

Caracterización fisicoquímica de cuatro especies de agaves con potencialidad en la obtención de pulpa de celulosa para elaboración de papel

Edith Jiménez-Muñoz^a, Francisco Prieto-García^{a*}, Judith Prieto-Méndez^b, Otilio A. Acevedo-Sandoval^b
& Rodrigo Rodríguez-Laguna^b

^aInstituto de Ciencias Básicas e Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca, México. *Autor de correspondencia. prietog@uaeh.edu.mx, bioedith13@gmail.com

^bInstituto de Ciencias Agropecuarias. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca, México. Jud_292003@yahoo.com.mx, acevedo@uaeh.edu.mx, rodris71@yahoo.com

Received: July 31th, 2015. Received in revised form: April 22th, 2016 Accepted: April 27th, 2016

Resumen

El objetivo general de este trabajo fue encontrar un nuevo valor agregado a las hojas de las agaváceas, desecho de la agroindustria. Se estudiaron cuatro especies de agaves de tres estados de la república mexicana: *Agave angustifolia* (Oacaxa), *Agave tequilana* (Jalisco), *Agave salmiana* y *Agave lechuguilla* (Hidalgo). Luego de una clasificación taxonómica, fenológica, ecológica y etnobotánica (basados en morfología comparada), se sometieron a diversos análisis físicos (humedad, molienda, tamizaje, granulometría y características foliares, MEB) y químicos (cenizas grasas y aceites, proteínas, análisis TGA y DTGA, así como FTIR). Las especies de *A. angustifolia* y *A. tequilana* son las que presentan un óptimo tamaño de fibra para la elaboración de papel. Corresponde también a los mayores porcentajes de celulosa (44.3% y 36.8%) por DTGA. Del análisis proximal, se evidencia que las dos especies definidas como mejores para la obtención de pulpa de celulosa, presentan pequeñas diferencias significativas en contenidos de grasas, proteínas, material solubilizable en agua caliente (AT) como en solución moderadamente alcalina y/o alcohólica.

Palabras clave: Agave ssp., análisis proximal, DTGA, FTIR, celulosa.

Physicochemical characterization of four species of agaves with potential in obtaining pulp for paper making

Abstract

The overall objective of this work was to find a new value to the leaves of agaváceas, waste of agribusiness. Four species of agaves were studied in three states of the Mexican Republic: *Agave angustifolia* (Oacaxa), *Agave tequilana* (Jalisco), *Agave salmiana* and *Agave lechuguilla* (Hidalgo). After a classification taxonomy, phenology, ecological and ethnobotanical (morphology), various physical analysis (moisture, grinding, screening, grading and leaf characteristics, SEM) and chemical (fat and oils, ash, proteins, TGA and DTGA and FTIR were subjected). The species of *A. angustifolia* and *A. tequilana* are those with an optimum size of fiber for papermaking. It also corresponds to the highest percentages of cellulose (44.3% and 36.8%) by DTGA. The proximate analysis, it appears that the two species defined as obtaining better for pulp, significant differences have small content of fat, protein, water solubilizable hot material (AT) and moderately alkaline and/or alcoholic solution.

Keywords: Agave ssp., proximate analysis, DTGA, FTIR, cellulose.

How to cite: Jiménez-Muñoz, E., Prieto-García, F., Prieto-Méndez, J., Acevedo-Sandoval, O.A. y Rodríguez-Laguna, R., Caracterización fisicoquímica de cuatro especies de agaves con potencialidad en la obtención de pulpa de celulosa para elaboración de papel. DYNA 83(197), pp. 233-243, 2016

1. Introducción

La celulosa, principal componente de las paredes celulares de las plantas, es un polisacárido formado por moléculas de cadenas lineales de $\beta(1,4)$ -D-glucopiranosas, que tienden a formar microfibrillas con diámetros de 1 a 10 nm y longitudes de 25 nm. Es el polímero más abundante de la naturaleza y utilizado como materia prima en industrias de papel y textil [1].

Es conocida la producción y obtención de celulosa, a partir de fuentes maderables, y existe una tendencia actual a la búsqueda de nuevas fuentes de obtención de celulosa. El agave es una especie no maderable que puede ser utilizada para extracción de celulosa. Existen diversas investigaciones sobre elaboración de fibras a base de residuos de agaves [2] en las cuales obtuvieron pulpa de bagazo de *A. tequilana* mediante técnicas mecánicas, químicas y biológicas. Recientemente se reporta [3] la elaboración papel a partir de fibras crudas de seis especies de *Agave*; tres de hoja angosta (*A. lechuguilla*, *A. angustifolia* y *A. tequilana*) y tres de hoja ancha (*A. americana*, *A. salmiana* y *A. mapisaga*), utilizando diferentes métodos para la extracción de fibras. El autor señala que *A. salmiana* y *A. mapisaga* fueron las especies que presentaron mejores características. El objetivo general de este estudio, fue encontrar un nuevo valor agregado a las hojas residuos de especies de agaves de la agroindustria tequilera, mezcalera y/o pulquera, y su potencialidad para obtener pulpa de celulosa como opción para la elaboración de papel de fibras cortas.

2. Metodología

2.1. Zona de estudio y toma de muestras

Las especies muestreadas aparecen en la Tabla 1. *A. tequilana* Weber, Var. Azul, sólo es cultivable en los estados mexicanos de Jalisco, Guanajuato, Michoacán, Nayarit y Tamaulipas, a pesar de que se adapta a un amplio rango altitudinal [4]; *A. tequilana* se desarrolla óptimamente de 700 a 1900 msnm [5].

2.2. Realización de ensayos

Las muestras fueron sometidas a determinación de humedad, posteriormente se molieron y tamizaron.

Se evaluaron sus dimensiones y características foliares, se determinó distribución y tamaños de partículas de las fibras obtenidas, mediante un analizador por difracción de rayos Laser en equipo LS13-320 de la firma Beckman Coulter ®. La muestra fue suspendida en agua destilada y, en agitación continua, se midieron los diferentes tamaños y distribución. Las muestras secas fueron analizadas por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) para precisar morfologías de las fibras. Se realizaron análisis termogravimétrico (TGA) y

derivativo (DTGA) y de espectroscopía infrarroja (FTIR). El análisis morfológico se realizó en un MEB de la firma JEOL, modelo JSM-820®. Los análisis térmicos se llevaron a cabo en analizador METTLER-TOLEDO®, modelo TGA/SDTGA-851, crisoles de aluminio y un barrido de 25°C a 600°C a velocidad de 10°C/min. FTIR se realizó acorde a [6] en muestras secas; analizadas en pastillas con KBr en equipo Perkin Elmer®, entre 400-4000 cm^{-1} y 4 cm^{-1} de resolución.

La concentración de azúcares totales se determinó por el método Fenol-Sulfúrico [5]. Los extractos fueron obtenidos a partir de 2 g de fracción de hojas de agaves, secadas y trituradas en un vaso de precipitados (maceradas), se les añadió agua destilada relación 1:6 (o en su caso, solución de NaOH 1 % y/o solución de etanol-agua 1:1 con calentamiento y agitación a 70°C por 30 minutos. Al término de 30 minutos, se centrifugó a 5000 rpm y el líquido claro se reservó como extracto de fracciones solubles. Se determinaron grasas y aceites, proteínas y lignina [5, 6].

