

CORRELACIÓN ENTRE PROPIEDADES ANATÓMICAS, RESISTENCIA A FLEXIÓN ESTÁTICA Y ENERGÍA REQUERIDA PARA EL CORTE DE LA CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum officinarum* L.)

CORRELATIONS AMONG ANATOMIC PROPERTIES, BENDING RESISTANCE AND ENERGY REQUIRED TO CUT SUGAR CANE (*Saccharum officinarum* L.)

Hugo Alberto González Sánchez¹; Alejandro Toro Betancur²; Fernando Álvarez Mejía³; Elkin Alonso Cortés Marín⁴

Resumen. La microestructura, estructura anatómica, la resistencia a la flexión y la energía requerida durante el corte de los tallos de tres variedades de caña de azúcar cultivadas en el Valle del Cauca (Colombia), fueron estudiados con el propósito de adquirir información útil para el desarrollo de cuchillas para corte de esta especie. Las labores de caracterización microestructural y anatómica se apoyaron en las técnicas de microscopía óptica y electrónica de barrido. Las propiedades mecánicas se determinaron adaptando algunas normas ASTM para maderas, mientras que la energía al corte se evaluó usando un péndulo de impacto tipo Charpy modificado. En los tallos de las tres variedades estudiadas se observaron diferentes distribuciones y dimensiones geométricas de las fibras y se verificó la presencia de partículas de sílice. Se presentó en general mayor requerimiento de energía específica al corte en los entrenudos que en los nudos y un menor consumo específico de energía al corte con las cuchillas con ángulo de afilado de 20°. Se establecieron relaciones entre la microestructura de los tallos, comportamiento a la flexión y al corte, destacándose la relación proporcional entre el área transversal efectiva de fibra (ATEF) y la energía específica al corte, así como entre el coeficiente de flexibilidad y el módulo de elasticidad en flexión.

Palabras claves: Tallos de caña de azúcar, propiedades mecánicas, energía al corte, características anatómicas, microestructura.

Abstract. The microstructure, anatomical structure, bending resistance and the energy required to cut stems of three varieties of sugar cane cultivated in the Valle del Cauca (Colombia), were studied in order to have useful data for the development of cutting blades. Microstructural and anatomical characterization tasks were performed by optical microscopy (OM), and scanning electron microscopy (SEM). The physical and mechanical properties were determined after adaptation of ASTM standards (which were developed for wood), while the consumption of energy during cutting was evaluated by using a modified Charpy type impact pendulum. The fibers and silica particles showed different geometry and distribution in the stems of the three studied varieties, and a relation was established between the microstructure of the stems and the energy required to cut them in the modified Charpy pendulum. Generally speaking, cutting the internodes required higher specific energy than cutting the nodes, and the use of blades with cutting angle of 20° led to lower levels of energy consumption. Also, a relation of proportionality between the effective cross-sectional area of fibers (ATEF) and the specific energy consumed in cutting, as well as between the flexibility coefficient and the modulus of elasticity in bending were found.

Key words: Sugar cane stems, mechanical properties, cutting energy, anatomical characteristics, microstructure.

Se registran pocas investigaciones sobre las propiedades de los tallos de caña de azúcar; lo anterior posiblemente porque este material no tiene aplicación estructural. Pero los tallos de caña de azúcar en el proceso de corte por parte de las cosechadoras sufren gran cantidad de esfuerzos, por lo que el estudio de las propiedades físicas, mecánicas y anatómicas de los tallos es fundamental para optimizar los componentes de las máquinas

cosechadoras sometidos a diferentes acciones de tipo tribológico (González, 2006).

Según Perafán (2005) la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) está compuesta por una parte sólida llamada fibra y una parte líquida, el jugo, que contiene agua y sacarosa. En ambas partes también se encuentran otras sustancias en cantidades muy pequeñas. Van Dillewijn, (1975) afirma que la

¹ Profesor Asistente. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Ciencias Agropecuarias. A.A. 1779. Medellín, Colombia. <hagonzal@unal.edu.co>.

² Profesor Asociado. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Minas. A.A. 1027. Medellín, Colombia. <aotoro@unal.edu.co>.

³ Profesor Titular. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Ciencias Agropecuarias. A.A. 1779. Medellín, Colombia. <falvarez@unalmed.edu.co>.

⁴ Profesor Titular. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Ciencias Agropecuarias. A.A. 1779. Medellín, Colombia. <ecortes@unalmed.edu.co>.

