis morfológico de los productos tamizados se realizó utilizando un microscopio electrónico de barrido de la firma JEOL, modelo JSM-820. En este análisis se observaron las características de las fibras obtenidas por tratamiento físico (antes de los pulpeos).

Los espectros de infrarrojo de los precursores y de las pulpas de celulosa se obtuvieron usando un espectrofotómetro de infrarrojo con transformada de Fourier NICOLET modelo Protege 460 Magna en un rango de longitud de onda de 4000 cm^{-1} a 400 cm^{-1} .

Los análisis térmicos se llevaron a cabo en un analizador térmico de la firma METTLER-TOLEDO, modelo TGA/SDTGA-851, en crisoles de aluminio de $40\text{ }\mu\text{L}$ y con un barrido de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ a una velocidad de $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$.

5.2.3. Bloque químico

Para los análisis químicos se consideraron las determinaciones de los contenidos en: cenizas (CEN), materia soluble en agua caliente considerado como azúcares totales (AT) y solubilizables, materia soluble en NaOH al 1% (HS) y materia extraíble en disolventes orgánicos (EXT), en este caso solución etanol-agua 1:1. Además se determinaron grasas (G), lignina (LIG), holocelulosa (HOL), α , β y γ celulosa (CEL). Para ello se utilizaron las normas UNE y Tappi, mientras que el contenido en holocelulosa se realizó por el método de Wise (AOAC, 1995; Alcántar y Sandoval,

1999; Rodríguez et al., 2001; TAPPI, 2004; Iñiguez et al., 2005; García et al., 2009). Los análisis de FTIR se realizaron acorde a con Rosas y Fernández (2012) y las muestras secas, obtenidas de la determinación de humedad, fueron analizadas en pastillas con KBr en un equipo FTIR Perkin Elmer (Spectrum one), entre $400\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$ y 4 cm^{-1} de resolución.

La determinación de lignina se realizó por el método Klason según la norma TAPPI T222om-88 (TAPPI, 2004b). Las muestras secas, trituradas, tamizadas y libres de extraíbles, con una pesada de 0.5 g, se colocaron en un vaso de precipitado, agregando 15 ml de ácido sulfúrico concentrado (72%) y frío, lentamente y en pequeñas porciones, manteniendo el vaso en lugar fresco y evitando sobrecalentamiento. Se homogenizó la muestra y el ácido y se cubrió con un vidrio reloj y se dejó en reposo manteniendo a temperatura ambiente durante dos horas. La mezcla se diluyó cuidadosamente completando a 575 ml con agua; la solución se colocó en ebullición por cuatro horas, procurando mantener el volumen constante, añadiendo pequeñas porciones de agua caliente y se esperó hasta enfriarse a temperatura ambiente, se filtró y el residuo se dejó secar hasta peso constante para determinar el contenido de lignina.

El contenido de Holocelulosa (indica el total de carbohidratos, celulosa y hemicelulosas), se determinó mediante el método Wise (Santiago et al., 2002; TAPPI, 2004a; Hernández, 2008) primero se pesaron exactamente 5 g de las muestras secas, trituradas, tamizadas y libres de extraíbles y se colocaron en un matraz Erlenmeyer® con capacidad de 500 mL, posteriormente fueron tratadas con una solución de clorito de sodio (NaClO_2) de 1.5 g en 160 mL de agua a la que previamente se le añadieron 10 gotas de ácido acético (CH_3COOH) concentrado; la mezcla se mantuvo en baño María a $75\text{ }^\circ\text{C}$ por una hora. Después de este tiempo se agregaron 1.5 g de clorito de sodio (NaClO_2) y 10 gotas más de ácido acético concentrado (CH_3COOH), se agitó y se dejó en reposo: el proceso anterior se repitió hasta completar 4 horas.

Posteriormente se dejó enfriar a temperatura ambiente y se filtró a vacío a través de papel de filtro N° 41 previamente tarado, se lavó con agua caliente y posteriormente con acetona. El filtrado recibido se llevó a la estufa y se dejó secar hasta peso constante a $45\text{ }^\circ\text{C}$ determinado así la holocelulosa.

La alfa, beta y gamma celulosas se realizaron siguiendo la norma TAPPI 203 om-88, en una muestra de 1.5 g del material seco, triturado, tamizado y libre de extraíbles y que había sido sometido al proceso de determinación de holocelulosa, este material de holocelulosa fue colocado en un vaso de precipitado de 250 ml, se le añadieron 75 ml del reactivo de NaOH al 17.5 %. La muestra se agitó con una varilla de vidrio hasta que la mezcla estuvo completamente homogénea. El material adherido a la varilla se retiró, con 25 ml del reactivo de sosa al 17.5 %, se añadió al vaso de precipitado para completar 100 ml de reactivo, después de un periodo de 30 minutos se añadieron 100 ml de agua destilada a $25^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{C}$ a la suspensión y se agitó completamente con la varilla. Se dejó el vaso de precipitado a baño maría por otro periodo de 30 minutos para que el tiempo total de extracción fuera de 60 ± 5 minutos. Al término del periodo de 60 minutos, se agitó la suspensión de la muestra con una varilla y se pasó al embudo de filtración. Se colectaron alrededor de 100 ml del filtrado en un matraz de filtración limpio y seco.

Para la determinación de alfa-celulosa se tomaron 10 ml del filtrado y 20 ml de solución de dicromato de potasio 0.5 N, se colocaron en un matraz de 250 ml. Se agregaron 30 ml de H_2SO_4 concentrado. La solución permaneció caliente por 15 min, después se le agregó 50 ml de agua y se enfrió a temperatura ambiente, una vez frío se le añadió de 2 a 4 gotas de indicador ferroína y se tituló con la solución de sulfato de amonio ferroso 0.1 N hasta color púrpura. La titulación en blanco se realizó sustituyendo el filtrado del material con 5 ml de NaOH al 17.5 % y 5 ml de agua.

Para el cálculo del % de α -celulosa se utilizará la expresión:

$$\% \alpha\text{-celulosa} = 100 - \frac{6.85 (V_2 - V_1) \cdot N \cdot 20}{A \cdot W}$$

Donde:

V1 = Volumen gastado en la titulación del filtrado de la pulpa (ml)

V2 = Volumen gastado en la titulación del blanco (ml)

N = Normalidad exacta de la solución de sulfato de amonio ferroso

A = Volumen del filtrado de la pulpa usado en la oxidación (ml)

W = Peso de la muestra de la pulpa secada en la estufa (gramos)

6.85 = Factor. Teóricamente, el miliequivalente de dicromato de potasio corresponde a 6.75 mg de celulosa y otras hexosas, y 6.6 mg de pentosanos. Bajo las condiciones de este método, el cual consume menos oxidante, se ha encontrado que 1 miliequivalente corresponde a 6.85 mg de celulosa y otros carbohidratos disueltos (NMX-N-22-1988).

La determinación de β -celulosa se determinó según la técnica TAPPI 203 om-88 (TAPPI, 2004a), se realizó por diferencia del 100 % luego de determinar los porcentajes de α -celulosa y γ -celulosa según la expresión:

$$\% \beta\text{-celulosa} = 100 - (\% \alpha\text{-celulosa} + \% \gamma\text{-celulosa})$$

Se tomaron 50 ml de material filtrado y se colocaron en un matraz Erlenmeyer® de 250 ml y se le agregaron 50 ml de H_2SO_4 3.00 N. Se calentó el matraz durante unos minutos en un baño de agua caliente a temperatura entre 70-90 °C para coagular la β -celulosa. El precipitado se dejó sedimentar por 15 horas. Se realizó una valoración de un blanco sustituyendo el filtrado por 6.25 ml de NaOH al 17.5 % y 6.25 ml de agua, a los que se le añadieron 20 ml de H_2SO_4 3.00 N, 10 ml de dicromato de potasio al 0.5000 N y 50 ml de agua. El cálculo para determinar la γ -celulosa se realizó por la expresión:

$$\% \gamma\text{-celulosa} = \frac{85 \cdot (V_4 - V_3) \cdot N \cdot 20}{25 \cdot W}$$

Donde:

V_3 = Volumen gastado en la titulación del filtrado después de precipitar la β -celulosa (ml)

V_4 = Volumen gastado en la titulación del blanco (ml)

N = Normalidad exacta de la solución de sulfato de amonio ferroso

W = Peso de la muestra de la pulpa secada en la estufa (gramos)

6.85 = Factor. Teóricamente, el miliequivalente de dicromato de potasio corresponde a 6.75 mg de celulosa y otras hexosas, y 6.6 mg de pentosanos. Bajo las condiciones de este método, el cual consume menos oxidante, se ha encontrado que 1 miliequivalente corresponde a 6.85 mg de celulosa y otros carbohidratos disueltos (NMX-N-22-1988).

5.3. Obtención de pulpas de celulosas

La obtención de la celulosa se realizó por dos métodos de pulpeo:

Pulpeo alcalino mediante el método del sulfato a la sosa, empleando una solución que contiene NaOH, Na_2CO_3 y Na_2SO_4 .

Pulpeo ácido mediante el método Organosolv. Los procesos Organosolv consisten en el tratamiento de los materiales lignocelulósicos con mezclas agua, disolvente orgánico y HCl. La función de este último es actuar como catalizador de la reacción de deslignificación para obtener celulosa y algo de lignina. En la obtención del material holocelulósico se utilizó CH₃COOH como agente deslignificante.

Para ambos métodos las muestras de agaves en estudio, secas y pulverizadas a granulometrías convenientes se hicieron reaccionar con las respectivas mezclas de disoluciones alcalinas o ácidas (Gumeta et al., 2007).

5.3.1. Método de pulpeo alcalino a la sosa

Para los pulpeos alcalinos por el método de la sosa al sulfato, se variaron las concentraciones de NaOH entre 4-12 % m/v, de Na₂CO₃ entre 1.0-2.5 % m/v y de Na₂SO₄ entre 0.2-1.0 % m/v. Para el procedimiento se pesaron cantidades de 10 g y se pasaron a los reactores pertinentes donde se les adicionaron los volúmenes y concentraciones de los reactivos mencionados. Se predeterminó el tiempo de reacción variando entre 24 y 72. Se utilizaron tres reactores para obtener tres réplicas por experimento y en cada uno de ellos se establecieron velocidades de agitación mediante agitadores magnéticos a velocidades entre 300 y 900 rpm. Mediante baño termostático se controlará el proceso a temperatura constante de 60°C.

5.3.2. Método de pulpeo ácido. Método Organosolv

Para los pulpeos ácidos por el método Organosolv se utilizaron concentraciones de CH₃COOH que varió entre 40-80 % m/v, de HCl como catalizador entre 0.5-1.5 % m/v y se completaron los volúmenes con porcentajes de agua entre 20-60 % m/v. Se utilizaron tiempos entre 2 y 6 horas e iguales velocidades de agitación que en el pulpeo alcalino. Estas cantidades son semejantes a las propuestas por algunos autores (Gumeta et al., 2007; Qi et al., 2012; Quintana, 2012). La temperatura será igualmente controlada a 60 °C.

5.3.3. Optimización de los métodos. Diseño de experimentos

Para la optimización de estos métodos se tomaron en consideración las matrices de factores o variables y por niveles, como se muestran en las tablas 3 y 4 para cada método de pulpeo.

Tabla 3. Matriz de variables por niveles. Pulpeo a la sosa

Factores	NaOH % m/v	Tiempo (horas)	Na ₂ CO ₃ % m/v	Na ₂ SO ₄ % m/v	Ruido. Vel. Agit. rpm
Niveles	A	B	C	D	R
1	4	24	1.0	0.2	300
2	8	48	1.5	0.5	600
3	12	72	2.5	1.0	900

Tabla 4. Matriz de variables por niveles. Pulpeo Organosolv

Factores	H ₂ O % m/v	Tiempo (horas)	CH ₃ COOH % m/v	HCl % m/v	Ruido. Vel. Agit. rpm
Niveles	A	B	C	D	R
1	60	2	40	0.5	300
2	40	4	60	1.0	600
3	20	6	80	1.5	900

Se establecieron 4 factores de control o variables para el pulpeo a la sosa (A: Concentración de NaOH en % m/v; B: Tiempo en horas; C: Concentración de Na₂CO₃ en % m/v y D: Concentración de Na₂SO₄, en % m/v) y un factor o variable no controlado (Ruido) que será considerada la velocidad de agitación del sistema en rpm. Así mismo 4 factores de control para el pulpeo Organosolv (A: % de agua m/v; B: Tiempo en horas; C: Concentración de CH₃COOH en % m/v y D: Concentración de HCl en % m/v. Esta matriz da la combinación de los niveles de cada factor en cada uno de los experimentos a realizar, es decir, cada factor (columna) es un vector ortogonal independiente de los demás factores (se ve afectado en la misma proporción por cada uno de los niveles de los demás factores).

Según se reporta en la bibliografía (Barrado et al., 1996), cumplen esta condición de ortogonalidad, un arreglo del tipo $L_9(3^4)$; que significa la realización de 9 corridas experimentales a tres niveles en sus cuatro factores de control.

Para la realización de esta parte experimental se presenta un diseño experimental factorial parcialmente fraccionado saturado aleatorio (método de parámetros de Taguchi) para optimizar el proceso de pulpeo (Massart et al., 1980), con una matriz de diseño que se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Matriz del diseño experimental $L_9(3^4)$

Experimento	Factores de control				Factor de Ruido		
	A	B	C	D	R1	R2	R3
1	1	1	1	1	1	2	3
2	2	2	2	3	4	5	6
3	3	3	3	2	7	8	9
4	1	2	2	3	10	11	12
5	2	3	1	2	13	14	15
6	3	1	3	1	16	17	18
7	1	3	3	3	19	20	21
8	2	1	1	2	22	23	24
9	3	2	2	1	25	26	27

Pulpeo a la sosa. A: NaOH en % m/v; B: Tiempo del proceso en horas; C: Na_2CO_3 en % m/v; D: Na_2SO_4 , en % m/v y R: Ruido velocidad de agitación del sistema en rpm.

Pulpeo Organosolv. A: H_2O en % m/v; B: Tiempo del proceso en horas; C: CH_3COOH en % m/v y D: HCl, en % m/v y R: Ruido velocidad de agitación del sistema en rpm.

El análisis y tratamiento estadístico de los datos experimentales que se obtuvieron fueron analizados en dos etapas:

- ANALISIS REGULAR, que permitirá evaluar la influencia de los factores sobre el valor medio de la respuesta y que consiste en crear una tabla de resultados y representar en una gráfica factorial y de interacciones, estos valores.
- ANALISIS SEÑAL/RUIDO, que evalúa como afectan los factores al valor medio y a la variación entorno a dicho valor medio.

En ambas etapas se realizó un análisis de varianza (ANOVA) que además brindó el porcentaje de contribución de cada uno de los factores a la variación total y la variación debida al error residual.

5.3.4. Experimentos confirmatorios

Una vez obtenidos los parámetros optimizados para cada variable y sus niveles por cada proceso de pulpeo, y siguiendo lo indicado por el método de parámetros de Taguchi, se procedió a realizar los experimentos confirmatorios en las condiciones definidas como óptimas.

5.4. Blanqueo de las pulpas obtenidas

Para el blanqueo de las pulpas obtenidas por ambos procesos (a la sosa y Organosolv) se utilizó clorito de sodio (NaClO_2) grado reactivo, según el método ASTMD-1104. Este método es el mismo que se emplea para determinar holocelulosa por ataque con clorito ácido y que consiste en aplicar varios ataques al material lignocelulósico con ácido y clorito de sodio que degrada a la lignina en productos solubles (ASTMD, 1984, TAPPI, 2004b).

5.5. Caracterización de precursores y pulpas obtenidas y blanqueadas

Se realizaron los análisis térmicos a las muestras de pulpas de celulosas obtenidas de la optimización y blanqueada y se compararon con los respectivos análisis térmicos de las fibras de los precursores correspondientes. Los termogramas fueron obtenidos en equipo TGA/SDTA 851^e de la firma Mettler Toledo y bajo las mismas condiciones explicadas en el apartado 5.2.2.

La DRX se realizó en equipo de Difracción de rayos X de polvos con un equipo modelo Equinox 2000 de la firma INEL para valores de 2θ desde 5° - 60° utilizando radiación $\text{Cu } K_{\alpha}$, y una longitud de onda de 1.5406 \AA .

Se determinó el porcentaje de cristalinidad según:

$$C_{rl} = (1 - I_{\min}/I_{\max}) * 100$$

Donde: I_{\min} es la intensidad de un mínimo a 2θ para la celulosa, entre 14° y 17°

I_{\max} es la intensidad del máximo de 2θ para la celulosa en el plano 002 de 2θ entre 22° y 23° (De Dios et al., 2016).

Según Evans et al. (1995), Canetti et al. (1996) y Goswami et al. (1996), existen pocos métodos adecuados para determinar cristalinidad en pulpas de celulosa y el más adecuado está basado en las intensidades relativas de los picos de difracción principal (plano 002) e intensidad mínima (para el plano 101).

5.6. Elaboración de hojas de papel artesanal

Para la elaboración del papel artesanal se utilizaron los siguientes materiales:

1. Cedazo: consta de dos partes: a) marco de madera con las siguientes medidas: 16 cm de largo por 13 cm de ancho y otro b) marco de la misma medida que el anterior con tela de “malla”.
2. Batea o charola: con las siguientes medidas: 50 cm de largo por 50 cm de ancho y 50 cm de profundidad.
3. Lienzo: franela (tela para secar superficies).
4. Prensa: Dos bloques de madera con las siguientes medidas: 20 cm de largo por 20 cm de ancho.
5. Cuatro soportes como mariposas para poder ajustar en los 4 lados de la madera.
6. Fliselina: esta es una tela que permite colocar el papel para luego secar.

Para la elaboración de hojas de papel artesanal se utilizaron los materiales descritos con anterioridad. Es pertinente mencionar que este proceso se divide en dos etapas principales: 1) elaboración de las hojas de papel y 2) prensado y secado de las mismas. En primera instancia se vierte agua a la charola y posteriormente se agrega la pulpa extraída de los residuos de los

agaves. Posteriormente se introduce el cedazo (marco con “malla”) a la charola que contiene la mezcla de agua y pulpa, esta acción se realiza mediante un movimiento de forma tal que se vaya sumergiendo el cedazo de abajo hacia arriba, de 90° a quedar en 180°. Debe quedar de manera proporcionada y homogénea. Después de esta acción se debe extraer el exceso de agua. A continuación, se debe colocar el papel en una superficie plana. Siguiendo el proceso se debe tomar un bloque de madera y colocar un papel de diario y una fliselina sobre el papel. Después se coloca el cedazo (marco sin “malla”) de tal manera que el papel quede sobre la fliselina. Enseguida se coloca un lienzo sobre el papel para absorber el exceso de agua. Seguidamente se deben remarcar todos los contornos para que el papel se desprenda del cedazo. Una vez que se retira el cedazo, se coloca una fliselina sobre el papel; posteriormente éste debe prensarse. Finalmente se coloca la prensa de forma vertical con el objetivo de que el exceso de agua sea drenando y esperar un tiempo de 12-24 horas para sacar el papel.

5.6.1. Caracterización de las muestras de papeles obtenidas

5.6.1.1. Contenido de humedad

Para la determinar el porcentaje de humedad en las hojas de papel artesanal se siguieron los pasos establecidos en la norma TAPPI T 412 om-94 (TAPPI, 2004). En primer lugar, se cortaron las muestras de papel, y se procedió a tomar lectura del peso a temperatura ambiente, se introdujeron las muestras en la estufa a 105 °C por 2 horas, esto se realizó con el propósito de eliminar la humedad, se colocaron en el desecador por 30 minutos y se obtuvo el peso libre de humedad, el porcentaje de humedad se calculó con la ecuación siguiente:

$$\% \text{ humedad} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} * 100$$

Donde:

W_1 = peso inicial del espécimen (gramos)

W_2 = peso libre de humedad (gramos)

Para determinar el porcentaje de humedad acumulada se pesaron las muestras de papel libre de humedad y se colocaron en desecadores con atmósfera saturada de humedad (100% humedad relativa) y 25 °C. Se predeterminaron tiempos de proceso que variaron de 24 y 96 horas hasta mantener la humedad relativa constante. Se procesaron tres muestras de cada papel por especie por cada método para obtener tres réplicas por experimento (Glatfelter, 2005).

5.6.1.2. Resistencia a la tensión

Es indicativa de la resistencia que soporta una tira de papel al aplicarse una carga y derivada de factores como la resistencia de las fibras, la longitud de ellas y la adhesión (Becerra y Ramírez, 2003). También es importante para el control de calidad, ya que la resistencia a la tensión se usa como indicador de utilidad de muchos papeles que están sometidos a esfuerzo de tensión (Becerra y Ramírez, 2003). La fuerza de tensión se ejerce en dirección perpendicular, sobre una tira de papel de un ancho de 1 cm, sobre la cual se originan dos tipos de esfuerzos, uno en sentido longitudinal y otro en sentido transversal (Método T-404). La resistencia a la tensión se realizó en un Texturómetro TexturePro CT V1.1 Build 7. Forma: Bloque, Longitud 100 mm, Anchura 10 mm, Altura 0.80 mm, Objetivo 5 mm, Carga de activación: 0.067 N, Velocidad del Test: 0.5 mm/s, Velocidad de vuelta: 4.50, Contador ciclos: 1 y Elemento TA-DGA.

5.6.1.3. Gramaje

El gramaje es el peso en gramos por unidad de área (metros cuadrados). Esta característica es importante ya que afecta directamente a todas las propiedades físicas del papel, se debe considerar el gramaje del papel debido a que la mayoría de los equipos de impresión o transformación pueden ajustarse para trabajar papel de diferentes gramajes, sin embargo, ningún equipo amortigua las variaciones del mismo de una hoja a otra (Becerra y Ramírez, 2003). El gramaje de las hojas se determinó mediante una balanza de precisión Ohaus® Adventurer, capacidad de 2100 g, con una precisión de indicación de 0.001 g.

5.6.1.4 Calibre

El calibre es la distancia que existe entre las dos caras de un papel, a esta dirección se le denomina dirección “Z”. El calibre es una propiedad que tiene mucha importancia en las propiedades de los papeles, principalmente en las propiedades físicas, ópticas y eléctricas. El calibre depende directamente del gramaje, la composición fibrosa, la refinación, la compresión (porosidad), humedad, contenido y tipo de cargas o pigmentos. El calibre se midió utilizando un Vernier de 15 cm, con precisión de 0.01 mm.

5.7. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de los resultados se debe señalar que en todos los casos se realizaron determinaciones por triplicado y se realizó una estadística simple de medias, desviaciones estándar y % de coeficiente de variabilidad. Se buscaron diferencias significativas mediante Tuckey a $P < 0.05$. Se realizó el proceso de optimización de las variables para los pulpeos estudiados mediante el método de parámetros de Taguchi utilizando para ello el software ANTM 003071, versión 2.5.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Bloque botánico

6.1.1. Clasificación taxonómica de los agaves en estudio

Los seres vivos se clasifican en taxones o grupos estructurados en una jerarquía de inclusión, en la cual los organismos son circunscritos de acuerdo con características compartidas en cada categoría. Los organismos son clasificados como se muestra a continuación.

Las categorías taxonómicas de los agaves en estudio son (Colunga et al., 2007; García-Mendoza, 2007; Mora et al., 2011):

- División: *Angiospermae*
- Clase: *Monocotyledoneae*
- Orden: *Liliales*
- Familia: *Agavaceae*
- Subfamilias: *Agavoideae*
- Género: *Agave*
- Especie: *Agave* sp.

6.1.1.1. Clasificación fenológica de agaves en estudio

Nombre científico: *Agave angustifolia* Haw.

Nombre(s) común(es): Maguey espadilla o maguey de monte, en Oaxaca (Palma, 1991).

Estatus: Ninguno (NOM-059-SEMARNAT-2010).

Origen: América del Norte (Pérez et Gallardo, 1997).

Forma biológica: Arbusto de 1 a 2 m (Wickens et al. 1987).

Fenología: Hojas: Las hojas pueden vivir entre 5 y 8 años (Palma, 1991); Flores: De mayo a junio (Wickens et al., 1987)

Resultados y Discusión

Distribución en México: Asociación vegetal en sabanas, bosques espinosos y selvas bajas caducifolias (Pérez et Gallardo, 1997). Bosques de *Quercus-Pinus*, *Quercus*, bosque tropical caducifolio y vegetación secundaria derribada (Wickens et al., 1987).

Requerimientos Ambientales: Altitud (msnm): Media: 1,000; Mínima: 0; Máxima: 2,000 (Wickens et al., 1987). Se obtuvo muestra en el municipio de Zimatlán en Oaxaca a una altitud de 1654 msnm.

Suelo: Clasificación (FAO), Luvisol crómico, Cambisol cálcico (Jose et García, 1995); Características físicas: Profundidad: De profundos a medianamente profundos; Textura: Arenolimoso; Drenaje: Bien drenados; Humedad aparente: poca; Color: pardo-oscuro a blanquecino-calcáreo; Características químicas; pH: 5-8.5; Materia orgánica: Moderada (Wickens et al., 1987); Temperatura (16 °C óptima), Media: 20 °C (Jose et García, 1995); Precipitación (mm), Media: 600 a 700 (Jose et García, 1995) Mínima: Menor de 235 (Palma, 1991); Máxima: no reportada

Reproducción: sexual por semillas y asexual por hijuelos (Sánchez, 1989), y por apomixis (Granados, 1993).

Obtención y manejo de la semilla: La reproducción sexual a partir de semillas es compleja y requiere periodos prolongados de cuidados, y generalmente no se practica (Granados, 1993).

Época de recolección y propagación: En los bulbillos después de que desarrolla la inflorescencia (Pérez et Gallardo, 1997). Los hijuelos y los bulbillos se siembran en el periodo de mayo a junio (Granado, 1993). Partes vegetativas útiles son Bulbillos (Pérez et Gallardo, 1997), hijuelos (Sánchez, 1989).

Métodos de obtención: Se extraen los hijuelos y bulbillos de la planta madre mediante un corte (Sánchez, 1989).

Acondicionamiento de la planta previo al trasplante definitivo: Se retiran las hojas maltratadas, las ramillas secas y se dejan expuestas al sol (Sánchez, 1989).

Preparación del terreno: Rastreo y Deshierbe. Si el terreno presenta problemas de malezas se recomienda realizar deshierbes manuales o mecánicos dependiendo de las condiciones del terreno. Si éste presenta pendientes mayores a 12% para evitar la erosión del suelo se recomienda, remover la vegetación solamente en los sitios donde se sembrarán las plantas, franjas o alrededor de las cepas. Esta actividad podrá realizarse por medio de chapear la vegetación, con machetes, o retirarla manualmente (Arriaga et al., 1994). Subsolado: Si el terreno presenta problemas de malezas se recomienda realizar deshierbes manuales o mecánicos dependiendo de las condiciones del terreno. Si éste presenta pendientes mayores a 12% para evitar la erosión del suelo se recomienda, remover la vegetación solamente en los sitios donde se sembrarán las plantas, franjas o alrededor de las cepas. Esta actividad podrá realizarse por medio de chapear la vegetación, con machetes, o retirarla manualmente. Se recomienda disponer las cepas sobre curvas a nivel en un arreglo a tres bolillos. La distancia entre curvas de nivel dependerá de la pendiente del terreno y de la densidad de plantas que se desee establecer.

Apertura de cepas: De 15 a 20 cm de profundidad y 1.5 a 2 m de separación. Dependiendo de las condiciones del terreno las dimensiones y tipo de cepas podrán variar, esto en función de las estrategias de conservación de suelo que se deseen emplear, de las características del suelo, y de las condiciones climáticas (Arriaga et al., 1994).

Plagas y enfermedades: la bacteria *Erwinia carotovora* (Ramírez, 1999) y el ataque del picudo negro (*Scyphophorus acupunctatus*) (=interstitialis) Gyllenhal) (Coleoptera: Curculionidae) (ICAPET, 2001, Solís et al., 2001, Bravo et al., 2007).

Nombre científico: *Agave lechuguilla* Torr.

Sinomia: *Agave glomeruliflora* Engelm. A. Berger. *Agave heteracantha* var. *glomeruliflora* Engelm. *Agave lechuguilla* forma *glomeruliflora*.

Nombre(s) común(es): Lechuguilla en los estados fronterizos del norte de México, tzuta (lengua otomí) - Hidalgo (Martínez, 1979), ixtle (Standley, 1961). Se tomó muestra del municipio de San Agustín Tlaxiaca a una altitud de 2340 msnm.

Estatus: Ley para el manejo sustentable del maguey del estado de Hidalgo (DOF, 2011)

Origen: Zonas áridas de América del Norte.

Forma biológica: Planta en forma de roseta de 50 a 70 cm de altura (Ramírez, 1999).

Fenología: Hojas: Perennifolia, crasas con espinas; Flores: Cada roseta florece sólo una vez (Ramírez, 1999); entre los 6 y los 15 años (Sánchez, 1993); Frutos: Cápsulas.

Distribución en México: Asociación vegetal en Matorral xerófilo (Rzedowski, 1983). Matorral desértico micrófilo y matorral desértico rosetófilo (Sánchez, 1993).

Entidades: En general en los estados fronterizos del norte de México, principalmente en Nuevo León, Coahuila, Tamaulipas (Ramírez, 1999), Durango (Hernández et al., 1999), y también reportado para el sur de Hidalgo (Rzedowski, 1983).

Requerimientos Ambientales: Altitud (msnm) Media: 2,400, Mínima: 2,250 (Rzedowski, 1983) y Máxima: 2,700 (Rzedowski, 1983).

Suelo: Clasificación (FAO), Feozem, Leptosol, Xerosol, Yermosol (Verificado con carta suelo); Rendzina, Leptosol, Foezem, Vertisol, Castañozem (Sánchez, 1993).

Características físicas: Profundidad: Someros; Textura: Franco-arenosa a franca-arcillosa (Sánchez, 1993); Pedregoso. Color: oscuro en Rendzina, pardo-oscuro en Castañozem (Sánchez, 1993); Características químicas del pH: 7.5 a 9.4 (Sánchez, 1993), Materia orgánica: 2.46% (Sánchez, 1993); Sales: Carbonatos en alto contenido de carbonato de calcio (Sánchez, 1993); Fertilidad: alta fertilidad en Rendzina (Sánchez, 1993).

Otros: Temperatura (°C) Media: 20°C; Mínima: -5°C y Máxima: 35°C; Precipitación (mm) de 105 a 600 (Sánchez, 1993; Ramírez, 1999).

Crece en suelos de origen calizo y ocasionalmente arcillosos (Sánchez, 1993).

Propagación principalmente vegetativa, sexual; La temperatura óptima para su germinación es de 25 a 30 °C, germina con altos porcentajes de luminosidad (Baskin y Baskin, 1998). Consistencia adecuada para mantener la semilla en su sitio, el volumen no debe variar drásticamente con los cambios de humedad, textura media para asegurar un drenaje adecuado y buena capacidad de retención de humedad. Fertilidad adecuada, libre de sales y materia orgánica no mineralizada. Cuando el sustrato es inerte una mezcla 55:35:10 de turba, vermiculita y perlita o agrolita, es adecuada (Arriaga et al., 1994). En propagación asexual mediante varetas, esquejes, raquetas, estacas.

Época de recolección y propagación: Desde la última semana de febrero hasta la llegada de las primeras lluvias, de mayo a junio. Partes vegetativas útiles Hijuelos (Sánchez, 1993). Se eligen las plantas con mejor porte y mayor número de pencas, el hijuelo se extrae con una vareta (Sánchez, 1993). Dado que el cultivo de esta especie es recomendable para zonas áridas, difícilmente habrá problemas de malezas. En caso de que existan, lo recomendable es quitar las malezas de manera manual, antes de que éstas produzcan semillas, y dejar la materia orgánica en el suelo.

Apertura de cepas: en las zonas áridas, es recomendable colocar a las plantas por debajo del nivel del suelo, de tal manera que se formen pequeñas hondonadas alrededor de las plantas. Así mismo, es recomendable levantar una barrera semicircular, de unos cuantos centímetros de alto, pendiente abajo de donde se siembre la planta, de tal manera que funcione como un pequeño dique. Depositar materia orgánica en la superficie puede reducir la desecación del suelo y ayudar en la infiltración del agua.

Plagas y enfermedades forestales: Los “escamoles” *Liometopum apiculatum* y *Peltophorus polymitus* perforan las hojas y los cogollos. *Megathymus* sp. barrena los cogollos. *Scyphophorus interstitialis* barrena las hojas. También lo atacan el hongo “secadera”, *Alternaria* sp., y el hongo “fumagina”, *Apnodium* sp. Otras son el picudo de lecheguilla, *S. acupunctatus*, y los roedores (Sánchez, 1993).

Nombre científico: *Agave salmiana* B. Otto ex Salm-Dick

Sinomia: Según Mora et al., (2011), *Agave Salmiana* Otto ex Salm–Dyck es una de las especies de maguey con la variabilidad morfológica más amplia, cuyas variantes se localizan en ambientes con diverso grado de humanización, desde agostaderos de uso múltiple hasta plantaciones y áreas agrícolas. Esta especie destaca por la abundancia de sus variantes y distribución en numerosas localidades en México, desde Tlaxcala hasta Coahuila. En el área geográfica del altiplano mexicano, en particular en regiones del estado de San Luis Potosí, se localizan poblaciones silvestres y cultivadas de *A. salmiana* (Mora et al., 2011), en las que se han descrito las variantes 'Blanco', 'chino' y 'Liso' usadas principalmente para fabricar mezcal. Sus plantas adultas presentan diferencias morfológicas en sus hojas y espinas laterales y en su reacción a la temperatura de germinación en condiciones de laboratorio (Peña et al., 2006; Vázquez et al., 2011). Se obtuvieron muestras del municipio de Epazoyucan, estado de Hidalgo, a una altitud de 2220 msnm.

Nombre(s) común(es): maguey verde, maguey manso, maguey pulquero

Estatus: Ley para el manejo sustentable del maguey del estado de Hidalgo (DOF, 2011)

Origen: originario de Mesoamérica, distribuyéndose desde los 34 ° Latitud Norte hasta los 60 ° Latitud Sur; coincidiendo en nuestro país el centro de origen con el centro de diversidad de especies.

Forma biológica: Planta comúnmente en roseta; de 80 cm a 2 m de alto por 1.2 a 2.5 m de diámetro. Hojas: Presenta de 10-20 hojas; son de forma linear-lanceolada de 70 cm a 2 m de largo por 16 a 40 cm de ancho; carnosas o casi rígidas: sus márgenes son córneos en el ápice y dentados en el resto; color verde claro, a veces verde-amarillentas o verde-glaucos. Inflorescencia: Escapo, en forma de panícula de 3.5 a 8m de largo, cubierto por brácteas carnosas de color verde. Flores: Color amarillo, de 7 a 11cm de largo. Frutos: Capsulares con semillas. Semillas: Negras de 8 a 9mm de longitud por 5 a 7mm de ancho. Características distintivas: Roseta de hasta 1.5 m de diámetro, verde oscuro, las hojas tienen dos o tres líneas ligeramente resaltadas cerca de la espina.

Fenología: Las características del maguey lo han llevado a ser una especie muy apreciada y por lo tanto se ha propagado con intervención humana a otras regiones de nuestro país; se ha llegado a

cultivar en estados como Guerrero y Oaxaca, lugar en donde la producción de mezcales es una actividad muy importante.

Suelo: Arcillosos, pedregosos. Pueden mantenerse en suelos con mucha pendiente; Sol: Abundante, aunque se pueden poner pálidos con excesiva insolación. Agua: Escasa. Si se aplica agua regularmente pueden crecer más rápido.

Nombre científico: *Agave tequilana* Weber, Var. Azul

Sinomia: *Agave tequilana* Weber variedad azul pertenece al subgénero *Agave* y a la sección *Rigidae*, a la cual también pertenecen una gran cantidad de especies fibreras y mezcaleras que se extienden en México y Centroamérica estando ausentes en los Estados Unidos. Este grupo es reconocible por la forma de sus hojas angostas y muy rígidas.

Nombre(s) común(es): Maguey tequilero, agave azul, azul tequilana, Weber

Estatus: Ninguno (NOM-059-SEMARNAT-2010).

Origen: Es una planta perteneciente a la familia *Agavaceae* y originaria de América del Norte (Gentry, 1982). Se encuentra distribuida entre los 5 y 25° de latitud norte y se adapta a regiones subtropicales semiáridas y subhúmedas con régimen térmico templado, semicálido o cálido (Ruiz et al., 1999). El término semiárido implica un ambiente con 30 a 119 días en los que la precipitación pluvial es igual o superior a la evapotranspiración potencial, mientras que el término subhúmedo significa de 120 a 180 días con esta condición. En tanto, los regímenes templados, semicálido y cálido se refieren a una temperatura media anual entre 5 y 18 °C, entre 18 y 22 °C y >22 °C, respectivamente (Ruiz et al., 1997; Medina et al., 1998; López et al., 2005). Se obtuvieron muestras del municipio de Tequila, estado de Jalisco a una altitud de 850 msnm.

Forma biológica: Planta suculenta de 1.2 a 1.8 m de longitud. Su tallo es grueso, corto de 30 a 50 cm. de altura al madurar. Las hojas de 90 a 120 cm, lanceoladas, acuminadas de fibras firmes, casi siempre rígidamente estiradas, cóncavas de ascendentes a horizontales; lo más ancho se encuentra hacia la mitad de la hoja, angosta y gruesa hacia la base, generalmente de color glauco azulado a verde grisáceo. El margen es recto a ondulado, los dientes generalmente de tamaño regular y espaciados irregularmente, en su mayoría de 3 a 6 mm. de largo a la mitad de la hoja. Los ápices delgados, curvos o flexos desde poca altura de la base piramidal de color café claro a

oscuro, de 1 a 2 cm de largo, raramente larga achatada o abiertamente surcada de arriba, la base ancha, café obscura decurrente o no decurrente. La inflorescencia es una panícula de 5 a 6 m de altura, densamente ramosa a lo largo, con 20 a 25 umbelas largas difusas de flores verdes y estambres rosados. Flores de 68 a 75 mm de largo con bracteolas sobre los pedicelos de 3 a 8 mm de longitud. Ovario de 32 a 38 mm de largo, cilíndrico con cuello corto, inconstricto, casi terminado en punta sobre la base. Tubo floral de 10 mm de ancho, funeliforme surcado, los pétalos desiguales de 25 a 28 mm de longitud por 4 mm de ancho, lineares. Filamentos de 45 a 50 mm de longitud, dobladas hacia adentro junto al pistilo, insertos de 5 a 7 mm cerca de la base de tubo; anteras de 25 mm de largo. El fruto es una cápsula ovalada a brevemente cúspide (Gentry, 1982; Ruíz, 2007).

Fenología: Las características de este agave lo han llevado a ser una especie muy apreciada. El *Agave tequilana* es monocárpico, florece sólo una vez en su vida y muere a continuación. La floración se produce después de una década. La planta produce un tallo floral de unos metros de altura, con numerosas umbelas de flores verdosas y tubulares verticales. La polinización depende exclusivamente de un murciélago *Leptonycteris nivalis*, un filostómido nectívoro.

Distribución en México: Se localiza en 180 municipios de cinco estados de la República que forman parte de la Denominación de Origen Tequila como son: Jalisco, Michoacán, Tamaulipas, Nayarit y Guanajuato. Solamente en esos municipios se puede utilizar la materia prima para la elaboración del Tequila.