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización física

Se observa en la Tabla 2 los resultados de caracterización de muestras de hojas de *A. tequilana* Weber, Var. Azul. Por sus dimensiones (98,58 cm de largo, 8,33 cm de ancho y 2,08 cm de espesor) se asemejan a lo reportado por algunos autores [7]; se puede analizar que en sus espesores resultaron ligeramente más gruesas y por tanto con mayores volúmenes y densidades volumétricas, lo cual da una idea de que las mismas se encuentran algo pasadas en madurez para el jimado (proceso de corte de las hojas para quedar sólo la piña central), también puede ser debido a que la recolección de las piñas se realizó en época de lluvia.

De igual forma la altura de las plantas se considera similar a lo reportado [7] aunque ligeramente menores en diámetro de la roseta. Los contenidos de humedad en las hojas resultaron un poco más elevadas (83,43%) con relación a lo que reportan [8], debido a haberse recolectado en época lluviosa. Se puede considerar un poco intenso el color verde de las hojas, al ser comparados en una escala de 1-6 con un valor promedio de 4,31, y según establecen [9], este valor debe estar entre 3-4 como indicativo de una suficiente madurez de la planta, que ha de corresponder a una edad entre 8-10 años (edad óptima para la jima (proceso de corte de las hojas para quedar sólo la piña central) y producción de tequila). Si los colores son menores de 3 la escala, presupone no madurez suficiente. En cuanto a la altura de la espina apical, se corresponde con lo reportado por otros autores [9,10] pero un poco más pequeña que lo que indica [8].

Tabla 1.
Localización geográfica de los puntos de toma de muestras de agavaceas

Variedad	Localidad; 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 Agustín Tlaxiaca, 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

Elaboración propia

Tabla 2.

Caracterización física de *Agave tequilana* Weber, Var. Azul, tomada en el municipio de Tequila, Jalisco.

Hoja	Hoja (n=10 hojas)					Roseta (n=6 plantas)			
	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)
media	98,58	8,33	2,08	641,64	1741,92	0,38	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
Dif. Sig	NO	NO	SI	NO	SI	SI	NO	NO	SI
Ref [11]	100,00	7,50	1,60	575,47	1200,00	0,48	816,00	1400,00	1800,00

Hoja	Humedad (%)	<0,5 mm (%)	0,5-1,0 mm (%)	>1,0mm (%)	Color (1-6)	Nº Espinas	Alt. E. apical (cm)
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
Dif. Sig	SI	-	NO	-	NO	NO	SI
Ref [11]	80,00	NR	> 85%	NR	4,00	150,00	2,00

Nota t tabulada: 2,26; cuando t cal < t tabulada no hay diferencias significativas, NR: No Reportado.

Fuente: Elaboración propia

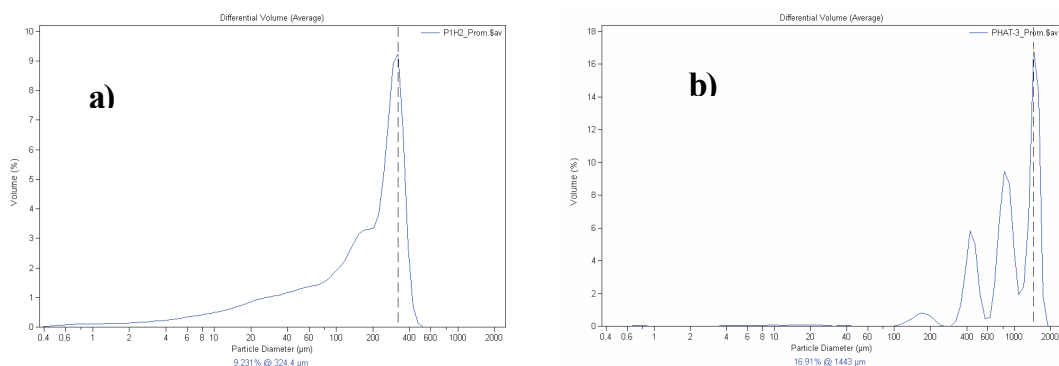


Figura 1. Distribución y tamaños de partículas secas de la a) fracción minoritaria (<0,5 mm) y b) fracción 0,5-2,0 mm, de hojas de *Agave tequilana* Weber, Var. Azul en el municipio de Tequila, estado de Jalisco, México.

Fuente: Elaboración propia.

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 [12]. La fracción < 0,5 mm varía entre 8-10% y se obtuvo un valor promedio ligeramente superior (13,6%). En la Fig. 1a se observa el tamaño y distribución de

Tabla 3.

Caracterización física de *Agave salmiana* B. Otto ex Salm-Dick, tomada en el municipio de Epazoyucan, Hidalgo.

Hoja	Hoja (n=10 hojas)					Roseta (n=6 plantas)			
	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)
media	159,00	21,23	6,54	9179,36	22821,48	0,43	3397,78	2236,17	2488,83
desv.				2281,69					
Est.	15,593	1,555	1,248	3	7474,732	0,125	567,370	161,310	336,553
%CV	9,81	7,33	19,09	24,86	32,75	28,71	16,70	7,21	13,52
t cal	1,825	6,659	5,165	1,912	2,632	0,903	1,545	4,630	2,714
Dif. Sig	NO	SI	SI	NO	SI	NO	NO	SI	SI
Ref [10]	150,00	24,50	4,50	7800,00	16600,00	0,47	3675	2000	2200

Hoja	Humedad (%)	<0,5 mm (%)	0,5-1,0 mm (%)	>1,0mm (%)	Color (1-6)	Nº Espinas	Alt. E. apical (cm)
media	92,31	25,16	70,18	4,66	3,75	111,40	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
Dif. Sig	SI	-	SI	-	NO	SI	NO
Ref [10]	85	NR	> 85%	NR	4	100	6

Nota t tabulada: 2,26; cuando t cal < t tabulada no hay diferencias significativas, NR: No Reportado.

Fuente: Elaboración propia

partículas de la fracción más fina (<0,5 mm). Como se puede apreciar el tamaño prevaleciente fue de 324,4 µm y muestra una distribución casi homogénea. En la Fig. 1b se observa el tamaño y distribución de partículas de la fracción 0,5-2,0 mm. El tamaño prevaleciente fue de 1443 µm.

La Tabla 3 refleja los resultados de caracterización física de la variedad *A. Salmiana* Otto ex Salm-Dyck. No existen diferencias significativas en cuanto al largo de sus hojas y corresponde con lo reportado algunos autores [5,10-12] que señalan valores de 150 cm. Sin embargo el valor promedio en el ancho de las hojas (21,23 cm) resultó ligeramente menor que lo reportado algunos de los autores de 24cm [10, 11]. Una variación importante espesor de las hojas que en promedio fue de 6,5 cm, muy superior a lo reportado (4.5 cm) [12]. La masa promedio se encontró que también fue superior (9179 g) a lo esperado, atribuido a la mayor cantidad de agua retenida, debido a la época de lluvias y correspondiendo con los mayores anchos y espesores de las hojas que resultaron 1,37 veces más voluminosas que lo que se reporta en las referencias consultadas (1600-1700 cm³).

Se observó mayor esbeltez de la planta y mayor diámetro de la roseta en surco, aproximadamente unos 200 cm más altas y más anchas las rosetas.

La humedad promedio (92,3%) en la variedad *A. Salmiana* presentó un 7% por encima de los valores que reportan [10], debido probablemente a la temporada de lluvias.

Los tamaños y distribución de partículas de las fracciones minoritarias (<0,5 mm) y mayoritarias (0,5-1,0 mm), se muestran en las Fig. 2a y 2b respectivamente; para la fracción mayoritaria fue de un 70.8%. Se observa en la Fig. 2b distribución del 25,2% de tamaño de partículas <0,5 mm que se espera igualmente no afecte demasiado en el pulpeo). En la Fig. 2b se aprecia una distribución casi homogénea con tamaño de partícula predominante entre 0.5 mm y 1.9 mm.