Recibido: Febrero 1 de 2008; aceptado: Agosto 29 de 2008.

Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín. 61(2): 4709-4720. 2008

sección transversal del entrenudo del tallo de caña de azúcar muestra, en orden consecutivo, desde fuera hacia dentro, la epidermis, una corteza estrecha o cáscara y los haces vasculares embebidos en parénquima o tejido básico. En la epidermis del tallo generalmente se alternan entre sí dos tipos de células: las células largas, y las células cortas. Las células largas constituyen la mayor parte del tejido epidérmico. Las células cortas son de dos tipos: células de corcho y células de sílice, las células de corcho pueden presentarse aisladas o en grupos de dos o tres. Sin embargo, la célula de corcho generalmente está combinada con una célula de sílice (Van Dillewijn, 1975). Según Paul *et al.* 1982 en las plantas existe alrededor de 1% de sustancias minerales.

El esclerénquima contribuye a sostener y proteger los tallos jóvenes. El esclerénquima está formado por

células o fibras. Cada célula es una fibra. Las fibras están situadas de preferencia en la periferia del tallo, frecuentemente mueren a la madurez quedando solo sus paredes (Weisz y Fuller, 1969).

Las características geométricas y mecánicas de las células de fibras son determinantes de las propiedades globales de los tallos; Leonard et al. 1988, asociaron el coeficiente de flexibilidad de los tallos con las dimensiones de las fibras (diámetro, espesor de la pared celular y lumen). En la Tabla 1 se observa la clasificación de las fibras con base en las recomendaciones de Tomolang y Wangaard (1961), citados por Villaseñor (2000), que con valores medios del coeficiente de flexibilidad (en porcentaje) clasifican las fibras en cinco categorías (muy gruesa, gruesa, media, delgada y muy delgada).

Tabla 1. Clasificación de las fibras según resultados del coeficiente de flexibilidad (L/D) (Tomolang y Wangaard 1961).

Rango de L/D (%)	Espesor de la pared
Menor de 30	Muy gruesa
30 – 50	Gruesa
50 – 65	Media
65 – 80	Delgada
Mayor de 80	Muy delgada

Los objetivos de esta investigación fueron caracterizar la microestructura de los tallos de tres variedades de caña de azúcar y establecer relaciones entre algunas características microestructurales de los tallos y la energía al corte. Uno de los aportes destacables de esta investigación es el haber relacionado algunas propiedades mecánicas con las dimensiones medias de las fibras para tres variedades de caña de azúcar.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestreo y selección de materiales de ensayo.

El muestreo se hizo en terrenos pertenecientes al Ingenio Manuelita (Palmira, Colombia). Se tomaron muestras de caña de las variedades Cenicaña Colombia (CC 8592), Venezuela (V 7151) y Puerto Rico (PR 61632). Los tallos fueron cortados hasta una altura de 1,20 m., por ser una región con mayor tiempo de crecimiento y desarrollo.

Caracterización anatómica y microestructural de los tallos. Para las observaciones anatómicas (identificación y caracterización de células de fibras, vasos conductores, parénquima, etc.) e identificación y cuantificación de sílice en los tallos, se empleó un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM 5910LV. También se efectuaron microanálisis químicos, usando espectrómetro EDS acoplado al microscopio mencionado. La medición de las células de fibra se llevaron a cabo utilizando un microscopio óptico marca Nikon AFX-II. Con base en las mediciones medias de las fibras (diámetro, espesor de la pared celular y diámetro del lumen) se determinó el área transversal efectiva de fibra (ATEF) y el coeficiente de flexibilidad (CF) para las tres variedades, de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$ATEF = \frac{\pi(D^2 - L^2)}{4} \quad \text{y} \quad CF = \frac{L}{D}$$

Donde,

L = Diámetro del lumen de la fibra

D = Diámetro de la fibra

Flexión estática (Norma ASTM D143-94 2003).