Requerimientos Ambientales: Se presentan de octubre a marzo, que tiene requerimientos de alta humedad relativa y temperatura media entre 15 y 22 °C. Precipitaciones entre 700-1000 mm (Ruiz et al., 1997). No tolera bajas temperaturas. La absorción celular se reduce a la mitad cuando las temperaturas descienden al nivel de -6°C. El agave es menos tolerante a bajas temperaturas (*Agave sisalana*) reduce a la mitad su absorción celular a -6.4°C y los dos agaves más tolerantes (*Agave parryi* y *Agave utahensis*) reducen su absorción celular a -19°C. Por esta razón *Agave tequilana* probablemente no puede ser cultivado en regiones donde ocasionalmente ocurren temperaturas de -7°C o inferiores. Por otro lado, la hoja de este agave puede tolerar temperaturas de hasta 55°C (Nobel et al., 1998). La asimilación del CO₂ es favorecida por temperaturas diurnas/nocturnas de bajas a moderadas y disminuye drásticamente en ambientes

donde las temperaturas del aire diurnas/nocturnas son altas. La asimilación neta diaria de CO₂ sobre periodos de 24 horas para hojas de esta especie es mayor para temperaturas diurna/nocturna de 15°C/5°C, disminuyendo 10% a 25°C/15°C y 72% a 35°C/25°C (Nobel et al., 1998). La temperatura base de desarrollo de agave resultó de 11°C, requiriendo 85 unidades calor para la emisión de una hoja en agave de 1 año y 45 unidades calor en agaves de 7 años (Flores et al., 2002).

Suelo: Textura media, por ejemplo, suelos francos, franco-arenosos o franco-arcillosos. Aunque en zonas con baja precipitación prefieren suelos con mayor retención de humedad, es decir suelos de textura pesada, como arcillosos o limo-arcillosos. Los agaves pueden desarrollarse adecuadamente desde suelos delgados a suelos profundos (FAO, 1994). El género *Agave* presenta una ligera a intermedia tolerancia a sales (FAO, 1994). Los agaves prosperan en un rango de pH de 6.0 a 8.0 No son recomendables suelos con problemas de acidez o alcalinidad (FAO, 1994). Puede desarrollar en terrenos con alto grado de pendiente, con drenajes superficiales muy eficientes y considerados no aptos para la agricultura tradicional. Sin embargo, bajo estas condiciones deben realizarse prácticas de conservación de suelo y agua para asegurar un ambiente favorable para el cultivo. Requiere suelos con buen drenaje (FAO, 1994).

6.1.1.2. Clasificación etnobotánica de agaves en estudio

Nombre científico: *Agave angustifolia* Haw.

A partir de la savia concentrada en sus zonas meristemáticas apicales es que se produce el aguamiel de donde se elabora el pulque. Sus hojas se usan para cocinar la carne de borrego en barbacoa y las flores en distintos platillos. En algunos lugares del país las flores y las hojas se usan como forraje. Además de la planta, se extraen fibras para elaborar cordeles, canastos, ropa, sandalias, cepillos, etc. Por su alto contenido de saponinas se le ha utilizado para elaborar jabón o para la fabricación de esteroides u otras hormonas sexuales. Se utiliza como remedio para las torceduras o huesos rotos de personas o de animales (Pérez et Gallardo, 1997).

Nombre científico: *Agave lechuguilla* Torr.

La extracción de ixtle para la fabricación de lazos, lomerías, gamarras, costales. Cubiertas para pacas de algodón, tapetes (Romahn, 1992). De la raíz y del tallo se obtienen productos que se emplean en la fabricación de jabones (Sánchez, 1993). El jugo de las hojas se puede utilizar como detergente (Baskin y Baskin, 1998). Se utiliza para la extracción de esteroides (González, 1986).

Nombre científico: *Agave salmiana* B. Otto ex Salm-Dick

Se obtiene el jugo llamado “aguamiel” es utilizado para elaborar el pulque. Como forraje las pencas son consumidas por el ganado. Medicinalmente el “aguamiel” se usa para curar las inflamaciones. Las hojas son usadas para curar la gastritis, diabetes, granos enterrados, cicatrizar heridas y tos. Además, se emplea en enfermedades del sistema digestivo, endócrino, heridas y desórdenes del sistema respiratorio y cutáneo. Es una de las mejores alternativas para restauración de suelos, ya que ayuda controlar erosión y a la formación de suelo. Pueden utilizarse para estos fines en pendientes un poco pronunciadas. En el altiplano Potosino-Zacatecano, se aprovecha el “maguey verde” (*Agave salmiana* ssp), como materia prima para la elaboración de pulque y mezcal, alimento para el ganado y material combustible. En los últimos años se ha intensificado su aprovechamiento, lo que puede ocasionar alteraciones ecológicas severas en los ecosistemas. Mediante el uso de SIG y un muestreo forestal se han cuantificado algunos atributos ecológicos como el grado de abundancia, la riqueza específica, el índice de diversidad y un índice de cobertura de las poblaciones y comunidades vegetales en las que habita el maguey en un predio ejidal de la región donde actualmente se realiza aprovechamiento (García et al., 2010). Su aprovechamiento es diverso y ha jugado un papel importante en la vida de los ancestros y de los actuales pobladores de la región potosina zacatecana; actualmente, su principal aprovechamiento es para la elaboración de mezcal (Zamora et al., 2010).

Nombre científico: *Agave tequilana* Weber, Var. Azul

El *Agave tequilana*, alcanza su madurez entre ocho a diez años después de haber sido sembrado, es pertinente proporcionar mantenimiento; limpieza del terreno, fertilización, control de crecimiento y prevención de enfermedades. Los agaves con la mejor calidad provienen de una selección minuciosa de plantas madre e hijuelos. Cuando la planta tiene seis años se realiza barbeo de escobeta rebajado (cortes horizontales en la parte superior de las hojas dejando la superficie plana), se continua con un barbeo castigado (piña casi sin pencas). Una vez alcanzada la madurez y en los meses secos, el agave comienza a reducir el tamaño de sus hojas en el centro, haciéndose más pequeñas y numerosas por el crecimiento de una inflorescencia llamada quiote. Este quiote crece rápidamente y consume todos los azúcares que se acumularon durante años, por lo que es cortado; a esta operación se le llama desquiote.

6.2. Bloque físico

6.2.1. Caracterización física de los agaves en estudio

6.2.1.1. *Agave tequilana* Weber, Var. Azul

En la tabla 6 se exponen los resultados de caracterización del *Agave tequilana* Weber, Var. Azul, las muestras fueron tomadas en el municipio de Tequila, Jalisco. Como promedio de 10 pencas (hojas) se observa que por sus dimensiones (98.58 cm de largo, 8.33 cm de ancho y 2.08 cm de espesor) concuerdan con lo reportado por algunos autores (Velasco et al., 2008 y Montañez et al., 2011); sólo se puede analizar que en sus espesores resultaron ligeramente más gruesas y por tanto con mayores volúmenes de las hojas y densidades volumétricas (Tabla 7), esto indica que las hojas son maduras para su jimado y recolección de piñas, también puede ser debido a que la recolecta se realizó en época de lluvia, con lo cual almacenan agua para períodos de intensas sequías. De igual forma la altura de las plantas se considera similar a lo reportado (Velasco et al., 2008) aunque ligeramente menores en diámetro de la roseta (Figura 12). Los contenidos de humedad en las hojas resultaron mayores (83.43%) con relación a lo que reportan los autores consultados (Águilar et al., 2011; Montañez et al., 2011).

Tabla 6. Evaluación morfológica y caracterización física de *Agave tequilana* Weber, Var. Azul, tomada en el municipio de Tequila, Jalisco

Especie: <i>Agave tequilana</i> Weber, Var. Azul									
No. de Hoja	Evaluación morfológica de la penca (Hoja)							Roseta	
	Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)	Masa (g)	Volumen (cm ³)	Densidad (g/cm ³)	Área foliar (cm ²)	Altura Planta (mm)	Diam. Planta (mm)
1	104.00	9.00	2.33	740.66	2182.752	0.339	936.00	1395.00	1435.00
2	110.00	9.50	2.16	846.90	2257.200	0.375	1045.00	1392.16	1460.69
3	80.00	7.40	1.95	448.82	1152.032	0.390	592.00	1387.50	1425.00
4	93.40	7.50	1.87	401.10	1309.935	0.306	700.50	1404.00	1408.50
5	107.00	9.00	2.28	854.80	2195.640	0.389	963.00	1502.30	1421.20
6	111.00	9.50	2.15	760.50	2267.175	0.335	1054.50	1374.60	1453.95
7	94.50	7.40	1.66	623.50	1160.838	0.537	699.30	1397.25	1425.95
8	93.40	8.40	2.08	528.20	1631.885	0.324	784.56	1439.05	1568.25
9	95.70	8.20	2.34	604.50	1836.292	0.329	784.74	1404.00	1546.44
10	96.80	7.40	1.99	607.40	1425.477	0.426	716.32	1478.46	1549.80
Media	98.58	8.33	2.08	641.64	1741.923	0.375	827.59	1417.43	1469.48
desv. Est.	9.011	0.833	0.207	149.094	439.885	0.065	152.652	40.044	57.931
%CV	9.14	10.00	9.95	23.24	25.25	17.20	18.45	2.83	3.94
t cal	2.055	2.187	7.341	1.403	3.896	5.120	0.240	1.377	18.042
t tab	2.262	2.262	2.262	2.262	2.262	2.262	2.262	2.262	2.262
Dif. Sig	NO	NO	SI	NO	SI	SI	NO	NO	SI
Ref	100	7.5	1.6	575	1200	0.480	816	1400	1800
Caracterización física de las pencas									
Hoja	Humedad (%)	Granul. <0.5 mm (%)	Granul. 0.5-1.0 mm (%)	Granul. >1.0mm (%)	Color (1-6)	Nº Espinas	Alt. E. apical (cm)		
1	86.10	15.41	81.21	3.38	4.0	166	1.5		
2	86.36	19.94	78.53	1.53	5.0	182	1.5		
3	85.13	12.25	86.19	1.56	4.0	126	1.4		
4	85.57	2.94	96.75	0.31	4.0	119	1.6		
5	86.13	10.27	89.07	0.67	5.0	182	1.5		
6	77.93	20.90	77.20	1.90	4.0	152	1.4		
7	85.39	18.15	79.21	2.64	4.0	154.5	1.6		
8	83.30	15.10	83.80	1.10	5.0	164	1.6		
9	81.93	7.59	91.47	0.93	4.0	136	1.5		
10	76.42	13.62	84.83	1.56	4.0	129	1.5		
Media	83.43	13.62	84.83	1.56	4.3	151.05	1.51		
desv. Est.	3.405	5.315	5.914	0.870	0.458	21.650	0.070		
%CV	4.08	39.03	6.97	55.86	10.66	14.33	4.64		
t cal	3.182	-	0.091	-	2.070	0.153	22.136		
t tab	2.262	2.262	2.262	2.262	2.262	2.262	2.262		
Dif. Sig	SI	-	NO	-	NO	NO	SI		
Ref	80	NR	> 85%	NR	4	150	2		

Resultados y Discusión

De igual forma se puede considerar alto el color de las hojas recolectadas, por cuanto al ser comparados en la escala de 1-6 con un valor promedio de 4.31. Reyes et al., (2000), encontraron que el valor debe estar entre 3-4 (3.5 como promedio de varias hojas colectadas) como indicativo de una suficiente madurez de la planta, que ha de corresponder a la edad entre 8-10 años (edad óptima para la jima y la producción de tequila). Si los colores encontrados son menores de 3 en dicha escala, presupone la no madurez suficiente o edad de la planta no adecuada. Superiores a 4, indican que está más madura de lo requerido, lo cual se refleja con contenidos de azúcares más elevados hacia las hojas, que en la base de éstas en lo que conforman las piñas; esto atenta con la producción de tequila (menores contenidos de alcohol), además de un mayor contenido de hemicelulosas. En cuanto a la altura de la espina apical, se corresponde con lo reportado por Montañez et al., (2011) pero más pequeña que lo que indica Águilar (2011).



Figura 12. Toma de muestras de *Agave tequilana* Weber, Var. Azul en el municipio de Tequila, estado de Jalisco

Una vez secadas las hojas y trituradas y tamizadas, se analizó la composición por fracciones de tamaños de partículas. Se obtuvo 98.5% < de 1 mm siendo la fracción mayoritaria entre 0.5-1.0 mm (84.3%) lo cual se corresponde con lo reportado por Águilar et al., (2011). La fracción < 0.5 mm varía entre 8-10% y se obtuvo un valor promedio ligeramente superior (13.6%) pero se espera que no afecte para el proceso de pulpeo en longitud de fibras. En la figura 13 se observa el tamaño y distribución de partículas de la fracción más fina (<0.5 mm), secada y molida previamente. Como se puede apreciar el tamaño prevaleciente fue de 324.4 μm y muestra una

distribución casi homogénea. En la figura 14 se observa el tamaño y distribución de partículas de la fracción 0.5-2.0 mm que representativamente se muestra, secada y molida previamente. Como se puede observar el tamaño prevaeciente fue de 1443 μm .

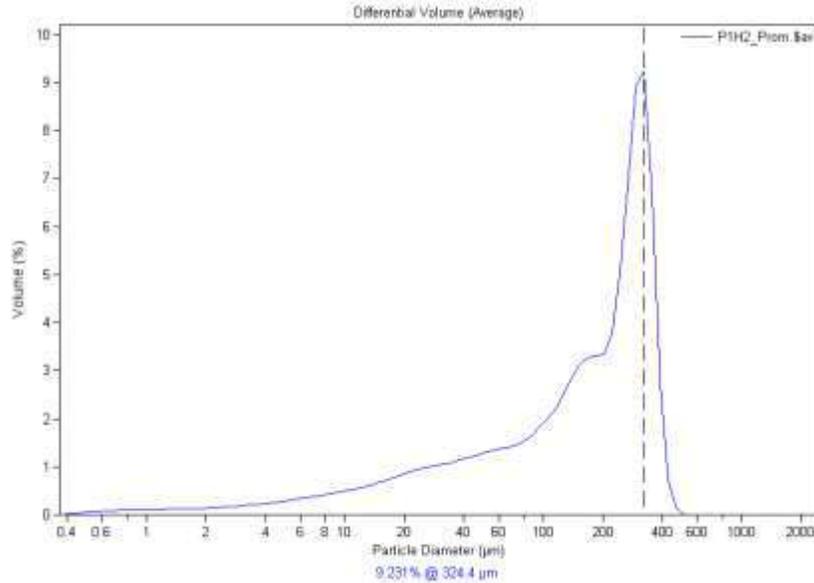


Figura 13. Distribución y tamaños de partículas secas de la fracción minoritaria (<0.5 mm) de hojas de *Agave tequilana* Weber, Var. Azul en el municipio de Tequila, estado de Jalisco

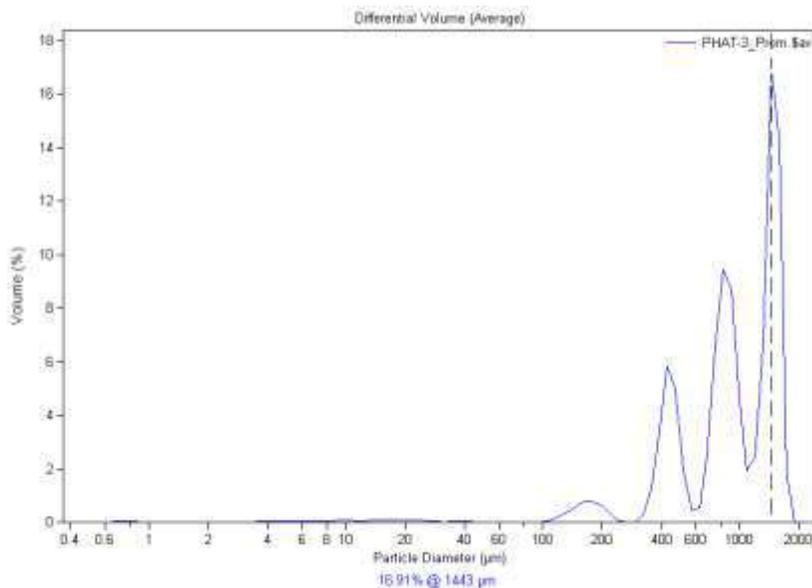


Figura 14. Distribución y tamaños de partículas secas de la fracción 0.5-2.0 mm de hojas *Agave tequilana* Weber, Var. Azul en el municipio de Tequila, estado de Jalisco

6.2.1.2. *Agave salmiana* B. Otto ex Salm-Dick

En la tabla 7 se reflejan los resultados de caracterización física de la variedad *Agave salmiana* Otto ex Salm–Dyck, muestras tomadas en el municipio de Epazoyucan, Hidalgo. De igual manera que la anterior, en un promedio de 10 hojas, se puede apreciar que no existen diferencias estadísticamente significativas en cuanto al largo de sus hojas y se corresponde con lo que reportan algunos autores (Ramsay, 2004; Parra et al., 2010; Silo et al., 2010 y Mora et al., 2011) que señalan valores de 150 cm. Sin embargo, los valores promedios en el ancho de las hojas (21.23 cm) resultó ligeramente menor que lo que indican algunos de los autores anteriores de 24 cm (Ramsay, 2004; Silo et al., 2010). Una variación importante se observa en cuanto al espesor de las hojas que fue en promedio de 6.5 cm, muy superior a lo reportado en promedio (4.5 cm) (Ramsay, 2004)

En cuanto a su masa promedio, se encontró que son también superiores en peso promedio (9179 g) a lo esperado, atribuido a la mayor cantidad de agua retenida, debido a la época de muestreo con alta incidencia de lluvias y correspondiendo con los mayores anchos y espesores de las hojas. De manera análoga resultaron 1.37 veces más voluminosas que lo que se reporta en las referencias consultadas (1600-1700 cm³). Consecuentemente una densidad ligeramente inferior, pero sin significación estadística. Se observó una mayor altura (esbeltez) de la planta y un mayor diámetro de la roseta en el surco (Figura 15), aproximadamente unos 200 cm más altas y más anchas las rosetas.

Los contenidos de humedad en la especie de *A. salmiana* presenta un 7% por encima de los valores que reportan Silo et al., 2010, alcanzó como promedio 92%, considerándose que es debido a la temporada en que se tomaron las muestras de alta lluvias.

Los tamaños y distribución de partículas secadas y molidas previamente de las fracciones minoritarias (<0.5 mm) y mayoritarias (0.5-1.0 mm), se muestran en las figuras 16 y 17 respectivamente; para la fracción mayoritaria fue de un 70.8%.

Tabla 7. Evaluación morfológica y caracterización física de *Agave salmiana* B. Otto ex Salm-Dick, tomada en el municipio de Epazoyucan, Hidalgo

Especie: <i>Agave salmiana</i> B. Otto ex Salm-Dick									
Hoja	Evaluación morfológica de la penca (Hoja)							Roseta	
	Hoja	Hoja	Hoja	Hoja	Hoja	Hoja	Hoja	Hoja	Hoja
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
media	media	media	media	Media	media	media	media	media	media
desv. Est.	desv. Est.	desv. Est.	desv. Est.	desv. Est.	desv. Est.	desv. Est.	desv. Est.	desv. Est.	desv. Est.
%CV	%CV	%CV	%CV	%CV	%CV	%CV	%CV	%CV	%CV
t cal	t cal	t cal	t cal	t cal	t cal	t cal	t cal	t cal	t cal
t tab	t tab	t tab	t tab	t tab	t tab	t tab	t tab	t tab	t tab
Dif. Sig	Dif. Sig	Dif. Sig	Dif. Sig	Dif. Sig	Dif. Sig	Dif. Sig	Dif. Sig	Dif. Sig	Dif. Sig
Ref	Ref	Ref	Ref	Ref	Ref	Ref	Ref	Ref	Ref
Caracterización física de las pencas									
Hoja	Humedad(%)	Granul. <0.5 mm (%)	Granul.0.5-1.0 mm (%)	Granul. >1.0mm (%)	Color (1-6)	N° Espinas	Alt. E. apical (cm)		
1	88.85	28.95	66.26	4.79	4.0	92.0	5.0		
2	91.13	28.15	60.86	11.00	3.0	122.0	5.0		
3	94.91	20.46	77.57	1.97	3.0	103.0	5.0		
4	94.37	26.16	69.18	4.66	4.0	116.0	7.0		
5	93.05	19.65	77.21	3.14	4.0	118.0	7.0		
6	91.52	27.59	70.00	2.41	4.0	115.0	6.0		
7	90.19	28.27	68.13	3.60	4.0	103.5	5.5		
8	92.09	23.90	69.03	7.07	3.5	120.0	6.0		
9	94.64	23.31	73.37	3.31	4.0	109.5	6.0		
10	92.31	25.16	70.18	4.66	4.0	115.0	6.0		
Media	92.31	25.16	70.18	4.66	3.8	111.4	5.85		
desv. Est.	1.886	3.119	4.723	2.520	0.403	8.888	0.709		
%CV	2.04	12.40	6.73	54.07	10.75	7.98	12.12		
t cal	12.255	-	9.923	-	1.961	4.056	0.669		
t tab	2.262	2.262	2.262	2.262	2.262	2.262	2.262		
Dif. Sig	SI	-	SI	-	NO	SI	NO		
Ref	85	NR	> 85%	NR	4	100	6		



Figura 15. Toma de muestras de *Agave salmiana* B. Otto ex Salm-Dick en el municipio de Epazoyucan, estado de Hidalgo

Se observan en la figura 16 la distribución de tamaño de partículas <0.5 mm (con un 25% en total; se espera igualmente que no afecte demasiado en el pulpeo). En la figura 17 se aprecia igualmente una distribución casi homogénea con un tamaño de partícula predominante de 429.2 μm (como valor moda). En la figura 17 se observa el tamaño y distribución de partículas desde fracciones de 0.5 mm a 1.9 mm.

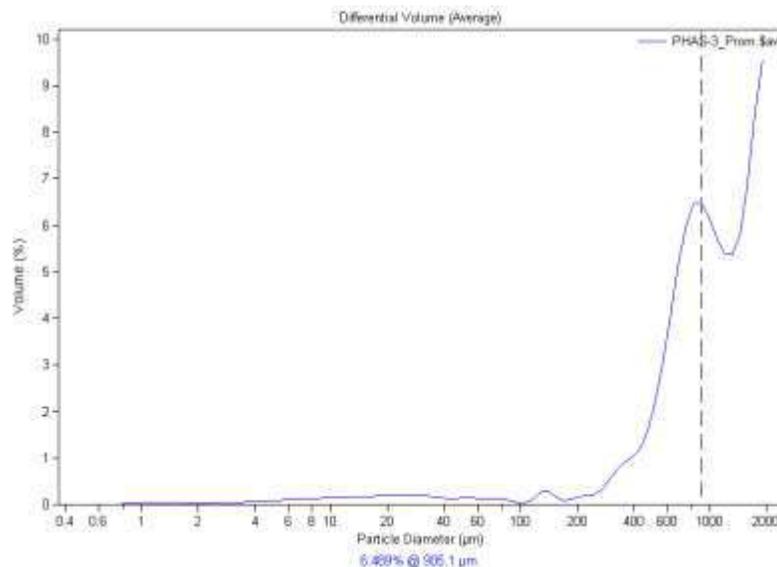


Figura 16. Distribución y tamaños de partículas secas de la fracción minoritaria (<0.5 mm) de hojas de *Agave salmiana* B. Otto ex Salm-Dick, tomada en el municipio de Epazoyucan, Hidalgo

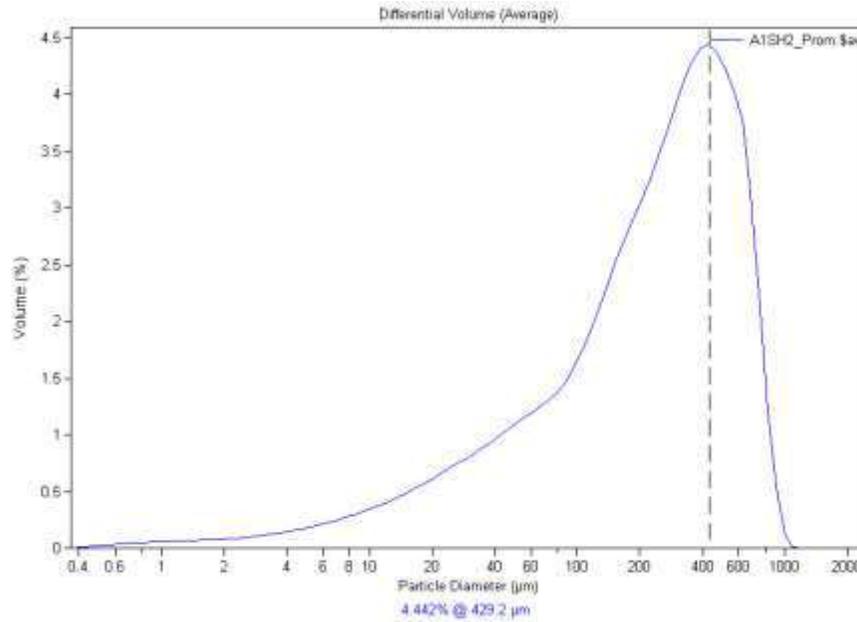


Figura 17. Distribución y tamaños de partículas secas de la fracción 0.5-2.0 mm de hojas de *Agave salmiana* B. Otto ex Salm-Dick, tomada en el municipio de Epazoyucan, Hidalgo

En cuanto al color de las hojas, éstas se consideran con edad de madurez adecuada (valores entre 3-4, según escala de color de Reyes et al., 2000) con valor promedio de 3.70. Estas hojas presentaron un número mayor de espinas laterales (111 como promedio) que lo reportado (≈ 100) por Silo et al., (2010), sin embargo la altura promedio de la espina apical (5.85 cm) si se corresponde con el parámetro que estos mismos autores refieren (≈ 6.0 cm).

6.2.1.3. *Agave angustifolia* Haw

En la tabla 8 se muestran los resultados de la caracterización física de la variedad *Agave angustifolia* Haw, tomada en el municipio de Zimatlán, Oaxaca (Figura 18). También como promedio de las 10 hojas colectadas se aprecia que existen diferencias significativas en cuanto largo y espesor de las hojas con relación a lo reportado por otros autores (Parra et al., 2010); en este trabajo se obtienen hojas de 102 cm de largo como promedio, más cortas que lo reportado de 125 cm y sin embargo ligeramente mayor espesor (2.12 cm) con relación a lo que se reporta (2.0 cm) por los anteriores autores. Por otro lado, la densidad de estas hojas fue menor que lo reportado (0.313 g/cm^3).

Tabla 8. Evaluación morfológica y caracterización física de *Agave angustifolia* Haw, tomada en el municipio de Zimatlán, Oaxaca

Especie: <i>Agave angustifolia</i> Haw									
Hoja	Evaluación morfológica de la penca (Hoja)							Roseta	
	Largo (cm)	Anchoç (cm)	Espesor (cm)	Masa (g)	Volumen (cm ³)	densidad (g/cm ³)	Área foliar (cm ²)	Altura Planta (mm)	Diam. Planta (cm)
1	118.00	7.00	2.10	616.00	1734.60	0.355	826.00	1700.00	2484.00
2	116.00	7.40	2.20	619.00	1888.48	0.328	858.40	1702.00	2480.00
3	89.00	5.33	2.00	288.00	949.33	0.303	474.67	1350.00	1960.00
4	92.00	6.00	2.30	317.00	1269.60	0.250	552.00	1351.00	1963.00
5	97.00	5.23	2.10	360.00	1066.03	0.338	507.63	1400.00	2232.00
6	100.00	6.00	2.00	366.00	1200.00	0.305	600.00	1402.00	2234.00
7	109.00	6.50	2.05	491.00	1467.30	0.330	713.00	1551.00	2359.00
8	106.50	6.32	2.15	489.50	1477.26	0.333	683.02	1551.00	2356.00
9	90.50	5.67	2.15	302.50	1109.47	0.277	513.33	1350.50	1961.50
10	102.00	6.16	2.12	427.67	1330.18	0.313	636.45	1484.17	2224.00
Media	102.00	6.16	2.12	427.67	1349.22	0.313	636.45	1484.17	2225.35
desv. Est.	9.754	0.650	0.087	116.497	282.17	0.030	126.33	130.539	193.818
%CV	9.56	10.54	4.09	27.24	20.91	9.46	19.850	8.80	8.71
t cal	7.456	1.650	4.260	2.235	1.112	10.127	2.101	2.806	3.677
t tab	2.262	2.262	2.262	2.262	2.262	2.262	2.262	2.262	2.262
Dif. Sig	SI	NO	SI	NO	NO	SI	NO	SI	SI
Ref	125	6.5	2.00	510	1250	0.408	552.50	1600	2000
Caracterización física de las pencas									
Hoja	Humedad (%)	Granul. <0.5 mm (%)	Granul. 0.5-1.0 mm (%)	Granul. >1.0mm (%)	Color (1-6)	Nº Espinas	Alt. E. apical (cm)		
1	82.81	29.37	64.98	9.13	4.0	80	2.5		
2	82.89	26.77	58.19	9.49	4.0	86	2.3		
3	63.24	12.28	73.87	2.87	4.0	73	2.3		
4	66.60	12.82	74.15	2.13	3.5	77	2.5		
5	70.59	17.18	63.63	6.76	4.0	77	2.2		
6	71.07	20.92	56.20	3.73	4.0	83	2.6		
7	76.94	25.15	60.59	6.43	4.0	82	2.5		
8	76.74	21.98	60.91	8.13	4.0	82	2.4		
9	64.92	12.55	74.01	2.50	4.0	75	2.4		
10	72.87	19.89	65.17	5.69	4.0	83	2.5		
media	72.87	19.89	65.17	5.69	4.0	79.75	2.42		
desv. Est.	6.593	5.825	6.366	2.618	0.150	3.894	0.1166		
%CV	9.048	29.29	9.77	46.05	3.80	4.88	4.82		
t cal	1.375	-	4.883	-	1.054	0.203	2.169		
t tab	2.262	2.262	2.262	2.262	2.262	2.262	2.262		
Dif. Sig	NO	NR	SI	NR	NO	NO	NO		
Ref	70	5	75	20	4	80	2.5		

En relación a las demás mediciones sólo se aprecian menores valores en cuanto a la altura y diámetro de la roseta de las plantas.



Figura 18. Toma de muestras de *Agave angustifolia* Haw., tomada en el municipio de Zimatlán, Oaxaca

Los tamaños y distribución de partículas secadas y molidas de la fracción mayoritaria entre 0.5-1.0 mm fue de 65.17%, para la menor fracción (<0.5 mm) fue de aproximadamente de un 20%, la distribución y tamaños de estas últimas partículas se observan en la figura 19. Se aprecia una distribución que de igual forma resulta casi homogénea pero con un tamaño de partículas predominante ligeramente mayor y de 517.2 μm , mientras que para el tamaño y distribución de partículas de la fracción 0.5 mm y hasta 2.0 mm se muestra en la figura 20. Como se puede observar el tamaño prevaleciente fue de 993.6 μm .

En cuanto al color de las hojas, éstas se consideran con edad de madurez adecuada (valores entre 3-4, según escala de color de Reyes et al., 2000) con valor promedio de 4.

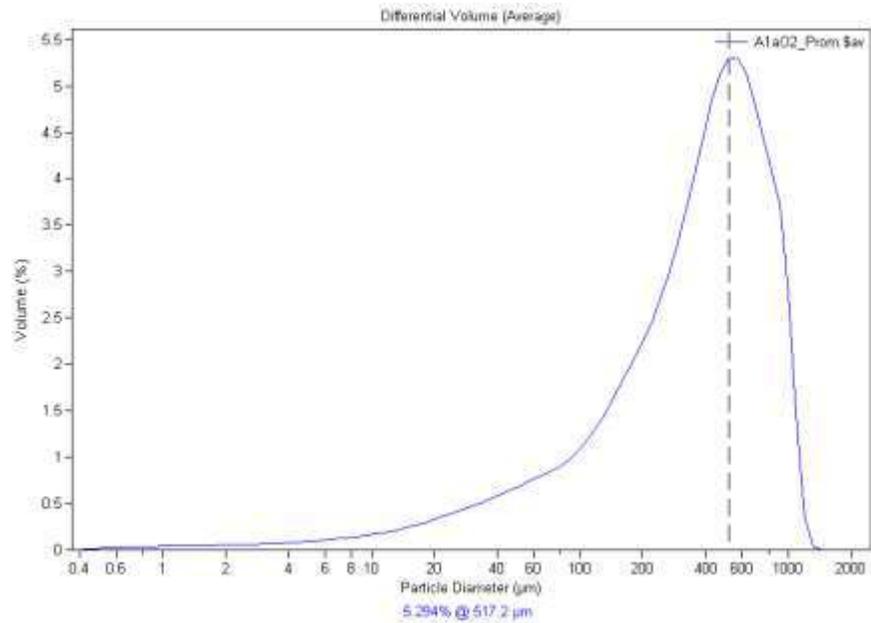


Figura 19. Distribución y tamaños de partículas secas de la fracción minoritaria (<0.5 mm) de hojas de *Agave angustifolia* Haw., tomada en el municipio de Zimatlán, Oaxaca

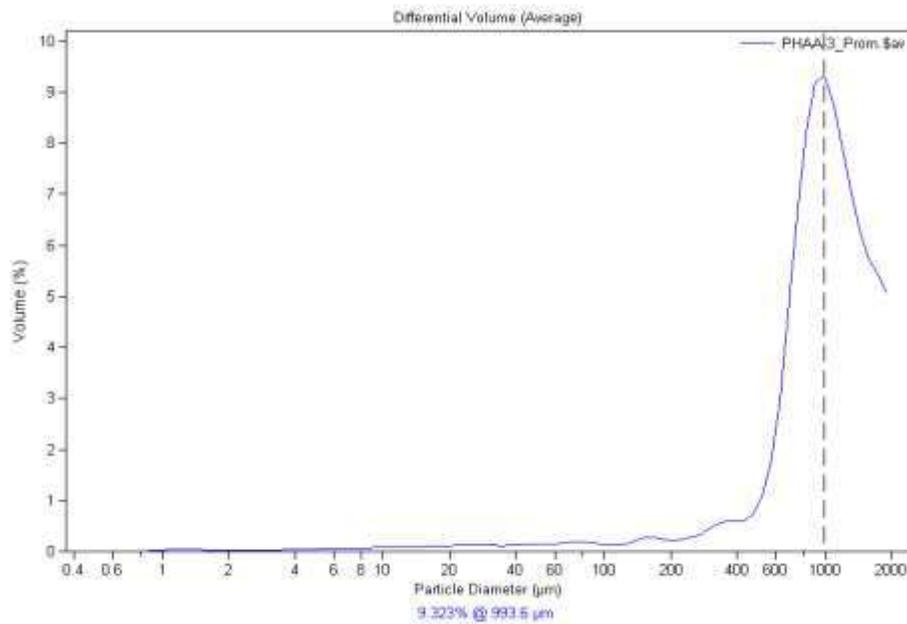


Figura 20. Distribución y tamaños de partículas secas de la fracción 0.5-2.0 mm de hojas de *Agave angustifolia* Haw., tomada en el municipio de Zimatlán, Oaxaca

6.2.1.4. *Agave lechuguilla* Torr.

En la tabla 9 se muestran los resultados de la caracterización física de la variedad *Agave lechuguilla* Torr., tomada en el municipio de San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo (Figura 21). En promedio de las 10 hojas colectadas se aprecia que existen varias diferencias significativas, salvo para el ancho y la masa de las hojas, en todos los restantes parámetros hay diferencias. Con relación a lo reportado por otros autores (Mora, 2012; Gutiérrez et al., 2012); en este trabajo se obtienen hojas más cortas, menor espesor, menor volumen, mayor densidad y mayor área foliar. En relación a las mediciones de la altura y el diámetro de la roseta de las plantas no existen diferencias significativas

Los contenidos de humedad de igual manera resultaron más altos de lo esperado, debido a la misma causa antes mencionada

Los tamaños y distribución de partículas secadas y molidas previamente de las fracciones minoritarias (<0.5mm) y mayoritaria (0.5-1.0 mm) se aprecian en las figuras 22 y 23. En la fracción mayoritaria solo se obtuvo un 46.92%, cifra está mucho más baja que la que se esperaba por lo que reportan Reyes et al., 2000, quienes señalan un valor aproximado de 75% y la más bajas de todas las especies. Para la menor fracción (<0.5 mm) se obtuvo un valor muy elevado de 41.8% (Figura 22), que aunque no existe un valor esperado para esta fracción se considera que si pudiera afectar al momento de obtención de pulpa de celulosa por su bajo tamaño.

Se aprecia una distribución casi homogénea pero con un tamaño de partículas predominante ligeramente mayor y de 567.7 μm , similar a la variedad *A. angustifolia* en la figura 19.

En la figura 23 se observa el tamaño y distribución de partículas de la fracción desde 0.5 mm y hasta 2.0 mm. Como se puede observar el tamaño prevaleciente fue de 1909 μm .