En cuanto al color de las hojas, se consideraron con edad de madurez adecuada (valores entre 3-4, según escala de color de [10]) con valor promedio de 3.70. Presentaron un número mayor de espinas laterales (111 como promedio) que lo reportado (≈ 100) por [12], sin embargo la altura promedio de la espina apical (5,85 cm) si se corresponde con el valor que estos mismos autores refieren (≈ 6,0 cm).

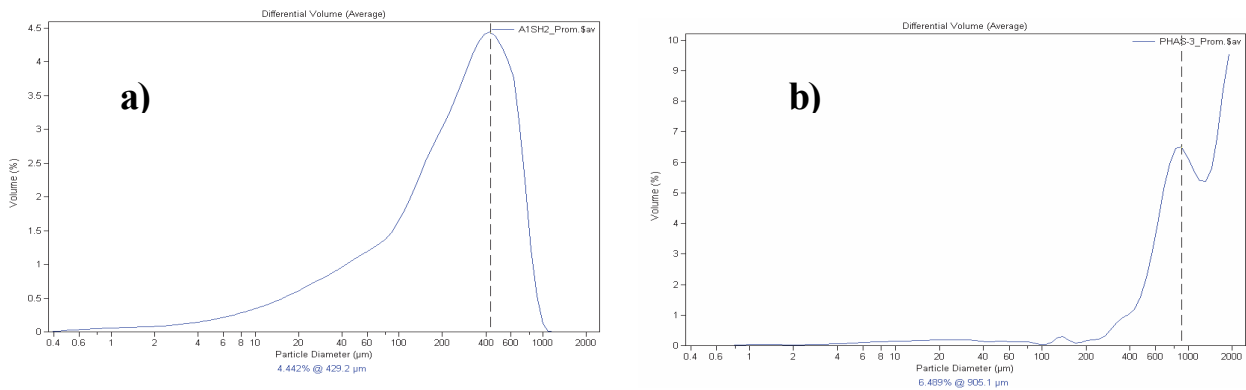


Figura 2. Distribución y tamaños de partículas secas de la a) fracción minoritaria (<0,5 mm) y b) fracción 0,5-2,0 mm, de hojas de *Agave salmiana* B. Otto ex Salm-Dick, tomada en el municipio de Epazoyucan, Hidalgo, México. Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Caracterización física de *Agave angustifolia* Haw, tomada en el municipio de Zimatlán, Oaxaca.

Hoja	Hoja (n=10 hojas)					Roseta (n=6 plantas)			
	largo (cm)	ancho (cm)	espesor (cm)	masa (g)	Volumen (cm ³)	densidad (g/cm ³)	Área foliar (cm ²)	Altura Planta (mm)	Diam. Planta (cm)
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	282,172	0,030	126,335	130,539	193,818
%CV	9,56	10,54	4,09	27,24	20,91	9,46	19,85	8,80	8,71
t cal	7,456	1,650	4,260	2,235	1,112	10,127	2,101	2,806	3,677
Dif. Sig	SI	NO	SI	NO	NO	SI	NO	SI	SI
Ref [13]	125,00	6,50	2,00	510,00	1250,00	0,408	552,50	1600,00	2000

Hoja	Humedad (%)	<0,5 mm (%)	0,5-1,0 mm (%)	>1,0mm (%)	Color (1-6)	Nº Espinas	Alt. E. apical (cm)
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	9,05	29,29	9,77	46,05	3,80	4,88	4,82
t cal	1,375	-	4,883	-	1,054	0,203	2,169
Dif. Sig	NO	NR	SI	NR	NO	NO	NO
Ref [13]	70	-	75	-	4	80	2,5

Nota t tabulada: 2,26; cuando t cal < t tabulada no hay diferencias significativas, NR: No Reportado. Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 4 se muestran los resultados de la caracterización física de la variedad *A. angustifolia* Haw. Se aprecia que existen diferencias significativas en cuanto largo y espesor de las hojas con relación a lo reportado por otros autores [4,13]; en este trabajo se obtuvo hojas de 102 cm de largo, más cortas que lo reportado (125 cm), 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 (0,313 g/cm³). En relación a las demás mediciones sólo se aprecian menores valores en cuanto a la altura y diámetro de la roseta de las plantas.

La humedad se reporta ligeramente por encima de lo señalado [13], probablemente debido a la época de abundantes lluvias. Los tamaños y distribución de partículas 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 se observan en la Fig. 3a. Se aprecia una distribución que resulta casi homogénea pero con un tamaño de partículas predominante ligeramente mayor 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 Fig. 3b. Como se puede observar el tamaño prevaleciente fue de 993,6 µm.

La Tabla 5 muestra resultados de la caracterización física

de la variedad *A. lechuguilla* Torr. 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 [11], 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.

Se aprecia en la Fig. 4a una distribución casi homogénea pero con un tamaño de partículas predominante ligeramente mayor de 567,7 µm, similar a la variedad *A. Angustifolia*. En la Fig. 4b se observa el tamaño y distribución de partículas de la fracción 0,5-2,0 mm con tamaño prevaleciente de 1909 µm.

En cuanto al color de las hojas, según [9] con valor promedio de 3,50, se consideran en edad madura y excelente para ser utilizadas. Estas hojas presentaron el menor número de espinas laterales (27 como promedio) que todas las demás variedades, esto debido a su menor tamaño relativo, la altura promedio de la espina apical (1,87 cm) si se corresponde con el reportado por [9] (≈ 2,0 cm).

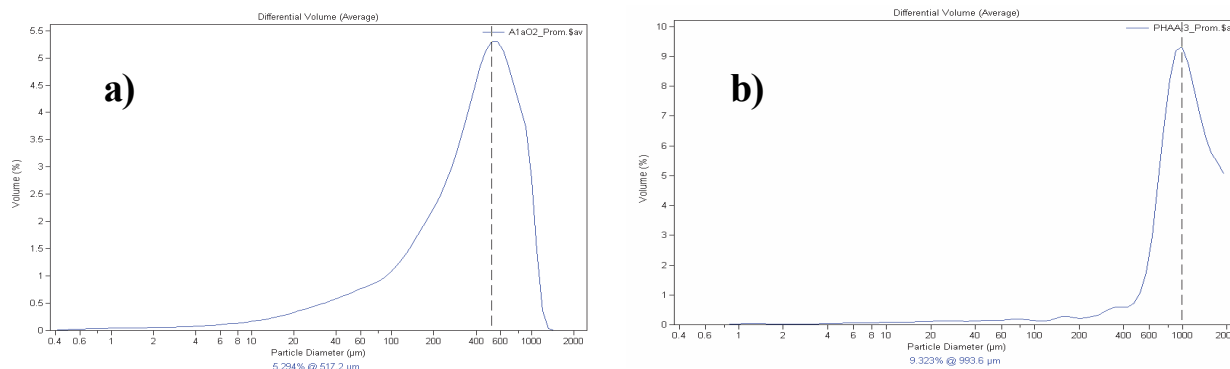


Figura 3. Distribución y tamaños de partículas secas de la a) fracción minoritaria (<0,5 mm) y b) fracción 0,5-2,0 mm de hojas de *Agave angustifolia* Haw., tomada en el municipio de Zimatlán, Oaxaca, México. Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Caracterización física de *Agave lechuguilla* Torr., tomada en el municipio de San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo.