Se cortaron tallos en estado verde con una longitud de 660 mm, los cuales se sometieron a ensayos de flexión estática en la máquina universal Tinius Olsen con aplicación de carga central; la distancia entre apoyos fue 600 mm y velocidad de carga de $0,025 \text{ mms}^{-1}$. En cada ensayo se determinó la carga máxima y se reportó el contenido de humedad (Norma ASTM D4442-92 2003); con base en las curvas esfuerzo vs. deformación se determinó el módulo de elasticidad. Para la variedad V 7151 la longitud de la probeta fue de 410 mm y la distancia entre apoyos de 350 mm, debido a que esta variedad presentó de manera sistemática un

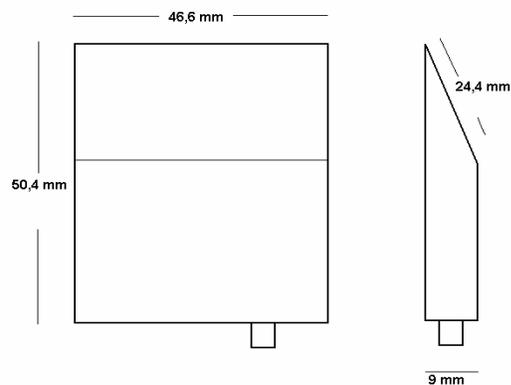
diámetro medio más bajo que las otras dos variedades estudiadas.

Medición de la energía requerida para el corte en péndulo de impacto.

La energía requerida para cortar los tallos se evaluó usando un péndulo Charpy modificado marca Amsler con martillo de 15 kg. La herramienta de impacto convencional se sustituyó por cuchillas de acero AISI 15B30 con 2 diferentes ángulos de corte: 20° y 25° (ver Figura 1). La velocidad media de la herramienta de corte fue aproximadamente $5,8 \text{ ms}^{-1}$. En cada tallo se experimentó en el nudo y en el entrenudo. En cada variedad se llevaron a cabo como mínimo 12 experimentos para cada variable.



A.



B.

Figura 1. A. Péndulo Charpy modificado utilizado para la medición de la energía requerida para cortar tallos de caña, B. Cuchilla adaptada al péndulo para la realización de los experimentos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Microestructura de los tallos. La Figura 2 muestra la microestructura típica de una sección

transversal y una longitudinal de un tallo de caña de azúcar, en las que se aprecian las células de fibras, los vasos conductores y células de parénquima (ver en el Anexo 1 otras imágenes de la microestructura).

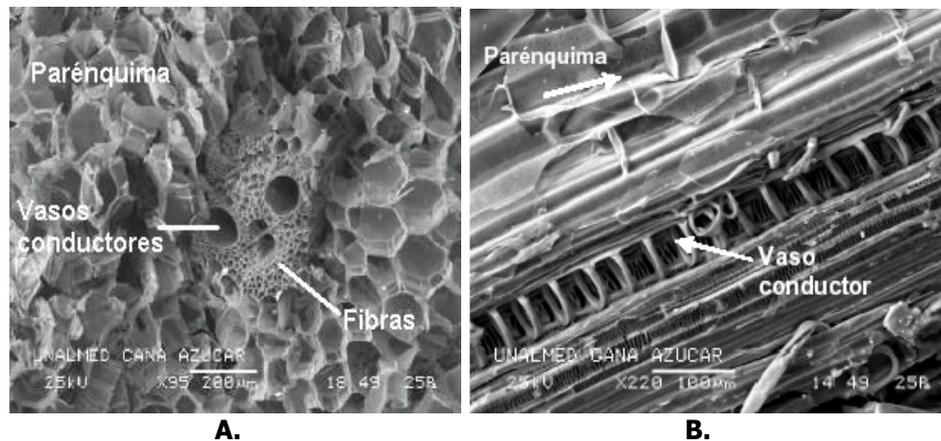


Figura 2. Imágenes SEM de un tallo de caña de azúcar. A. Microestructura típica de una sección transversal y B. Longitudinal.

Obsérvese la Figura 3, donde en una célula de fibra se diferencia el espesor de la pared celular (W), el diámetro de lumen (L) y el diámetro total de la célula (D). En Tabla 2 se presentan los resultados medios de las mediciones anatómicas de las fibras.

Con un nivel de confianza del 95%, no se presentaron diferencias estadísticamente significativas en el espesor de la pared celular de las tres variedades; pero en la variedad CC 8592 el diámetro de las fibras y el

diámetro del lumen son significativamente mayores que en las otras dos variedades. Por otra parte, no se presentaron diferencias significativas entre la V 7151 y PR 61632. De acuerdo a la Tabla 1 las fibras de las tres variedades estudiadas están en el rango de clasificación de fibras de paredes gruesas, Porres y Valladares (1979), citados por Villaseñor (2000), afirman que las fibras de paredes gruesas tienden a colapsarse menos, son menos flexibles y presentan una resistencia a la tensión mayor.