Tabla 9. Evaluación morfológica y caracterización física de *Agave lechuguilla* Torr., tomada en el municipio de San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo

Especie: <i>Agave lechuguilla</i> Torr.									
Hoja	Evaluación morfológica de la penca (Hoja)							Roseta	
	Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)	Masa (g)	Volumen (cm ³)	Densidad (g/cm ³)	Área foliar (cm ²)	Altura Planta (mm)	Diam. Planta (mm)
1	43.00	3.50	0.83	96.95	124.76	0.78	150.50	55.00	88.00
2	39.00	3.99	0.58	77.75	90.12	0.86	155.74	55.00	88.00
3	38.50	3.83	0.58	82.78	86.14	0.96	147.58	60.00	96.00
4	36.00	4.07	0.57	74.39	84.13	0.88	146.40	61.00	96.00
5	43.00	4.33	0.70	118.52	131.24	0.90	186.33	61.00	90.00
6	39.50	4.30	0.66	95.87	112.55	0.85	169.85	60.00	90.00
7	41.25	3.90	0.75	96.41	118.66	0.81	160.18	57.50	89.00
8	41.00	4.16	0.64	98.14	110.68	0.88	171.04	58.00	89.00
9	37.25	3.95	0.58	78.59	85.14	0.92	146.99	60.50	96.00
10	39.83	4.00	0.66	91.04	104.83	0.87	159.40	58.67	91.33
media	39.83	4.00	0.66	91.04	104.83	0.87	159.40	58.67	91.33
desv. Est.	2.177	0.229	0.080	12.529	16.619	0.050	12.352	2.156	3.194
%CV	5.46	5.71	12.23	13.76	15.85	5.67	7.75	3.68	3.50
t cal	7.506	0.061	5.698	0.263	7.454	15.856	15.739	1.955	1.320
t tab	2.262	2.262	2.262	2.262	2.262	2.262	2.262	2.262	2.262
Dif. Sig	SI	NO	SI	NO	SI	SI	SI	NO	NO
Ref	45	4	0.8	90	144	0.63	97.92	60	90
Caracterización física de las pencas									
Hoja	Humedad (%)	Granul. <0.5 mm (%)	Granul. 0.5-1.0 mm (%)	Granul. >1.0mm (%)	Color (1-6)	Nº Espinas	Alt. E. apical (cm)		
1	75.78	34.20	59.92	5.88	3.50	30.00	2.00		
2	74.93	28.98	50.24	20.78	3.50	27.00	1.90		
3	76.11	39.99	57.07	2.94	3.50	22.00	1.50		
4	74.03	49.24	39.14	11.62	3.50	26.00	2.20		
5	78.76	46.76	30.71	22.53	3.50	30.00	1.50		
6	76.87	51.60	44.41	3.99	3.50	29.00	2.10		
7	76.33	42.90	52.17	4.93	3.50	29.50	2.05		
8	76.85	37.87	40.47	21.65	3.50	28.50	1.70		
9	75.07	44.62	48.10	7.28	3.50	24.00	1.85		
10	76.08	41.80	46.92	11.29	3.50	27.33	1.87		
media	76.08	41.80	46.92	11.29	3.50	27.33	1.87		
desv. Est.	1.230	6.527	8.266	7.299	0.00	2.540	0.227		
%CV	1.62	15.62	17.62	64.65	0.00	9.29	12.16		
t cal	15.638	-	10.744	-	-	-	1.858		
t tab	2.262	2.262	2.262	2.262	2.262	2.262	2.262		
Dif. Sig	SI	-	SI	-	-	-	NO		
Ref	70	NR	75	NR	3.5	NR	2		



Figura 21. Toma de muestras de *Agave lechuguilla* Torr., tomada en el municipio de San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo

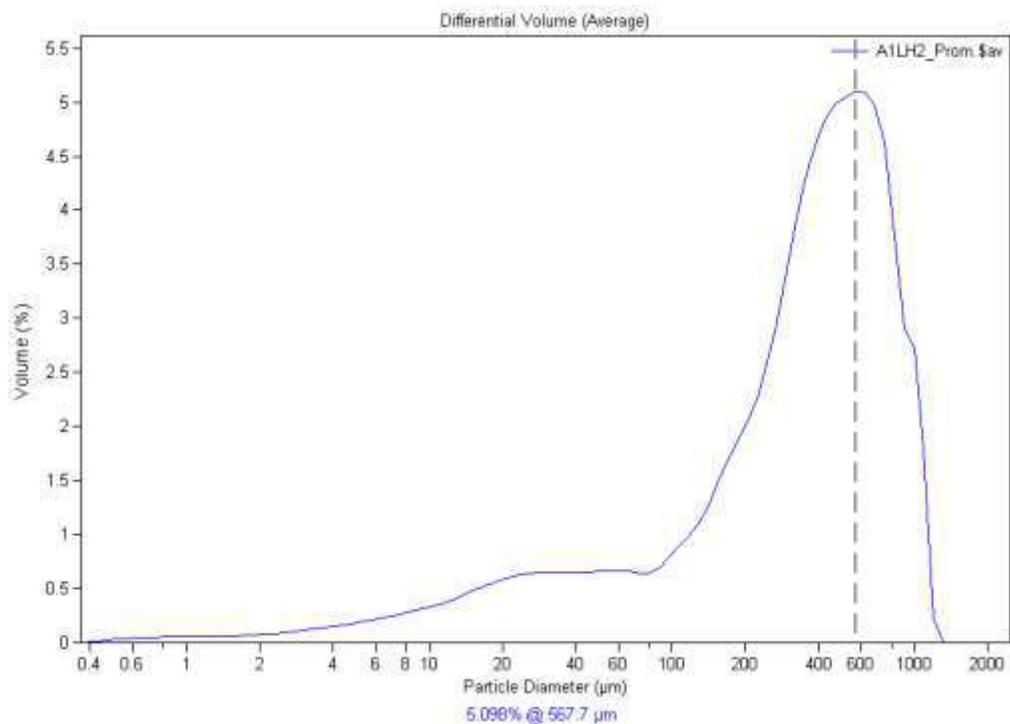


Figura 22. Distribución y tamaños de partículas secas de la fracción mayoritaria (<0.5mm) de hojas de *Agave lechuguilla* Torr., tomada en el Municipio de San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo

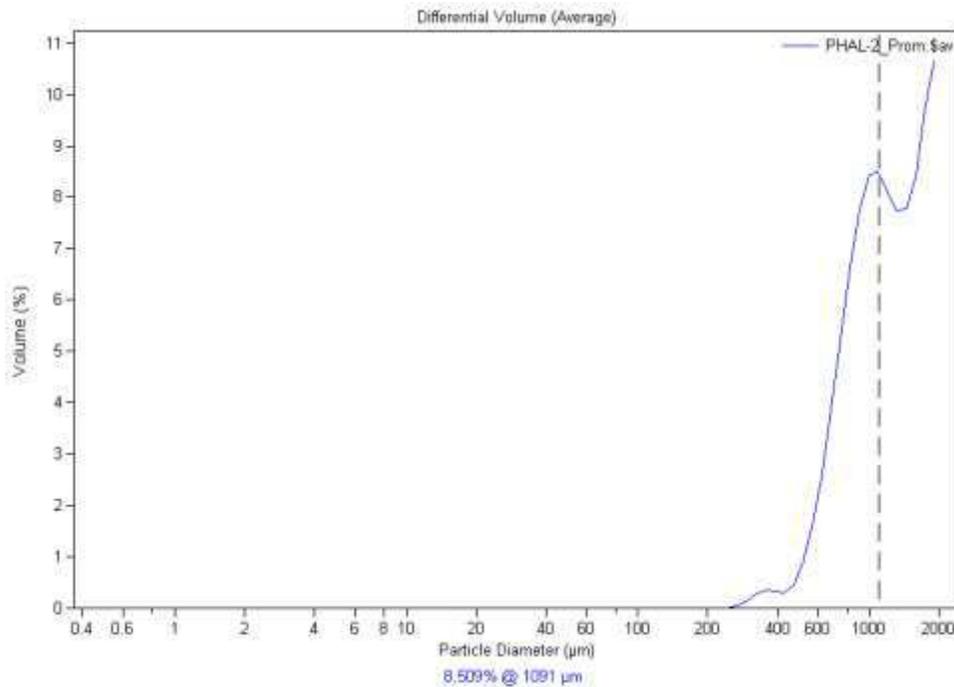


Figura 23. Distribución y tamaños de partículas secas de la fracción 0.5-2.0 mm de hojas de *Agave lechuguilla* Torr., tomada en el municipio de Zimatlán, Oaxaca

6.2.2. Caracterización física de precursores y pulpas

6.2.2.1. Microscopía electrónica (MEB)

En la figura 24 se observa la morfología de hojas secadas previa a la trituración. Se puede observar que están formadas por fibrillas de celulosa aglomeradas mediante hemicelulosa y lignina que actúan como cementantes y los cuales deben ser eliminados durante el proceso de obtención de las fibras o pulpa de celulosa.

En la figura 25 a-d se aprecian las microfotografías que se hicieron a las fibras de las hojas de agaváceas secadas y posterior al proceso de trituración en la fracción 0.5-2.0 mm (*A. angustifolia*, *A. salmiana*, *A. tequilana* y *A. lechuguilla*, respectivamente). Se muestran conformaciones similares en las morfologías de estas fibras para las cuatro especies. Los tamaños se corroboran con los evaluados en la etapa anterior.

6.2.2.2. Espectroscopía infrarroja (FTIR)

En la figura 26 se muestran los espectros FTIR de las cuatro especies en estudio. Se observa un gran número de bandas, donde se superponen las absorciones características de la celulosa, hemicelulosas y la lignina, con preponderancia de las bandas de la celulosa, que es el componente mayoritario de las fibras de los agaves en estudio y de la lignina.

Los espectros FTIR de polisacáridos son generalmente difusos, con fuerte solapamiento de las bandas, de modo que las diferencias espectrales entre ellos no se encuentran bien definidas. Esto se puede atribuir a la gran complejidad de los diversos tipos de interacciones intermoleculares e intramoleculares (Bermello et al., 2008).

Se observan de manera importante las bandas entre $3500-3390\text{ cm}^{-1}$ asociadas a la tensión del enlace O-H fenólico con formación de puentes de hidrógeno y de doblaje en las señales entre 1000 y 1200 cm^{-1} y que están presentes en la lignina, la hemicelulosa y la celulosa; estas últimas se traslapan con señales de vibraciones de valencia de enlaces glicosídicos C-O-C en la zona de 1050 a 1200 cm^{-1} . Las bandas entre $2915-2920\text{ cm}^{-1}$ (vibración simétrica) y $2848-2850\text{ cm}^{-1}$ (vibración asimétrica), así como las bandas en $1420-1425\text{ cm}^{-1}$ y $1315-1320\text{ cm}^{-1}$ correspondientes a la tensión del enlace H-C-H del grupo $-\text{CH}_2$ o $-\text{CH}_3$ se corresponden con lo reportado (Contreras et al., 2010) para la celulosa; las bandas en 1735 cm^{-1} (hombro) y 1636 cm^{-1} , que se atribuye a la tensión del enlace C-O en C=O de éster lactónico y C=C vinílico o aromático. Se aprecia también absorciones características de anillos aromáticos de la lignina en la zona de 1400 a 1600 cm^{-1} , mismas que se ven disminuidas significativamente en la muestra de celulosa pura. Se logra apreciar absorciones características (hombro) de grupos C=O en la región de los 1730 cm^{-1} , fundamentalmente de grupos éster y carbonilos y carboxilo de la lignina, lo cual no se distingue en la celulosa pura.

Es interesante distinguir la señal de absorción entre $875-895\text{ cm}^{-1}$ como absorción más típica de la configuración estereoquímica β de las D-glucopiranosas, reportada para la celulosa como una banda débil (Bermello et al., 2008). La naturaleza de esta absorción del espectro IR de la celulosa y otros polisacáridos tiene un carácter complejo según señala Zhbakovbb en 1966 y citado por

Bermello et al., (2008). En la celulosa natural esta banda es débil, pero su intensidad varía con el tratamiento a que se someta la celulosa; lo cual es un aspecto de seguimiento en el proceso de pulpeo, donde esta intensidad debe ir en aumento (Vega et al., 2014). En efecto para la celulosa pura se puede apreciar dicha banda débil, pero de carácter más intenso en relación a las especies en estudio.

6.2.2.3. Análisis térmicos (TGA/DTGA)

Por los resultados de los análisis térmicos (TGA y DTGA) en las especies de agaves, se pudo apreciar cinco momentos de cambios o transformaciones (Figuras 27 a la 30 y Figura 31, para comparación con la celulosa pura).

La biomasa lignocelulósica, es una mezcla compleja de polímeros de carbohidratos conocidos como celulosa, hemicelulosa, lignina y pequeñas cantidades de otras sustancias como extractables y cenizas, los cuales están contenidos en la pared celular de las plantas (Carrier et al., 2011). Según Müller-Hagedorn et al. (2003), la descomposición térmica de la madera, desarrollada por análisis termogravimétrico de pequeñas muestras, revela dos regímenes de descomposición, y que el pico en la zona de descomposición a la menor temperatura puede estar asociado a la presencia de humedad, seguido por la pirolisis de la hemicelulosa, y el pico a alta temperatura a la descomposición de la celulosa.

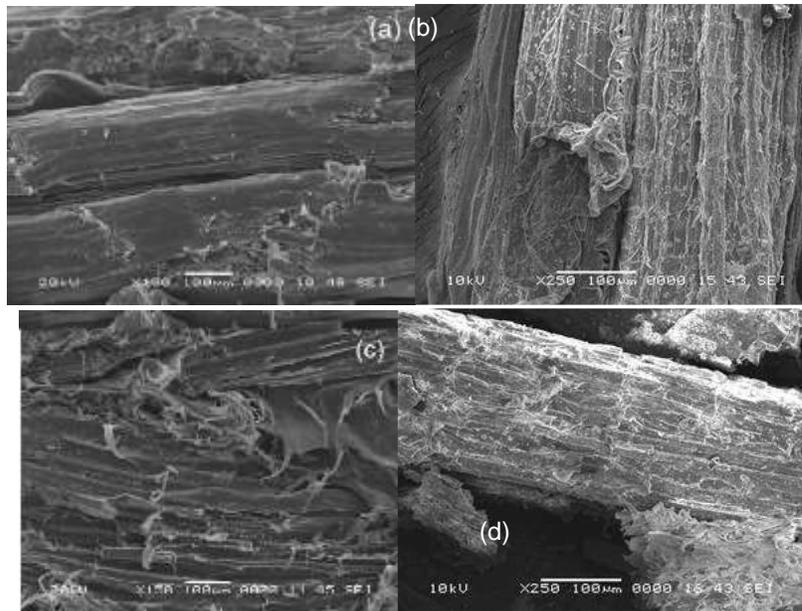


Figura 24. Microfotografías que muestran las morfologías de las fibras de hojas de agaves secadas, previo a la molienda. a) *A. angustifolia*, b) *A. salmiana*, c) *A. tequilana* y d) *A. lechuguilla*

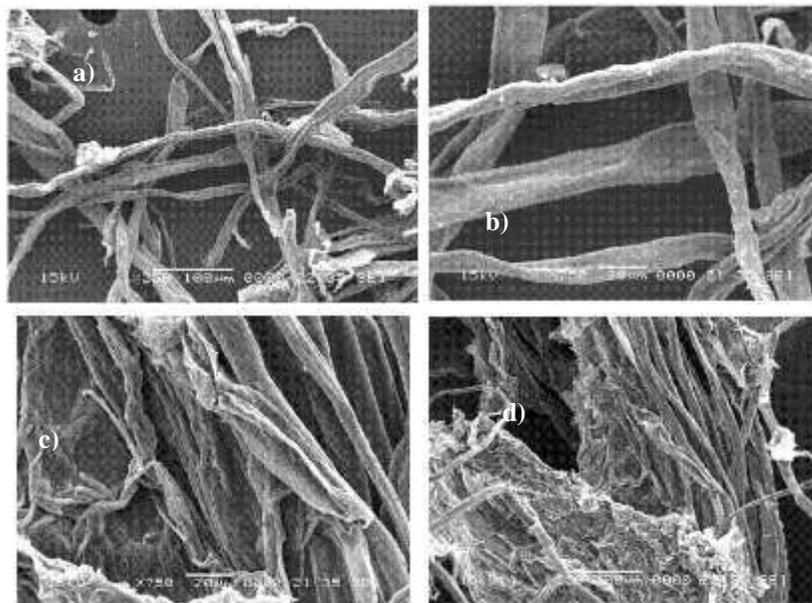


Figura 25. Microfotografías que muestran las morfologías de las fibras obtenidas por proceso de molienda y tamizaje para las cuatro variedades de hojas de agaves en estudio a) *A. angustifolia*, b) *A. salmiana*, c) *A. tequilana* y d) *A. lechuguilla*

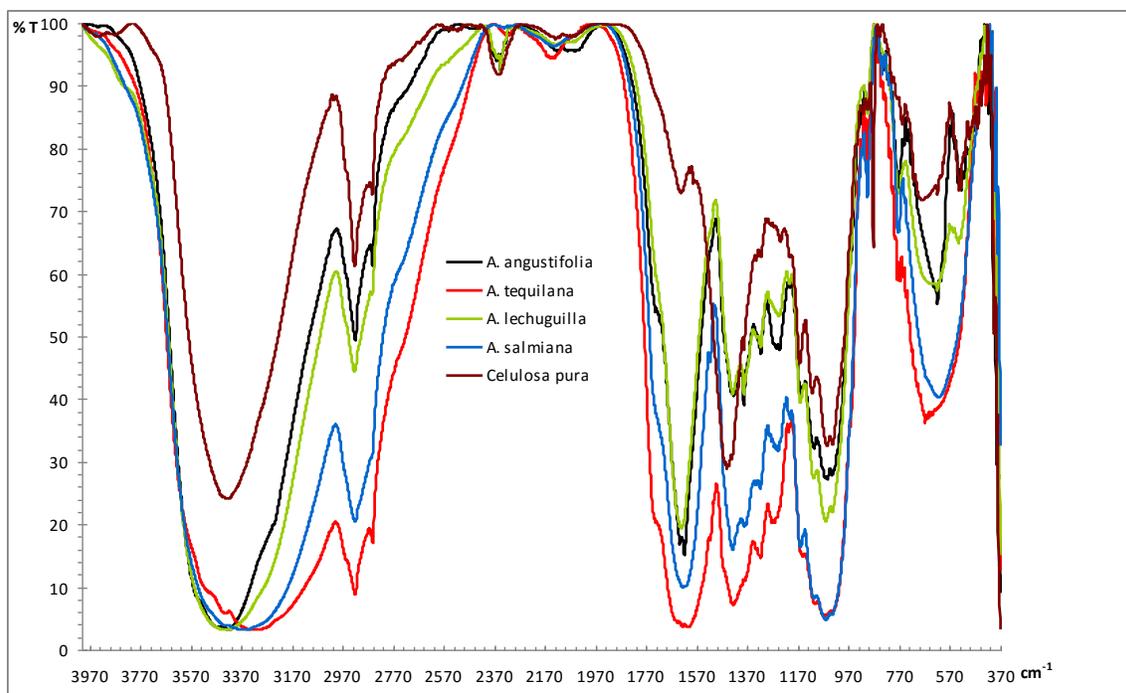


Figura 26. Espectros FTIR en pastillas de KBr de las hojas de agave secadas y trituradas.

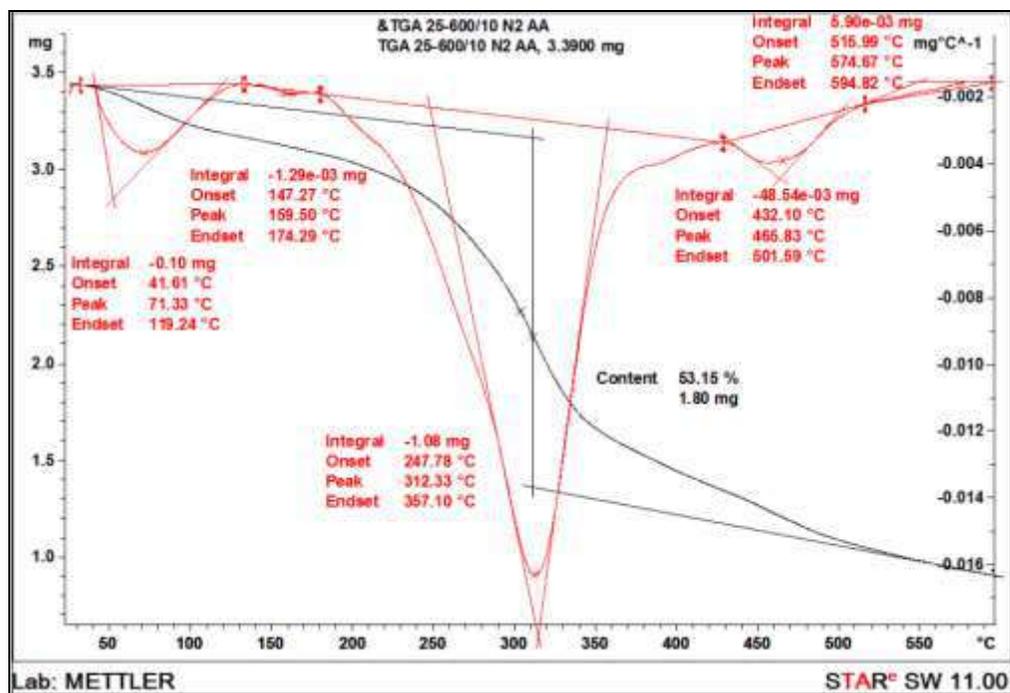


Figura 27. Análisis térmicos de las fibras de *A. angustifolia*

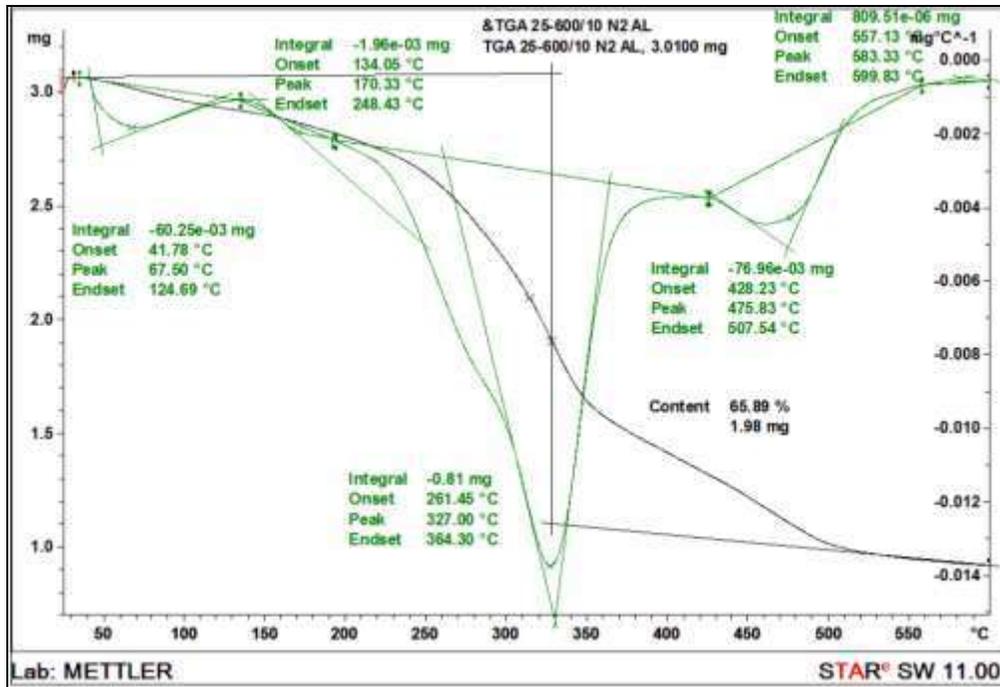


Figura 28. Análisis térmicos de las fibras de *A. lechuguilla*

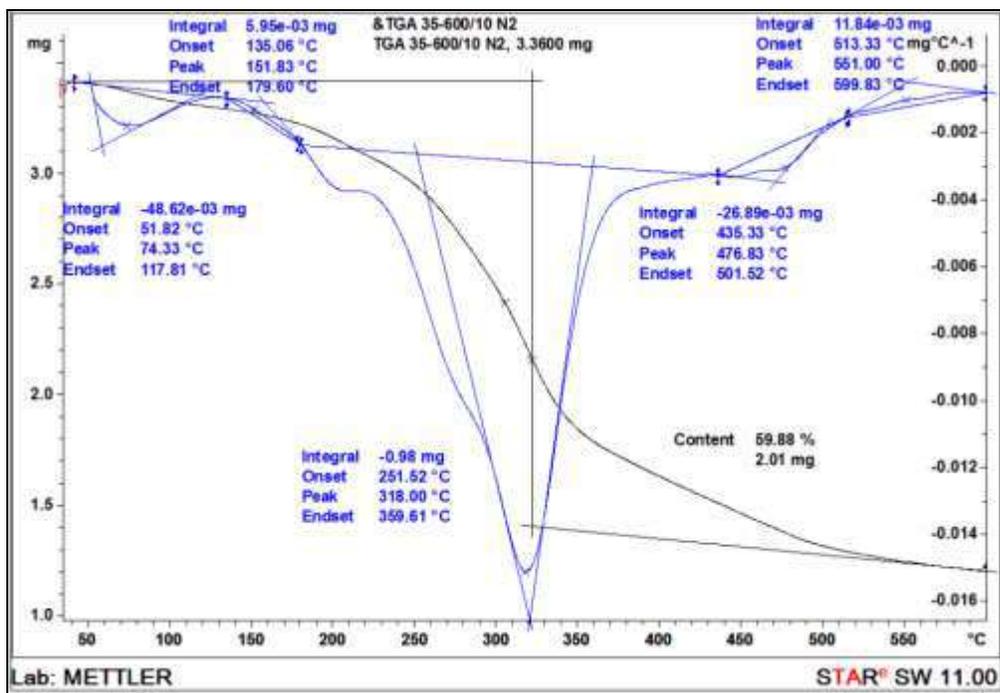


Figura 29. Análisis térmicos de las fibras de *A. salmiana*

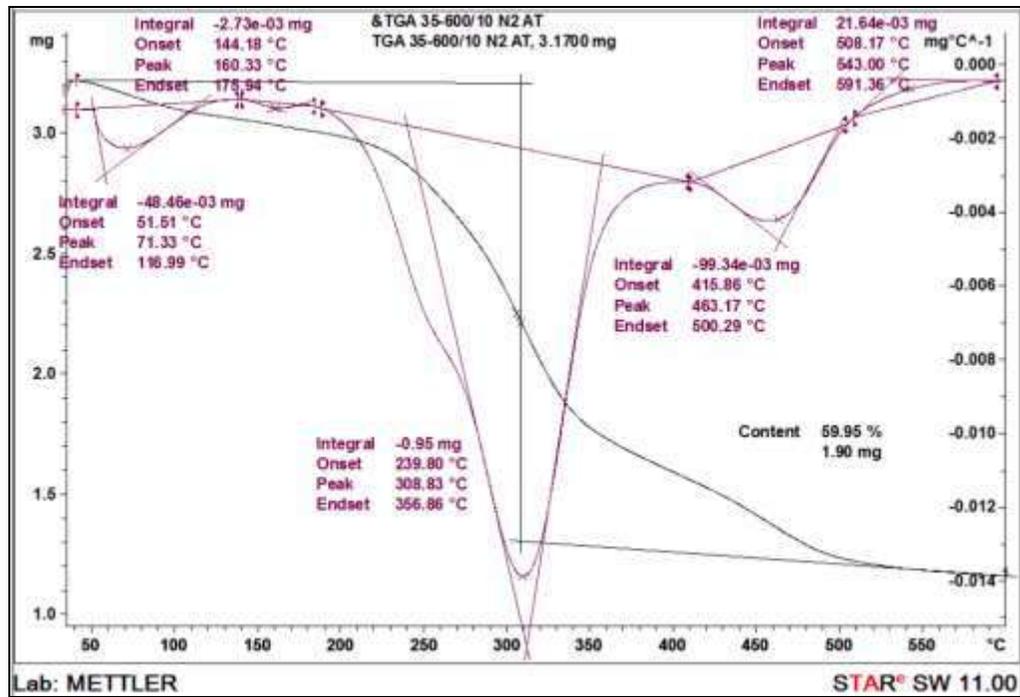


Figura 30. Análisis térmicos de las fibras de *A. tequilana*

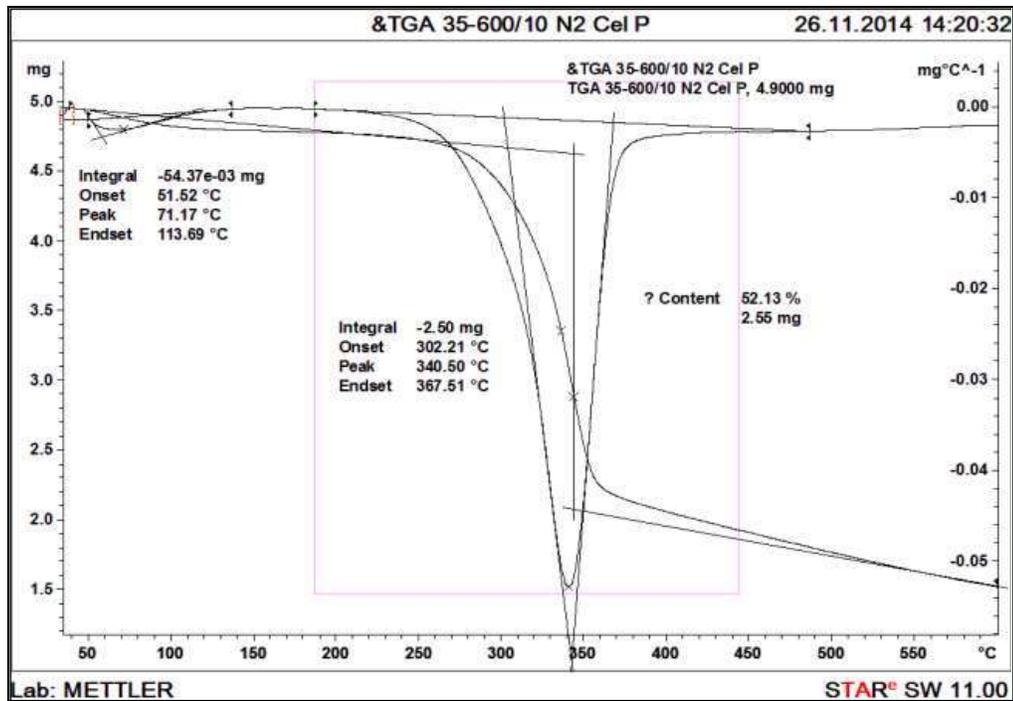


Figura 31. Análisis térmicos de Celulosa pura

Resultados y Discusión

Se han desarrollado estudios de la descomposición de residuos agrícolas, distinguiendo cinco intervalos de temperatura en los cuales se plantea que tiene lugar la descomposición de los diferentes componentes de la biomasa lignocelulósica: hemicelulosa, celulosa, lignina, extractables y cenizas (Manals et al., 2011).

Las diferentes biomásas vegetales se caracterizan por su diversidad en cuanto al contenido de celulosa, hemicelulosa, lignina y componentes extractables como terpenos, taninos, ácidos grasos, aceites y resinas; humedad y materia mineral (Acelas et al., 2010; White, et al., 2011).

En todas las figuras se observa un primer cambio (1 Δp) que ocurre entre 47 ± 5 °C y 120 ± 3 °C en promedio para las cuatro especies (Ver tabla 10). Este cambio se asocia a la pérdida por evaporación de humedad absorbida por las fibras, debido a su carácter hidrofílico (Bolio et al., 2011; Muñoz et al., 2014). Estas pérdidas de humedad, representaron entre 2.59-3.54% en masa para las cuatro variedades, con pequeñas diferencias significativas. Estos resultados resultan dos veces más bajos que los que reporta Andrade et al. (1998) en fibras de henequén (6%) y menor que 4.2% según han reportado (Arceo et al., 2006) para fibras de *Leguminosa unguiculata*.

Tabla 10. Caracterización termogravimétrica de los hojas secadas y trituradas de los agaves en estudio

Asociado a:		Humedad	Hemicelulosa	Celulosa	Lignina	Cenizas	Total
Agavacea	p. inicial (mg)	1 Δp (mg)	2 Δp (mg)	3 Δp (mg)	4 Δp (mg)	5 Δp (mg)	
<i>A. angustifolia</i>	3.39	0.120 ^a	0.087 ^a	1.500 ^a	0.097 ^a	0.242 ^a	2.046 ^a
<i>A. lechuguilla</i>	3.01	0.096 ^b	0.086 ^a	1.080 ^b	0.083 ^b	0.304 ^b	1.649 ^b
<i>A. salmiana</i>	3.36	0.105 ^b	0.180 ^b	1.150 ^b	0.086 ^b	0.325 ^b	1.796 ^c
<i>A. tequilana</i>	3.17	0.082 ^c	0.110 ^c	1.165 ^b	0.067 ^c	0.319 ^b	1.743 ^c
Agavacea		% Humedad	% Hemicelul.	% Celulosa	% Lignina	% Cenizas	% Total
<i>A. angustifolia</i>		3.54 ^a	2.57 ^a	44.25 ^a	2.86 ^a	7.14 ^a	60.35 ^a
<i>A. lechuguilla</i>		3.19 ^b	2.86 ^a	35.88 ^b	2.75 ^b	10.10 ^b	54.88 ^b
<i>A. salmiana</i>		3.13 ^b	5.36 ^b	34.23 ^b	2.56 ^b	9.67 ^c	53.45 ^b
<i>A. tequilana</i>		2.59 ^c	3.47 ^c	36.75 ^b	2.11 ^c	10.06 ^b	54.98 ^b
Temp. Inic. Prom.	°C	46.68±4.99	140.14±5.70	250.14±7.78	427.88±7.38	523.66±19.53	
Temp. Final Prom.	°C	119.68 ± 3.00	177.07±2.08	359.47±3.15	502.74±2.82	596.47±3.59	

Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas ($p < 0.05$)

La humedad absorbida puede ser correlacionada con la cantidad de lignina; a mayores contenidos de lignina se observa una mayor humedad absorbida, atribuible a la presencia de los grupos carboxílicos y carbonilos que se introducen en la lignina mediante el sistema enzimático de la lacasa, que inhibe los grupos hidroxilos e incrementan en carácter hidrofílico (Taiz et Zeiger, 2006). De ahí que en el proceso de pulpeo alcalino se mineralice la lignina haciéndola solubilizable. La molécula de lignina presenta un elevado peso molecular, que resulta de la unión de varios ácidos y alcoholes fenilpropílicos (cumarílico, coniferílico y sinapílico) (Figura 32). El acoplamiento aleatorio de estos radicales da origen a la estructura tridimensional, del polímero amorfo.

El segundo cambio observado, menos pronunciado ($2 \Delta p$) que el anterior, es el que se observó en el intervalo de temperatura de 140.1 ± 5.7 °C 177.1 ± 2.1 °C con una pérdida de masa del 2.57-3.47 %, que se atribuyó a la degradación de la hemicelulosa, la cual siendo semicristalina, presenta menos estabilidad térmica que la celulosa (Wang et al., 2007; Acelas et al., 2010; Quesada et al., 2011).

La hemicelulosa es uno de varios heteropolímeros, presente junto con la celulosa en casi todas las paredes celulares de las plantas. Mientras que la celulosa es más cristalina, fuerte y resistente a la hidrólisis, la hemicelulosa tiene una estructura semicristalina al azar con poca fuerza. Es fácilmente hidrolizada por ácido diluido o base, así como por enzimas hemicelulosa innumerables.

En los residuos agrícolas, el componente hemicelulósico es muy parecido al de las maderas duras pero presentando, al igual que las maderas blandas, menor proporción de grupos acetilo. Los xilanos son cuantitativamente dominantes en la fracción hemicelulósica. El xilano más abundante es el arabinoxilano caracterizado por la unión mediante un enlace O-glucosídico β -(1 \rightarrow 3) de moléculas de α -L-arabinofuranosas a la cadena de xilano principal (Figura 33) (Tomás, 2010).

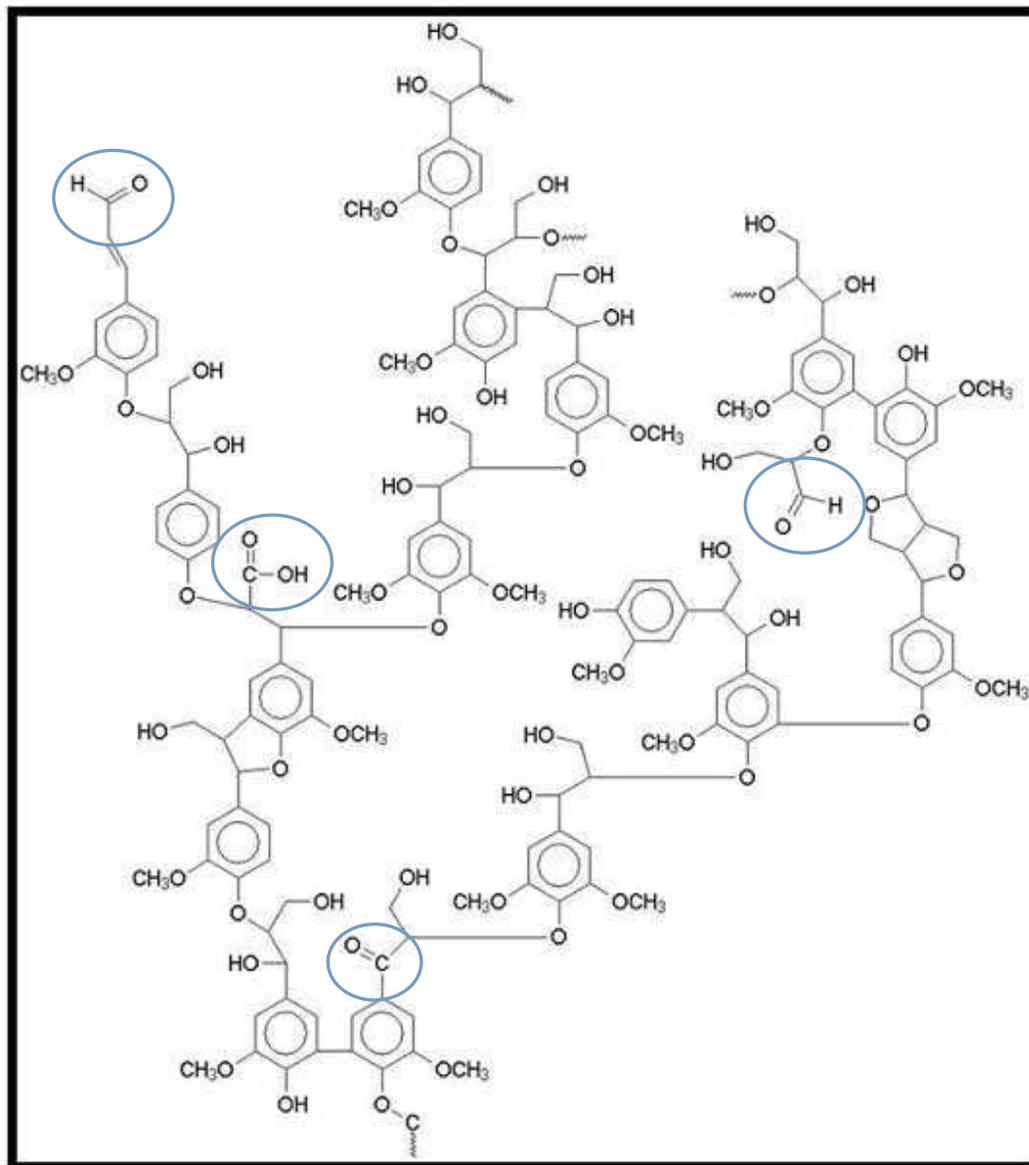


Figura 32. Estructura de molecular de la lignina.

Por su estructura química, al poseer unidades de pentosas, la distribución que posee dentro de la estructura de la planta es en forma de microtúbulos entrelazados de modo superficial de una cadena a otra, sólo por enlaces por puente de hidrógeno. De lo anterior se puede deducir, que ante un proceso de despolimerización, como lo constituye el aumento de la temperatura, se necesitará menor energía térmica para fragmentarlo (Quesada et al., 2011).

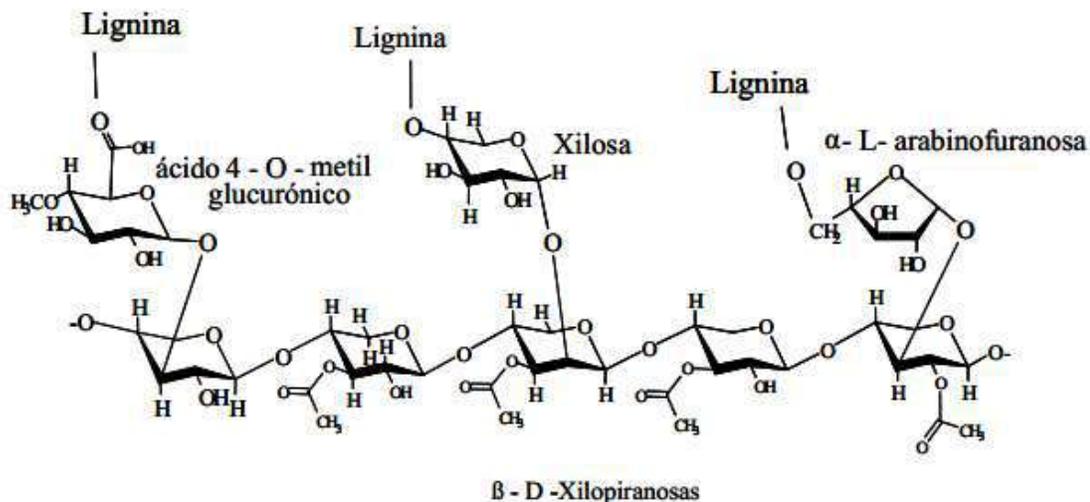


Figura 33. Estructura molecular de la hemicelulosa. Se observa el Arabinoxilano característico.