Hoja	Hoja (n=10 hojas)					Roseta (n=6 plantas)			
	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)
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
Dif. Sig	SI	NO	SI	NO	SI	SI	SI	NO	NO
Ref [13]	45,00	4,00	0,80	90,00	144	0,63	97,92	60,00	90,00

Hoja	Humedad (%)	<0,5 mm (%)	0,5-1,0 mm (%)	>1,0mm (%)	Color (1-6)	Nº Espinas	Alt. E. apical (cm)
media	76,08	41,80	46,92	11,29	3,5	27,33	1,87
desv. Est.	1,230	6,527	8,266	7,299	0,0	2,540	0,227
%CV	1,62	15,62	17,62	64,65	0,0	9,29	12,16
t cal	15,638	-	10,744	-	0,0	-	1,858
Dif. Sig	SI	-	SI	-	NO	-	NO
Ref [13]	70,00	NR	75,00	NR	3,5	NR	2

Nota t tabulada: 2,26; cuando t cal < t tabulada no hay diferencias significativas, NR: No Reportado. Fuente: Elaboración propia

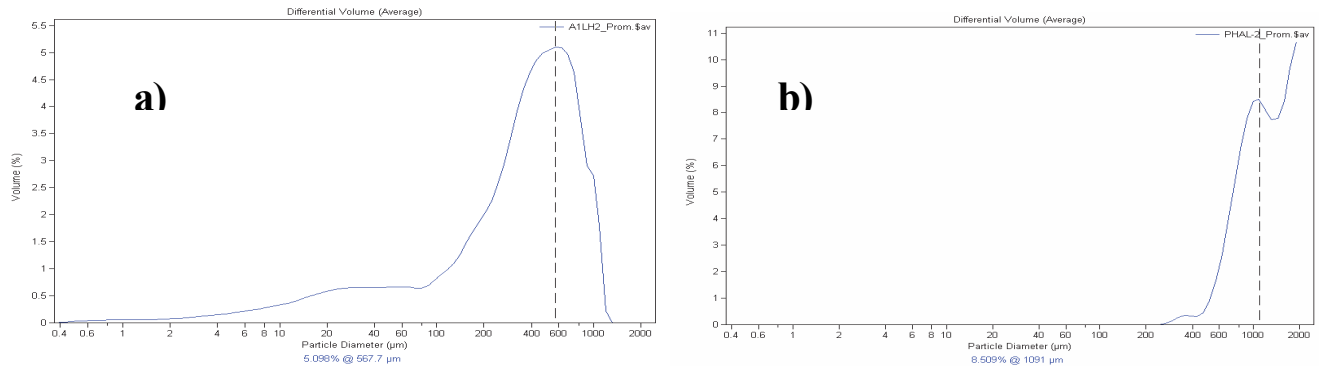


Figura 4. Distribución y tamaños de partículas secas de la a) fracción minoritaria (<0,5 mm) y b) fracción mayoritaria (0,5-2,0 mm) de hojas de Agave lechuguilla Torr., tomada en el Municipio de San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo, México. Fuente: Elaboración propia.

3.2. Microscopía electrónica de barrido (MEB)

En la Fig. 5 a-d se observa la morfología de hojas previa a la trituración, formadas por fibrillas de celulosa aglomeradas mediante hemicelulosa y lignina que actúan como cementantes, que deben ser eliminados durante el proceso de obtención de fibras o pulpa de celulosa. En la Fig. 6 a-d se aprecian las microfotografías de las fibras de hojas, posterior a la trituración en la fracción 0,5-2,0 mm. Se muestran conformaciones similares de estas fibras para las cuatro variedades. Los tamaños se corroboran con los evaluados en la etapa anterior.

3.3. Análisis térmicos

Por los análisis térmicos (TGA y DTGA) de las especies de agaves, se pudo apreciar cinco momentos de cambios o transformaciones (Fig. 7 y Fig. 8). 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, contenidos en la pared celular de las plantas. Según [14], la descomposición térmica de la madera, por análisis termogravimétrico, revela dos regímenes de descomposición, y que el pico en la zona de descomposición a la menor temperatura está 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.

Raveendran (1996), desarrolló estudios de descomposición de residuos agrícolas, distinguiendo cinco intervalos de temperatura en los cuales plantea que tiene lugar la descomposición de los diferentes componentes de la biomasa [15,16].

En todas las figuras se observa un primer cambio ($1 \Delta p$) que ocurre entre $47 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ y $120 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ para las cuatro especies. Este cambio se asocia a la pérdida por evaporación de humedad absorbida por las fibras, debido a su carácter hidrofílico [17]. Estas pérdidas de humedad, representaron entre 2,59-3,54% en masa, con pequeñas diferencias significativas. Estos resultan dos veces más bajos que los que reporta [18] en fibras de henequén (6%) y menor que 4.2% a lo reportado por [19] para fibras de Leguminosa unguiculata.

La humedad absorbida está correlacionada con la cantidad de lignina; atribuible a la presencia de los grupos carboxílicos

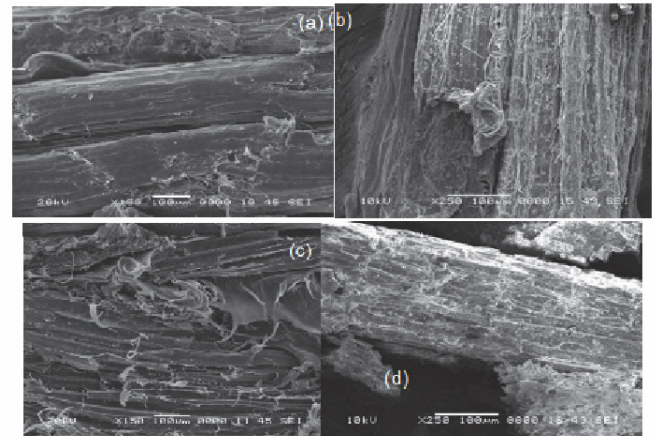


Figura 5. Microfotografías que muestran las morfologías de las fibras de hojas de agaves secadas, previo a la molienda. a) *A. angustifolia*, b) *A. salmiana*, c) *A. tequilana* y d) *A. lechuguilla* Fuente: Autores

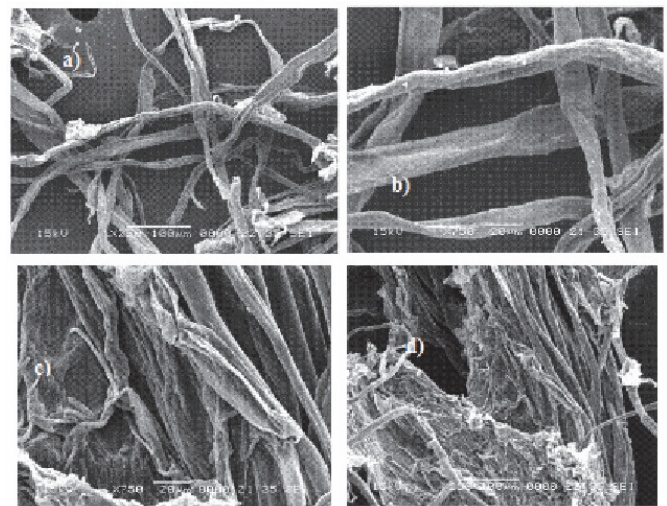


Figura 6. Microfotografías que muestran las morfologías de las fibras obtenidas por proceso de molienda y tamizado para las cuatro variedades de hojas de agaves en estudio a) *A. angustifolia*, b) *A. salmiana*, c) *A. tequilana* y d) *A. lechuguilla* Fuente: Autores

y carbonilos que se introducen en la lignina mediante el sistema enzimático de la lacasa, que inhibe los grupos hidroxilos e incrementan el carácter hidrofílico [20]. De ahí que en el proceso de pulpeo alcalino se mineralice la lignina haciéndola solubilizable.