El tercer y principal cambio observado (3 Δ p) es el que representa la degradación de la celulosa presente en las fibras vegetales de los agaves en estudio, con una pérdida de masa entre 1.08-1.50 mg, representando entre 34.23-44.25 % en masa. Esta pérdida ocurre en un rango de temperatura de 250 ± 8 °C y 360 ± 3 °C. Este intervalo es prácticamente igual al que reportan Manals et al. (2011) para la degradación de la celulosa presente en el bagazo de caña o para la cascarilla de café (entre 200-400 °C) con un porcentaje en masa similar de 44 % (Manals et al., 2011). Para residuos de hojas de tabaco se observaron por los mismos autores dos zonas de temperaturas, una primera entre 227-320 °C y otra entre 320-460 °C. De la figura 31 se observa que para la celulosa pura el rango de temperatura fue de 302-368 °C lo cual corrobora lo anterior.

En la estructura de la celulosa, ésta forma cadenas largas entrelazadas unas con otras por enlaces de hidrógeno, de un modo más compacto que en la hemicelulosa. Esto se debe a los grupos -CH₂OH alternados por arriba y por debajo del plano de la molécula (Figura 34), que permiten una organización espacial en forma de bloques a través de puentes de hidrógeno, provocando un proceso de despolimerización de las capas superiores hacia el interior del paquete, lo que explica la mayor estabilidad térmica con respecto a la hemicelulosa (Quesada et al., 2011; Ayirmis et al., 2011; Rojas, 2014).

El cuarto cambio (4 Δp) se observó entre temperaturas de 428 ± 7 °C y 503 ± 3 °C y se atribuyó a la degradación de la lignina. Se apreció una pérdida de masa entre 2.11-2.86%. Estos resultados se corresponden con los que reporta Silos et al., (2011), quienes encontraron 2.61% en *A. salmiana*. Según Otero (200%), y citado por Vinenent et Fajardo (2009), los contenidos de lignina en agaves cultivados en Cuba (*Agave fourcroydes*, Lem), los contenidos de lignina pueden oscilar entre 3.1-9.9%; en nuestro caso los valores resultaron más bajos. Por su parte Rojas (2014) ha reportado en cascarilla y paja del cultivo de cebada contenidos de lignina mucho más altos (10.6-19.7%).

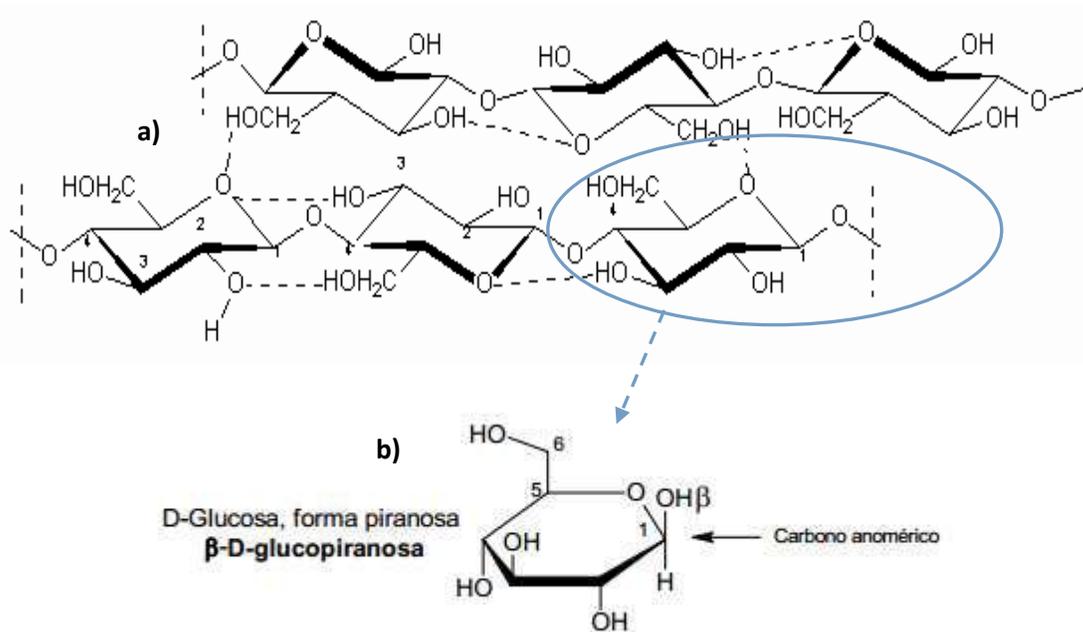


Figura 34. Estructura de molecular de la celulosa. a) Molécula de celulosa b) Detalle de la configuración estereoquímica β de las D-glucopiranosas

Se ha reportado que la descomposición térmica en ausencia de oxígeno de una sustancia lignocelulósica genera, alquitranes, gases y carbón. Se conoce que la hemicelulosa comienza los procesos de descomposición térmica cerca de los 180 °C y es la responsable en gran medida de la generación de gases. La celulosa comienza la degradación entorno a 240 °C y la lignina posteriormente a los 280 °C (Betancourt et al., 2009). En nuestro estudio se realizó en atmósfera de aire (presencia de oxígeno) lo cual explica las temperaturas más elevadas. Estos mismos

autores señalan que en condiciones oxidativas, la lignina, algunos polisacáridos y ciertas sustancias inorgánicas pueden ser las causantes de la continuidad en el proceso degradativo, y que se presenta a temperaturas incluso por encima de los 550 °C.

El quinto cambio observado ($5 \Delta p$) entre 524 ± 20 °C y 596 ± 4 °C se atribuye a las “cenizas” derivadas de la degradación de polímeros más complejos y sales inorgánicas, con una pérdida de masa entre 7.14 % y 10.10 %. A temperaturas superiores a 600 °C es posible que se logre el resto de las transformaciones (degradación y/o fusión de sales).

Los contenidos en hemicelulosa, celulosa y lignina hasta aquí reportados por análisis térmicos derivativos (DTGA), resultan semicuantitativos. En la bibliografía se reportan contenidos de hemicelulosa para plantas no maderables entre 15-32%, de lignina entre 7-24% y de celulosa entre 22-85% (Hernández, 2008), mucho más elevados que los que se han encontrado semicuantitativamente. Para especies maderables los contenidos reportados de lignina resultan más elevados (21-48%) (Moya, 2010).

6.3. Bloque químico

6.3.1 Composición química

La composición química de los vegetales no maderables varía según la especie, la edad y la estructura a evaluar. Estas plantas están constituidas en su mayoría por un material estructural llamado celulosa (Figura 35), que existe como delgados filamentos con una longitud indefinida y que estos filamentos se llaman microfibrillas de celulosa y forman un esqueleto que está rodeado de otros materiales como hemicelulosa y material incrustante (lignina), además de extraíbles, proteínas y bajas cantidades de compuestos inorgánicos (Acelas et al., 2010; White, et al., 2011).

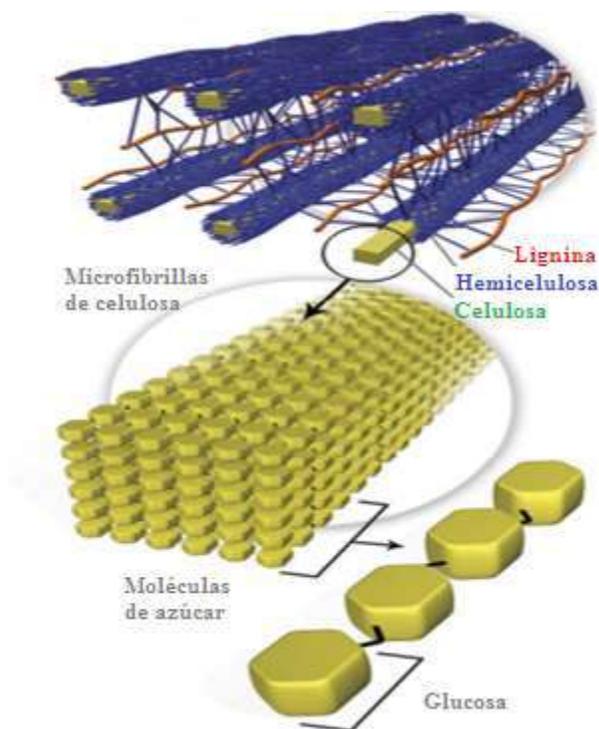


Figura 35. Composición química de especies vegetales

6.3.1.1 Contenidos solubilizables y cenizas

Las hojas de los agaves constituyen los residuos agrícolas del cultivo y a pesar de su alto contenido de azúcares totales (AT) y a los grandes volúmenes que anualmente se generan, actualmente no se utilizan (CTR, 2009; Montañéz et al., 2011). Las hojas representan del 45 al 50% del peso total de la planta. Es en las hojas secas donde se encuentran residuos que pueden ser solubles en agua fría y/o caliente u otros medios; estos residuos solubles son atribuidos a la presencia de azúcares (AT), parte de la lignina, entre otros.

Anualmente la industria tequilera por ejemplo, demanda aproximadamente un millón de toneladas de piñas de *A. tequilana* Weber Var. azul, actividad que genera una cantidad similar en peso de hojas que constituyen los residuos agrícolas del cultivo y que no son utilizadas en la actualidad (Iñíguez et al., 2001; Montañéz et al., 2011). Aunado a ello, hoy en día existe una sobreproducción de agave tequilero que ocasiona pérdidas anuales cercanas a las 100,000 toneladas (Narváez et Sánchez 2009). Por lo anterior, la finalidad de este trabajo consistió en

utilizar los residuos agrícolas del cultivo del agave tequilero (*Agave tequilana* Weber Azul) y de otras especies de agaves, como materia prima para la obtención de fibras de celulosa por vía del pulpeo para la elaboración de papel, como sustituto parcial de la pulpa de celulosa de especies madereras.

Acorde a su estructura química, los carbohidratos se pueden dividir en dos grupos principales, azúcares y no azúcares. Los azúcares más simples (monosacáridos), en general, son solubles en agua, escasamente en etanol e insolubles en éter, son activos ópticamente, poseen propiedades reductoras. Las fructanas son polímeros de fructuosa que presentan un solo residuo de glucosa en el extremo de la molécula; constituyen unos de los principales carbohidratos de las plantas (Vargas, 2009). Otros de los nombres con que se conocen estos polímeros son fructanos o fructosanos, también se les conoce como polifruetosilsacarosas debido a que son polímeros sintetizados a partir de la molécula de sacarosa. Se caracterizan por pertenecer a la fracción solubilizable en agua caliente (Chacón, 2006).

La concentración de azúcares totales (AT) se determinó a través de una curva de calibración de la absorbancia en función de la concentración para la cual se prepararon soluciones de 10-70 mg/L utilizando manosa como estándar. Como blanco para las lecturas se utilizó agua destilada aplicándole el mismo tratamiento. Para la aplicación del método Dubois (1956) (Método Fenol-Sulfúrico), reportado por Ávila et al., 2012, se mezclaron 2mL de muestra de extracto con 2mL de fenol al 5% en tubos digestores y se colocaron en una gradilla sumergida en un baño de agua fría. A los tubos se les añadieron 5 mL de H₂SO₄, se dejaron reposar por 15 min y se analizaron en un espectrofotómetro (Genesys 10vis) a una longitud de onda de 490 nm. Los ensayos se realizaron por triplicado para obtener valores promedios. Los extractos fueron obtenidos a partir de 2 g de fracción de hojas de agaves, secadas y trituradas en un vaso de precipitados y se les añadió agua destilada en relación 1:6 sólido-agua (o en su caso, solución de NaOH 1 % y/o solución de etanol 1:1. Se llevó a calentamiento y agitación hasta 70°C por 30 minutos. Al término se centrifuga a 5000 rpm y el líquido claro se reserva como extracto de fracciones solubles.

En la tabla 11 se muestran los resultados de porcentajes de cenizas, así como material solubilizable en agua caliente, expresados como %ART (método del fenol-sulfúrico), material solubilizable en NaOH (álcali) y CH₃CH₂-OH (medio alcohólico).

Tabla 11. Resultados de análisis proximales de las hojas de agaves en estudio

Especie: <i>Agave angustifolia</i> Haw (Mezcal) (Oaxaca)				
Hoja	Cenizas (%)	Sol. H ₂ O (% AT)	Sol. NaOH 1% (%)	Sol. CH ₃ - CH ₂ OH:agua 1:1(%)
Media	10.09 ^a	18.697 ^a	2.055 ^a	0.344 ^a
desv. Est.	0.044	0.255	0.095	0.025
%CV	0.439	1.364	4.62	7.27
Especie: <i>Agave tequilana</i> Weber, Var. Azul (Tequila) (Jalisco)				
Hoja	Cenizas (%)	Sol. H ₂ O (% AT)	Sol. NaOH 1% (%)	Sol. CH ₃ - CH ₂ OH:agua 1:1(%)
Media	10.08 ^a	20.152 ^b	3.021 ^b	0.322 ^a
desv. Est.	0.210	0.254	0.104	0.019
%CV	2.087	1.260	3.443	5.90
Especie: <i>Agave salmiana</i> B. Otto ex Salm-Dick (Pulque) (Hidalgo)				
Hoja	Cenizas (%)	Sol. H ₂ O (% AT)	Sol. NaOH 1% (%)	Sol. CH ₃ - CH ₂ OH:agua 1:1(%)
Media	12.93 ^b	19.970 ^b	1.875 ^c	0.284 ^b
desv. Est.	0.321	0.232	0.112	0.029
%CV	2.49	1.162	5.97	10.21
Especie: <i>Agave lechuguilla</i> Torr. (fibras) (Hidalgo)				
Hoja	Cenizas (%)	Sol. H ₂ O (% AT)	Sol. NaOH 1% (%)	Sol. CH ₃ - CH ₂ OH:agua 1:1(%)
Media	10.08 ^a	15.788 ^c	2.176 ^a	0.472 ^c
desv. Est.	0.181	0.228	0.176	0.069
%CV	1.79	1.447	8.09	14.62

Nota: Letras diferentes en columna indican diferencias significativas (p < 0.05) entre especies

Como se aprecia en la tabla, las tres especies de hoja angosta mostraron similares contenidos de cenizas a diferencia de la especie *A. salmiana* de hoja ancha. Esto puede estar asociado a la mayor capacidad de acumular sales minerales por sus mayores dimensiones. Este valor encontrado en *A. salmiana* es 1.6 veces más elevado que el reportado por Vargas (2009), lo que atribuimos a la toma de muestras en épocas de lluvia con mayor probabilidad de incrementar las sales disponibles de los suelos.

Para los contenidos de solubilizables en agua caliente (calculados y expresados como azúcares totales), se realizó la curva de calibrado a partir de estándar de manosa. En la figura 36 se muestra la misma con una regresión de 0.9968.

Los resultados variaron entre 7.4-8.8% de AT, siendo las especies más rica en este sentido la *A. tequilana* y la *A. salmiana* (8.83% y 8.71%, respectivamente. Algunos autores señalan que en general los AT están constituidos por inulinas y fructanos no identificados, como principales carbohidratos solubles de reserva, además de sacarosa, fructosa y glucosa, los cuales pueden participar en los procesos de protección de la planta, almacenamiento de fuentes de energía, estabilizadores de presiones intracelulares y como compuestos de difusión para un almacenamiento más eficiente de los productos originados por el proceso fotosintético, ya que estos compuestos tienden a encontrarse en mayor proporción en el floema (Wang et Nobel, 1998).

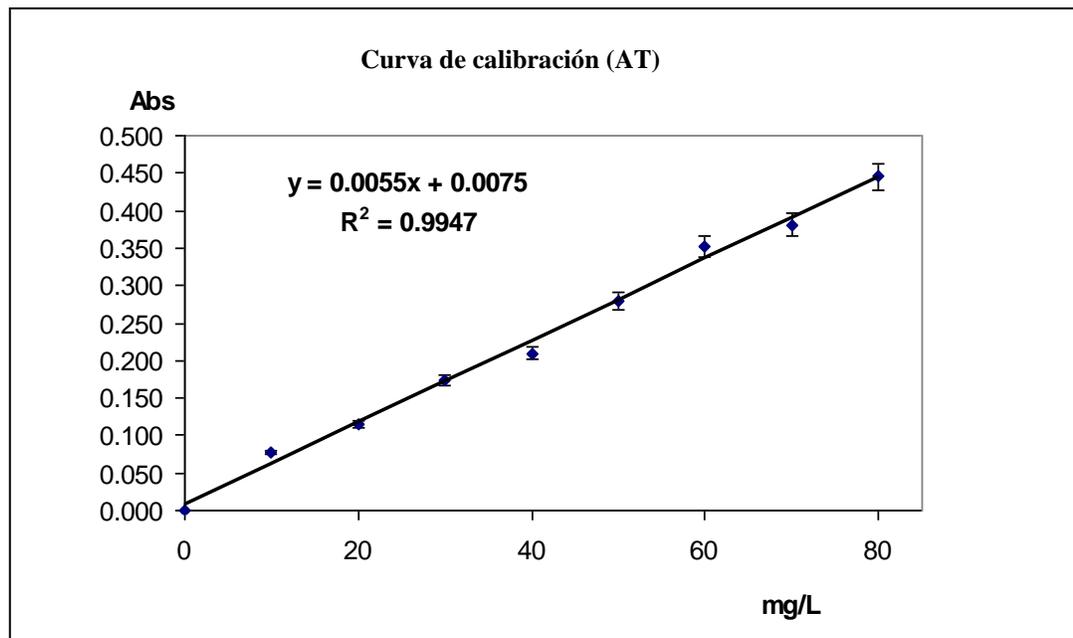


Figura 36. Curva de calibración para determinación de azúcares totales (AT) en la fracción solubilizable en agua caliente

Sin embargo, por los bajos contenidos en materia solubilizables en extracto etanólico, se asume que son relativamente bajos los contenidos de inulina. Esto se corresponde con lo reportado para

la especie *A. atrovirens* Kart (Saengthongpinit et Sajjaanantakul, 2005), donde los autores también indican que los resultados son dependientes de la edad del cultivo. En este estudio se establecieron edades entre 6 y 8 años en función del color de las hojas (Reyes et al., 2000). El material solubilizable en agua caliente se calculó de forma gravimétrica; en la tabla 12 se hace un comparativo entre sus resultados expresados como %AT por el método fenol-sulfúrico y la determinación gravimétrica (% m/m de solubles en agua caliente). Como se puede apreciar existen pequeñas diferencias significativas entre ambas formas de estimar los resultados. De manera similar los resultados gravimétricos oscilan entre 13.8-17.9%, ligeramente más bajos que por el método fotocolorimétrico. Estos resultados también permiten discernir que en efecto los contenidos de inulina deben ser bajos ya que al parecer son mayoritariamente azúcares reductoras como sacarosa, fructosa y glucosa ya que se trata igualmente de especies de agaves.

Los contenidos solubles en solución 1% de NaOH y etanol-agua 1:1, se pueden asociar a una fracción solubilizable de una parte de los contenidos de lignina presentes y que son integrantes de la fibra cruda total, compuesta fundamentalmente por celulosa, hemicelulosas y lignina.

Tabla 12. Comparativo de material solubilizable en agua caliente (método fotocolorimétrico y gravimétrico)

	% AT (Método fenol-sulfúrico)			
	Prom. <i>A. salm.</i>	Prom. <i>A. angu.</i>	Prom. <i>A. tequ</i>	Prom. <i>A. Lech</i>
Media	19.970^a	18.697^b	20.152^c	15.788^d
Des. Est	0.232	0.255	0.254	0.228
%CV	1.162	1.364	1.260	1.447
	% solubles en agua caliente (gravimétrico)			
	Prom. <i>A. salm.</i>	Prom. <i>A. angu.</i>	Prom. <i>A. tequ</i>	Prom. <i>A. Lech</i>
Media	17.429^b	17.530^c	17.943^b	13.76^e
Des. Est	0.832	1.219	0.505	0.432
%CV	4.06	6.62	2.60	2.43

Nota: Letras diferentes en filas indican diferencias significativas entre especies ($p < 0.05$).

Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas entre métodos ($p < 0.05$)

Una parte de la lignina total puede ser parcialmente disuelta por álcalis y/o solventes orgánicos. Luego de una hidrólisis ácida, la lignina puede ser removida por un proceso de deslignificación alcalina con NaOH, sin previa hidrólisis ácida, solo es removida una pequeña fracción de la

lignina total. Este tipo de tratamiento simple con álcalis es reportado en estudios para mejorar la digestibilidad de tejidos vegetales (por ejemplo, con $\text{Ca}(\text{OH})_2$) donde es eliminada parcialmente la lignina (Ramírez et al., 2012).

6.3.1.2 Azúcares totales

El contenido de azúcares totales determinado en las especies de agaves bajo estudio, se encuentra entre 42.29% y 17.58% mostrados en la tabla 13, siendo la especie más rica en este sentido la *A. salmiana* (42.29%), seguida de *A. angustifolia* (32.61%) y *A. tequilana* (32.33%). Algunos autores señalan que en general los AT están constituidos por inulinas y fructanos no identificados, como principales carbohidratos solubles de reserva, además de sacarosa, fructosa y glucosa, los cuales pueden participar en los procesos de protección de la planta, almacenamiento de fuentes de energía, estabilizadores de presiones intracelulares y como compuestos de difusión para un almacenamiento más eficiente de los productos originados por el proceso fotosintético, ya que estos compuestos tienden a encontrarse en mayor proporción en el floema (Wang et Nobel, 1998).

Tabla 13. Resultados sobre porcentaje de azúcares totales de las cuatro especies de agaves Entre paréntesis los valores de desviación estándar

Especie	Azúcares totales (%)	CV (%)
<i>Agave salmiana</i>	42.29 (0.1631) _a	0.39
<i>Agave angustifolia</i>	32.61 (0.1037) _b	0.32
<i>Agave tequilana</i>	32.33 (0.1916) _b	0.59
<i>Agave lechuguilla</i>	17.58 (0.0861) _d	0.49

Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas ($p < 0.05$) **Tukey (0.95)**.

6.3.1.3 Grasas

Referente al contenido de grasas los valores determinados resultan ser valores bajos relativamente mostrados en la tabla 14, siendo el menor de ellos el correspondiente a la especie *A. lechuguilla* (0.74 %). El valor más elevado correspondió a la especie *A. salmiana* (1.68 %) y

resulta semejante al valor que reportan (Vargas, 2009) en 1.82%. Peña et al., (2004) y citados por Molina et al., (2007), indican que la presencia de grasas en estos agaves (*A. tequilana*, *A. salmiana* y *A. angustifolia*) se atribuye a la presencia de terpenos y ácidos grasos y concuerdan los resultados con los encontrados cuando señala (Molina et al., 2007) que la especie *A. salmiana* es más rica en ácidos grasos.

Tabla 14. Resultados sobre porcentaje de grasas. Entre paréntesis, los valores de desviación estándar.

Especie	Grasas (%)	CV (%)
<i>Agave salmiana</i>	1.68 (0.0016) _a	0.10
<i>Agave tequilana</i>	1.23 (0.0148) _b	1.21
<i>Agave angustifolia</i>	1.15 (0.0173) _c	1.51
<i>Agave lechuguilla</i>	0.74 (0.0152) _d	2.05

Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas ($p < 0.05$) **Tukey (0.95)**.

6.3.1.4 Lignina

La lignina es uno de los biopolímeros más abundantes de las plantas y junto con la celulosa y las hemicelulosas conforman la pared celular de las mismas en una disposición regulada a nivel nano-estructural, dando como resultado redes de lignina-hidratos de carbono.

La composición de los tres componentes en esas redes cambia dependiendo de la especie y de la edad de la planta (Solomon et al., 2009). Para especies maderables los contenidos reportados de lignina resultan más elevados (21-48%) (Moya, 2010), comparados con el contenido de lignina de especies no maderables (11.1-32.2%) (Ververis et al., 2004)

En la tabla 15. podemos observar un comparativo del porcentaje de lignina de las cuatro especies estudiadas (reportadas en la literatura y en el presente estudio); para la especie *Agave tequilana* reportamos 13.37 % de contenido de lignina, esto es muy similar a lo que reporta Yang et al.,

(13.8%) en el 2015, y más alto que lo que reportan Li et al., (11.9%) en el año 2012, es pertinente mencionar que el contenido de lignina para los residuos (hojas) de esta especie es más bajo que lo que reportan Kestur et al., (15.98%) en 2013 para el bagazo de la misma especie. La especie *Agave angustifolia* presenta un porcentaje más alto que lo que reportan Rosli et al., (6.3%) en el 2013 y también es la especie que presenta mayor contenido de lignina comparado con las otras especies estudiadas.

El valor más bajo de contenido de lignina correspondió a la especie de *Agave lechuguilla* (12.50%) y también es muy bajo comparado con lo que reportan Viera et al., (2002).

La especie *Agave salmiana* se ubica en segundo lugar en cuanto a contenido de lignina (15.58%) comparada con las otras especies bajo estudio.

El contenido de lignina es sumamente importante en el proceso de obtención de pulpa de celulosa, ya que el principal objetivo de este proceso consiste básicamente en separar las fibras de celulosa que están unidas por medio de la lignina, ya sea por procesos mecánicos, químicos o biológicos. La lignina es un polímero indeseable y se requieren altas cantidades de químicos y energía para su eliminación.

Las cuatro especies de agaves del presente estudio contienen porcentajes más bajos (12.50-16.87%) que las especies maderables utilizadas en la industria del papel (21-48%) Ververis et al., 2004; Bierman, 1996; Moya 2010, este bajo contenido de lignina se refleja en un beneficio en el proceso de pulpeo ya que el tiempo del mismo se reduce a un tercio del tiempo que es requerido para maderas suaves o duras, asimismo la demanda de químicos se reduce un 30% y se consume menos energía, también los procesos de blanqueo son menos complicados y se utilizan menos insumos comparados con los de fuentes maderables (Young, 1997).

Además, el contenido de lignina de una pulpa es un factor importante en la determinación de las cualidades del batido, ya que entre menos contenido de lignina el batido será mayor y la unión de las fibras es mejor.

Tabla 15. Contenido de lignina en especies de agaves reportados en la literatura y en el presente estudio.

Entre paréntesis, los valores de desviación estándar.

Especies	Lignina (%)
<i>A. tequilana</i> <u>*Iñiguez-Covarrubias et al., 2001</u>	15.9
<i>A. tequilana</i> <u>*Alonso, 2005</u>	16.3
<i>Agave tequilana</i> <u>*Yang et al., 2015</u>	13.8 ± 1.3
<i>Agave tequilana</i> <u>*Li et al., 2012</u>	11.9
<i>Agave tequilana</i> “bagazo” <u>*Kestur et al., 2013</u>	15.98 ± 1.20
<i>Agave tequilana</i> ^a Presente estudio	13.37 (0.2604)
<i>Agave angustifolia</i> <u>*Rosli et al. 2013</u>	6.3
<i>Agave angustifolia</i> ^b Presente estudio	16.87 (0.4083)
<i>Agave lechuguilla</i> <u>*Viera et al., 2002</u>	15.3
<i>Agave lechuguilla</i> ^c Presente estudio	12.50 (0.2046)
<i>Agave salmiana</i> “bagazo” <u>*Garcia-Reyes y Rangel-Mendez, 2009</u>	10.1
<i>Agave salmiana</i> ^a Presente estudio	15.58 (0.1508)

Los datos en negritas son los datos obtenidos en este estudio comparados con los de la literatura.

* Los datos subrayados son los datos que se reportan en diversas investigaciones.

Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas (p<0.05) Tukey (0.95).

6.3.1.5 Holocelulosa

El contenido de holocelulosa determinado en las especies de agaves bajo estudio, se encuentra entre 91.97% y 81.44% mostrados en la tabla 16, siendo la especie con mayor contenido de holocelulosa *Agave lechuguilla* (91.97%), seguida de *Agave angustifolia* (85.61%), *Agave salmiana* (83.05%) y *Agave tequilana* (81.44%). Los resultados reportados en el presente estudio

se encuentran en un rango mayor (91-97-81.44%) a los que reportan Bledzki et al., 2004; Iñiguez et al., 2001 para la especie de *Agave tequilana* (70.5%) y para hequén (87.88%) por Valadez et al., 1999; Cazaurang et al., 1990.

Tabla 16. Resultados sobre porcentaje de contenido de holocelulosa. Entre paréntesis los valores de desviación estándar.

Especie	Holocelulosa (%)	CV (%)
<i>Agave lechuguilla</i>	91.97 (1.5392) _a	1.67
<i>Agave angustifolia</i>	85.61 (0.1947) _b	0.23
<i>Agave salmiana</i>	83.05 (3.342) _c	4.02
<i>Agave tequilana</i>	81.44 (2.0016) _d	2.46

Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas ($p < 0.05$) Tukey (0.95).

6.3.1.6 Alpha, beta y gamma celulosa

Los carbohidratos se encuentran clasificados como el grupo más abundante de compuestos orgánicos del planeta, y la celulosa el más abundante de este grupo, ya que representa el 50% o más del total de átomos de carbono en las plantas. La celulosa es un carbohidrato estructural. Casi la mitad de la madera es celulosa, y en el algodón alcanza el 90%. Las células vegetales están rodeadas por resistentes paredes celulares de sostén formadas, en su mayor parte, por celulosa. (Solomon et al, 2009). La alpha celulosa es la celulosa con estructura cristalina que no se degrada en las condiciones alcalina del proceso de deslignificación.

Respecto al contenido de alpha celulosa (tabla 17) los valores determinados en este estudio son más altos (87.85-77.78%) que los que reportan Iñiguez et al., 2001 para *Agave tequilana* 64.8% mientras que para *Agave angustifolia* Rosli et al., 2013 reportaron 67% de contenido de alpha celulosa. Podemos observar que el mayor contenido de alpha celulosa lo presenta el *Agave lechuguilla* (87.85%) y que el que presentó un menor porcentaje fue la especie de *Agave angustifolia* (77.78%).

Según la clasificación de Nieschlag et al., 1960 los materiales con más de 34% de alpha celulosa presentaran mejores características para fabricar papel, (citado en Veveris et al., 2004).

En cuanto al contenido de beta y gamma celulosa en la literatura se han reportado los siguientes porcentajes 15.21% y 8.86% respectivamente para bagazo de *Agave tequilana* (Kestur et al., 2014).

Con respecto al contenido de hemicelulosas reportado como beta y gamma, estas tienen una influencia sobre las cualidades de batido de la pulpa. Las sustancias hemicelulósicas son deseables en la pulpa para la producción de papeles resistentes. Las pulpas que tienen contenidos bajos de hemicelulosas son muy resistentes al batido y tienen características bajas de resistencias, mientras que las pulpas con porcentajes altos de hemicelulosas se baten con mayor facilidad, obteniendo hojas más resistentes. Otras características del papel que están relacionadas con el contenido de hemicelulosas son la resistencia a la tensión, la resistencia a la explosión y la resistencia al dobléz y el rendimiento de la pasta.

El *Agave angustifolia* contiene 14.35 y 7.88% de beta y gamma celulosa respectivamente, seguido del *Agave tequilana* que contiene 13.85 y 7.18% de beta y gamma celulosa respectivamente, *Agave salmiana* contiene 13.18 y 7.37% de beta y gamma celulosa respectivamente, y *Agave lechuguilla* con el menor contenido de beta y gamma celulosa.

El contenido de hemicelulosas (gamma y beta) (tablas 18 y 19) más bajo lo tiene el *Agave lechuguilla* por lo tanto las hojas producidas a partir de esta especie serían hojas de baja resistencia, menor resistencia a la explosión, menor resistencia al dobléz y menor resistencia a la tensión (Bierman, 1996).

Sin embargo las hemicelulosas son más solubles y lábiles que la celulosa, lo cual las hace más susceptibles a la degradación química.

La resistencia del papel también depende del contenido de celulosa y de lignina. Específicamente la fuerza de tensión está directamente relacionada con el contenido de celulosa (Madakadze et al., 1999 y Bierman, 1996).

Las diferencias encontradas en las especies de agaves en cuanto al porcentaje de contenido de los componentes químicos, pueden ser debido a la cosecha y madurez de las plantas, metodologías usadas para la determinación, las condiciones ambientales de desarrollo de las plantas, la región geográfica de crecimiento de la planta, entre otros factores (Cedeño-Cruz, et al., 1999; Li et al., 2012; Iñiguez-Covarrubias et al., 2001; Iñiguez-Covarrubias et al., 2005).

Tabla 17. Resultados sobre porcentaje de contenido de alpha celulosa. Entre paréntesis los valores de desviación estándar.

Especie	Alpha celulosa (%)	CV (%)
<i>Agave lechuguilla</i>	87.85 (0.0431) _a	0.05
<i>Agave salmiana</i>	79.45 (0.1139) _b	0.14
<i>Agave tequilana</i>	78.96 (0.3946) _c	0.50
<i>Agave angustifolia</i>	77.78 (0.0746) _d	0.10

Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas ($p < 0.05$) Tukey (0.95).

Tabla 18. Resultados sobre porcentaje de contenido de beta celulosa. Entre paréntesis los valores de desviación estándar.

Especie	Beta celulosa (%)	SD	CV (%)
<i>Agave angustifolia</i>	14.35 _a	0.0899	0.63
<i>Agave tequilana</i>	13.85 _b	0.3559	2.57
<i>Agave salmiana</i>	13.18 _c	0.1469	1.11
<i>Agave lechuguilla</i>	6.20 _d	0.1469	2.37

Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas ($p < 0.05$) Tukey (0.95).

Tabla 19. Resultados sobre porcentaje de contenido de gamma celulosa. Entre paréntesis los valores de desviación estándar.

Especie	Gama celulosa (%)	CV (%)
<i>Agave salmiana</i>	7.37 (0.0344) _a	0.47
<i>Agave tequilana</i>	7.18 (0.0456) _b	0.63
<i>Agave angustifolia</i>	7.88 (0.0172) _c	0.22
<i>Agave lechuguilla</i>	5.94 (0.0456) _d	0.77

Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas ($p < 0.05$) Tukey (0.95).

En la tabla 20 podemos observar una correlación negativa entre el contenido de alpha celulosa y el contenido de beta y gamma celulosa con un 99 y 96 % respectivamente. Lo cual nos indica que con el mayor porcentaje de contenido de alpha celulosa, tendremos un menor porcentaje de beta y gamma celulosa (hemicelulosas).

Tabla 20. Correlación de Pearson entre variables (alpha, beta, gamma celulosa)

	% Alpha	% Beta	% Gamma
% Alpha	1	-0.998**	-0.968**
% Beta	-0.998**	1	0.953**
% Gamma	-0.968**	0.953**	1

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

Idarra et al., (1999), mencionan que de acuerdo a resultados obtenidos en su investigación, se requieren estudios específicos y detallados para cada especie de planta (materia prima para la obtención de pulpa de celulosa) con la finalidad de encontrar las condiciones óptimas para producir pulpa de calidad.

6.4 Procesos de pulpeo

Actualmente se conocen diversos métodos para la obtención de pulpa para papel; métodos químicos, mecánicos, químico-mecánicos y biológicos (biopulpeo), sin embargo, estos procedimientos aplicados en el ámbito industrial utilizan preferentemente materias primas convencionales, como las coníferas de fibra larga. De esta manera, el uso de otras materias primas provenientes de plantas anuales y desechos agroindustriales como el bagazo de maguey, es relativamente limitado (Escoto et al., 2006).

En términos generales el proceso de pulpeo mecánico se lleva a cabo mediante el uso de una piedra giratoria en la cual se ponen en contacto los materiales lignocelulósicos. También se utilizan discos del refinador. Las especies procesadas son maderas duras como el álamo y maderas blandas como abetos. La pulpa obtenida a través de este proceso presenta fibras cortas, alta opacidad, suavidad y grosor, así como una alta capacidad de absorción de agua y baja resistencia y brillo; se utilizan principalmente para elaborar papel periódico, papel de libros y revistas. Se obtienen altos rendimientos hasta del 98% (Biermann, 1996; Becerra y Ramírez, 2003).

En el proceso termomecánico, el objetivo principal es mantener la longitud de las fibras después del proceso. En este proceso se introduce como variable principal a la temperatura. En este proceso se obtiene pulpa con fibras de mayor longitud y altos rendimientos de 95 a 98% (Biermann, 1996; Becerra y Ramírez, 2003).

En el proceso quimicotermodomecánico se utilizan algunos químicos como NaOH o NaHSO₃, con el objetivo de degradar las sustancias que unen a las fibras evitando que estas se acorten por el efecto del trabajo refinador. La pulpa obtenida presenta una moderada resistencia. Los rendimientos que se obtienen oscilan entre 88.95% (Biermann, 1996; Becerra y Ramírez, 2003).

En el proceso semiquímico en el primer paso se utiliza un químico suave y posteriormente se aplica un proceso mecánico moderado de refinación. Principalmente se procesan maderas duras como robles y maderas blandas como abetos. Las fibras obtenidas de este proceso presentan

buena rigidez y moldeabilidad con rendimientos de hasta 80% (Biermann, 1996; Becerra y Ramírez, 2003).

En esta investigación se utilizó un proceso mecánico-químico, debido a que las hojas fueron trituradas y posteriormente fueron tratadas con agentes químicos. Como se menciona en el apartado de métodos se utilizaron dos procesos (alcalino y ácido) para procesar las muestras.

En el proceso Alcalino se emplea una solución que contiene 1-30% de NaOH, 1-2.5 % de Na_2CO_3 y 0.2-1% de Na_2SO_4 (Bierman, 1996;).

Con respecto al Proceso Organosolv se utiliza CH_3COOH como agente deslignificante y como catalizador HCl (Gumeta et al., 2007).

Los experimentos se realizaron en reactores de 500 mL de capacidad (figura 37), con un el baño termostático.



Figura 37. Reactores de pulpeo (Proceso de pulpeo alcalino (NaOH) de *Agave salmiana*, muestra por triplicado).

En cuanto al rendimiento en pulpa (Rp) este se determinó gravimétricamente después del secado de las pulpas hasta peso constante (Ligero et al., 2004).

A partir del peso de la pulpa seca se calculó el rendimiento porcentual con la siguiente ecuación:

$$Rp = \frac{\text{peso de la pulpa}}{\text{peso de la muestra inicial}} * 100$$

6.4.1. Pulpeo alcalino (NaOH) Pulpeo Organosolv (CH₃COOH)

6.4.1.1. *Agave salmiana*

Los resultados de rendimiento (%) de la especie *Agave salmiana* obtenidos mediante dos métodos se presentan seguidamente. Podemos observar que los rendimientos obtenidos por el método alcalino son más bajos comparados con los obtenidos con el método Organosolv.

Los rendimientos de pulpa de celulosa obtenidos por el método Organosolv son más altos que los que reportan Romero-Viloria, P et al., 2014 para residuos agrícolas de cáscara y tallo de *Musa sapientum*. Estos autores obtuvieron rendimientos de 27%.

Por otra parte Jahan et al., 2016 obtuvieron rendimientos de pulpa de celulosa de jute de entre 36 a 46% por método de pulpeo alcalino, en el cual utilizaron cargas de NaOH de 14-18%, lo cual es un factor que influye directamente sobre el rendimiento de la pulpa de celulosa. En esta investigación se utilizaron porcentajes entre 4 y 12% con la finalidad de minimizar el ataque sobre las fibras de celulosa y aumentar la resistencia de las mismas.

Según Jaouadi et al., 2009 los rendimientos obtenidos para pulpa de celulosa de *Agave americana* fueron de 6 a 49%.

Podemos observar también que los rendimientos de pulpa de celulosa por el método de pulpeo alcalino disminuyeron a mayores concentraciones de NaOH como lo reportan Santiago et al., (2002) para la especie de *Agave sisalana*.

En las tablas 21 y 22 se presentan los rendimientos (%) de pulpa de celulosa de la especie *Agave salmiana* obtenidos mediante el método alcalino (NaOH) o método a la sosa y por el método Organosolv (CH₃COOH) respectivamente, en las cuales se observan los promedios de las 3 repeticiones de los 9 experimentos a tres niveles de ruido.