El segundo cambio (2 Δ p), menos pronunciado que el anterior, se observó en el intervalo de temperatura de 140,1 \pm 5,7 °C a 177,1 \pm 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 [16,21,22].

Mientras que la celulosa es más cristalina, fuerte y resistente a la hidrólisis, la hemicelulosa tiene una estructura semicristalina al azar con poca fuerza, fácilmente hidrolizada por ácido diluido o base, así como por enzimas hemicelulasas innumerables.

Los xilanos son cuantitativamente dominantes en la fracción hemicelulósica. El 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 [23]. Por su estructura química, al poseer unidades de pentosas, la distribución 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 temperatura, se necesitará menor energía térmica para fragmentarlo [22].

La celulosa 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, 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 [22,23].

El tercer y principal cambio observado (3 Δ p) es el que representa la degradación de la celulosa presente en fibras vegetales de agaves, con una pérdida de masa entre 1.08-1.50 mg, representando entre 34.23-44.25%. Esta pérdida ocurre en un rango de temperatura de 250 \pm 8 °C y 360 \pm 3 °C. Este intervalo es prácticamente igual al que reportan [19] 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% [19]. Para residuos de hojas de tabaco se observó por los mismos autores dos zonas de temperaturas, una entre 227-320 °C y otra entre 320-460 °C. De la Fig. 8 se observa que para la celulosa pura el rango de temperatura fue de 302-368 °C lo cual corrobora lo anterior.

El cuarto cambio (4 Δ p) se observó entre temperaturas de 428 \pm 7 °C y 503 \pm 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 [11], quienes encontraron 2.61% en *A. salmiana*. Según Otero, citado por [23], los contenidos de lignina en agaves cultivados en Cuba (*A. fourcroydes*, Lem), pueden oscilar entre 3,1-9,9%; en este caso los valores resultaron más bajos. Por su parte [24] ha reportado en cascarilla y paja del cultivo de cebada contenidos de lignina mucho más altos (10,6-19,7%).

El quinto cambio observado (5 Δ p) entre 524 \pm 20 °C y 596 \pm 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).

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% [24], mucho más elevados que los que se han encontrado. Para especies maderables los contenidos reportados de lignina resultan más elevados (17-48%) [25].

3.4. Solubilidades y análisis químicos

Las hojas de los agaves constituyen residuos agrícolas del cultivo a pesar de su alto contenido de azúcares totales (AT) y a los grandes volúmenes que anualmente se generan [7,26]. Las hojas representan del 45 al 50% del peso total de la planta. Es en las hojas secadas se encuentran residuos que pueden ser solubles en agua fría y/o caliente u otros medios; atribuidos a la presencia de azúcares totales (AT), parte de la lignina, entre otros. Anualmente la industria tequilera demanda aproximadamente un millón de toneladas de piñas de *A. tequilana* Weber Var. azul, actividad que genera una cantidad similar en peso de hojas y que no son utilizadas en la actualidad [7,27].

Por su estructura química, los carbohidratos se dividen 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 y poseen propiedades reductoras. Las fructanas son polímeros de fructosa que presentan un solo residuo de glucosa en el extremo de la molécula; constituyen unos de los principales carbohidratos de las plantas [4,28], también se les conoce como polifruetosilsacarosos debido a que son polímeros sintetizados a partir de la molécula de sacarosa. Se caracterizan por pertenecer a la fracción solubilizable en agua caliente [29].

En la Tabla 6 se muestran los resultados de porcentajes de cenizas, grasas y proteínas, así como material solubilizable en agua caliente, expresados como %AT, material solubilizables en NaOH y CH₃CH₂-OH. Como se aprecia, las tres especies de hoja angosta mostraron similares contenidos de cenizas a diferencia de la especie *A. salmiana* de hoja ancha. Asociado a la posible 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 [4], lo que se atribuye a la toma de muestras en épocas de lluvia con mayor probabilidad de incrementar las sales disponibles de los suelos.

Los contenidos de grasas y aceites resultan ser valores relativamente bajos, siendo el menor de ellos el correspondiente a la especie *A. lechuguilla* (0.08 %). El valor más elevado correspondió a la variedad *A. salmiana* (1.85 %) y resulta similar al que reportan [6] en 1.82%. Peña y colaboradores [30], indican que la presencia de grasas en los 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 [31] que la especie *A. salmiana* es más rica en ácidos grasos.

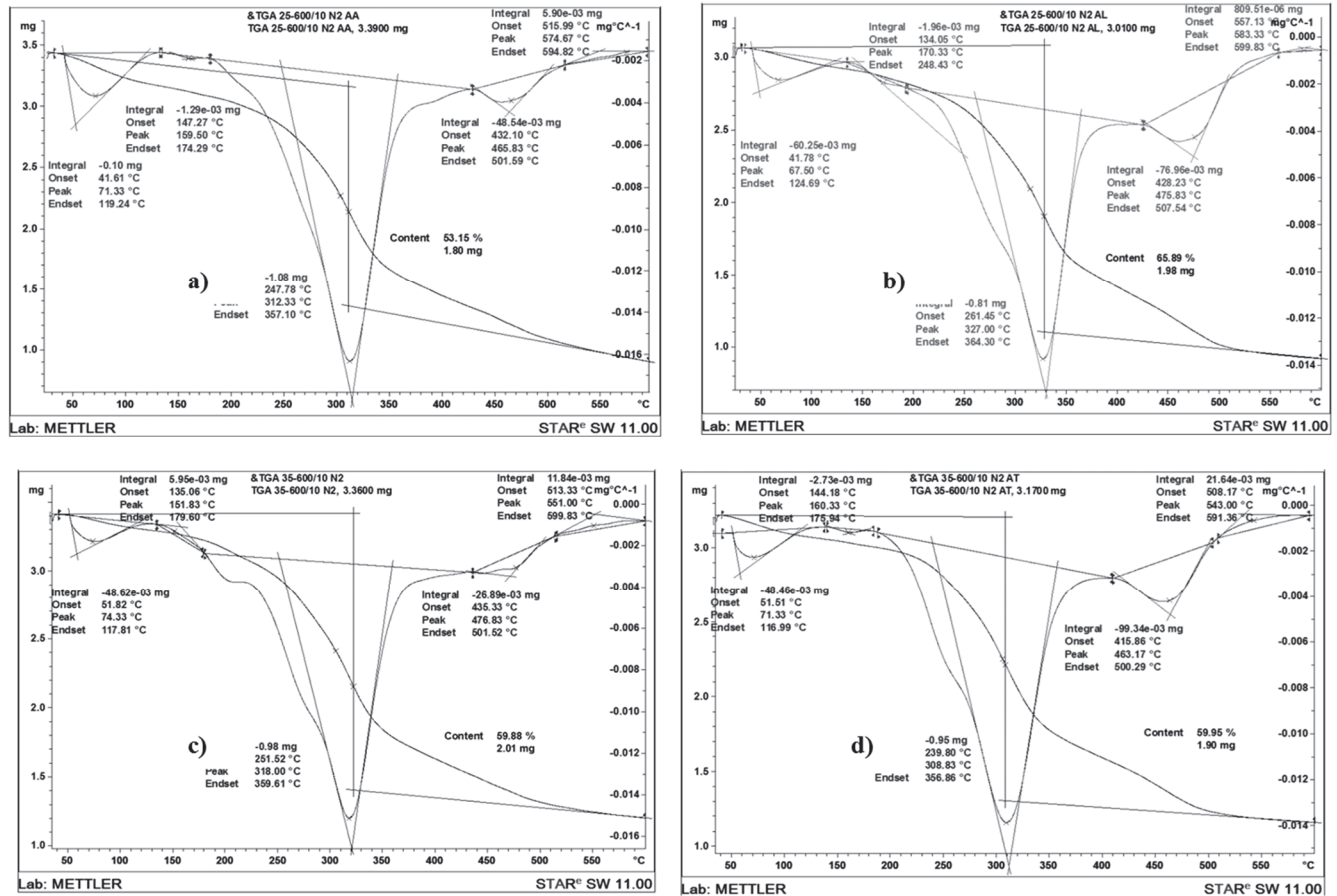


Figura 7. Análisis térmicos de las fibras de a) *A. angustifolia*, b) *A. lechuguilla*, c) *A. salmiana* y d) *A. tequilana*. Fuente: Elaboración propia