Tabla 21. Rendimientos (% p/p) de pulpa de celulosa de la especie *Agave salmiana* obtenidos mediante el método de pulpeo a alcalino (NaOH).

Experimento	R1	R2	R3
1	19.38	21.84	16.02
2	16.24	13.51	15.65
3	13.84	13.48	12.11
4	18.11	20.14	20.81
5	18.98	19.26	15.59
6	14.13	13.55	14.12
7	21.18	22.01	18.98
8	15.32	19.72	18.13
9	15.25	16.29	13.24

Tabla 22. Rendimientos (% p/p) de pulpa de celulosa de la especie *Agave salmiana* obtenidos mediante el método de pulpeo Organosolv (CH₃COOH).

Experimento	R1	R2	R3
1	36.67	39.27	33.27
2	34.11	33.10	25.55
3	32.71	36.30	38.26
4	28.58	27.31	26.94
5	35.06	33.57	38.21
6	34.13	36.32	29.69
7	31.48	33.23	32.94
8	34.65	32.71	32.15
9	36.03	29.85	33.86

Efecto promedio de los factores sobre el nivel medio de rendimiento de pulpa de celulosa (pulpeo alcalino)

En la figura 38 podemos observar los resultados de la influencia de los factores sobre el valor medio de la respuesta factorial y de interacciones. Específicamente notamos que los valores que contribuyen en mayor porcentaje son **(A3)** una concentración alta (12%) de NaOH, **(B1)** con un tiempo de proceso de 24 horas, **(C3)** una alta (2.5% m/v) concentración de Na₂CO₃, **(D1)** una baja concentración de Na₂SO₄, en % m/v y **(R2)** con una velocidad de agitación media de 600 rpm.

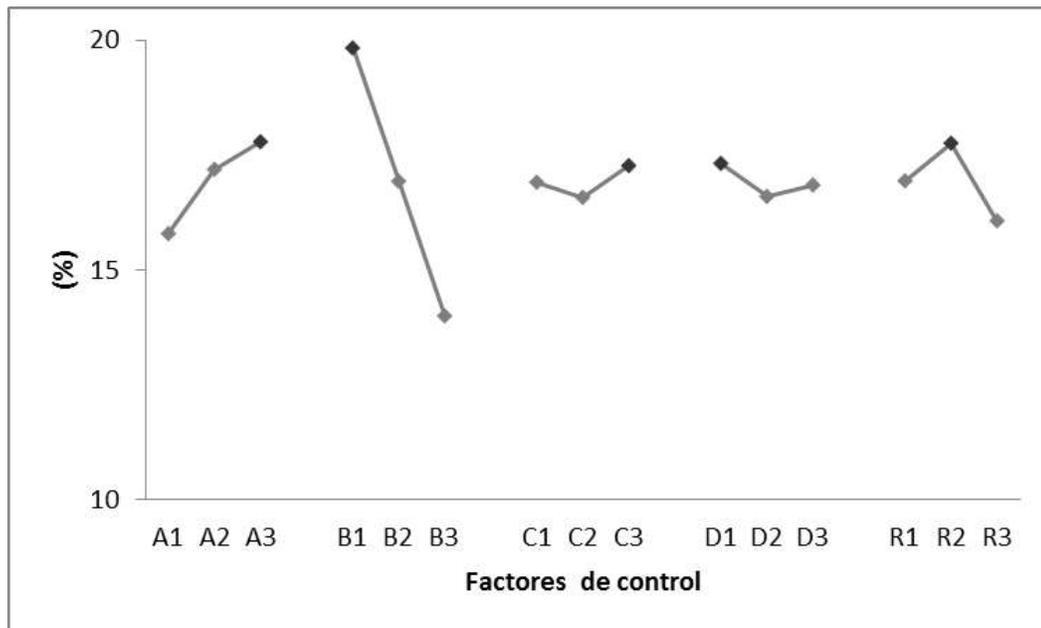


Figura 38. Efecto promedio de las interacciones entre factores de control y factores de ruido sobre el nivel medio de rendimiento de pulpeo de la especie *Agave Salmiana* con el método de pulpeo alcalino (NaOH).

Efecto promedio de la relación señal/ruido sobre el valor medio del rendimiento de pulpa de celulosa (pulpeo alcalino)

En la figura 39 podemos observar las condiciones óptimas para obtener los porcentajes más altos de rendimiento de pulpa de celulosa en el pulpeo alcalino. Según el análisis realizado se requiere **(A3)** una concentración alta (12%) de NaOH, **(B1)** con un tiempo de proceso de 24 horas, **(C3)** una alta (2.5% m/v) concentración de Na₂CO₃, **(D1)** una baja concentración de Na₂SO₄, en % m/v.

En la tabla 23 y figura 40 observamos que las condiciones óptimas para obtener mayores rendimientos a R1 son las siguientes: A3, B1, C3 y D1; para R2 las condiciones óptimas son A3, B1, C1 y D1; mientras para R3 las condiciones óptimas son A2, B1, C2 y D3. Nótese que para R1, R2 y R3, se requiere el mismo nivel para el factor tiempo (B1).

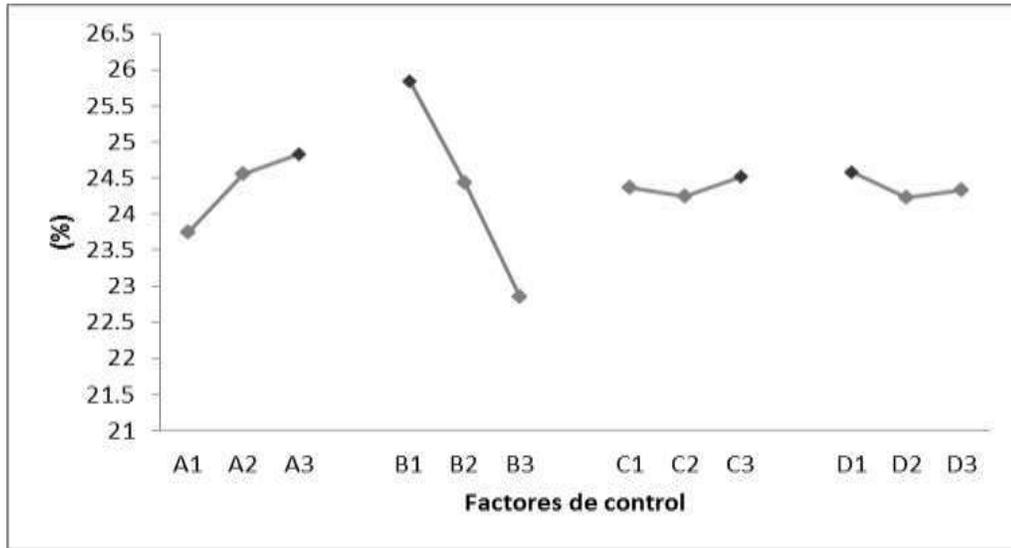


Figura 39. Efecto promedio de la relación señal/ruido sobre el valor medio del rendimiento de pulpa de celulosa de la especie *Agave salmiana* con el método de pulpeo alcalino (NaOH).

Efecto promedio de los factores sobre el nivel medio de rendimiento de pulpa de celulosa (pulpeo Organosolv)

En la figura 41 podemos observar los resultados de la influencia de los factores sobre el valor medio de la respuesta factorial y de interacciones, los valores de respuesta. Específicamente notamos que los valores que contribuyen en mayor porcentaje son **(A1)** una concentración baja (60% m/v) de H₂O **(B3)** con un tiempo de proceso de 6 horas, **(C3)** una alta (80% m/v) concentración de CH₃COOH, **(D1)** una baja (0.5% m/v) concentración de HCl, en % m/v y **(R1)** con una velocidad de agitación de 600 rpm.

Tabla 23. Efecto promedio de las interacciones de los factores sobre el rendimiento de pulpa de celulosa de la especie *Agave salmiana* con el método de pulpeo alcalino (NaOH).

	R1	R2	R3
A1	16.49	16.28	14.59
A2	17.07	17.65	16.84
A3	17.25	19.34	16.78
B1	19.56	21.33	18.6
B2	16.85	17.5	16.46
B3	14.41	14.44	13.16
C1	16.28	18.37	16.09
C2	16.53	16.65	16.57
C3	18	18.25	15.56
D1	17.87	19.13	14.95
D2	17.18	16.36	16.25
D3	15.76	17.78	17.02

A: NaOH (% m/v); B: Tiempo del proceso (horas); C: Na₂CO₃ (% m/v); D: Na₂SO₄, (% m/v) y R: Ruido velocidad de agitación del sistema en rpm.

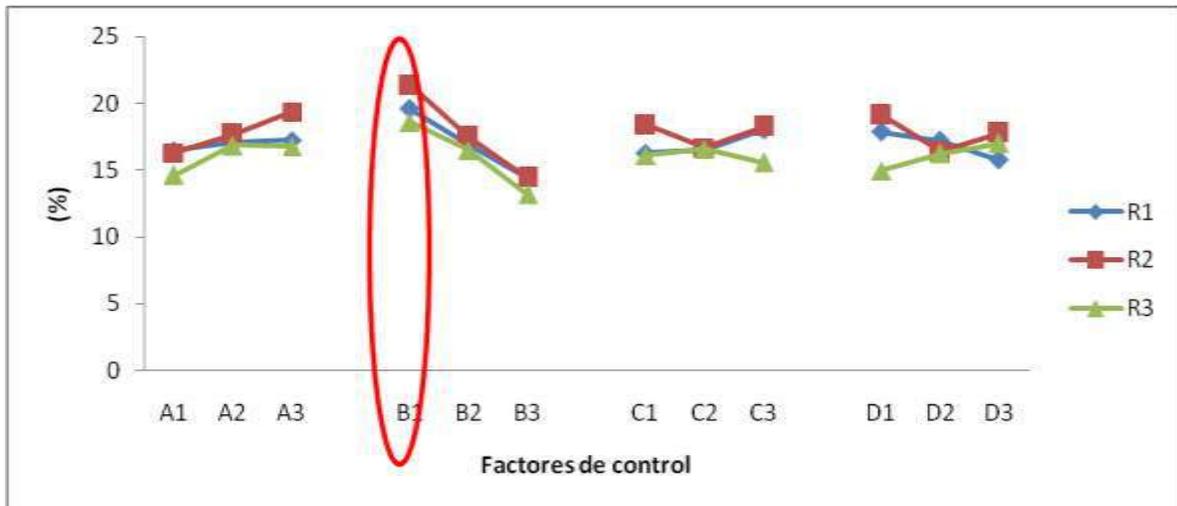


Figura 40. Efecto promedio con los valores medios.

Agave salmiana con el método de pulpeo alcalino (NaOH).

Efecto promedio de la relación señal/ruido sobre el valor medio del rendimiento de pulpa de celulosa (pulpeo Organosolv)

En la figura 42 podemos observar las condiciones óptimas para obtener los porcentajes más altos de rendimiento de pulpa de celulosa de la especie *Agave salmiana* por el proceso de pulpeo conocido como Organosolv (CH_3COOH). Según el análisis realizado se requiere (**A1**) una concentración baja (60% m/v) de H_2O (**B3**) con un tiempo de proceso de 6 horas, (**C3**) una alta (80% m/v) concentración de CH_3COOH , (**D1**) una baja (0.5% m/v) concentración de HCl.

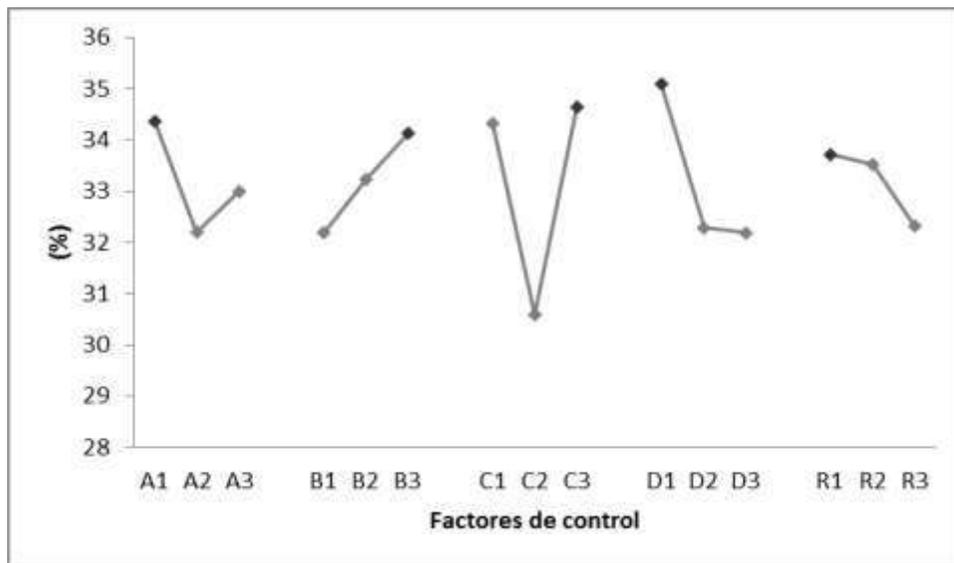


Figura 41. Efecto promedio de las interacciones entre factores de control y factores de ruido sobre el nivel medio de rendimiento de pulpeo de la especie *Agave Salmiana* con el método de pulpeo Organosolv (CH_3COOH).

Respuestas con los valores medios bajo el efecto promedio de las interacciones

En la tabla 24 y figura 43 observamos que las condiciones óptimas para obtener mayores rendimientos a R1 son las siguientes: A1, B2, C1 y D1; para R2 las condiciones óptimas son A1, B3, C1 y D1; mientras para R3 las condiciones óptimas son A3, B3, C3 y D1. Nótese que para R1, R2 y R3, se requiere el mismo nivel para el factor tiempo (B1).

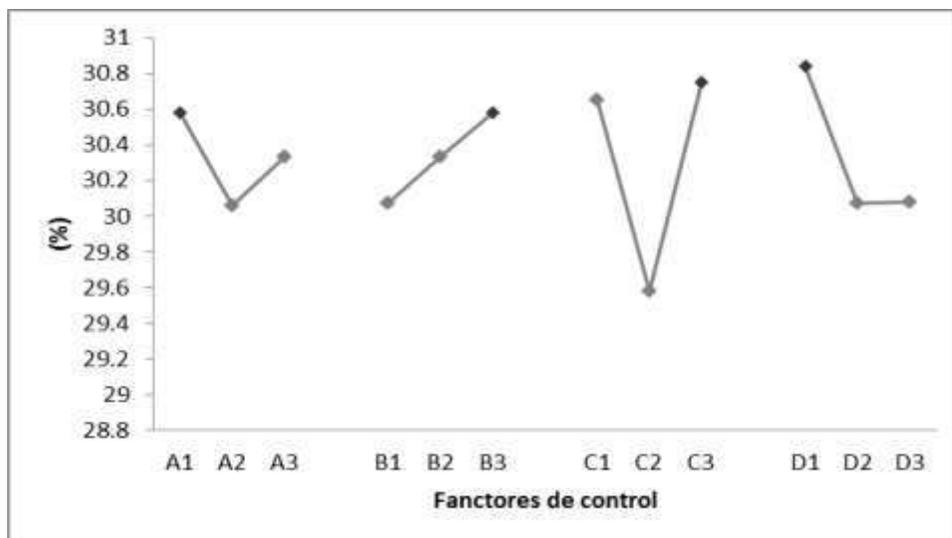


Figura 42. Efecto promedio de la relación señal/ruido sobre el valor medio del rendimiento de pulpa de celulosa de la especie *Agave salmiana* con el método de pulpeo Organosolv (CH_3COOH).

Tabla 24. Respuesta promedio con los valores medios bajo el efecto promedio de las interacciones de la especie *Agave salmiana* con el método de pulpeo Organosolv (CH_3COOH).

	R1	R2	R3
A1	34.5	36.22	32.36
A2	32.59	32.4	31.61
A3	34.05	31.93	32.98
B1	32.24	33.27	31.05
B2	34.61	33.13	31.97
B3	34.29	34.16	33.94
C1	35.15	36.1	31.7
C2	32.91	30.09	28.78
C3	33.08	34.37	36.47
D1	35.92	34.23	35.11
D2	33.24	34.22	29.39
D3	31.98	32.11	32.45

A: H_2O en % m/v; B: Tiempo del proceso en horas; C: CH_3COOH en % m/v y D: HCl , en % m/v) y R: Ruido velocidad de agitación del sistema en rpm.

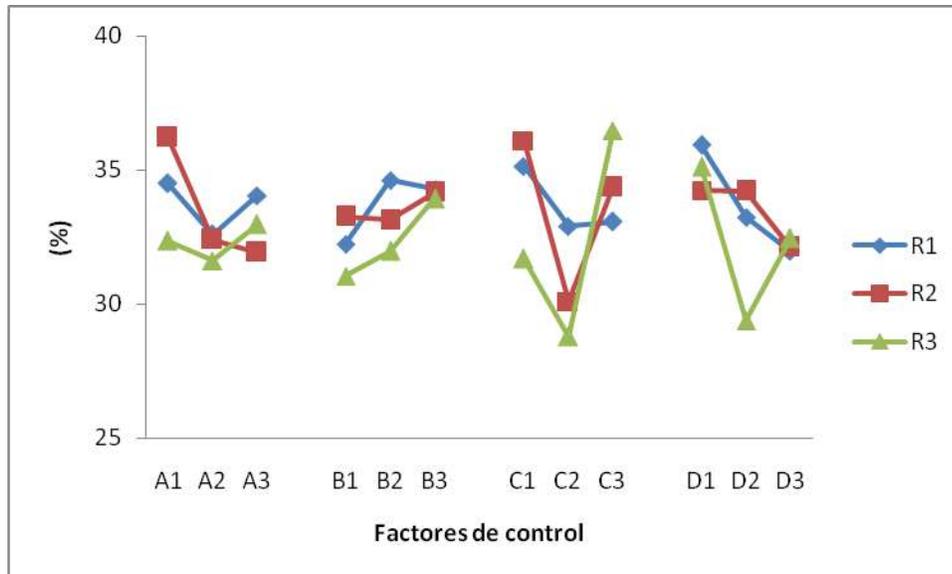


Figura 43. Efecto promedio con los valores medios. *Agave salmiana* con el método de pulpeo Organosolv (CH_3COOH).

Condiciones óptimas en el proceso de pulpeo alcalino (NaOH)

A partir del análisis de los resultados obtenidos, se establece que las condiciones óptimas para obtener altos rendimientos de pulpa en el proceso de pulpeo alcalino (NaOH) se logran mediante la siguiente combinación de factores y niveles:

Factor A: Concentración de 12% m/v de NaOH (**nivel 3**)

Factor B: Tiempo del proceso de pulpeo de 24 horas (**nivel 1**)

Factor C: Concentración de 2.5% m/v Na_2CO_3 (**nivel 3**)

Factor D: Concentración de 0.2% m/v Na_2SO_4 (**nivel 1**)

Condiciones óptimas en el proceso de pulpeo Organosolv (CH_3COOH)

A partir del análisis de los resultados obtenidos, se establece que las condiciones óptimas para obtener altos rendimientos de pulpa en el proceso de pulpeo Organosolv (CH_3COOH) se logran mediante la siguiente combinación de factores y niveles:

Factor A: Concentración de 60% m/v de H_2O (**nivel 3**)

Factor B: Tiempo del proceso de pulpeo de 6 horas (**nivel 3**)

Factor C: Concentración de 80% m/v CH_3COOH (**nivel 3**)

Factor D: Concentración de 0.5% m/v HCl (**nivel 1**)

Entre la gran gama de disolventes orgánicos propuestos en la literatura el ácido acético ha sido más utilizado debido a que puede deslignificar de forma extensiva y selectiva. La utilización de ácido acético en el proceso de pulpeo proporciona altos rendimientos de pulpa de celulosa debido a que la materia prima es fraccionada en celulosa y licores conteniendo lignina y productos de la degradación de las hemicelulosas.

6.4.1.2. *Agave tequilana*

Los resultados de rendimiento (%) de la especie *Agave tequilana* obtenidos mediante dos métodos de pulpeo citados en párrafos anteriores se muestran en los siguientes párrafos. Podemos observar que los rendimientos obtenidos por el método Organosolv son más homogéneos que los obtenidos por el método alcalino. Los rendimientos de pulpa de celulosa obtenidos por el método Organosolv son semejantes a los que reportan Fernández-Rodríguez et al., (2016) para hojas de *Agave tequilana*.

En las tablas 25 y 26 se presentan los rendimientos (%) de pulpa de celulosa de la especie *Agave tequilana* obtenidos mediante el método alcalino (NaOH) o método a la sosa y por el método

Organosolv (CH₃COOH) respectivamente, en las cuales se observan los promedios de las 3 repeticiones de los 9 experimentos a tres niveles de ruido.

Tabla 25. Rendimientos (% p/p) de pulpa de celulosa de la especie *Agave tequilana* obtenidos mediante el método de pulpeo a alcalino (NaOH).

Experimento	R1	R2	R3
1	30.25	28.85	27.51
2	22.57	29.20	19.45
3	23.66	21.04	23.82
4	28.15	30.58	31.09
5	43.59	37.60	30.54
6	30.27	26.94	22.56
7	30.68	32.17	33.55
8	27.10	27.46	20.82
9	19.11	16.14	14.79

Tabla 26. Rendimientos (% p/p) de pulpa de celulosa de la especie *Agave tequilana* obtenidos mediante el método de pulpeo Organosolv (CH₃COOH).

Experimento	R1	R2	R3
1	54.89	56.29	55.11
2	47.89	45.27	43.11
3	55.07	57.19	52.73
4	46.19	43.76	44.64
5	43.60	45.32	45.40
6	45.35	49.40	52.27
7	42.41	42.88	40.33
8	49.57	47.68	42.46
9	49.79	50.62	44.82

Análisis de varianza de la relación señal/ruido sobre el valor medio del rendimiento de pulpa de celulosa (pulpeo alcalino)

Se realizó un análisis de varianza de la relación señal/ruido, el cual evalúa la influencia de los factores sobre el valor medio y la variación entorno a dicho valor medio para el rendimiento de

pulpa de celulosa. Podemos observar en la tabla 27 que se descartó al factor D: Na₂SO₄, en % m/v, debido a que fue el factor que presentó la varianza menor, por ende es el factor que tiene una menor incidencia sobre los resultados de rendimiento de celulosa.

Seguidamente, se recalculó el ANOVA sin la influencia del factor de menor varianza (tabla 27). Se observa que para este análisis, sin considerar al factor de menor incidencia sobre el sistema el error residual es de 3.12; también podemos observar que el factor B (tiempo del proceso) es el que presenta mayor desviación estándar y el que presenta menor desviación estándar es el factor A (Concentración de NaOH), el que presenta mayor incidencia en el sistema es el tiempo del proceso y el que presenta menor contribución es la concentración de NaOH.

Tabla 27. ANOVA *Agave tequilana* método alcalino (NaOH)

S	DF	S	V	F	S'	RHO
A	2	8.55	4.28	33.67	8.30	25.47
B	2	14.46	7.23	56.93	14.21	43.60
C	2	9.32	4.66	36.68	9.06	27.81
D	2	0.25	0.13			
e	2	0.25	0.13		1.02	3.12

A: NaOH en % m/v; B: Tiempo del proceso en horas; C: Na₂CO₃ en % m/v; D: Na₂SO₄, en % m/v y R: Ruido velocidad de agitación del sistema en rpm. GL: Grados de libertad por cada variable; S: Desviación estándar; V: S²; F: F de Fisher calculada; S': Desviación estándar recalculada al despreciar la V más pequeña; RHO: Porcentaje de contribución de cada variable al sistema (F_{tab}= 19 v=2)

Efecto promedio de la relación señal/ruido sobre el valor medio del rendimiento de pulpa de celulosa (pulpeo alcalino)

En la figura 44 podemos observar las condiciones óptimas para obtener los porcentajes más altos de rendimiento de pulpa de celulosa. Según el análisis realizado se requiere **(A2)** una concentración media (8%) de NaOH, **(B1)** con un tiempo de proceso de 24 horas, **(C3)** una alta (2.5% m/v) concentración de Na₂CO₃, **(D2)** una media concentración de Na₂SO₄, en % m/v.

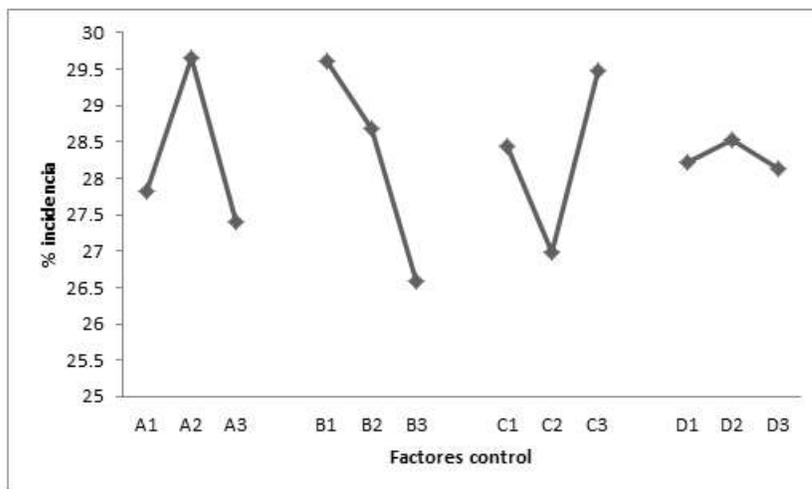


Figura 44. Efecto promedio de la relación señal/ruido sobre el valor medio del rendimiento de pulpa de celulosa de la especie *Agave tequilana* con el método de alcalino (NaOH).

Análisis de varianza de la relación señal/ruido sobre el valor medio del rendimiento de pulpa de celulosa (pulpeo Organosolv)

En la tabla 28 podemos observar que se descartó al factor C: CH_3COOH en % m/v, debido a que fue el factor que presentó la varianza menor, por ende es el factor que tiene una menor incidencia sobre los resultados de rendimiento de celulosa.

Posteriormente, se recalculó el ANOVA sin la influencia del factor de menor varianza. Se observa que para este análisis, sin considerar al factor de menor incidencia sobre el sistema el error residual es de 62.51; también podemos observar que el factor A: H_2O en % m/v es el que presenta mayor incidencia en el sistema es D: HCl , en % m/v.

Tabla 28. ANOVA *Agave tequilana* método ácido (CH₃COOH)

S	DF	S	V	F	S'	RHO
A	2	2.29	1.14	2.71	1.44	26.66
B	2	1.33	0.67	1.58	0.49	9.02
C	2	0.84	0.42			
D	2	0.94	0.47	1.12	0.10	1.81
e	2	0.84	0.42		3.38	62.51

A: H₂O en % m/v; B: Tiempo del proceso en horas; C: CH₃COOH en % m/v; D: HCl, en % m/v y R: Ruido velocidad de agitación del sistema en rpm. GI: Grados de libertad por cada variable; S: Desviación estándar; V: S²; F: F de Fisher calculada; S': Desviación estándar recalculada al despreñar la V más pequeña; RHO: Porcentaje de contribución de cada variable al sistema (Ftab= 19 v=2)

Efecto promedio de la relación señal/ruido sobre el valor medio del rendimiento de pulpa de celulosa (pulpeo Organosolv)

En la figura 45 podemos observar las condiciones óptimas para obtener los porcentajes más altos de rendimiento de pulpa de celulosa de la especie *Agave tequilana* por el proceso de pulpeo conocido como Organosolv (CH₃COOH). Según el análisis realizado se requiere (A1) una concentración baja (60% m/v) de H₂O (B3) con un tiempo de proceso de 6 horas, (C1) una baja (40% m/v) concentración de CH₃COOH, (D1) una baja (0.5% m/v) concentración de HCl.

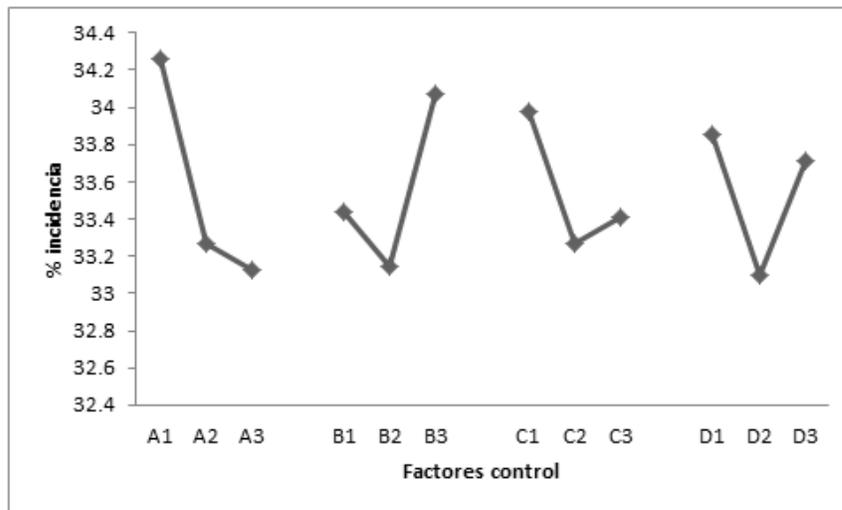


Figura 45. Efecto promedio de la relación señal/ruido sobre el valor medio del rendimiento de pulpa de celulosa de la especie *Agave tequilana* con el método de pulpeo Organosolv (CH₃COOH).

Condiciones óptimas en el proceso de pulpeo alcalino (NaOH), para la especie *Agave tequilana*

A partir del análisis de los resultados obtenidos, se establece que las condiciones óptimas para obtener altos rendimientos de pulpa en el proceso de pulpeo alcalino (NaOH) se logran mediante la siguiente combinación de factores y niveles:

Factor A: Concentración de 8% m/v de NaOH (**nivel 2**)

Factor B: Tiempo del proceso de pulpeo de 24 horas (**nivel 1**)

Factor C: Concentración de 2.5% m/v Na₂CO₃ (**nivel 3**)

Factor D: Concentración de 0.5% m/v Na₂SO₄ (**nivel 2**)

Condiciones óptimas en el proceso de pulpeo Organosolv (CH₃COOH), para la especie *Agave tequilana*

A partir del análisis de los resultados obtenidos, se establece que las condiciones óptimas para obtener altos rendimientos de pulpa en el proceso de pulpeo Organosolv (CH₃COOH) se logran mediante la siguiente combinación de factores y niveles:

Factor A: Concentración de 60% m/v de H₂O (**nivel 1**)

Factor B: Tiempo del proceso de pulpeo de 6 horas (**nivel 3**)

Factor C: Concentración de 40% m/v CH₃COOH (**nivel 1**)

Factor D: Concentración de 0.5% m/v HCl (**nivel 1**)

6.4.1.3. *Agave lechuguilla*

Los rendimientos de pulpa de celulosa de *Agave lechuguilla* obtenidos por el método alcalino (tabla 29) fueron más altos que los obtenidos para *Agave salmiana*, pero más bajos que los reportados para *Agave tequilana*; no obstante, podemos observar que los rendimientos obtenidos por el método ácido (Organosolv) muestran otra tendencia (tabla 30) ya que son más semejantes a los reportados para *Agave salmiana*.

Tabla 29. Rendimientos (% p/p) de pulpa de celulosa de la especie *Agave lechuguilla* obtenidos mediante el método de pulpeo a alcalino (NaOH).

Experimento	R1	R2	R3
1	29.87	25.52	19.54
2	18.54	16.42	18.47
3	20.42	22.08	26.08
4	33.83	37.46	33.48
5	11.70	11.12	10.62
6	22.15	25.42	17.79
7	26.34	27.99	21.93
8	49.38	52.69	60.93
9	14.47	15.33	11.26

Tabla 30. Rendimientos (% p/p) de pulpa de celulosa de la especie *Agave lechuguilla* obtenidos mediante el método de pulpeo Organosolv (CH₃COOH).

Experimento	R1	R2	R3
1	43.294	44.587	41.819
2	42.253	42.736	40.843
3	39.826	42.174	36.608
4	44.757	42.703	42.519
5	50.426	48.144	38.213
6	39.165	42.738	43.014
7	54.234	45.403	34.468
8	44.677	39.452	42.733
9	44.665	43.778	58.4

En las tablas 29 y 30 se presentan los rendimientos (%) de pulpa de celulosa de la especie *Agave lechuguilla* obtenidos mediante el método alcalino (NaOH) o método a la sosa y por el método Organosolv (CH₃COOH) respectivamente, en las cuales se observan los promedios de las 3 repeticiones de los 9 experimentos a tres niveles de ruido.

Análisis de varianza de la relación señal/ruido sobre el valor medio del rendimiento de pulpa de celulosa (pulpeo alcalino)

Se realizó un análisis de varianza de la relación señal/ruido, el cual evalúa la influencia de los factores sobre el valor medio y la variación entorno a dicho valor medio para el rendimiento de pulpa de celulosa. Podemos observar en la tabla 31 que se descartó al factor A: NaOH, debido a que fue el factor que presentó la varianza menor, por ende, es el factor que tiene una menor incidencia sobre los resultados de rendimiento de celulosa.

Seguidamente, se recalculó el ANOVA sin la influencia del factor de menor varianza. Se observa que para este análisis, sin considerar al factor de menor incidencia sobre el sistema el error residual es de 25.72; también podemos observar que el factor D es el que presenta mayor desviación estándar y el que presenta menor desviación estándar es el factor B. El factor con mayor contribución al sistema es el Na₂SO₄, en % m/v.

Tabla 31. ANOVA *Agave lechuguilla* método alcalino (NaOH)

S	DF	S	V	F	S'	RHO
A	2	8.71	4.35	-		
B	2	17.86	8.93	2.05	9.16	6.77
C	2	30.42	15.21	3.49	21.72	16.04
D	2	78.37	39.19	9.00	69.67	51.47
E	2	8.71	4.35	-	34.82	25.72

A: NaOH en % m/v; B: Tiempo del proceso en horas; C: Na₂CO₃ en % m/v; D: Na₂SO₄, en % m/v y R: Ruido velocidad de agitación del sistema en rpm. GL: Grados de libertad por cada variable; S: Desviación estándar; V: S²; F: F de Fisher calculada; S': Desviación estándar recalculada al despreciar la V más pequeña; RHO: Porcentaje de contribución de cada variable al sistema (F_{tab}= 19 v=2)

Efecto promedio de la relación señal/ruido sobre el valor medio del rendimiento de pulpa de celulosa (pulpeo alcalino)

En la figura 46 podemos observar las condiciones óptimas para obtener los porcentajes más altos de rendimiento de pulpa de celulosa. Según el análisis realizado se requiere **(A3)** una concentración alta (12%) de NaOH, **(B1)** con un tiempo de proceso de 24 horas, **(C1)** baja concentración (1 % m/v) concentración de Na₂CO₃, **(D3)** alta concentración de Na₂SO₄, en % m/v.

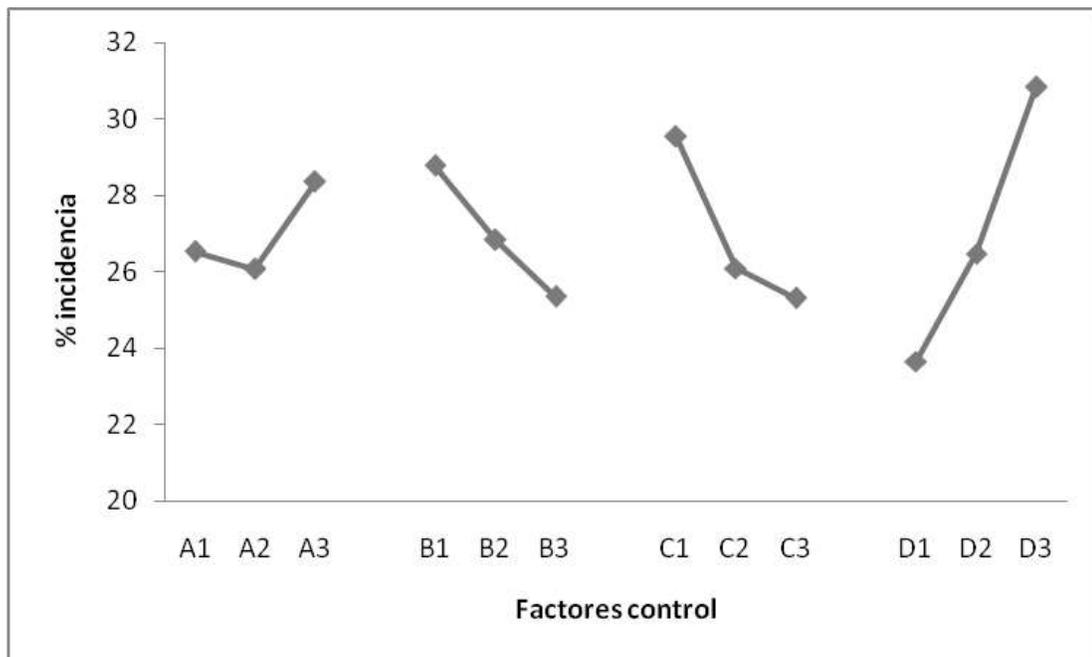


Figura 46. Efecto promedio de la relación señal/ruido sobre el valor medio del rendimiento de pulpa de celulosa de la especie *Agave lechuguilla* con el método de alcalino (NaOH).

Análisis de varianza de la relación señal/ruido sobre el valor medio del rendimiento de pulpa de celulosa (pulpeo Organosolv)

En la tabla 32 podemos observar que se descartó al factor B, debido a que fue el factor que presentó la varianza menor, es decir este factor es el que presenta menos influencia en el sistema. Posteriormente, se recalculó el ANOVA sin la influencia del factor de menor varianza. Se observa que para este análisis, sin considerar al factor de menor incidencia sobre el sistema el

error residual es de 0.86; también podemos observar que el factor D es el que presenta mayor incidencia en el sistema.

Tabla 32. ANOVA *Agave lechuguilla* método ácido (CH₃COOH)

S	DF	S	V	F	S'	RHO
A	2	0.42	0.21	115.36	0.42	24.48
B	2	3.67E-3	1.83E-3			
C	2	0.35	0.18	96.68	0.35	20.56
D	2	0.92	0.46	252.23	0.92	54.00
E	2	3.67E-3	1.83E-3		0.01	0.86

A: H₂O en % m/v; B: Tiempo del proceso en horas; C: CH₃COOH en % m/v; D: HCl, en % m/v y R: Ruido velocidad de agitación del sistema en rpm. GI: Grados de libertad por cada variable; S: Desviación estándar; V: S²; F: F de Fisher calculada; S': Desviación estándar recalculada al despreciar la V más pequeña; RHO: Porcentaje de contribución de cada variable al sistema (F_{tab}= 19 v=2)

Efecto promedio de la relación señal/ruido sobre el valor medio del rendimiento de pulpa de celulosa (pulpeo Organosolv)

En la figura 47 podemos observar las condiciones óptimas para obtener los porcentajes más altos de rendimiento de pulpa de celulosa de la especie *Agave lechuguilla* por el proceso de pulpeo conocido como Organosolv (CH₃COOH). Según el análisis realizado se requiere un factor **A3**, **B1**, **C2** y **(D1)**.

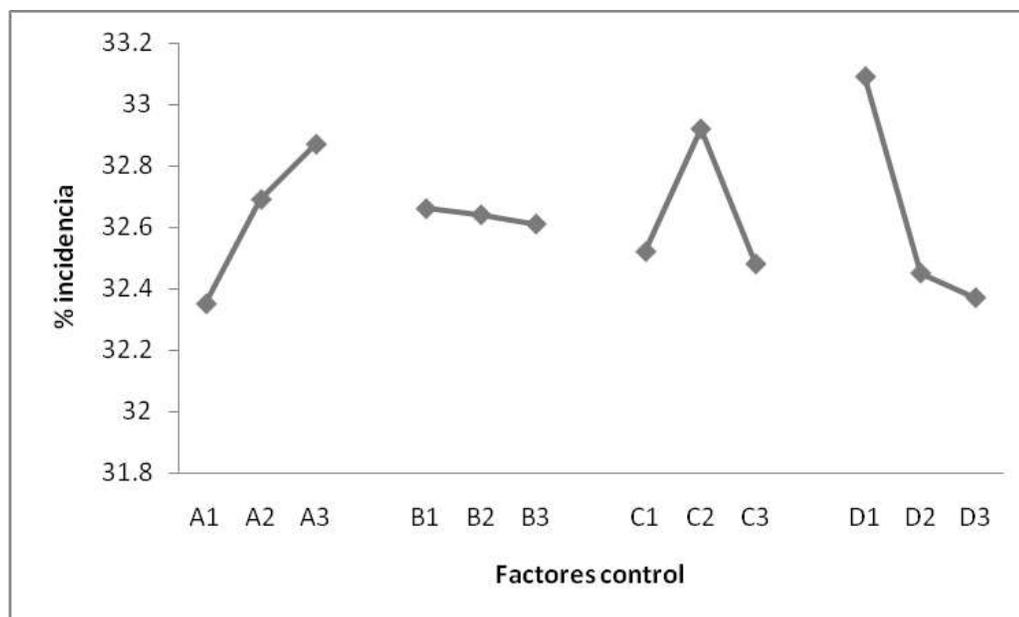


Figura 47. Efecto promedio de la relación señal/ruido sobre el valor medio del rendimiento de pulpa de celulosa de la especie *Agave lechuguilla* con el método de pulpeo Organosolv (CH_3COOH).

Condiciones óptimas en el proceso de pulpeo alcalino (NaOH), para la especie *Agave lechuguilla*

A partir del análisis de los resultados obtenidos, se establece que las condiciones óptimas para obtener altos rendimientos de pulpa en el proceso de pulpeo alcalino (NaOH) se logran mediante la siguiente combinación de factores y niveles:

Factor A: Concentración de 12% m/v de NaOH (**nivel 3**)

Factor B: Tiempo del proceso de pulpeo de 24 horas (**nivel 1**)

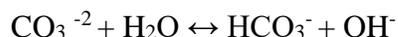
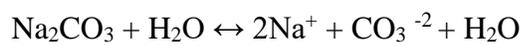
Factor C: Concentración de 1% m/v Na_2CO_3 (**nivel 1**)

Factor D: Concentración de 1% m/v Na_2SO_4 (**nivel 3**)

Efecto de los parámetros de proceso en los rendimientos de pulpa de celulosa del pulpeo alcalino (NaOH) y del pulpeo ácido (Organosolv)

Este proceso es ampliamente usado en la industria del papel, ya que presenta ciertas ventajas sobre otros métodos como que puede ser usado para todas las especies maderables, además las fibras de la pulpa obtenida presentan alta resistencia, asimismo este proceso es eficiente debido a la recuperación de químicos y energía, por otra parte, el tiempo de proceso es relativamente corto (Sefik T, M., 2003).

La actividad de deslignificación en el proceso de pulpeo ocurre por la formación de iones OH^- por hidrólisis de NaOH . En adición también el siguiente equilibrio juega un importante papel en el proceso:



Los rendimientos más altos se obtuvieron con las concentraciones altas de NaOH ; respecto a la concentración de Na_2CO_3 los rendimientos más altos se obtuvieron con concentraciones bajas y el tiempo del proceso de pulpeo fue el menor (24 horas) y la concentración de Na_2SO_4 con nivel alto. Esto se debe directamente al grado de causticidad y sulfidez que está directamente relacionado con el grado de deslignificación. Además, cabe mencionar que el rendimiento depende de otros factores como son la naturaleza del precursor y de la calidad de las fibras (Macleod, M., 2007).

La naturaleza física de las fibras es otro factor importante en el rendimiento de la pulpa, como el tamaño y la homogeneidad de estas, es decir si las fibras son pequeñas y heterogéneas se obtendrá un bajo rendimiento.

Entre la gran gama de disolventes orgánicos propuestos en la literatura el ácido acético ha sido el más utilizado debido a que puede deslignificar de forma extensiva y selectiva. La utilización de ácido acético en el proceso de pulpeo proporciona altos rendimientos de pulpa de celulosa debido a que la materia prima es fraccionada en celulosa y licores conteniendo lignina y productos de la degradación de las hemicelulosas.

Experimentos confirmatorios (NaOH) y ácido (CH₃COOH)

En esta etapa se realizaron los experimentos confirmatorios utilizando las condiciones óptimas para cada proceso (tabla 33).

El porcentaje de celulosa en base seca obtenido mediante el método de pulpeo alcalino para la especie *Agave salmiana* fue el más bajo comparado con las especies *A. lechuguilla* y *A. tequilana*, sin embargo *Agave salmiana* presentó el porcentaje más alto cuando fue procesado mediante el pulpeo ácido (Organosolv), podemos observar también que *Agave tequilana* es la especie que muestra porcentajes semejantes obtenidos mediante los dos métodos; al comparar estos resultados con los resultados obtenidos por Hernao et al., (2009), quienes obtuvieron un rendimiento de residuos de la industria del mueble de 45.9% y por otra parte Canché et al., (2005) y Bautista et Honorato en el 2005), obtuvieron un rendimiento de celulosa del seudotallo del banano entre el 19 y 27%, podemos observar que estos resultados son más bajos en los que se reportan en esta investigación.

Por lo demás, podemos observar que el pulpeo alcalino a la sosa muestra rendimientos más bajos que el pulpeo ácido, también se observa que para cada especie los rendimientos son diferentes, lo que evidencia que se relacionan con las diferencias en composiciones del material lignocelulósico. Así, por ejemplo, a mayores concentraciones de hemicelulosas, son menores los rendimientos alcalinos por cuanto son solubilizadas en este medio bajando rendimiento finales. De igual manera sucede con la degradación de la lignina. También se observa que los contenidos de celulosa son variables según la especie. Actualmente no se conoce un procedimiento general y único para el tratamiento de materiales lignocelulósicos, se afirma que las distintas especies de biomásas requieren diferentes procedimientos (Hahn-Hagerdal et al., 2006; González et al., 2011).

Tabla 33. Rendimientos (%) de pulpa de celulosa de *Agave salmiana*, *Agave tequilana* y *Agave lechuguilla* por dos métodos

Especie	Pulpeo alcalino (NaOH)	Pulpeo ácido Organosolv (CH ₃ COOH)
<i>Agave salmiana</i>	39.6 ± 0.05	71.57% ± 0.06
<i>Agave tequilana</i>	50.60% ± 0.05	50.94% ± 0.06
<i>Agave lechuguilla</i>	49.00 ± 0.01%	70.80 ± 0.08%

6.5 Blanqueo

Las operaciones de blanqueo indican pérdidas de rendimiento entre 28- 39%, estas pérdidas relacionadas con el grado de blancura de la pulpa de celulosa obtenida. Los resultados del blanqueo con las pulpas obtenidas por la vía alcalina, resultaron más blancas que las obtenidas por el método ácido del organosolv. Aparentemente para este segundo tratamiento quedan mayores proporciones de lignina que resultan difíciles de eliminar en el blanqueo.

Los resultados de las pulpas que se obtuvieron por el proceso alcalino a la sosa y su posterior blanqueo, se aprecian en la figura 48 a y b.

La caracterización por medio de los análisis térmicos realizados para cada especie en sus precursores y sus comparaciones con las pulpas obtenidas y blanqueada se muestra en las figuras siguientes. Para la especie *A. salmiana* pulpeada a la sosa, se muestra en la figura 49 el termograma del precursor (línea negra) y la pulpa obtenida y blanqueada (línea roja).

Se hacen notar en el precursor (línea negra) la presencia de hemicelulosas (xiloglucano, de más bajo peso molecular y galactomanano, de mayor peso molecular), luego se observa la mayor transición en la degradación de la α -celulosa (la β -celulosa es soluble en medio alcalino). En el intervalo de 200-325°C se produce la degradación de las hemicelulosas (xiloglucanos y galactomananos) (Souza et al., 2010; Acelas et al., 2010; Muñoz et al., 2014). Las hemicelulosas o poliosas son heteropolisacáridos de gran abundancia en el reino vegetal. En la madera pueden ser consideradas como la fracción soluble en álcali y estable. La α -celulosa es la fracción de mayor peso molecular que no ha sido fraccionada durante los procesos de pulpeo y blanqueo, que

es resistente a una solución de NaOH a determinadas condiciones normalizadas (Canché et al., 2005). Finalmente se observa la degradación de la lignina.

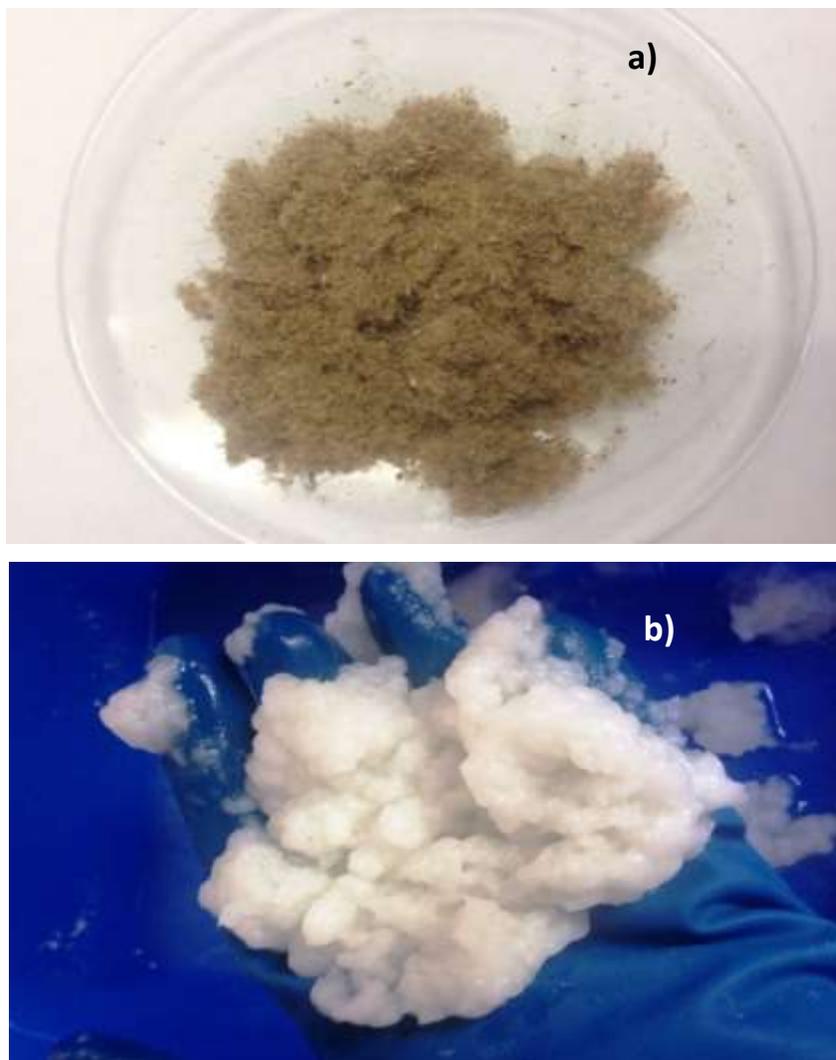


Figura 48. Pulpa de celulosa obtenida mediante a) pulpeo alcalino (NaOH) y b) blanqueada con clorito de sodio NaClO₂)

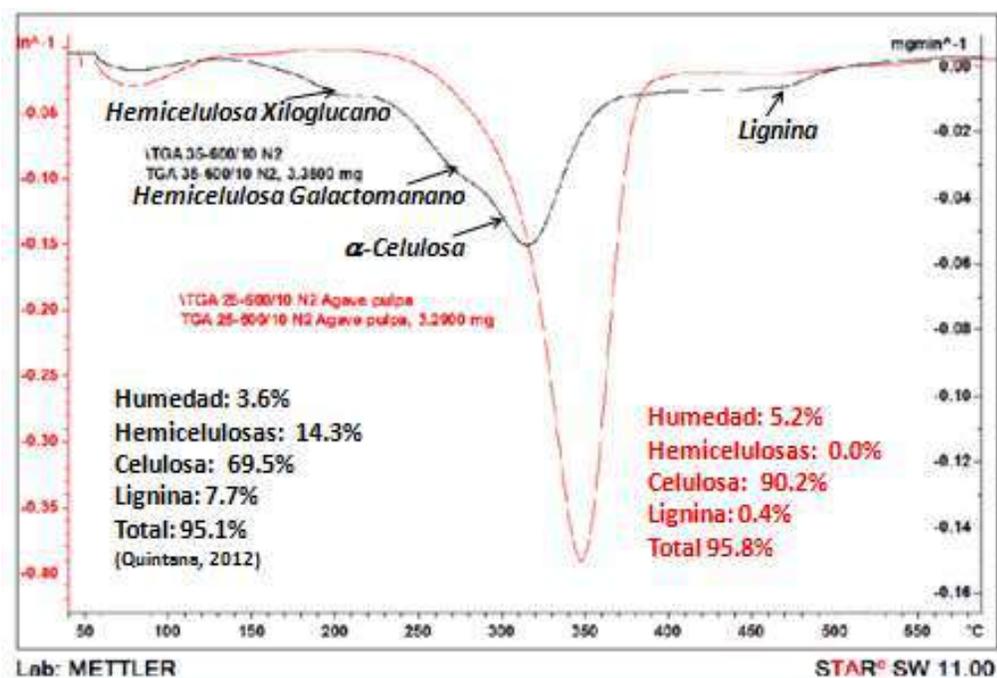


Figura 49. *A. salmiana*. Precursor (línea negra) y pulpa de celulosa a la sosa y blanqueada (línea roja)

De acuerdo a la integración de las curvas y en función del peso inicial utilizado se obtuvo de forma cuantitativa que para el *A. salmiana*, se tuvo un 3.6% de humedad inicial, 14.3% de hemicelulosas, 69.5% de celulosa y 7.7% de lignina. Estos resultados son similares a los reportados por otros autores (González et al., 2011; Quintana, 2012) para leguminosas y agaváceas.

Para esta pulpa blanqueada se nota (línea roja) un 5.6% de humedad remanente, no son detectadas las hemicelulosas, se observa una gran transición alrededor de los 350°C correspondiente a la celulosa (90.2%) y finalmente una pequeña cantidad de lignina (0.4%). Esto se corresponde con lo reportado (González et al., 2011) cuando se afirma que con este tipo de tratamiento, que es efectivo, aún no se logra remover totalmente la lignina, lo que para los efectos pudiera afectar la blancura del material.

Para la especie *A. tequilana* pulpeada a la sosa, se muestra de igual manera, en la figura 50 el termograma del precursor (línea negra) y la pulpa obtenida y blanqueada (línea roja). En ambos productos aparece igualmente la humedad remanente, entre 3-5%, similar a la anterior especie.

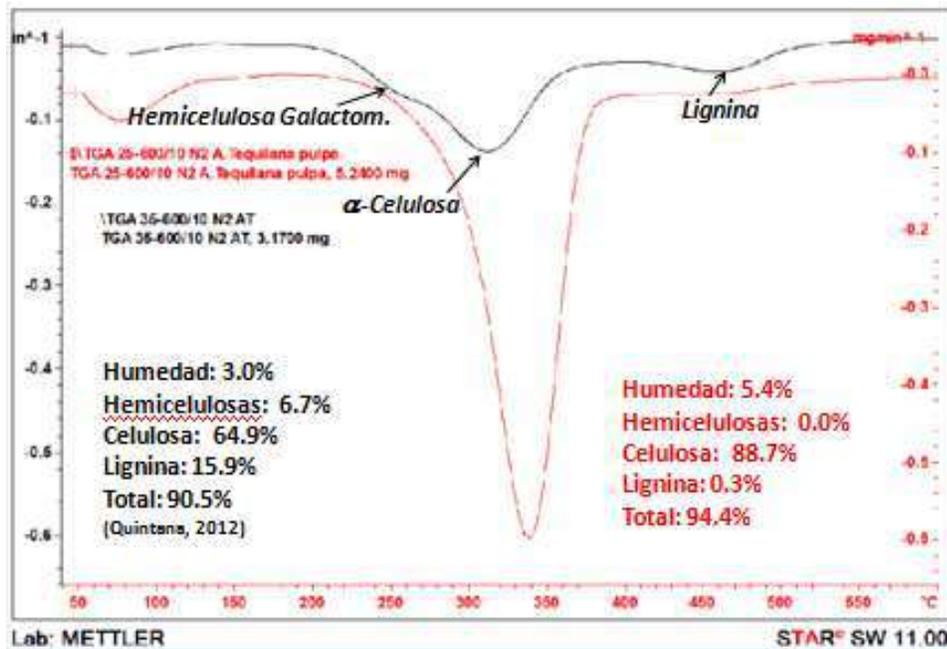


Figura 50. *A. tequilana*. Precursor (línea negra) y pulpa de celulosa a la sosa y blanqueada (línea roja)

Para esta especie, en el precursor se observó la mitad menos de hemicelulosas que en la anterior, los xiloglucanos no fueron detectados y solo en galactomananos se observó un 6.7%, esto hace esperar menores gastos en NaOH para el pulpeo, pero sin embargo se pudo apreciar que por los contenidos de celulosa que resultaron similares (64.9%) a la especie *Agave salmiana* no se evidencia, tal vez debido a la presencia de una doble cantidad de lignina (15.9%), comparada con la especie *Agave salmiana*. Para la pulpa blanqueada se notó (línea roja) humedad remanente, no son detectadas las hemicelulosas, se observa la transición alrededor de los 350°C correspondiente a la celulosa (88.7%) en proporciones similares a la anterior especie y finalmente una pequeña cantidad de lignina (0.3%).

De manera análoga vemos en la figura 51 los termogramas para la especie *A. lechuguilla*. Se puede señalar que los resultados son parecidos a los anteriores, pero se aprecian aquí mayores

contenidos en lignina (16.4%). Esto se corrobora al observar la pulpa blanqueada donde se observa un remanente de lignina mayor (0.7%) que en las otras especies.

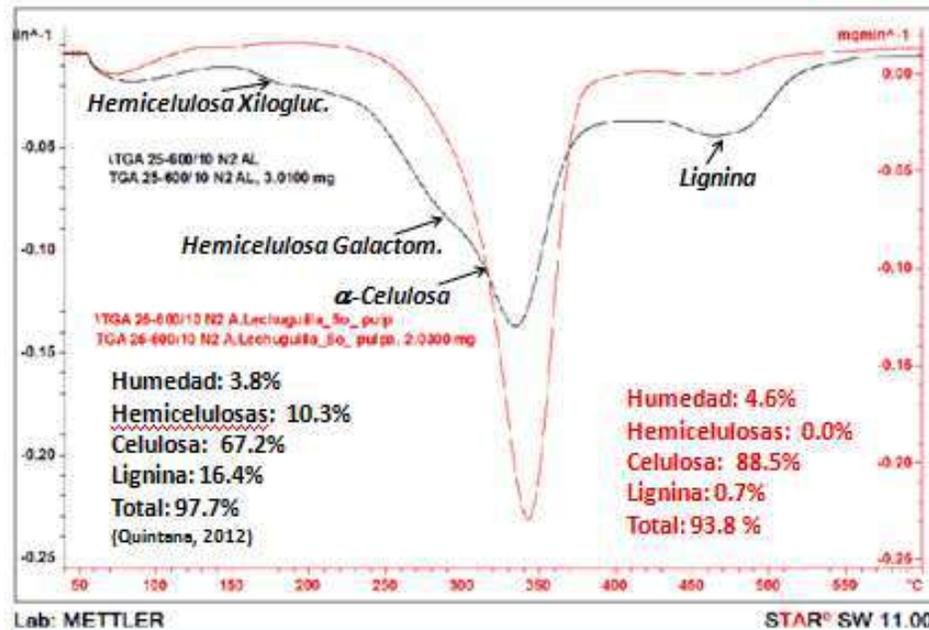


Figura 51. *A. lechuguilla*. Precursor (línea negra) y pulpa de celulosa a la sosa y blanqueada (línea roja)

Al comparar las pulpas ya blanqueadas entre ellas y a su vez, con una muestra de celulosa pura, se observa en la figura 52, la similitud entre estos termogramas, pero a su vez las pequeñas diferencias. Las transiciones de la degradación de la celulosa ocurren en todos los casos entre 345-355°C. Las diferencias en intensidades son debidas a las diferencias en pesos iniciales de muestra y las pequeñas inflecciones correspondientes a la presencia de lignina se hacen despreciables. Se aprecia que se logró eliminar entre 95-98% de la lignina presente en el precursor.

La figura 53 a y b muestra las pulpas obtenidas vía proceso organosolv y blanqueadas, respectivamente. Se puede apreciar el color más amarillento en ambos casos (44 a y b), comparadas con las obtenidas por vía alcalina (figura 48). Resulta evidente la mayor presencia de lignina que ha sido oxidada por exposición a la luz y es la responsable de esa tonalidad amarillenta en las pulpas.

Para los pulpeos por el método organosolv y por cada especie en estudio, los resultados de los análisis térmicos se muestran a continuación. La figura 54 muestra para la especie *A. salmiana* los valores de material lignocelulósico iniciales y después de pulpeado y blanqueado. Se puede apreciar como las hemicelulosas no se detectan posterior al pulpeo y blanqueo, sin embargo, la lignina residual es apreciable; es decir solo se logra eliminar el 32% de la misma.

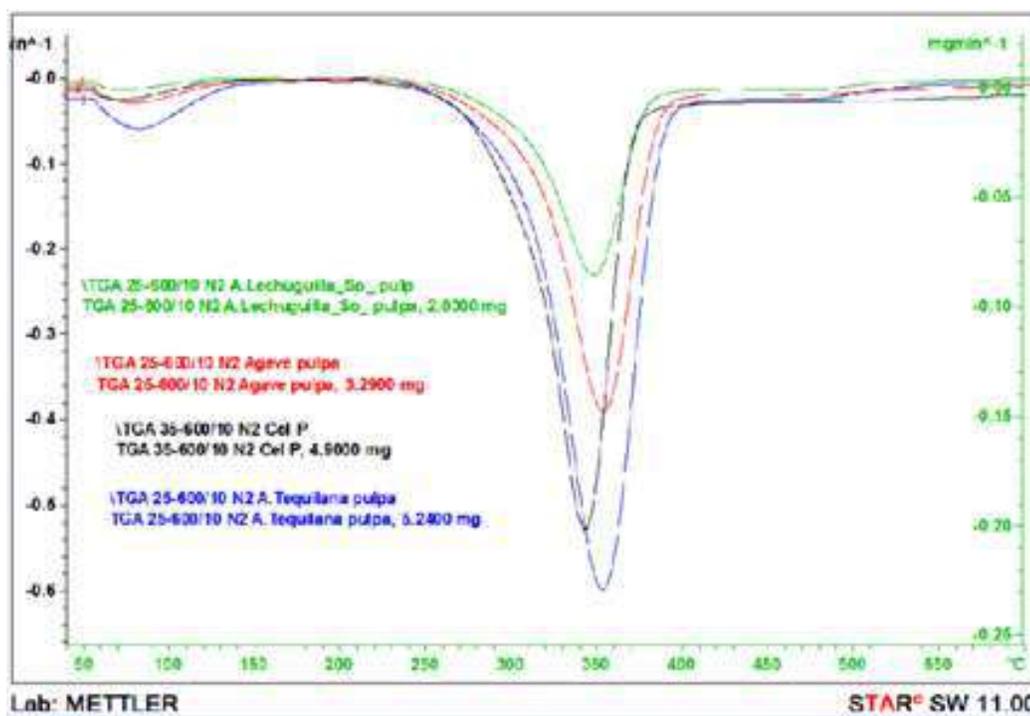


Figura 52. Comparación de las pulpas de celulosa obtenidas por pulpeo a la sosa y blanqueada para las tres especies en estudio y su comparación con la pulpa de celulosa pura.

Esto se corresponde con lo reportado por algunos autores que aseguran que en medio ácido no es posible la liberación de la lignina de forma completa (Quintana, 2012; Romero et al., 2014). Se observa esto mismo para las especies *A. tequilana* y *A. lechuguilla* en las figuras 55 y 56. Para el *A. tequilana* solo se logra reducir el 62% de la lignina presente en el precursor en tanto que para el *A. lechuguilla* se eliminó sólo el 24%. Estas diferencias en la reducción de la lignina en los pulpeos en medio ácido con respecto a los pulpeos alcalinos es debida a que en el medio alcalino se emplean, además de NaOH, Na₂SO₄ y en ocasiones Na₂CO₃, los cuales favorecen en gran medida la disolución de la lignina en el medio; en tanto las hidrólisis ácidas no favorecen la eliminación de la lignina que se hace resistente a este medio (Chávez y Domine, 2013).

Cuando se comparan las pulpas obtenidas de cada especie por el método organosolv y blanqueadas (figura 57), se observan las transiciones térmicas de ciertas cantidades de hemicelulosas y sobretodo de lignina, en comparación con la pulpa de celulosa pura. Solamente se logró eliminar entre 24-62% de la lignina presente en los precursores.

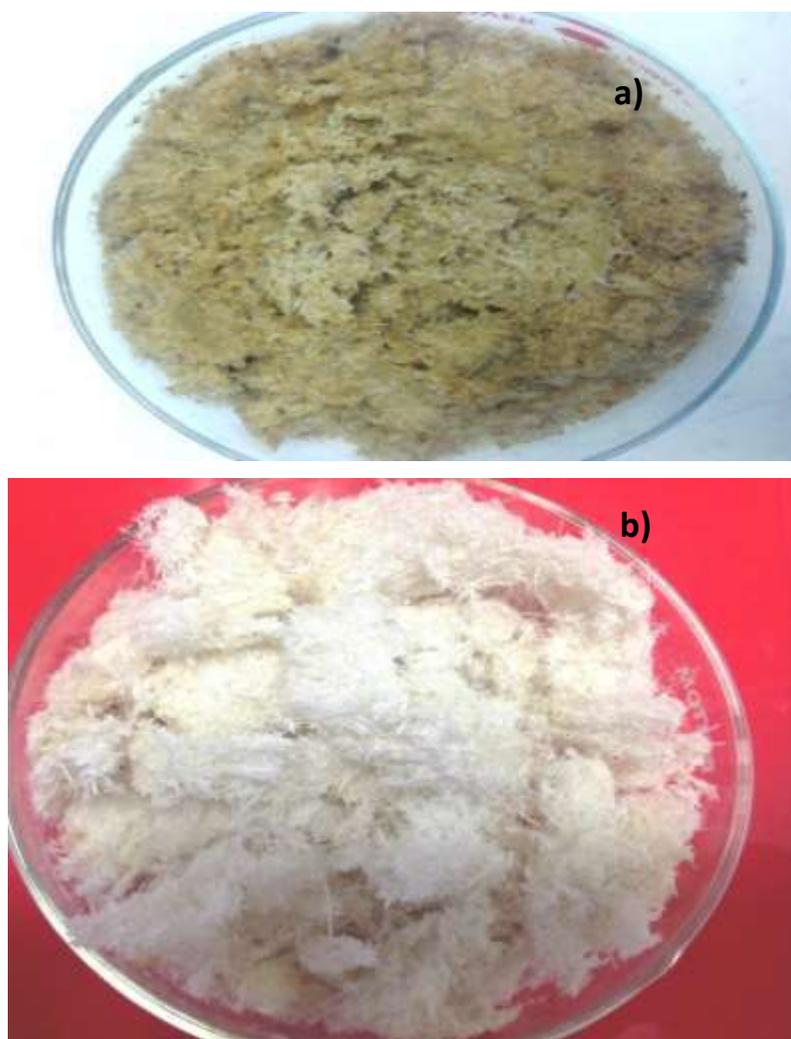


Figura 53. Pulpa de celulosa obtenida mediante a) pulpeo ácido (CH_3COOH) y b) blanqueada con clorito de sodio (NaClO_2)

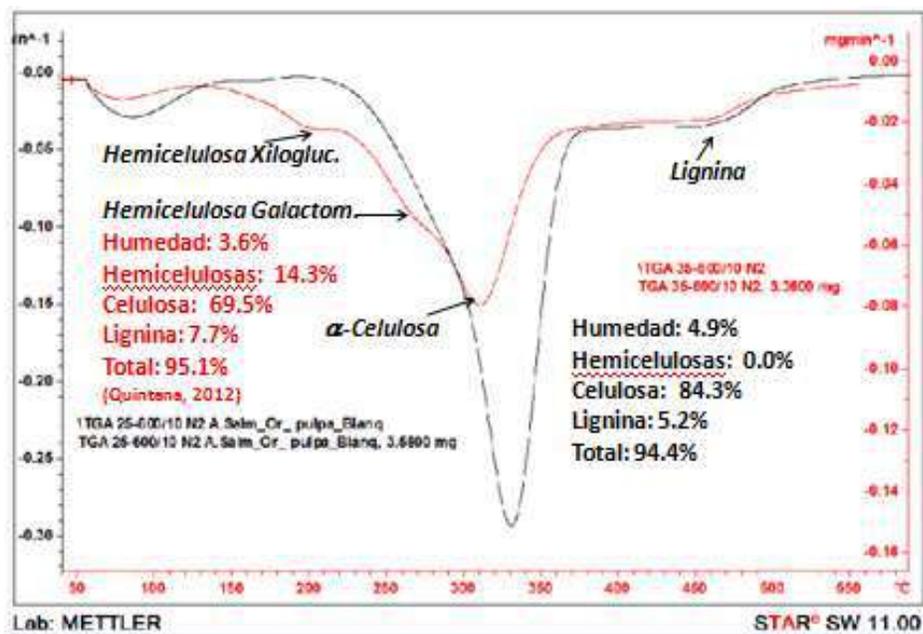


Figura 54. *A. salmiana*. Precursor (línea roja) y pulpa de celulosa al organosolv y blanqueada (línea negra)

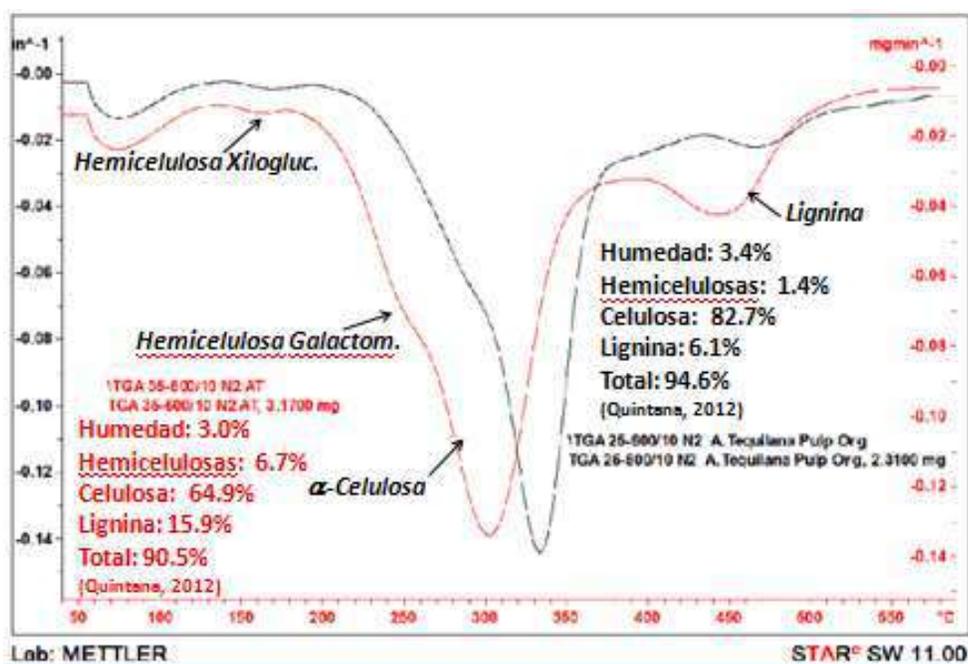


Figura 55. *A. tequilana*. Precursor (línea roja) y pulpa de celulosa al organosolv y blanqueada (línea negra)

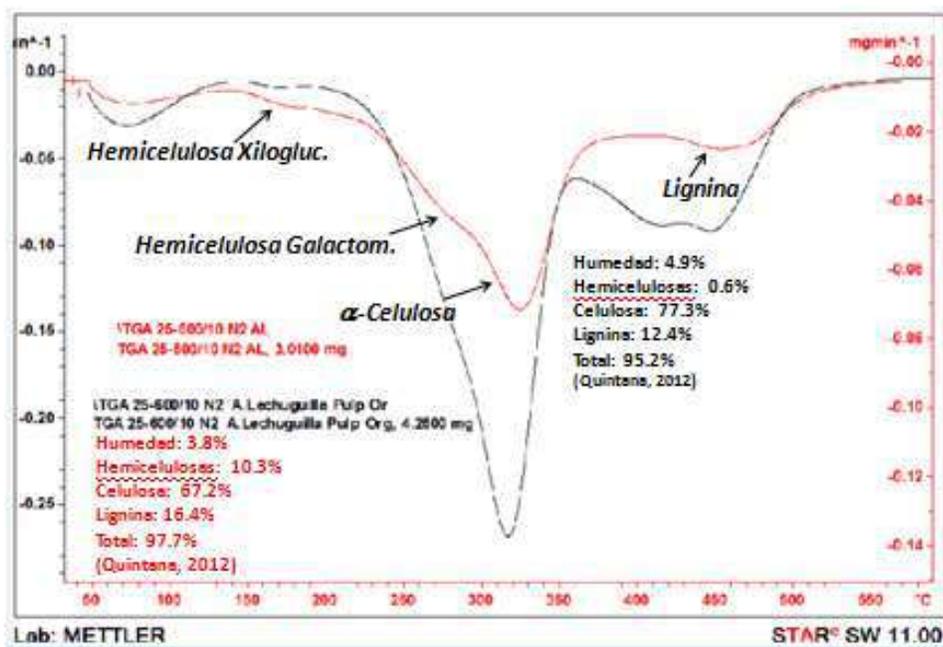


Figura 56. *A. lechuguilla*. Precursor (línea roja) y pulpa de celulosa al organosolv y blanqueada (línea negra)

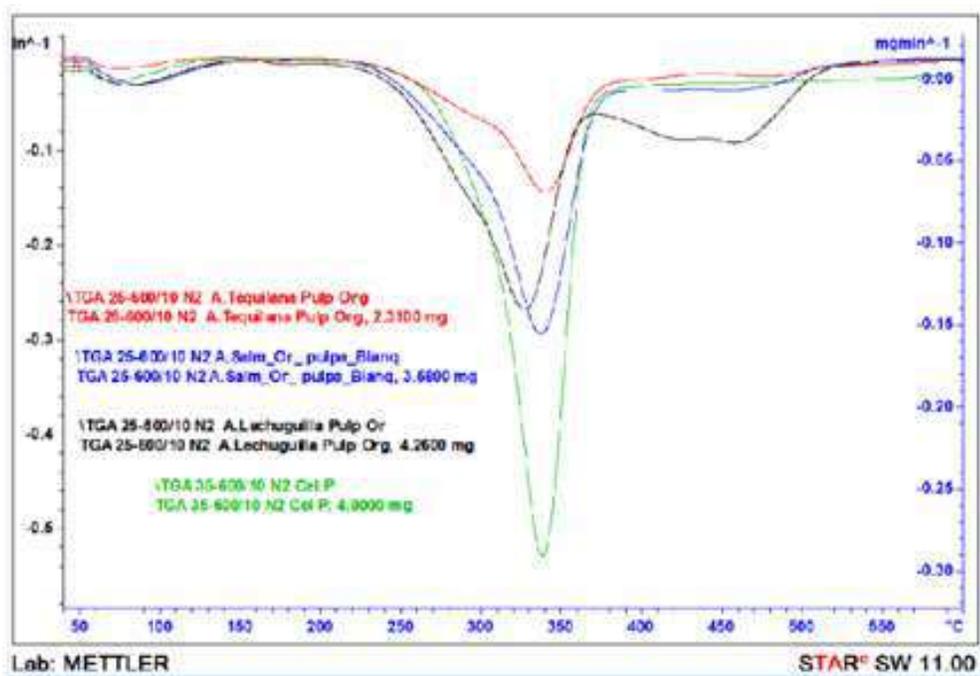


Figura 57. Comparación de las pulpas de celulosa obtenidas por pulpeo al método organosolv y blanqueada para las tres especies en estudio y su comparación con la pulpa de celulosa pura.

Resultados y Discusión

La difracción de rayos X (DRX) ha permitido mostrar las fases presentes en las pulpas de celulosa obtenidas por ambos métodos de pulpeos y blanqueadas. Así en la figura 58 a y b podemos notar la presencia de fases cristalinas. El pico de máxima difracción se encuentra alrededor de las 22° que se corresponden al plano 002 de la fase mayoritaria cristalina de la celulosa. Para la celulosa pura se reporta a 22.4° (Wang et al., 2007; Bolio et al., 2011).

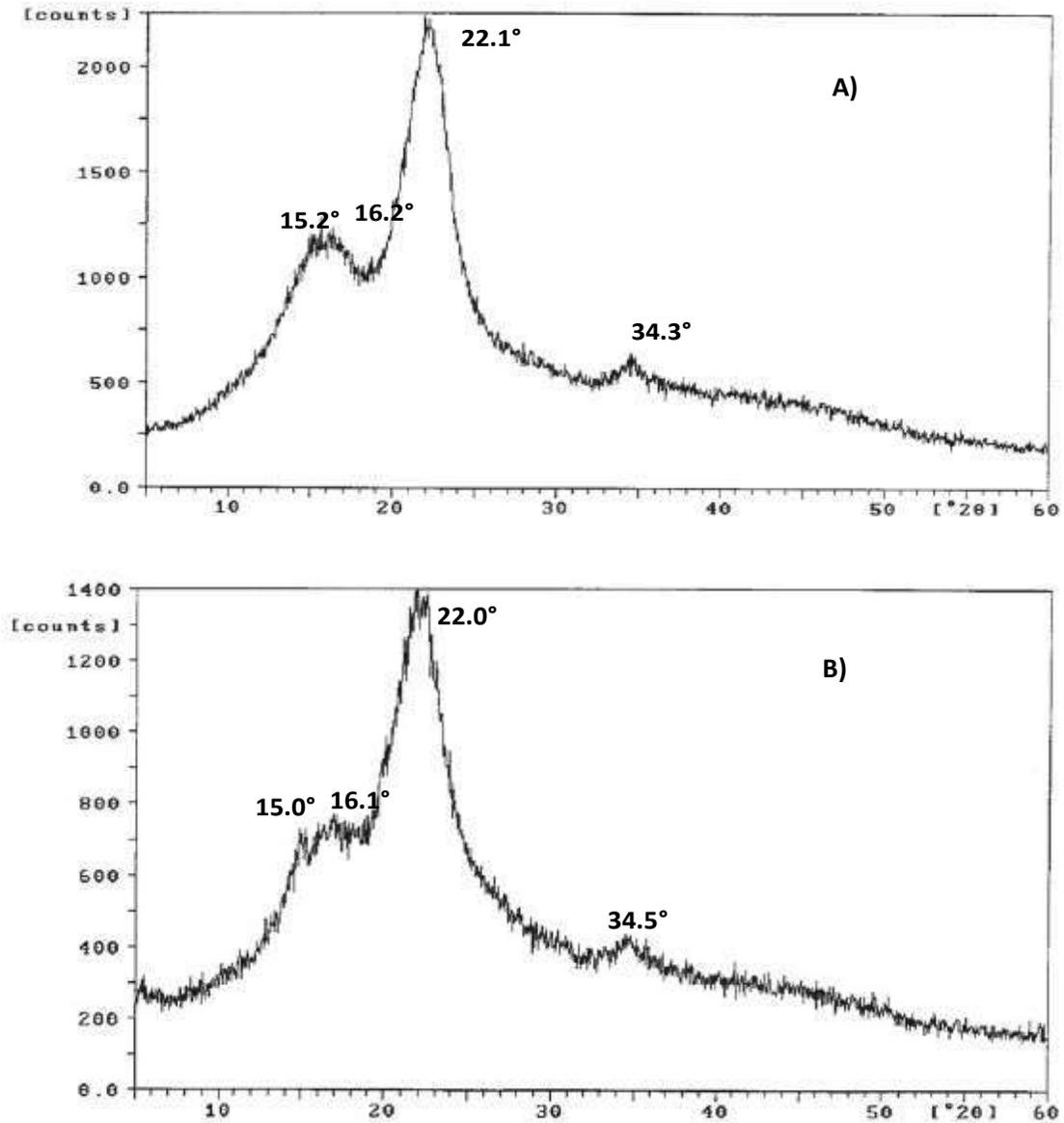


Figura 58. Difractogramas de las pulpas de celulosas obtenidas por los dos métodos de pulpeo y blanqueadas.