En cuanto a los contenidos en proteínas resultan ser menores de un 5% (entre 2-3%) lo cual no hace de interés a estas especies es este sentido. De nueva cuenta la variedad más pobre en proteínas fue *A. lechuguilla* (0,37 %). El valor encontrado de 3,32 % en *A. salmiana* es similar al que reporta [4] de 3,24 %.

Para los contenidos de solubilizables en agua caliente (AT), se realizó la curva de calibrado a partir de estándar de manosa ($y = 0,004x - 0,0091$, y con un regresión de 0,9964).

Los resultados variaron entre 17-21% de AT, siendo las especies más ricas la *A. tequilana* y la *A. salmiana*. 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 [32]. 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 [33], donde los autores

también indican que los resultados son dependientes de la edad del cultivo. Los contenidos solubles en solución 1% de NaOH y etanol-agua 1:1, se asocian a una fracción solubilizable de una parte de los contenidos de lignina presentes y que son integrantes de la fibra cruda total. 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

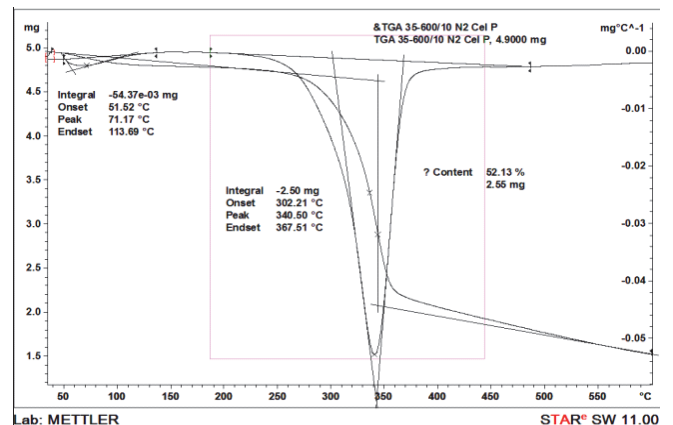


Figura 8. Análisis térmicos de Celulosa pura. Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.
Resultados de análisis proximales de las hojas de agaves en estudio

Especie: <i>Agave angustifolia</i> Haw (Mezcal) (Oaxaca)						
Hoja	Cenizas (%)	Grasas (%)	Proteína (%)	Sol. H ₂ O (% AT)	Sol. NaOH 1% (%)	Sol. CH ₃ -CH ₂ -OH:agua 1:1 (%)
media	10,09 ^a	0,697 ^a	2,289 ^a	18,741 ^a	2,055 ^b	0,344 ^b
desv. Est.	0,044	0,085	0,200	0,255	0,095	0,025
%CV	0,439	12,20	8,74	1,36	4,62	7,27
Especie: <i>Agave tequilana</i> Weber, Var. Azul (Tequila) (Jalisco)						
Hoja	Cenizas (%)	Grasas (%)	Proteína (%)	Sol. H ₂ O (% AT)	Sol. NaOH 1% (%)	Sol. CH ₃ -CH ₂ -OH:agua 1:1 (%)
media	10,08 ^a	0,97 ^b	2,64 ^b	20,630 ^b	3,021 ^c	0,322 ^b
desv. Est.	0,210	0,103	0,205	0,254	0,104	0,019
%CV	2,087	10,57	7,77	1,23	3,443	5,90
Especie: <i>Agave salmiana</i> B. Otto ex Salm-Dick (Pulque) (Hidalgo)						
Hoja	Cenizas (%)	Grasas (%)	Proteína (%)	Sol. H ₂ O (% AT)	Sol. NaOH 1% (%)	Sol. CH ₃ -CH ₂ -OH:agua 1:1 (%)
media	12,93 ^b	1,85 ^c	3,32 ^c	20,333 ^b	1,875 ^a	0,284 ^a
desv. Est.	0,321	0,115	0,186	0,232	0,112	0,029
%CV	2,49	6,22	5,60	1,14	5,97	10,21
Especie: <i>Agave lechuguilla</i> Torr. (fibras) (Hidalgo)						
Hoja	Cenizas (%)	Grasas (%)	Proteína (%)	Sol. H ₂ O (% AT)	Sol. NaOH 1% (%)	Sol. CH ₃ -CH ₂ -OH:agua 1:1 (%)
media	10,08 ^a	0,08 ^d	0,369 ^d	16,889 ^c	2,176 ^a	0,472 ^c
desv. Est.	0,181	0,013	0,067	0,328	0,176	0,069
%CV	1,79	16,25	18,16	1,94	8,09	14,62

Nota: Medias con letras diferentes en columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$) según Tuckey.

Fuente: Elaboración propia

deslignificación alcalina con NaOH; sin previa hidrólisis ácida, solo es removida solo 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 Ca(OH)₂) donde es eliminada parcialmente la lignina [34].

3.5. Análisis por FTIR

En la Fig. 9 se muestran los espectros FTIR de las cuatro especies en estudio y de la celulosa pura. Se observa un gran número de bandas, donde se superponen 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.

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 atribuye a la complejidad de los diversos tipos de interacciones intermoleculares e intramoleculares [34]. Se observan de manera importante bandas entre 3500-3390 cm⁻¹ asociadas a la tensión del enlace O-H 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 glucosídicos C-O-C en la zona de 1050 a 1200 cm⁻¹.

Las bandas de vibración entre 2915-2920 cm⁻¹ (simétrica) y 2848-2850 cm⁻¹ (asimétrica), así como las bandas en 1420-1425 cm⁻¹ y 1315-1320 cm⁻¹ correspondientes a la tensión del enlace H-C-H del grupo -CH₂ o -CH₃ se corresponden con lo reportado [38] 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. Es interesante distinguir la señal de absorción entre 875-895 cm⁻¹ como absorción más típica de la configuración estereoquímica β de las D-glucopiranosas, reportada para la celulosa como una banda débil [34]. La naturaleza de esta absorción del espectro IR de la celulosa y otros polisacáridos tiene un carácter complejo según señala Zbankovb en 1966, citado por [34]. En la celulosa natural esta banda es débil, pero su intensidad varía con el tratamiento a que se someta la misma; lo cual es un aspecto de seguimiento en el proceso de pulpeo, donde esta intensidad debe ir en aumento [34]. En efecto para la celulosa pura se puede apreciar dicha banda débil pero de carácter más intenso en relación a las especies en estudio.

4. Conclusiones

Los promedios de todas las especies en cuanto al tamaño de las partículas en las fracciones minoritarias (<0,5 mm), aquellas que pudieran resultar no beneficiosas al momento del pulpeo, se concluye que con tamaños entre 0,34-0,45 mm corresponden los porcentajes más elevados (25,2% y 41,8%) para las especies *A. lechuguilla* y *A. Salmiana*; ambas especies cultivadas en el estado de Hidalgo. Se corresponde con las especies de hoja más larga, más ancha y de mayor espesor (*A. salmiana*) y la más corta, más angosta y de menor espesor (*A. lechuguilla*). Corresponde igualmente a las dos especies con los porcentajes más bajos encontrados en celulosa (35,9% y 34,2%, respectivamente), según DTGA. Las especies *A. angustifolia* y *A. tequilana* fueron las de menores porcentaje en esta fracción <0,5 mm, y mayor porcentaje en partículas 0,5-2,0 mm lo cual representa una

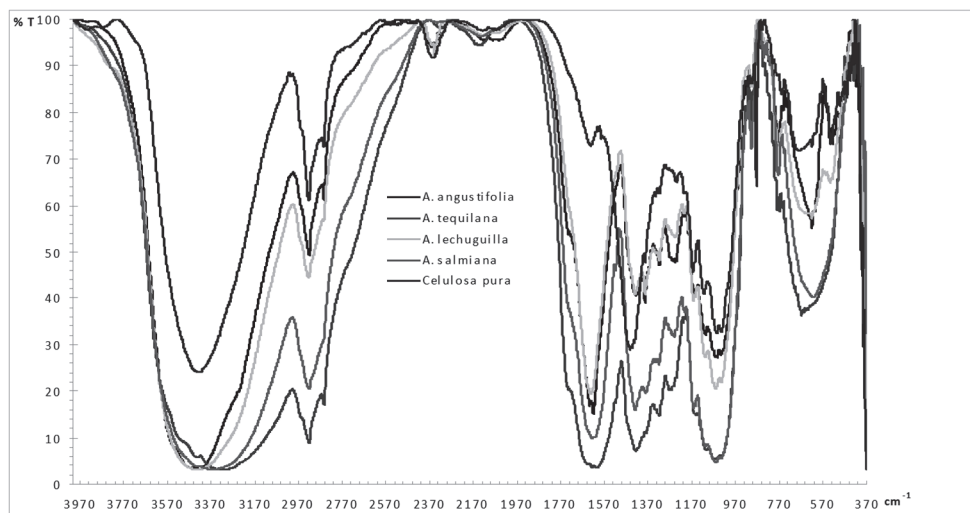


Figura 9. Espectros FTIR en pastillas de KBr de las hojas de agave secadas y trituradas.
Fuente: Elaboración propia

ventaja sobre las otras especies, concluyendo que éstas son las que presentan un óptimo tamaño de fibra para la elaboración de pulpa. Corresponde también a los mayores porcentajes de celulosa (44,3% y 36,8%) por DTGA.

Del análisis proximal, se evidencia que las dos especies definidas por análisis físicos como mejores para la obtención de pulpa de celulosa, presentan pequeñas diferencias significativas en contenidos de grasas, proteínas, material soluble en agua y en solución moderadamente alcalina y/o alcohólica. En las especies *A. salmiana* y *A. lechuguilla* las diferencias significativas resultan más marcadas.

Los espectros FTIR se presentan con fuerte solapamiento de las bandas, de modo que las diferencias espectrales entre diferentes especies no se encuentran bien definidas. Sin embargo se logran identificar señales propias que están presentes en la lignina, la hemicelulosa y la celulosa. Es importante distinguir la señal de absorción en 895 cm^{-1} como la absorción más típica de la configuración estereoquímica β de las D-glucopiranosas, reportada para la celulosa.

Referencias

- [1] Franco-Guarnizo, A., Martínez-Yépes, P.N. y Sánchez-Hoover, A., Pretratamientos de la celulosa y biomasa para la sacarificación. *Revista Scientia Et Technica*, [En línea]. 15(42), pp. 284-289, 2009. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/849/84916714053.pdf>.
- [2] Parra, L.A., del Villar, P. y Prieto, A., Extracción de fibras de agave para elaborar papel y artesanías. *Acta Universitaria*, [En línea]. 20(3), pp. 77-83, 2010. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=41618860011>
- [3] Ruiz-Corral, J.A., Requerimientos agroecológicos y potencial productivo del agave *Agave tequilana* Weber en México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. [En línea]. Centro de Investigación Regional del Pacífico Centro. 2007, pp. 11-36. Disponible en: http://www.inifapcirne.gob.mx/Revistas/Archivos/agave_final_baja%20resolucion.pdf
- [4] Vargas, C.G. Obtención de insumos de interés industrial a partir de las fructanas del agave mezcalero potosino (*A. salmiana*). Tesis, Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Investigaciones para el Desarrollo Integral Regional. CIIDIR-IPN-Michoacán, México, 2009.
- [5] Avila-Fernández, A., Galicia-Lagunas, N., Rodríguez-Alegria, M.E., Olvera, C. y López-Munguía, A., Production of functional oligosaccharides through limited acid hydrolysis of agave fructans. *Food Chem*, 129(2), pp. 380-386, 2011. DOI: 10.1016/J.FOODCHEM.2011.04.088.
- [6] Rojas-Urbe, E.H. y Narváez, P.C. Método de análisis de calidad del aceite durante el freído por inmersión para pequeñas y medianas empresas. *Ingeniería e Investigación* [En línea]. 31(1), pp. 83-92, 2011. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=64321170010>
- [7] Rosas-Mendoza, M.E. y Fernández-Muñoz, J.L., FTIR aplicada durante la deshidratación osmótica de mango Ataulfo (*Magnifera indica* L.). *Superficies y Vacío*, [En línea]. 25(1), pp. 8-13, 2012. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/sv/v25n1/v25n1a2.pdf>
- [8] Montañez, J.L., Victoria, J.C., Flores, R. and Vivar, M.A., Fermentation of *Agave tequilana* Weber Azul fructans by *Zymomonas mobilis* and *Saccharomyces cerevisiae* in the production of bioethanol. *Información Tecnológica*, 22(6), pp. 3-14, 2011. DOI: 10.4067/S0718-07642012000300009
- [9] Aguilar, R.N., Efecto del almacenamiento de bagazo de caña en las propiedades físicas de celulosa grado papel. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, [En línea]. 12(1), pp. 189-197, 2011. Disponible en: <http://www.redalyc.org/html/404/40419907008/>
- [10] Mora-López, J.L., Reyes-Agüero, J.A., Flores-Flores, J.L., Peña-Valdivia, C.B. y Aguirre-Rivera J.R., Variación morfológica y humanización de la sección *salmiana* del género *Agave*. *Agrocencia*, [En línea]. 45(4), 465-467, 2011. Disponible en: <http://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2011/may-jun/art-6.pdf>
- [11] Silos-Espino, H., Tovar-Robles, C.-L., González-Cortés, N., Méndez-Gallegos, S.J. y Rossel-Kipping, D., Estudio integral del maguey (*Agave salmiana*): Propagación y valor nutricional. XI Simposium-Taller Nacional y II Internacional de producción del nopal y maguey, [En línea]. pp. 75-82, 2011. Disponible en: <http://cvu.colpos.mx/cvu.aspx?idinv=120378>
- [12] Rodríguez-Macias, R., Alcantar-González, E.G., Iñiguez-Covarrubias, G., Zamora-Natera, F., García-López, P.M., Ruiz-López, M.A. y Salcedo-Pérez, E., Caracterización física y química de sustratos agrícolas a partir de bagazo de agave tequilero. *Interciencia*. [En línea]. 35(7), pp.515-520, 2010. Disponible en: http://www.interciencia.org/v35_07/515.pdf
- [13] Carrier, M., Loppinet-Serani, A., Denux, D., Lasnier, J.M., Hampichavant, F., Cansell, F. and Monier, C.A., Thermogravimetric analysis as a new method to determine the lignocellulosic composition of biomass. *Biomass and Bioenergy*, 35 (1), pp. 298-307, 2011. DOI: 10.1016/j.biombioe.2010.08.067