A) Pulpa a la sosa blanqueada. B) Pulpa al organosolv blanqueada.

Así mismo se observan picos de difracción entre 15-16° (plano 101) y en 34° (plano 040) (León et al., 2013), que de igual manera se corresponden con los 4 picos característicos correspondientes a la estructura de la celulosa I (Bolio et al., 2011). No se hacen notar diferencias entre ambos difractogramas.

Siguiendo la Ec.1, se determinó el porcentaje de cristalinidad obtenidos por ambos pulpeos y blanqueos. Así para la pulpa obtenida por el método alcalino del NaOH se obtuvo 49.88%; este valor se corresponde perfectamente con el que reportan De Dios et al. (2016) de 50.07% y a su vez un poco más baja que la que se reporta para celulosa de bagazo de caña de azúcar (López et al., 2016) de 55%. Para la celulosa obtenida por método de pulpeo ácido el porcentaje de cristalinidad resulta más bajo de 48.43%, tal vez debido a la presencia de pequeñas cantidades de hemicelulosas y de lignina que resultan amorfas.

6.6. Elaboración de hojas de papel artesanal

Se formaron seis hojas de papel artesanal: tres hojas por el método alcalino (NaOH) de las tres especies (*Agave tequilana*, *Agave salmiana* y *Agave lechuguilla*), y tres hojas por el método ácido de las tres especies también (figura 59).

Podemos observar que las hojas procesadas por el método alcalino son hojas más blancas debido a la menor cantidad de lignina que contienen, ya que las hojas procesadas por el método ácido son más amarillentas debido al mayor contenido de lignina retenido. Asimismo se observa que las hojas procesadas por el método ácido presentan más irregularidades, esto se corresponde con los resultados que obtuvieron Alfonso et al., (2016), en hojas de papel artesanal elaboradas a partir de residuos orgánicos, además esto es debido a que no se realizó una separación completa de la lignina (Mazzeo et al., 2010) que las procesadas por el método alcalino, además podemos notar que las hojas procesadas por el método alcalino presentan menos porosidad que las otras.

Papel de celulosa obtenido por pulpeo alcalino y blanqueado	Papel de celulosa obtenido por pulpeo ácido y blanqueado
	
	
	

Figura 59. Hojas de papel artesanal

De igual manera las hojas procesadas de forma ácida presentan paquetes de fibras más gruesos, lo cual repercute directamente en el gramaje y el calibre de las hojas.

6.7. Características físicas del papel

6.7.1. Contenido de humedad

El contenido de humedad es la cantidad de agua que contiene un papel, expresada como porcentaje de su peso (figura 60). El papel puede contener humedad entre las fibras o dentro de ellas; el contenido de humedad tiene un efecto importante en la calidad del papel (Becerra y Ramírez, 2003).

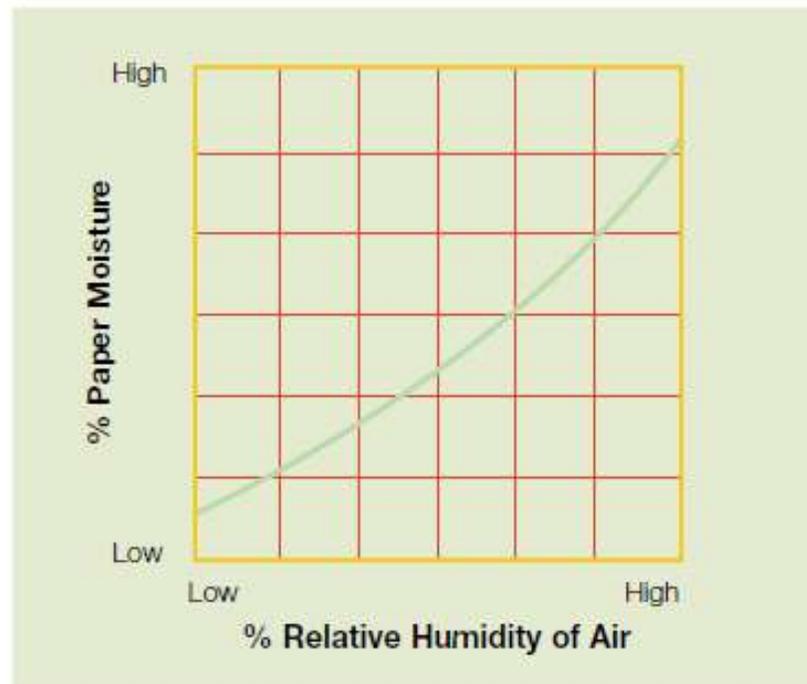


Figura 60. Típica relación entre el contenido de humedad de papel base celulosa con la humedad relativa del ambiente

La relación que existe entre el agua y el papel es una relación estrecha, debido a que las fibras que conforman el papel son higroscópicas. Debido al efecto de histéresis el papel gana o pierde humedad hasta encontrar un equilibrio con el medio que lo rodea (figura 60) (Biermann, 1996; Becerra y Ramírez, 2003).

El papel absorbe diferentes cantidades de agua debido a sus características específicas como tipo de fibras que lo constituyen, procesos de fabricación y los encolantes que sean utilizados. Debe especificarse que el papel puede absorber agua de forma física por efecto de capilaridad en este caso llegaría hasta 25% del peso del papel, mientras que cuando el agua se aloja en los poros grandes que existen entre las fibras, saturando todos los espacios disponibles podría constituir hasta un 300% del peso total del papel, como en el caso de papeles muy absorbentes, por lo tanto es importante aplicar encolantes para regular el contenido de humedad; la cantidad de los encolantes depende del destino final del papel (el uso para el cual se destina el papel). Cabe destacar que el papel debe tener un porcentaje de humedad, para proporcionarle flexibilidad, debido a que si el contenido de humedad es bajo el papel se vuelve quebradizo e inestable. El contenido de humedad de un papel afecta sus propiedades, principalmente el peso base y las resistencias. Por lo tanto, se debe mantener un control adecuado para muchos de los procesos de transformación del papel, por ejemplo en la impresión, recubrimiento e impregnación. Por otra parte debe considerarse que cuando el papel absorbe agua, las fibras de celulosa se hinchan (a lo ancho 15 o 20 veces más que a lo largo), provocando cambios en dimensiones es decir el papel se expande o se contrae, que son mayores en el sentido transversal que en el sentido de fabricación del papel, y que resulta en diversos problemas sobre la impresión, específicamente en la falta de registro, ondulaciones o arrugas (Biermann, 1996; Becerra y Ramírez, 2003).

En la figura 61 podemos observar los porcentajes de humedad que absorbieron las seis hojas de papel de las tres especies procesadas por los dos métodos de pulpeo. Los resultados presentados muestran que el papel elaborado con pulpa de celulosa de *Agave salmiana* y procesado por el método Organosolv absorbe 7.99% de humedad y posteriormente sigue el papel de *Agave tequilana* (6.09%) y *Agave lechuguilla* con 4.52%, mientras que los papeles que fueron obtenidos del método de pulpeo alcalino resultaron absorber un menor porcentaje de humedad, esto debido a al efecto de histéresis, ya que el papel gana o pierde humedad hasta encontrar un equilibrio con el medio que lo rodea. Por ende, podemos precisar que el contenido de humedad de una hoja de papel, presenta una relación directa con la humedad relativa de la atmósfera que lo rodea y del mismo modo que cuando se encuentra en contacto con el agua, la absorbe Biermann, 1996; (Becerra y Ramírez, 2003 y). Las seis hojas de papel absorbieron mayor porcentaje de humedad

que una hoja de papel bond (3.66%) o una hoja de papel tissue (4.81%), estos resultados también pueden estar relacionados con el tipo y cantidad de encolantes utilizados; en el caso de las hojas de papel artesanal elaboradas en este proyecto no se utilizó ningún tipo de encolante con la finalidad de minimizar los efectos negativos al medio ambiente.

En cuanto a los porcentajes de humedad acumulada podemos observar que la hoja elaborada a partir de pulpa de celulosa de *Agave lechuguilla* y procesada por el método de pulpeo alcalino fue la que acumuló el mayor porcentaje (40.26) de humedad (figura 62) en una atmósfera saturada (100% humedad y 25°C), y el papel de *Agave salmiana* obtuvo un menor porcentaje (24.8). Estos resultados siguen la misma tendencia que los reportados por Pejic et al., (2008), ya que ellos mencionan que cuando se eliminan más contenidos de lignina y hemicelulosas la humedad disminuye. Por otra parte al observar los porcentajes de humedad acumulada por las hojas procesadas por el método ácido (figura 63) son más altos respecto a los del método alcalino, sin embargo la hoja de papel de la especie *Agave tequilana* fue la que absorbió un mayor porcentaje de humedad (51.44%), seguida de la especie *Agave lechuguilla* (44.04) y *Agave salmiana* (31.615) fue la absorbió un porcentaje menor, estos resultados pueden ser debido a que el papel de *Agave tequilana* tiene porcentajes más altos de hemicelulosas y debido a los grupos de ácido carboxílico la absorción de humedad es más rápida que la que ocurre en los grupos hidroxilo (Ping et al., 2001).

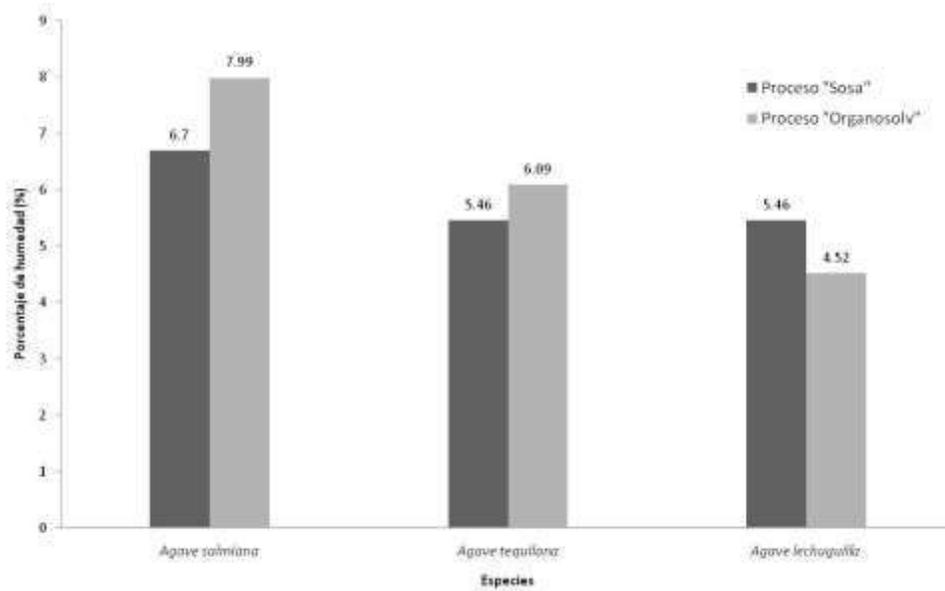


Figura 61. Porcentaje de humedad absorbida (25°C y 24% humedad ambiente).

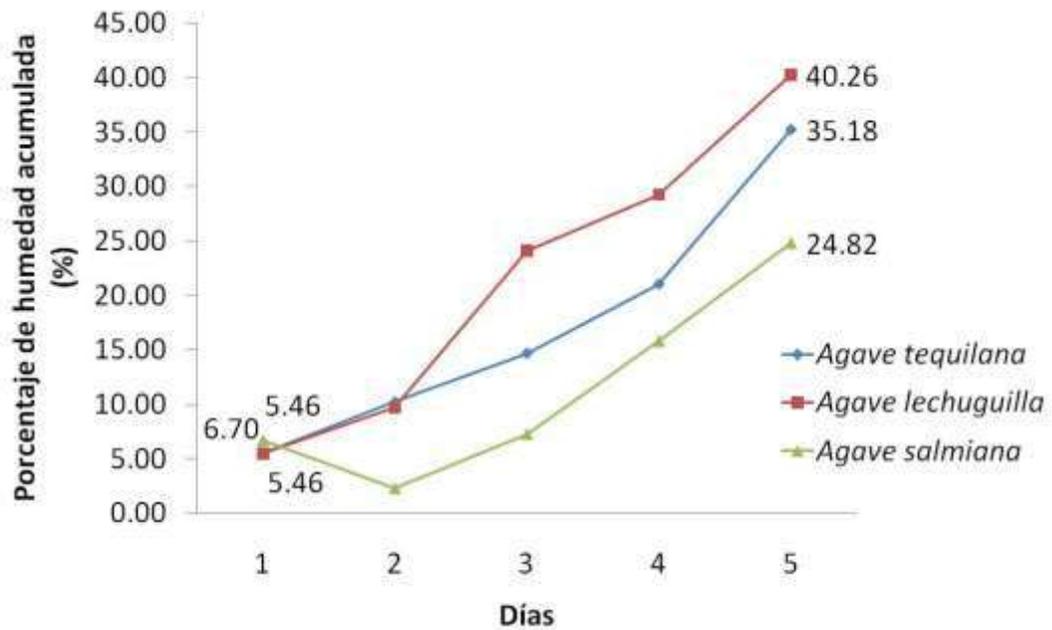


Figura 62. Porcentajes de humedad acumulada en hojas de papel elaboradas a partir de pulpa de celulosa obtenida del proceso de pulpeo alcalino.

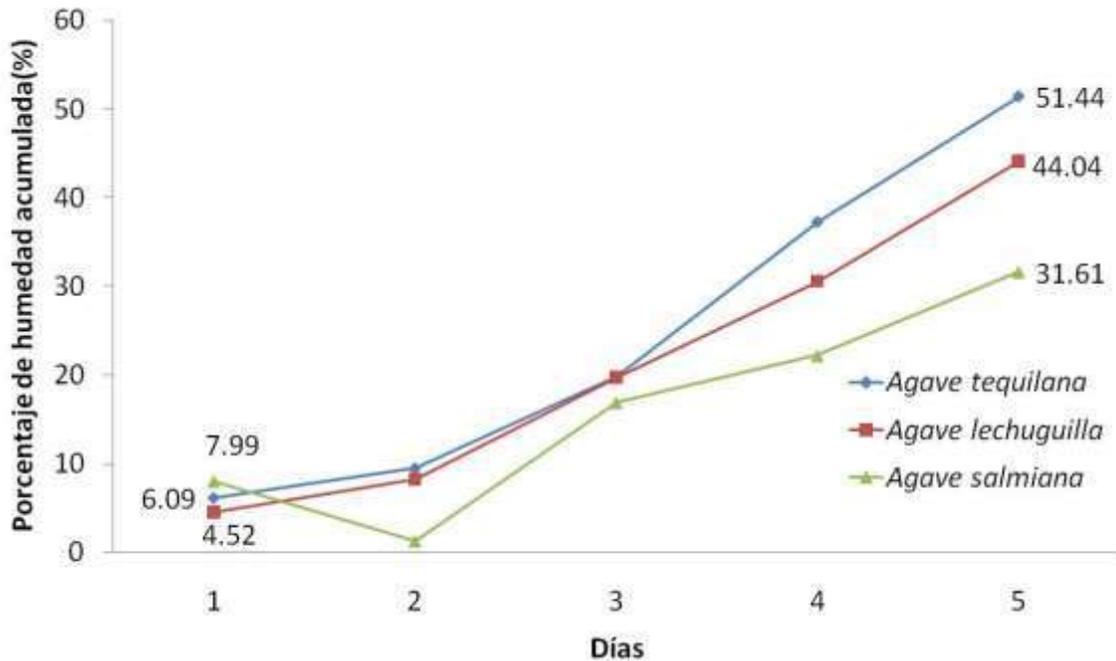


Figura 63. Porcentajes de humedad acumulada en hojas de papel elaboradas a partir de pulpa de celulosa obtenida del proceso de pulpeo ácido

Es reconocido que el agua facilita la unión entre las fibras de pulpa de celulosa para formar el papel, por lo que la humedad tiene una fuerte influencia sobre las propiedades mecánicas del papel. Como se ha mencionado con antelación las hojas de papel pueden absorber o perder humedad en función de los cambios en la humedad relativa del ambiente. Las hojas de papel pueden extenderse o contraerse en función de la humedad relativa ambiental (higroexpansión). Es importante destacar que no se conoce una relación directa entre la higroexpansión y la humedad relativa ambiente. Se han realizado algunos experimentos para determinar la relación general que existe entre la higroexpansión y la humedad relativa ambiente y en el caso de el nylon se encontró una relación casi lineal, sin embargo, no se han realizado experimentos similares para determinar esta relación en hojas de papel debido a la extrema dificultad en la medición del espesor. Por otra parte, el agua que puede absorber el papel crea puentes de hidrógeno entre las fibras lo cual que conducirá a una reducción entre la interacción de las fibras, lo cual se traduce en un papel menos resistente (Dhakal, et al., 2007).

6.7.2. Resistencia a la tensión

En la tabla 34 se puede observar que los papeles elaborados con pulpa de celulosa procesada por el método ácido (Organosolv), presentan mayor gramaje y mayor calibre, son más gruesos, pero menos resistentes, debido a la poca unión entre las fibras de celulosa, ya que a pesar de haber sido sometidas a un proceso de blanqueo para eliminar mayoritariamente los contenidos de lignina y hemicelulosas, aún los puentes de hidrógeno disponibles para la unión interfibras son pocos. Asimismo, los paquetes de fibras gruesos dificultan la flexibilidad del papel, ya que cuando el papel está seco es más rígido y se desprende con facilidad de la matriz de papel.

Tabla 34. Comparativo de características físicas de hojas de papel

PROCESO NaOH				
Tipo de papel	Gramaje (g/m ²)	Calibre (mm)	Humedad (%)	RT (N/mm)
Alechuguilla	156.67	0.54	5.46	3.37
Atequilana	121.47	0.46	5.46	9.39
Asalmiana	79.67	0.20	6.7	0.78
PROCESO ORGANOSOLV				
Tipo de papel	Gramaje (g/m ²)	Calibre (mm)	Humedad (%)	RT (N/mm)
Alechuguilla	226.20	0.80	4.52	1.64
Atequilana	202.47	0.63	6.09	0.14
Asalmiana	105.20	0.34	7.99	0.19
Bond	75.00	0.08	3.66	27.87
Tissue	19.00	0.10	4.81	3.37

Se observa que los papeles más resistentes son los procesados por el método alcalino, cuyas fibras son más homogéneas y más largas, además las fibras para la elaboración de estos papeles fueron más finas lo que permitió obtener una mayor cantidad de puentes de hidrógeno interfibra. Además, los gramajes y calibres de estos papeles fueron más bajos.

En otras investigaciones se ha reportado que el incremento de humedad absorbida por las fibras de celulosa disminuye la resistencia a la tensión de las mismas (Voorn et al., 2001; Placet et al., 2012; Van) lo que se confirma con los resultados obtenidos en esta investigación.

Se encontró que los papeles más resistentes son los procesados por el método alcalino, cuyas fibras son más homogéneas y más largas; además tienen el porcentaje más alto de cristalinidad lo cual está relacionado directamente con la absorción de humedad, como lo reportan, Nakamura et al., (1981), es decir cuando la cristalinidad aumenta el porcentaje de absorción de humedad disminuye.

7. CONCLUSIONES

En el pulpeo ácido se obtuvieron los rendimientos de pulpa de celulosa altos, sin embargo; no se logra la mejor reducción de la lignina y de las hemicelulosas presentes en los precursores, incluso después del blanqueo. Sólo se elimina entre 24-62%.

En el proceso de pulpeo alcalino (NaOH) se obtuvieron rendimientos bajos de pulpa de celulosa, empero posterior al blanqueo se eliminó 95-98% de la lignina y la totalidad de las hemicelulosas de los precursores.

De acuerdo con lo que cita la literatura consultada y basados en los resultados obtenidos en esta investigación, se confirma que se deben realizar experimentos específicos para obtener las condiciones óptimas para cada especie. Además, la demanda de químicos utilizada en los métodos se reduce ya que los precursores tienen bajos contenidos de lignina.

Los patrones de DRX mostraron el grado de cristalinidad de ambas pulpas resultando de mayor porcentaje de cristalinidad la obtenida mediante pulpeo a la sosa con 49.88% y con 48.43% la obtenida por pulpeo al organosolv, aparentemente porque estas últimas mostraron restos de hemicelulosas y lignina.

El porcentaje de absorción de humedad está relacionado con el porcentaje de cristalinidad, y con el contenido de hemicelulosas, dado que cuando el porcentaje de cristalinidad es menor, el contenido de hemicelulosas es mayor y el porcentaje de absorción de humedad se incrementa.

Los papeles obtenidos por el método alcalino son los que presentan menor porcentaje de humedad, y por otra parte presentan mayor resistencia a la tensión.

Conclusiones

Los papeles elaborados mediante el método Organosolv son los de mayor gramaje y calibre y mayor contenido de humedad y menor resistencia a la tensión.

8. REFERENCIAS

- Acelas, N; Ruiz, W; López, D. 2010. Determinación de los parámetros cinéticos en la pirólisis del pino ciprés. *Quim. Nova.* 33(7): 1500-1505.
- Aguilar, R.N. 2011. Efecto del almacenamiento de bagazo de caña en las propiedades físicas de celulosa grado papel. *Ingeniería Investigación y Tecnología* 12(1):189-197.
- Alcántar, G. G; Sandoval, V. M. 1999. Manual de Análisis Químico de Tejido Vegetal. Guía de Muestreo, Preparación Análisis e Interpretación. Publicación especial N° 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Colegio de Postgraduados. México. 156 pp.
- Alfaro-Rojas, Guillermo; Legaria-Solano, Juan-Porfirio; Rodríguez-Pérez, Juan Enrique; 2007. Diversidad genética en poblaciones de agaves pulqueros (*Agave spp.*) del nororiente del Estado de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 30: 1-12.
- Alfonso-Moreno, F; Robayo-Quintana, M; Ferrucho-Rodriguez, L; Vargas-Oyola, M. 2016. Harvesting of petal waste from roses, sunflower stalks and bananashoots for manufacture handmade of paper. N° 20. pp. 71 – 81. ISSN 1909-2520 impreso.
- Andrade, S. B. 1998. Efecto de las condiciones de proceso de obtención de celulosa sobre sus propiedades fisicoquímicas, Tesis de Licenciatura, UADY, México.
- Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 1995) Official methods of analysis. 15.ed. Arlington: 1117p.
- Arceo, E. 2006. Extracción y caracterización física de celulosa a partir de vainas de la leguminosa *Vigna unguiculata* L. Walp. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería Química. Universidad Autónoma de Yucatán. México.
- Arriaga, V. V; Cervantes y A. Vargas-Mena. 1994. Manual de Reforestación con Especies Nativas: Colecta y Preservación de Semillas, Propagación y Manejo de Plantas. SEDESOL/INE/ Facultad de Ciencias UNAM. México, D.F
- American Society for Testing Material (ASTM D-1104. 1984). Method of Test for Holocellulose in wood
- Ávila-Núñez, Ramona; Rivas-Pérez, Bernarda; Hernández-Motzezak, Rómulo; Chirinos, Marluy; 2012. Contenido de azúcares totales, reductores y no reductores en *Agave cocui* Trelease. *Multiciencias* 12: 129-135.
- Ayrilmis, N.; Jarusombuti, S.; Fueangvivat, V.; Bauchongkol, P. 2011. Effect of thermal-treatment of wood fibres on properties of flat-pressed wood plastic composites. *Polymer Degradation and Stability*, 96: 818-822.

Baena, A. 2005. Aprovechamiento del bagazo del maguey verde (*Agave salmiana*) de la agroindustria del mezcal en San Luis Potosí para la producción de hongo Ostra (*Pleurotus ostreatus*). Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales. IPICYT.

Barrado, E; Vega, M; Pardo, R; Grande, P. and Del Valle, J. 1996 Optimisation of a purification method for metal-containing wastewater by use of a Taguchi experimental design. *Water Res* 30, 2309–2314.

Baskin, C. C and J. M. Baskin. 1998. Seeds: ecology, biogeography, and evolution of dormancy and germination. Academic Press, San Diego, California, USA.

Bautista, R. y Honorato, J. 2005. Composición química de la madera de cuatro especies del género *Quercus*. *Ciencia forestal en México*. 25 pp.

Bayer, E. A; Shimon, L. J; Shoham, Y; Lamed, R. 1998. Cellulosomes: Structure and ultrastructure. *J. Struct, Biol.* 124:221-234.

Becerra y Ramirez, 2003

Bermello, A; Díaz, D; Martínez, R; Quintana, G; Mieres, G; Leal J. A. 2008. Estudio de un material compuesto de partículas de bagazo de caña y matriz de polietileno mediante espectrometría FTIR. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, vol. XLII, núm. 1-3, pp. 106-111

Betancourt S., Gañán P., Jiménez A., Cruz L. J. 2009. Degradación térmica de fibras naturales procedentes de la calceta de plátano (estudio cinético). *Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*; S1 (1): 215-219

Biermann, Christopher J. *Handbook of pulping and papermaking*. Academic Press. 1996. E.U. A.

Bledzki A. K. and Faruk O. 2004. Wood fiber reinforced polypropylene composites: Compression and injection molding process. *Polymer-Plastics Technology and Engineering* 43 (3), 871-888.

Bolio G. I.; Valadez A.; Valeva L. y Andreeva A. 2011. Cellulose whiskers from agro-industrial banana wastes: isolation and characterization. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* Vol. 10, No. 2, 291-299

Boudet, A. M; Kajita, S; Grima, J; Goffner, D. 2003. Lignins and lignocellulosics a better control of synthesis for new and improved uses. *Trends Plant Sci.* 8(12):576-581.

Bravo-Mosqueda, E., J. Rojas-León, H. Espinosa-Paz y P. López-López. 2007. Evaluación de atrayentes para la captura de *Scyphophorus interstitialis* Gylh. *Agroproduce* 2 (16): 10-14.

Camejo-Rodrigues J C, L Ascensão, M Ángel-Bonet, V Joan 2003. An ethnobotanical study of medicinal and aromatic plants in the Natural Park of “Serra de São Mamede” (Portugal). *Ethnopharmacology*. 89:199–209.

- Canche, G., De los Santos, J., Andrade, S. y Gómez, R. 2005. Obtención de celulosa a partir de los desechos agrícolas del banano”. Información tecnológica, 16: 83-88
- Canetti, M., Cosentino, C., Bocchio, L., Lastaldi, G., Fosher, B. 1996. Characterization of non-wood plant cellulose by X-ray and solid-state ^{13}C NMR. Fourth European Workshop on Lignocellulosics and Pulp. Stresa, Italy, p.283-291.
- Carrier M., A. Loppinet-Serani, D. Denux, J.M. Lasnier, F. Ham-Pichavant, F. Cansell, C.A. Y Monier. 2011. Thermogravimetric analysis as a new method to determine the lignocellulosic composition of biomass. Biomass and Bioenergy. 35. Págs. 298-307
- Cazaurang M. M., Peraza S. S., Cruz R. C. (1990). Dissolving-Grade Pulp from. Henequen Fiber. Cellulose Chem. and Technol. 24, 629-638.
- Chacón A. 2006. Perspectivas agroindustriales actuales de los Oligofruetosacáridos (FOS). Agronomía Mesoamericana 17(2): 265-286
- Chávez-Sifontes, M. y Domine, M. E. 2013. Lignina, estructura y aplicaciones: Métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial. Av. cien. ing.: 4(4), 15-46
- Cedeño Cruz M, Alvarez-Jacobs J. Production of tequila from agave: historical influences and contemporary processes. In: Jacques, Lyons, Kelsall, editors. The alcohol textbook: a reference for the beverage, fuel and industrial alcohol industries. Nottingham University Press, Alltech Inc.; 1999. ISBN 1-897676735, chapter 15.
- Centeno-Rumbos, R., Pavone-Maniscalco, D., 2015. Producción de celulasas y biomasa del hongo *Trichoderma reesei* utilizando lodo papelerero como fuente de carbono. Rev. Soc. Ven. Microbiol. Caracas. 35: 35-38
- Colunga, G. M. P., Larqué, A. S., Eguiarte, L. E. y Zizumbo, Z. 2007. En lo ancestral hay futuro: del tequila, los mezcales y otros agaves. CICY-CONACYT-CONABIO-INE, México, D.F. 402 pp.
- Contreras Q., Héctor J.; Trujillo P., Hugo A.; Arias O., Gerardo; Pérez C., José L.; Delgado F., Ezequiel. 2010. Espectroscopia ATR-FTIR de celulosa: aspecto instrumental y tratamiento matemático de espectros. e-Gnosis, vol. 8, pp. 1-13
- CRT. CONSEJO REGULADOR DEL TEQUILA. 2008. Informe de las principales actividades enero-diciembre de 2008, Disponible en la dirección: www.crt.org.mx Consultado 10 de marzo de 2014.
- Dhakal, H. N., Zhang, Z. Y., and Richardson, M. O. W. 2007. Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites. Compos. Sci. Technol. 67:1674–1683.

De Dios Naranjo, Cuauhtémoc; Alamilla-Beltrán, Liliana; Gutiérrez-Lopez, Gustavo F.; Terres-Rojas, Eduardo; Solorza-Feria, Javier; Romero-Vargas, Sofía; Yee-Madeira, Hernani T.; Flores-Morales, Areli; Mora-Escobedo, Rosalva; 2016. Aislamiento y caracterización de celulosas obtenidas de fibras de *Agave salmiana* aplicando dos métodos de extracción ácido-alcali. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7: 31-43.

Diario Oficial de la Federación. DOF. publicada en el Alcance del Periódico Oficial, el 28 de noviembre de 1994.

Diario Oficial de la Federación. DOF, 2011. Ley publicada en el Alcance del Periódico Oficial, el lunes 31 de diciembre de 2011

Dufresne, A. Nanocellulose: From Nature to High Performance Tailored Materials. De Gruyter. 2012. 460 páginas.

Eichhorn, S.J., C.A. Baillie, N. Zafeiropoulos, L.Y. Mwaikambo, M.P. Ansell, A. Dufresne, K.M. Entwistle, P.J. Herrera-Franco, G.C. Escamilla, L. Groom, M. Hughes, C. Hill, T.G. Rials, and P.M. Wild. 2001. Current international research into cellulosic fibers and composites. *J. Mater. Sci.* 36(9): 2107-2131.

Eriksson, K.-E. L. 1989. Biotechnology in the pulp and paper industry. *Wood Sci Technol.* 24, 79-101.

Escoto-García, T., Vivanco-Castellanos, E. M., Lomelí-Ramírez, M. G., Arias-García, A. 2006. Tratamiento fermentativo-químico-mecánico del bagazo de maguey (*Agave tequilana* Weber) para su aplicación en papel hecho a mano. *Revista Mexicana de Ingeniería Química.* 5(1): 23-27.

Evans, R., Newman, R. H., Roick, U. C., Suckling, I. D., Wallis, A. F. 1995. Changes in cellulose crystallinity during kraft pulping. Comparison of infrared, X-ray diffraction and solid state NMR results. *Holzforschung,* 49(6):498-504.

Evert, R. F. 2006. *Esau's plant anatomy Meristems, Cells, and Tissues of the Plant Body: Their Structure, Function, and Development.* Wiley & Sons. 2006. E. U. A.

Food and Agriculture Organization of the United Nations FAO 1994. *Agriculture Series, No. 27.* ISSN 0081-4539.

Fernández-Rodríguez J., Robles E., Gordobil O., González-Alriols M., Labidi J., 2016, Lignin valorisation from sidestreams produced during agriculture waste pulping and tcf bleaching, *Chemical Engineering Transactions.* 52: 187-192

Flores L., H. E., K. F. Byerly M., J. J. Aceves R., y J. A. Ruiz C. 2002. Diagnóstico del sistema de producción de agave con énfasis en problemas fitosanitarios. pp. 63-95. In *Análisis agroecológico de Agave tequilana* Weber var. Azul con énfasis en problemas fitosanitarios en Jalisco. Publicación Especial Núm. 1. INIFAP-CIRPAC-Campo Exp. Altos de Jalisco. Tepatlán, Jalisco, México.

Referencias

- Franco-Guarnizo, A., Martínez-Yépes, P. N., Sánchez-Hoover, A. 2009. Pretratamientos de la celulosa y biomasa para la sacarificación. *Revista Scientia Et Technica*. 15(42):284-289.
- García Curbelo, Y.; López, M. G.; Bocourt, L. 2009. Fructanos en *Agave fourcroydes*, potencialidades para su utilización en la alimentación animal. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*. 43(2):175-177.
- García Mendoza, A. J., E. Lot. 1994. Agavaceae. En: Davidse G., M. Sousa y A.O. Chater (eds.). *Flora Mesoamericana* 6: 35-47, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
- García Mendoza, A. J. 2007. Distribution of the genus *Agave* (Agavaceae) and its endemic species in Mexico. *Cactus and Succulent Journal* 74: 177-187.
- García-Mendoza, A. 2010. Revisión taxonómica del complejo *Agave potatorum* Zucc. (Agavaceae): nuevos taxa y neotipificación. *Acta Bot. Mex.* 91(2):71-93.
- Gentry H.S. 1982. *Agaves of Continental North America*. Arizona University Press, Tucson, 670 pp.
- Glatfelter, 2005. Moisture and Relative Humidity. *Technical Bulletin*. 2:1-12.
- González, E. A., Cedillo, P. E., Díaz, G. L. 2005. *Morfología y Anatomía de las plantas con flores*. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco. 276 p.
- González, S. M.; Soto, N. O.; Rutiaga, O. M.; Medrano, H.; Rutiaga, J. G. y López, J. 2011. Optimización del proceso de hidrólisis enzimática de una mezcla de pajas de frijol cuatro variedades (Pinto villa, Pinto saltillo, Pinto mestizo y Flor de mayo). *Rev. Mex. Ing. Quím.* Vol. 10 N°1, 17-28.
- González. M. 1986. Determinación de la Dosis de Ácido 2-cloroetil fosfórico y Época Óptima para la Propagación de Barbasco *Dioscorea composita*. Tesis profesional (Ingeniero Agrónomo). Facultad de Agricultura, Universidad Autónoma de Guadalajara. Jalisco.
- Goswami, T., Saikia, C. N., Baruah, R. K., Sarma, C. M. 1996. Characterization of pulp obtained from *Populus deltoids* plants of different ages using IR, XRD and SEM. *Bioresource Technology*, 57(2):209-214.
- Granados S., D. 1993. *Los agaves en México*. Universidad Autónoma de Chapingo, México.
- Granados, S. D. 1999. *Los agaves de México*. Universidad Autónoma de Chapingo. 252p.
- Gumeta Chávez C., Chanona Pérez J., Vega Alberto, Ligerio P, Mendoza Pérez J. A., Gutiérrez López G. 2007. Obtención de celulosa y lignina mediante el proceso organosolv. XII Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería. Memorias. Morelia, México.

- Gutiérrez-Urbe, A. J.; Santos-Zea, L., Leal-Díaz, A. M. Cortes-Ceballos, E. 2012 “Agave (*Agave* spp.) and Its Traditional Products as a Source of Bioactive Compounds,” *Current Bioactive Compounds*, Vol. 8, No. 3, 2012, pp. 218-231.
- Habibi, Y., Key advances in the chemical modification of nanocelluloses. *Chem. Soc. Rev.*, 2014. 43(5): p. 1519-1542.
- Hahn-Hagerdal, B.; Galbe, M.; Gorwa-Grauslund, M. F.; Zacchi, G. 2006. Bioethanol, the fuel tomorrow from the residues of today. *Trends Biotechnology*, 24, 549-556.
- Hereida-Solis, A., Esparza-Ibarra, E., Romero-Bautista, L., Cabral-Arellano, F y Bañuelos-Venezuela, R. 2014 Bagazos de *Agave salmiana* y *Agave weberi* utilizados como sustrato para producir *Pleurotus ostreatus*. *Revista Iberoamericana de Ciencias*. 1(5):103-110.
- Hernández, M. 2008. Elaboración y caracterización del papel artesanal de la corona del fruto de dos variedades de piña *Ananas comosus* (L.) Merr. Tesis profesional de Ingeniería Forestal. Universidad de Chapingo, México.
- Hernao, L, V., Rojas, I, D., Giraldo, G, A. 2009. Cuantificación de celulosa proveniente de residuos de la industria del mueble. *Ingeniería de recursos naturales y del ambiente*, enero-diciembre, 23-28.
- Howard, R. L., Abotsi, E., Jansen van Rensburg, E. L., Howard, S. 2003. Lignocellulose biotechnology: issues of bioconversion and enzyme production. *Afr. J. Biotechnol.* 2(12):602-619.
- Idarraga, G., Ramos, J., Zúñiga, V., Shain, T., Young, R. 1999. Pulp and paper from blue Agave waste from Tequila production. *J. Agric. Food Chem*, 47:4450-4455.
- Instituto de Capacitación y Productividad para el Trabajo del Estado de Oaxaca (ICAPET). 2001. I Censo de la industria del mezcal. Gobierno de la industria del mezcal. Gobierno del Estado de Oaxaca. Oaxaca, México. p. 40.
- Iñiguez-Covarrubias G, Lange SE, Rowell RM. 2001. Utilization of byproducts from the tequila industry: part 2 potential value of *Agave tequilana* Weber azul leaves. *Bioresour. Technol.* 77:101-108
- Iñiguez, G., Acosta, N., Martínez, L., Parra, J., González, O. 2005. Utilización de subproductos de la industria tequilera. Parte 7: Compostaje de bagazo de agave y vinazas tequileras. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 21(1):37-50.
- Jahan, M.S. Rahman, J. N. N. M, Islam, M y Quaiyyum, M. A. 2016. Chemical characteristics of ribbon retted jute and its effect on pulping and papermaking properties. *Industrial and Crops Products*. 84: 116-120.
- Jaouadi, M.; M’sahli, S.; Sakli.; F. 2009. Optimization and Characterization of Pulp Extracted from the *Agave americana* L. Fibers. *Textile Research Journal*. 79(2): 110–120.