- [14] Manals, E., Pinedo, M. y Giralt, G., Análisis termogravimétrico y térmico diferencial de diferentes biomásas vegetales. *Tecnología Química*, XXXI(2), pp. 36-43, 2011.
- [15] Bolio, G.I., Valadez, A., Valeva, L. and Andreeva, A., Cellulose whiskers from agro-industrial banana wastes: Isolation and characterization. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, [Online]. 10(2), pp. 291-299, 2011. Available at: <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmiq/v10n2/v10n2a13.pdf>
- [16] Muñoz, M.F., Hidalgo, M.A. and Mina, J.H., Fique fiber an alternative for reinforced plastics. Influence of surface modification. *Biotechnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, [Online]. 12(2), pp. 60-70, 2014. Available at: <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v12n2/v12n2a07.pdf>
- [17] Quesada-González, O., Torres-García, E. y Alfonso-Martínez, F.E., Estudio de la degradación térmica del residuo de la naranja. *Revista Cubana de Química*, 23(1), pp. 25-33, 2011. DOI: 10.1016/j.rriit.2015.05.001
- [18] Tomás, M.E., Bioetanol de paja de trigo: Estrategias de integración de las etapas del proceso. Tesis, [En línea]. Departamento de Microbiología II, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Complutense de Madrid. Madrid, España, 2010. Disponible en: <http://eprints.ucm.es/10802/1/T31774.pdf>
- [19] Ayrlimis, N., Jarusombuti, S., Fueangvivat, V. and Bauchongkol, P., Effect of thermal-treatment of wood fibres on properties of flat-pressed wood plastic composites. *Polymer Degradation and Stability*, 96(5), pp. 818-822, 2011. DOI: 10.1016/j.polyimdegradstab.2011.02.005
- [20] Rojas-León A., Propuesta sustentable para la utilización de residuos agrícolas y urbanos: Fabricación de un eco-material compuesto. Tesis Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería. Universidad Autónoma de Hidalgo, Pachuca, México. 2014.
- [21] Vinnnet-Serrano, E. y Fajardo-Gutiérrez, O., Estrategia para el mejoramiento genético de Agaves en Cuba. Instituto de Investigaciones Hortícolas "Liliana Dimitrova" (IIHLD), [En línea]. 2009, pp. 37-43. Disponible en: http://www.utm.mx/edi_anteriores/temas037/N3.pdf
- [22] Betancourt, S., Gañán, P., Jiménez, A. y Cruz, L.J. Degradación térmica de fibras naturales procedentes de la calceta de plátano (estudio cinético). *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, [En línea]. 1(1), pp. 215-219, 2009. Disponible en: <http://www.rlmm.org/archivos/S01/N1/RLMMArt-09S01N1-p215.pdf>
- [23] Moya-Roque, R., Información comparativa de las 10 especies maderables evaluadas provenientes de plantación en Costa Rica. Ficha técnica 11. En: R. Moya R., et al., eds., *Tecnología de madera de plantaciones forestales: Fichas técnicas*. [En línea]. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* 7(18-19), pp. 181-219. 2010. Editorial Corporación Garro y Moya, (ISBN: 978-9968-9643-3-3). Disponible en: www.tec.ac.cr/revistaforestal.
- [24] Iñiguez, G., Acosta, N., Martínez, L. Parra, J. y González, O., Utilización de subproductos de la industria tequilera. Parte 7: Compostaje de bagazo de agave y vinazas tequileras. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, [En línea]. 21(1), pp. 37-50, 2005. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/370/37021105.pdf>
- [25] Narváez, Z.J. and Sánchez, T.F., Agaves as a raw material, recent technologies and applications. *Recent Patents on Biotechnology*, 3(3), pp. 1-7, 2009. DOI: 10.2174/187220809789389144
- [26] Chacón, A., Perspectivas agroindustriales actuales de los Oligofruetosacáridos (FOS). *Agronomía Mesoamericana*, [En línea]. 17(2), pp. 265-286, 2006. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/437/43717212.pdf>
- [27] Peña-Valdivia, C.B., Sánchez-Urdaneta, A.B., Aguirre, J.R.R., Trejo, C., Cárdenas, E. and Villegas, A., Temperature and mechanical scarification on seed germination of "maguey" (*Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck). *Seed Sci. Technol*, 34(1), pp. 47-56, 2006. DOI: 10.15258/sst.2006.34.1.06
- [28] 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. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/620/62060106.pdf>
- [29] Saengthongpinit, W. and Sajjaanantakul, T., Influence of harvest time and storage temperature on characteristics of inulin from Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) tubers. *Postharvest biology and Technology*, 37(1), pp. 93-100, 2005. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2005.03.004
- [30] Ramírez-Cortina, C.R., Alonso-Gutiérrez, M.S. y Rigal, L., Valorización de residuos agroindustriales del tequila para alimentación de Rumiantes. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, [En línea]. 18(3), pp. 449-457, 2012. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/629/62926234015.pdf>
- [31] Bermello, A., Díaz, D., Martínez, R., Quintana, G., Mieres, G. y Leal, J.A., 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*, [En línea]. 42(3), pp. 106-111, 2008. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/2231/223120667015.pdf>
- [32] Contreras, J.Q.H., Trujillo, P.H.A., Arias, O.G., Pérez, C.J.L. y Delgado, F.E., Espectroscopia ATR-FTIR de celulosa: Aspecto instrumental y tratamiento matemático de espectros. e-Gnosis, [En línea]. 8(9), pp. 1-13, 2010. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/730/73013006008.pdf>
- [33] Gutiérrez-Urbe, A.J., Santos-Zea, L., Leal-Díaz, A.M. and Cortes-Ceballos, E., Agave (*Agave spp.*) and its Traditional Products as a Source of Bioactive Compounds. *Current Bioactive Compounds*, 8(3), pp. 218-231, 2012. DOI: 10.2174/157340712802762410
- [34] Vega-Baudrit J., Sibaja, M.B. Nikolaeva, S.N. y Rivera, A.A., Síntesis y caracterización de celulosa amorfa a partir de triacetato de celulosa. *Rev. Soc. Quím. Perú*. [En línea]. 80(1), pp. 45-50, 2014. Disponible en: www.redalyc.org/pdf/896/89640816003.pdf.

E. Jiménez-Muñoz, Estudiante del Doctorado en Ciencias Ambientales por la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México.
ORCID: 0000-0001-7883-0600.

F. Prieto-García, Dr. en Química por la Universidad de Valladolid, España.
ORCID: 0000-0001-8878-3908.

J. Prieto-Méndez, Dra. en Ciencias Ambientales por la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México.
ORCID: 0000-0001-5705-1704.

OA. Acevedo-Sandoval, Dr. en Química por la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México
ORCID: 0000-0003-0475-7003.

R. Rodríguez-Laguna, Dr. en Ciencias. Manejo de Recursos Naturales por la Universidad Autónoma de Nuevo León, México.
ORCID: 0000-0002-0867-008X.