- Jose J. R. y M. E., García. 1995. Fijación de CO₂ en Agave angustifolia Haw. Boletín de la Sociedad Botánica de México. 57: 5-10.
- Kestur, G. S.; Flores-Sahagún, T. H. S.; Pereira Dos Santos, L.; Dos Santos, J.; Mazzaroc, I. and Mikowski A. 2013. Characterization of blue agave bagasse fibers of Mexico. Composites: Part A. 45:153-161.
- Kong, K., Eichhorn, S. J. 2005. The influence of hydrogen bonding on the deformation micromechanics of cellulose fibers. Journal of Macromolecular Sciences. 44:1123-1136.
- Kurita K. 2006. Chitin and Chitosan: Functional biopolymers from marine crustaceans; Mar. Biotechnol. Chem. 8:203-226.
- León, V., Rieumont, J., Bordallo, E., Dopico, D., Peña, E., Menéndez, I. 2013. Obtención y caracterización de la celulosa hidrofóbicamente modificada. ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar, vol. 47, no. 1, pp. 51 – 56.
- Li H, Foston., Kumar, MB., Samuel, R., Gao, R., X., Hu F. 2012. Chemical composition and characterization of cellulose for Agave as a fast-growing, drought-tolerant biofuels feedstock. RSC Adv. 11:4951-4958.
- Ligero, P., Vega, A y Bao, M. 2004. Acetosolv deslignification of Miscanthus sinensis bark: Influence of process variables. Industrial Crops and Products. In Press.
- López S., J. L., J. A. Ruiz C., J. J. Sánchez G. y R. Lépiz I. 2005. Adaptación climática de 25 especies de frijol silvestre (*Phaseolus spp*) en la República Mexicana. Revista Fitotecnia Mexicana. 28: 221-230.
- López-Martínez, A; Bolio-López, G.I; Veleza, L; Solórzano-Valencia, M; Acosta-Tejada, G; Hernández-Villegas, M.M; Salgado-García, S; Córdova-Sánchez, S. 2016. Agroproductividad: 9 (7): 41-45.
- Lynd, L. R., Wyman, C. E. & Gerngross, T. U. 1999. Biocommodity engineering. Biotechnol Prog. 15, 777-793.
- Lynd, R. L., Weimer, P. J., van Zil, W. H., Pretorius, E. S. 2002. Microbial cellulose utilization: Fundamentals and microbiology. Microbiol. Mol Biol Rev, 66(4):506-577.
- MacLeod, M. 2007. The top ten factors in kraft pulp yield. Paperi ja Puu – Paper and Timber. 89 (4): 1-7.
- Madakadze, I. C; Radiotis, T; Li, J; Goel, K; Smith, D.L. 1999. Kraft pulping characteristics and pulp properties of warm season grasses. Bioresour. Technol. 69, 75–85
- Maiti, R. 1995. Fibras vegetales en el mundo: Aspectos botánicos, calidad y utilidad. Editorial Trilla, México, p.300.

- Manals E., Pinedo M. y Giralt G. 2011. Análisis termogravimétrico y térmico diferencial de diferentes biomásas vegetales. *Tecnología Química* Vol. XXXI, No. 2: 36-43.
- Martínez L., E. 2004. Tequila, tradición y destino. Revimundo, México D. F. 165 pp.
- Martínez, M. 1979. Catálogo de Nombres Científicos y Vulgares de Plantas Mexicanas. Fondo de Cultura Económica. México. 1247 p.
- Massart, D.L., Gerald, C.F. y Wheatley, P.O. 1980. "Evaluation and Optimization of Laboratory Methods of Analytical Procedures". Elsevier Science Publishers.
- Mazzeo, M., León, L.; Mejía, L. F., Guerrero, L. E., & Botero, J. D. 2010. Aprovechamiento industrial de residuos de cosecha y poscosecha de plátano en el departamento de Caldas. *Revista Educación en Ingeniería*. 9: 128-139.
- Medina G., G., J. A. Ruiz C. y R. A. Martínez P. 1998. Los Climas de México. Libro Técnico Núm. 1. INIFAP. Ed. Conexión Gráfica. Guadalajara, Jalisco, México. 103 p.
- Merritt, J H. 2010. *The Biology of Small Mammals*. University Press, Baltimore. 336 pages, 63 b/w figures, 13-line figures. ISBN-13: 978-0- 8018-7950-0.
- Molina-Guerrero, J.A., Botello-Álvarez, J.E., Estrada-Baltazar, A., Navarrete-Bolaños, J.L., Jiménez-Islas, H., Cárdenas-Manríquez, M. y Rico-Martínez, R., Compuestos volátiles en el mezcal. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, [En línea]. 6(1), pp. 41-50, 2007.
- Montañez, S. J.; Venegas, G. J.; Vivar, V. M. y Ramos, R. E. 2011. Extracción, caracterización y cuantificación de los fructanos contenidos en la cabeza y en las hojas del *Agave tequilana* Weber Azul. *Bioagro*. 3(23):199-206.
- Mora, C. A. 2012. Caracterización estructural de dos matorrales del noreste de México. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Forestales. Departamento de Silvicultura y Manejo Forestal.
- Mora-López J L, J A Reyes-Agüero, J L Flores-Flores, C B Peña-Valdivia, J R Aguirre-Rivera 2011. Variación morfológica y humanización de la sección salmianae del género *Agave*. *Agrociencia* 45:465-467.
- Jose M. Moran-Mirabal, J M. 2013. Advanced-Microscopy Techniques for the Characterization of Cellulose Structure and Cellulose-Cellulase Interactions, *Cellulose - Fundamental Aspects*, Dr. Theo G.M. Van De Ven (Ed.), InTech.
- Moya Roque, R. 2010. Información comparativa de las 10 especies maderables evaluadas provenientes de plantación en Costa Rica. Ficha técnica 11. In *Tecnología de madera de plantaciones forestales: Fichas técnicas*. R. Moya R., [et al]. (en línea). *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* 7(18-19):181-219. Editorial Corporación Garro y Moya, (ISBN: 978-9968-9643-3-3). Disponible en www.tec.ac.cr/revistaforestal.

- Müller-Hagedorn M., H. Bockhorn, L. Krebs, U. Müller. 2003. A comparative kinetic study on the pyrolysis of three different wood species. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, Vol. 68-69. Págs. 231-249.
- Muñoz M. F.; Hidalgo M. A; Mina J. H. 2014. Figue fiber an alternative for reinforced plastics. Influence of surface modification. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* Vol 12 No. 2 (60-70).
- Murashima, K., Kosugi, A. & Doi, R. H. 2003. Synergistic effects of cellulosomal xylanase and cellulases from *Clostridium cellulovorans* on plant cell wall degradation. *J Bacteriol.* 185, 1518-24.
- Nakamura K, Hatakeyma T, Hatakeyma H (1981) Studies on bound water of cellulose by differential scanning calorimetry. *J Text Inst* 72(9): 607-613.
- Narvaez, Z.J. y T.F. Sanchez. 2009. Agaves as a raw material, recent technologies and applications. *Recent Patents on Biotechnology*, 3 (3), 1-7.
- Nidetzky, B., Steiner, W., Hayn, M. & Claeysens, M. 1994. Cellulose hydrolysis by the cellulases from *Trichoderma reesei*: a new model for synergistic interaction. *Biochem J.* 298 Pt 3, 705-10.
- Nobel, P. S. 1988. *Environmental Biology of Agaves and Cacti*. Cambridge University Press, New York, USA. 270 p.
- Norma NMX-N-22-1988. Método de prueba para la determinación de alfa, beta, gamma celulosa, en pulpas para papel y cartón.
- Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo.
- Palma, F. 1991. El género *Agave* L. y su distribución en el Estado de Oaxaca. Tesis de Licenciatura, Escuela Nacional de Estudios Profesionales, Iztacala, UNAM.
- Pandey, K. K. 2002. A study of chemical structure of soft and hardwood and wood and polymers by FTIR spectroscopy. *Journal of Applied Polymer Science* 71:1969–1975.
- Parra, L. A.; del Villar, P.; Prieto, A. 2010. Extracción de fibras de agave para elaborar papel y artesanías. *Acta Universitaria*. Vol. 20, Número especial 3, p.77-83.
- Pejic, B.M., Kostic, M.M., Skundric, P.D., Praskalo, J.Y., 2008. The effects of hemicelluloses and lignin removal on water uptake behavior of hemp fibers. *Bioresour.Technol.* 99, 7152–7159.
- Peñaloza-Catalán, D. 2004. Evaluación técnico-económica de la aplicación de hongos de pudrición Blanca (HPB) en pulpaje Draft. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales, Escuela de Ciencias Forestales, Departamento de Ingeniería de la Madera.

Referencias

- Peña-Alvarez, A; Díaz, L; Medina, A; Labastida, C; Capella, S. y Vera, L. E. 2004. Characterization of three Agave species by gas chromatography and solid-phase microextraction–gas chromatography–mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1027, 131–136.
- Peña–Valdivia C B, A B Sánchez–Urdaneta, J R Aguirre R, C Trejo, E Cárdenas, A Villegas. 2006. Temperature and mechanical scarification on seed germination of "maguey" (*Agave salmiana* Otto ex Salm–Dyck). *Seed Sci. Technol.* 34:47–56.
- Pérez, C. 2007. Mezcales tradicionales de los pueblos de México, Herencia cultural y biodiversidad. *Ciencias.* 87: 54-60.
- Pérez, E. Y C., Gallardo. 1997. Diagnóstico Botánico-Ecológico General del Parque Zoológico "Zoofari" en el Estado de Morelos. México.
- Pérez, M; Moreda, C; Valdés, M. 2000. Plantas anuales. Fuente alternativa de fibra en la Fabricación de papel. Congreso Iberoamericano de Investigación en Celulosa y Papel. CIADICYP.
- Ping, Q.T. Nguyen, S.M. Chen, J.Q. Zhou, Y.D. Ding *Polymer*, 42 (2001), pp. 8461-8467.
- Placet, V.; Trivaudey, F.; Cissé, O.; Boubakar, L. 2013. What are the possible origins of the nonlinear tensile behaviour of hemp fibres? The 19th International Conference on Composite Materials (ICCM), Jan 2013, France. pp.1 – 8.
- Ponce Andrade, G. I., Vázquez Duhalt, R., Rodríguez Vázquez, R., Medina Ramírez, I. E., Lozano Álvarez, J. A. y Jáuregui Rincón, J. 2012. Evidencia de la biodegradación de resinas fenólicas con hongos ligninolíticos por microscopía electrónica de barrido. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 28(2):159-166.
- Qi, L., Lei, Y, Yuangang, Z., Minghua, Z., Ying, Z., Xiunan, Z., Rongrui, Z., Zhen, S., Jinming, H., Xiaonan, Z, and Wengang, L. 2012. Investigation of the effects of different organosolv pulping methods on antioxidant capacity and extraction efficiency of lignin. *Food Chemistry.* 131:313-317.
- Quesada-González O., Torres-García E., Alfonso-Martínez F. E. 2011. Estudio de la degradación térmica del residuo de la naranja. *Revista Cubana de Química*, Vol. XXIII, N° 1, págs. 25-33
- Quintana, M. J. 2011. Uso de antroquinona en cocción Kraft de *Eucalyotus globulus* y *Eucalyptus nitens*. Tesis de maestría. Universidad de Vicoso. Minas Gerais-Brasil.
- Quintana, M. A. 2012. Aprovechamiento integral del bagazo de piña de A. tequilana. Caracterización de fracciones lignocelulósicas obtenidas por proceso organosolv. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional de México. Departamento de Biotecnología, p.7.
- Ramales, O., Martín, C., Barragán, R. M. 2002. La industria del mezcal y la economía oaxaqueña. Edit, Fondo de cultura económica. México, p.352.

Referencias

- Ramírez R. 1999. Los Recursos Forestales no Maderables de México. Tesis profesional (Biología). Facultad de Ciencias, UNAM. México, D.F. 131 p.
- Ramírez-Cortina, Clementina R.; Alonso-Gutiérrez, María S.; Rigal, Luc. 2012. Valorización de residuos agroindustriales del tequila para alimentación de Rumiantes. Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, vol. 18, núm. 3, septiembre-diciembre, pp. 449-457.
- Ramsay, M R. 2004. The maguey in Gundhó, Valle del Mezquital (Hidalgo, Mexico): Varieties, propagation and changes in the uses. Etnobiología 4:54-66.
- Reyes-Agüero, J. A., Aguirre-Rivera, J. R., Peña-Valdivia, C. B. 2000. Biología aprovechamiento de *Agave lechuguilla* Torr. Boletín de la Sociedad Botánica de México. Vol. 67, p. 75-88.
- Rigal, L. A. M. 1997 Caracterización y valorización del bagazo de *Agave tequilana* Weber de la industria del tequila. Rev. Chapingo Ser. Hort. 3:31-39
- Rodríguez, I. M. 2006. Caracterización química de fibras de plantas herbáceas utilizadas para la fabricación de pastas de papel de alta calidad. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla, España.
- Rodríguez, M. R.; Pascoe, S.; Zamora, N. F.; Álvarez, C.; Salcedo, E. 2001. Evaluación de sustratos vegetales elaborados a partir de residuos de la industria tequilera. Memorias I Congreso Nacional de Agricultura Sustentable. Veracruz, México. pp. 257-259.
- Rojas-León A. 2014. Propuesta sustentable para la utilización de residuos agrícolas y urbanos: fabricación de un eco-material compuesto. Tesis Doctoral en Ciencias Ambientales. Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería. Universidad Autónoma de Hidalgo, Pachuca, México
- Romahn, 1992. Citado en: R. Ramírez. 1999. Los Recursos Forestales no Maderables de México. Tesis profesional (Biología). Facultad de Ciencias, UNAM. México, D.F. 131 p.
- Romero V, P.; Marfisi, S.; Rondón O, P.; Rojas, B y Peña, G. 2014. Obtención de celulosa microcristalina a partir de desechos agrícolas del cambur (*Musa sapientum*). Síntesis de celulosa microcristalina. Rev. Iber. Polímeros. Vol. 15(6), 286-300.
- Ruiz C., J. A., G. Medina G. y R.A. Martínez P. 1997. Estratificación ambiental del Estado de Jalisco. In Memorias del Simposio Ciencia y Tecnología Jalisco 1997. CONACYT. Guadalajara, Jalisco. pp. 95-96.
- Rosli, N. A., Ahmad, I., Adbullah, I. 2013. Isolation and characterization of cellulose nanocrystals from *Agave angustifolia* Fibre. BioResources. 8:1893-1908
- Ruiz C., J. A., G. Medina, I. J. González, C. Ortiz, H. E. Flores L., R. A. Martínez y K. F. Byerly. 1999. Requerimientos agroecológicos de cultivos. Libro Técnico Núm. 3. INIFAP-CIRPAC. Ed. Conexión Gráfica. Guadalajara, Jalisco, México México. 362 p.
- Ruiz Corral, J. A. 2007. Requerimientos agroecológicos y potencial productivo del agave *Agave tequilana* Weber en México. p. 11-36 In Rulfo V., F. O. et al. (ed.). Conocimiento y prácticas

agronómicas para la producción de Agave tequilana Weber en la zona de denominación de origen del tequila. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional del Pacífico Centro.

Rzedowski, J. 1983. Vegetación de México. Editorial Limusa. México.

Saengthongpinit, W. y Sajjaanantakul, T. 2005. Influence of harvest time and storage temperature on characteristics of inulin from Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) tubers. *Postharvest biology and Technology*. 37(1):93-100.

Sánchez Riano, A. M., Gutiérrez Morales, A. I., Muñoz Hernández, J. A y Rivera Barrero, C. A. 2010. Producción de bioetanol a partir de subproductos agroindustriales lignocelulósicos. *Revista Tumbaga*. 5:61-91.

Sánchez, C, 1989. Principales enfermedades que afectan a *Agave angustifolia* Haw. y *Agave americana* L. en el distrito de Tlacolula, Oaxaca. Tesis de Licenciatura, Biólogo. Escuela Nacional de Estudios Profesionales Iztacala, UNAM.

Sánchez, V. 1993. Producción de lechuguilla. Tesis profesional (Ingeniero Agrónomo). Facultad de Estudios Superiores, Cuautitlán, UNAM. Edo. de Méx.

Santiago, A. D., Rodríguez G, N., Mogollón G. 2000. Evaluación del potencial papelero de la fibra de sisal (*Agave sisalana*), en Memorias del Congreso Iberoamericano en Celulosa y papel 2000. CIADICY. 10p.

Santiago, D., Rodríguez, N., Mogollón, G. 2002. Potencial papelero de la fibra de Sisal (*Agave sisalana*). *Revista Forestal Venezolana*. 46(2): 19-27.

Secretaría de Economía. 2009. Estudio de territorialidad del agave para la integración y proyección de la industria elaboradora de comiteco. San Cristóbal de Las Casas, Chiapas. Secretaría de Economía.

Sefik T, M., 2003. Relationship between alkaline pulp yield and the mass fraction and degree of polymerization of cellulose in pulp. Ankara University

Sghaier, B, A. E. O.; Chaabouni, Y.; Msahli, S.; Sakli, F. 2012. Morphological and crystalline characterization of NaOH and NaOCl treated Agave Americana L. fiber. *Industrial Crops and Products*. 36:257-26

Sistema de información cultural. SIC. CONACULTA. (2008). Los agaves, mezcales y tequila. http://sic.conaculta.gob.mx/ficha.php?table=gastronomia&table_id=50.

Silos-Espino H., Tovar-Robles C. L., González-Cortés N., Méndez-Gallegos S. J. y Rossel-Kipping D. 2011. Estudio integral del maguey (*Agave salmiana*): propagación y valor nutricional. *Revista de Salud Pública y Nutrición. Edición Especial No 5*. pp 75-82. (ISSN 1870-0160).

- Solís Aguilar, J. F., H. González Hernández, J. L. Leyva Vázquez, A. Equihua Martínez, F. J. Flores Mendoza y A. Martínez Garza. 2001. *Scyphophorus acupunctatus* Gyllenhal, Plaga del agave tequilero en Jalisco, México. *Agrociencia* 35 (6): 663-670.
- Solomon, E P; Berg, L R; Martin, D W. 2011. *Biology*. Edition 9th ed. Published Belmont, CA Brooks/Cole 2011. xxxii, 1263, 12, 48, 52 p. ISBN 0538741252.
- Sousa, F. D., Cristian G., Martínez-Ávila, G., Monteiro-Moreira, A. C., Aguilar, C. N. y Azevedo Moreira, R. 2010. Perspectivas biotecnológicas de hemicelulosas vegetales. *Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila*. Volumen 2, No. 4, 32-39
- Standley, P. C. 1961. *Trees and Shrubs of Mexico*. United States National Herbarium.
- Taiz, L.; Zeiger E. 2006. *Fisiología vegetal 1*. Universitat Jaume I. p. 549. ISBN 9788480216012. Consultado el 24 de febrero de 2015.
- Tappi Test Methods. Technical Association of the Pulp and Paper Industry. TAPPI. 2004. Atlanta, Georgia, USA.
- Tirado, O. 2004. Characterization of microorganism with carbohydrase activities from tropical ecosystems, University of Puerto Rico, Doctoral Thesis.
- Tomás M. E. 2010. Bioetanol de paja de trigo: estrategias de integración de las etapas del proceso. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Ciencias Biológicas. Departamento de Microbiología II.
- Valadez G. A., Cervantes U. J., Olayo R., Herrera F. P. 1999. Effect of fiber surface treatment on the fiber-matrix bond strength of natural fiber reinforced composites *Composites: Part B*. 30, 309-320.
- Van Voorn B, Smit HHG, Sinke RJ, de Klerk B. 2001. Natural fiber reinforced sheet molding compound. *Composites: Part A*. 32:1271-9.
- Vargas, G. A., Kolver, E. S. 1997. Microbial and animal limitations to fiber digestion and utilization, Conference: New developments in forage science contributing to enhanced fiber utilization by ruminants. *J. Nut.* 127(5):809S-809S.
- Vargas T., V. M. 2004. Evaluación del potencial agroecológico del cultivo de *Agave tequilana* Weber en el Estado de Jalisco. Tesis de Licenciatura. Universidad de Guadalajara, Facultad de Agronomía. Zapopan, Jalisco.
- Vargas C. G. 2009. Obtención de insumos de interés industrial a partir de las fructanas del agave mezcalero potosino (*A. salmiana*). Tesis de Maestría en producción agrícola sustentable. Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Investigaciones para el Desarrollo Integral Regional. CIIDIR-IPN-Michoacán.

- Vázquez Díaz, Erasmo, García Nava, J. Rodolfo, Peña Valdivia, Cecilia B., Ramírez Tobías, Hugo M., y Morales Ramos, Victorino. 2011. Tamaño de la semilla, emergencia y desarrollo de la plántula de maguey (*Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck). *Revista fitotecnia mexicana*, 34(3), 167-173
- Velasco, P.; Soengas, P.; Vilar, M.; Cartea, M. E.; del Rio, M., Comparison of glucosinolate profiles in leaf and seed tissues of different *Brassica napus* crops. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 2008, 133, (4), 551-558.
- Vega-Baudrit J., Sibaja M. B. Nikolaeva S. N., Rivera A. A. 2014. Síntesis y caracterización de celulosa amorfa a partir de triacetato de celulosa. *Rev Soc Quím Perú.* 80 (1): 45-50.
- Veroes, Y. 2004. Evaluación del bagazo de cocuy (*Agave cocui trelease*), como materia prima para la elaboración de pulpa para papel. Tesis de Maestría. Universidad del Zulia, Venezuela.
- Veveris, C., Georghiou, K., Christodoulakis, N., Santas, P. and Santas, R. 2004. Fiber Dimensions, Lignin and Cellulose Content of Various Plant Materials and their Suitability for Paper Production. *Industrial Crops and Products.*19: 245-254.
- Vieira MC, Heinze T, Antonio-Cruz R, Mendoza-Martinez AM. 2002. Cellulose derivatives from cellulosic material isolated from *Agave lechuguilla* and *fourcroydes*. *Cellulose* 9:203–212
- Vinnet E., Fajardo O. 2009. Estrategia para el mejoramiento genético de Agaves en Cuba. *Temas de Ciencia y Tecnología | enero – abril.* p. 37-43.
- Wang, B., Sain M. y Oskman, K. 2007. Study of structural morphology of hemp fiber from the micro to the nanoscale. *Applied Composite Materials* 14, 89-103.
- Wang, N. y Nobel, P. S. 1998. Phloem transport of fructans in the Crassulacean acid Metabolism species *Agave deserti*. *Plant physiology.* 116: 709-714.
- Wickens, G., Goodin, R. y D. Field (eds.) 1987. *Plants for arid Lands. Proceedings of the Kew International Conference on Economic Plants for Arid Lands held in the Jodrell Laboratory. Royal Botanic Gardens. 23-27 Julio 1984. Londres, Gran Bretaña.*
- White J.E., W. James Catallo, B.L. Legendrea. 2011. Biomass pyrolysis kinetics: A comparative critical review with relevant agricultural residue case studies. doi.org/10.1016/j.jaap.2011.01.004
- Young, R.A., 1997. Processing of agro-based resources into pulp and paper. In: Rowell, R.M., Young, R.A., Rowell, J.K. (Eds.), *Paper and Composites from Agro-based Resources.* CRC Press/Lewis Publishers, New York, pp. 137–245
- Zamora, C.; Juárez, B. I.; Aguirre, J. R., Ortiz, D. P., Godínez; C. I.; Álvarez, G. 2010. Variación de la concentración de azúcares y saponinas durante la cocción del maguey mezcalero potosino. *e-Gnosis*, vol. 8, p. 1-11.

Sitios de internet

http://www.tetlacuilolli.org.mx/glifos.php?id_comp_glifico=1236721625&act=ant&ord_glifo=1288214987

<http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/879Agave%20angustifolia.pdf>

<http://www.google.com.mx/imgres?um=1&sa=N&rls=com.microsoft:es-mx>.

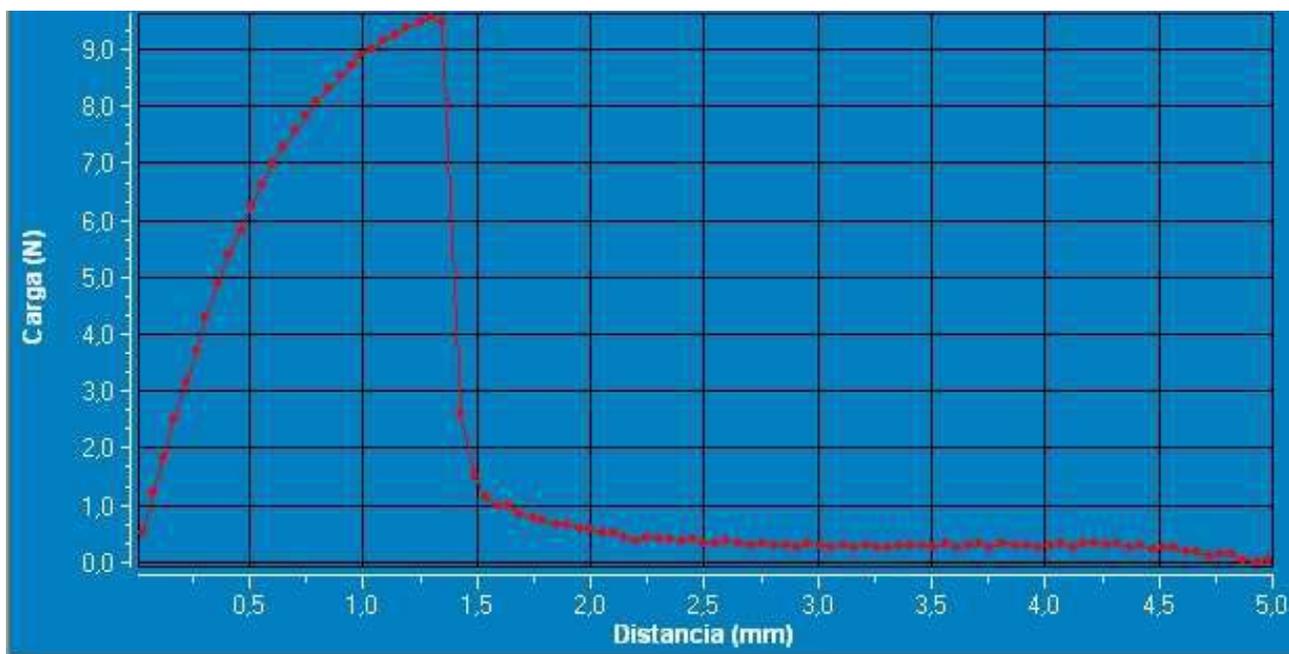
<http://images.latin-wife.com/colombia/images/agave-americana.jpg>

http://www.medicinatradicionalmexicana.unam.mx/images/atlas/Agave_salmiana2.jpg

<http://pics.davesgarden.com/pics/2008/02/11/Equilibrium/1d4d47.jpg>

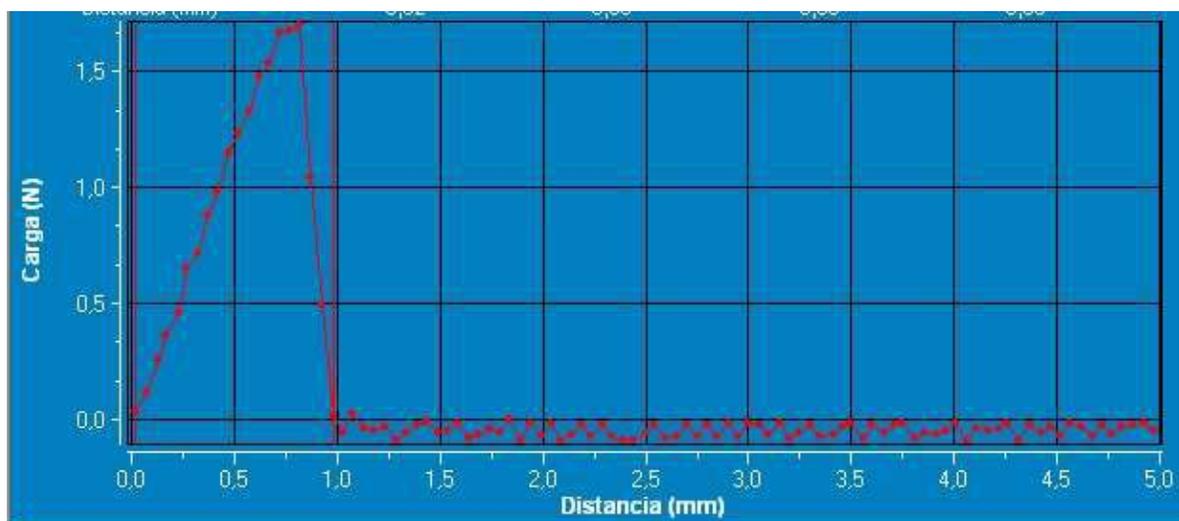
9. ANEXOS

Anexo 1. Gráfica de resistencia a la tensión (hoja elaborada a partir de pulpa de celulosa de *Agave tequilana*, procesada por el método alcalino y blanqueada).



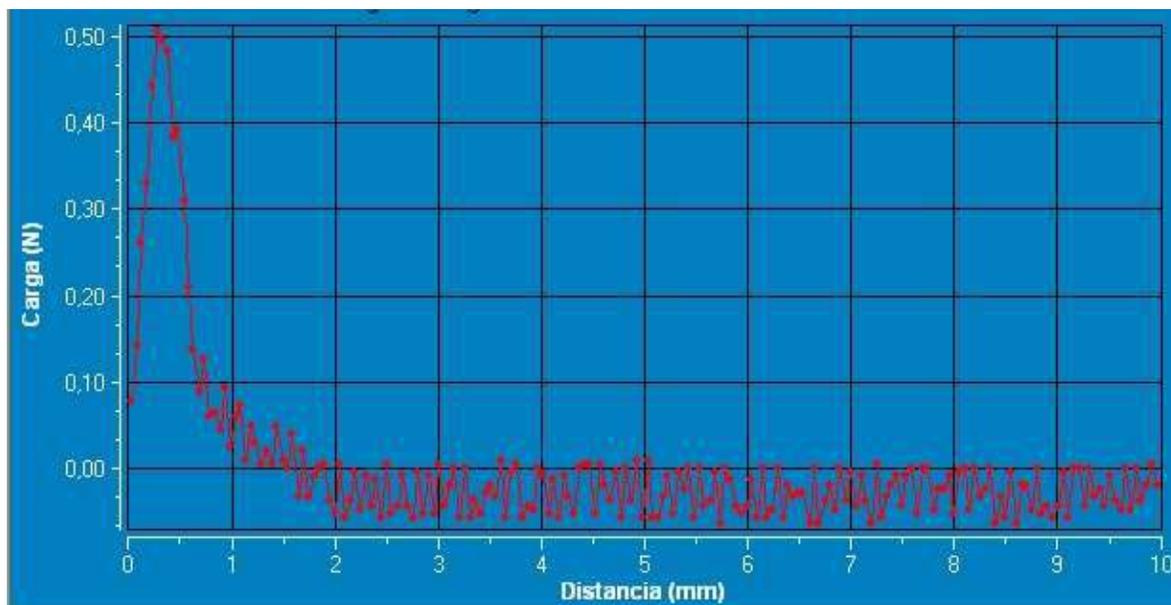
<i>Agave tequilana</i>	Promedio	Desvest
Carga (N)	9.73	0.508
Distancia (mm)	2.31	0.176
Área bajo la curva (N/mm)	9.39	2.882

Anexo 2. Gráfica de resistencia a la tensión (hoja elaborada a partir de pulpa de celulosa de *Agave salmiana*, procesada por el método alcalino y blanqueada.



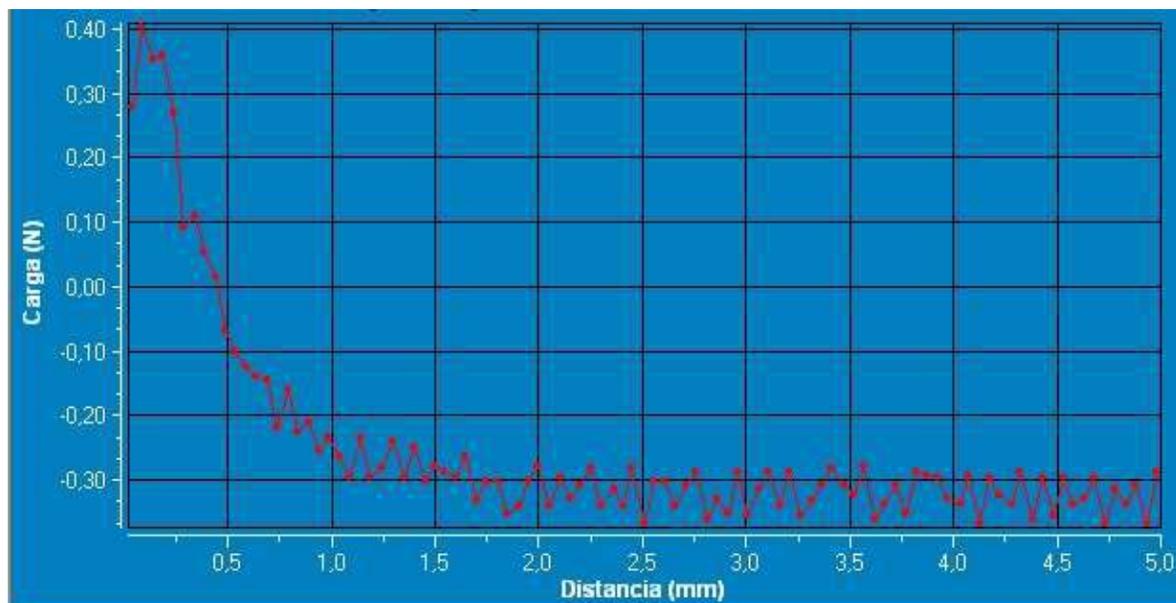
<i>Agave salmiana</i>	Promedio	Desvest
Carga (N)	5.121	6.5
Distancia (mm)	1.245	1.5
Área bajo la curva (N/mm)	6.138	4.6

Anexo 3. Gráfica de resistencia a la tensión (hoja elaborada a partir de pulpa de celulosa de *Agave lechuguilla*, procesada por el método alcalino blanqueada).



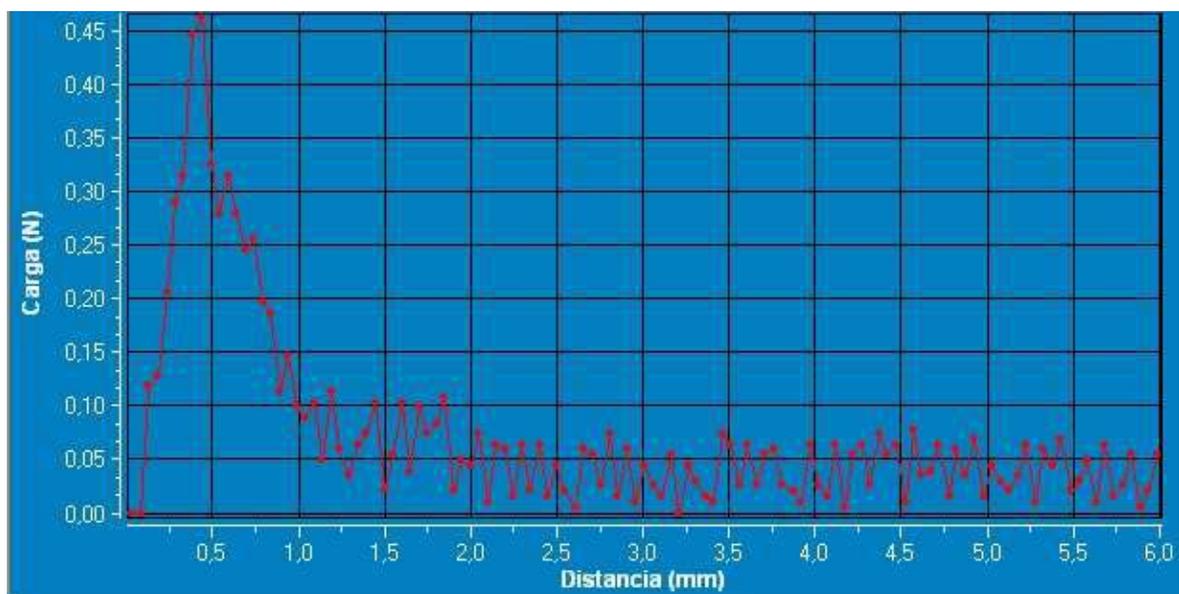
<i>Agave lechuguilla</i>	Promedio	Desvest
Carga (N)	7.28	0.451
Distancia (mm)	0.78	0.050
Área bajo la curva (N/mm)	3.37	0.209

Anexo 4. Gráfica de resistencia a la tensión (hoja elaborada a partir de pulpa de celulosa de *Agave tequilana*, procesada por el método ácido y blanqueada).



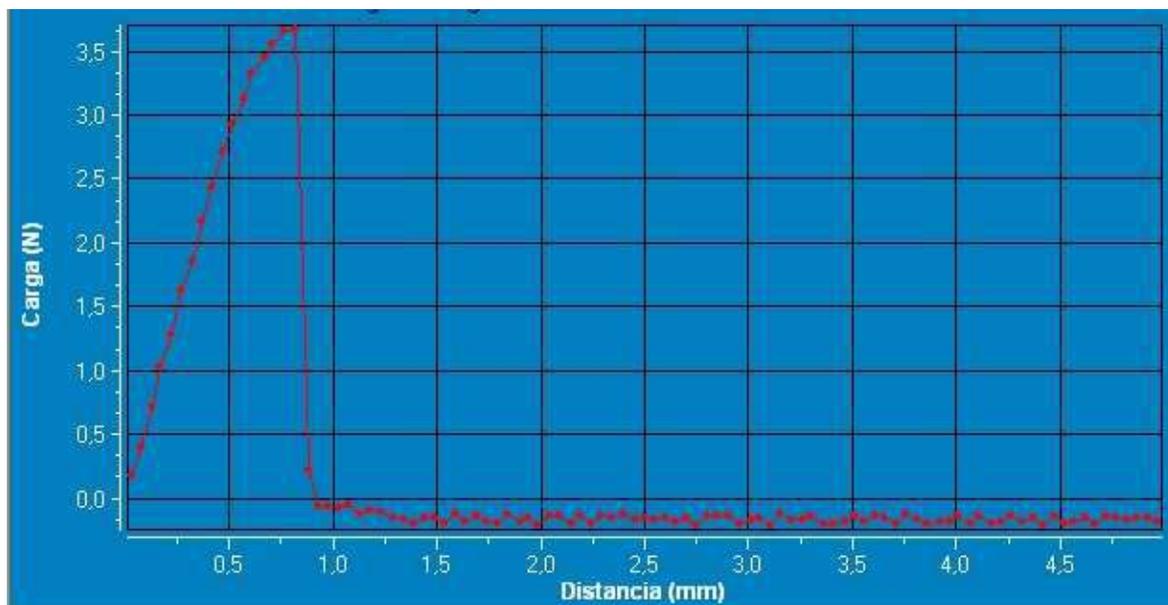
<i>Agave tequilana</i>	Promedio	Desvest
Carga (N)	0.339	0.2
Distancia (mm)	0.790	0.2
Área bajo la curva (N/mm)	0.143	0.1

Anexo 5. Gráfica de resistencia a la tensión (hoja elaborada a partir de pulpa de celulosa de *Agave salmiana*, procesada por el método ácido y blanqueada).



<i>Agave salmiana</i>	Promedio	Desvest
Carga (N)	0.333	0.0
Distancia (mm)	1.147	0.4
Área bajo la curva (N/mm)	0.187	0.0

Anexo 6. Gráfica de resistencia a la tensión (hoja elaborada a partir de pulpa de celulosa de *Agave lechuguilla*, procesada por el método ácido y blanqueada).



<i>Agave lechuguilla</i>	Promedio	Desvest
Carga (N)	3.070	0.7
Distancia (mm)	1.337	0.2
Área bajo la curva (N/mm)	1.640	0.3