Tabla 2. Dimensiones medias de las fibras en la microestructura típica de un tallo de caña de azúcar.

Variedades	W (μm)	L (μm)	D (μm)	L/D (%)	ATEF (μm^2)
CC 8592	11,51	10,82	22,33	48	299,6
PR 61632	10,54	8,32	18,86	44	225,0
V 7151	11,02	7,00	18,03	39	216,8

Donde,

W = Espesor de la pared celular (μm)

L = Diámetro del lumen de la fibra (μm)

D = Diámetro de la fibra (μm)

L/D = Relación lumen – diámetro (coeficiente de flexibilidad).

$ATEF = \text{Área Transversal Efectiva de Fibra } (\mu\text{m}^2) = \pi (D^2 - L^2) / 4$

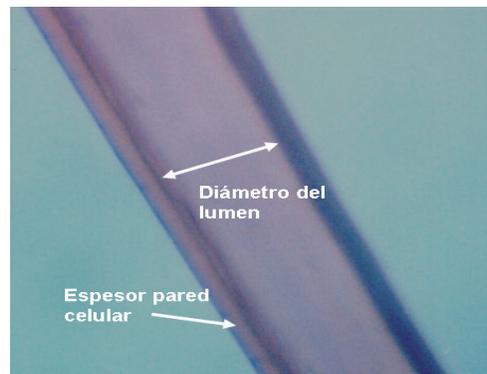


Figura 3. Célula de fibra en tallos de la variedad de caña de azúcar CC 8592 (100x, microscopio óptico).

Cantidad y distribución de fibras. Las células de fibras se concentran en dos regiones principalmente: a) en la corteza, y b) alrededor de los vasos conductores, formando estructuras aproximadamente cilíndricas que se extienden longitudinalmente por el tallo (paquetes de fibras). En la Figura 4 se presentan cortes transversales de las tres variedades

estudiadas. Los resultados muestran que la distribución de fibras en las variedades CC 8592 y V 7151 es bastante similar en términos del número de paquetes o agrupamientos de fibras, mientras que en la PR 61632 se observa un menor número de dichos agrupamientos.

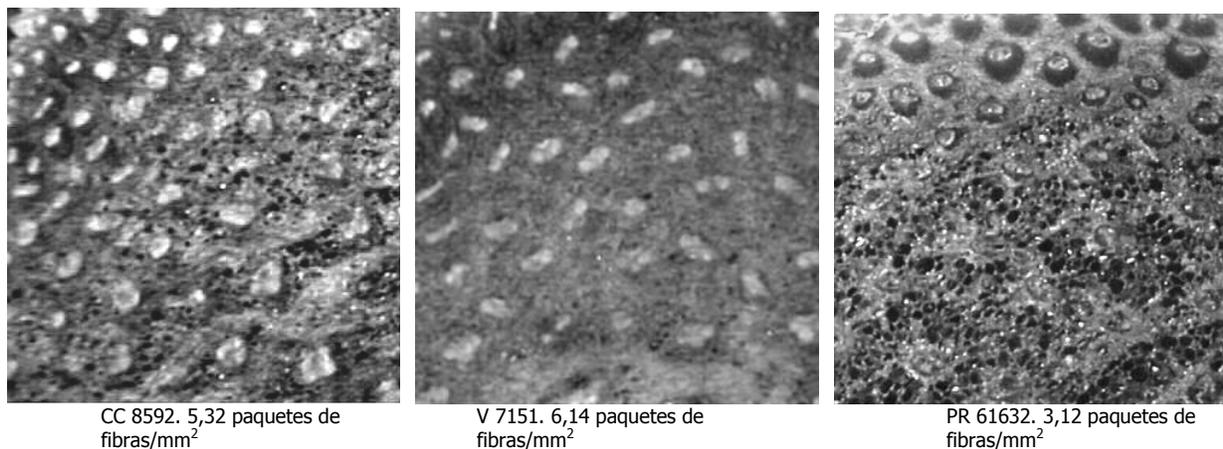


Figura 4. Distribución de las fibras en la estructura del tallo en tres variedades de caña de azúcar, sometidos a cortes transversales.

Presencia de sílice en los tallos. Las Figuras 5, 6 y 7 muestran el aspecto típico de la corteza y de una sección longitudinal interna de un tallo de caña de azúcar, observado en un microscopio electrónico de barrido. En la corteza se pueden identificar partículas de sílice con tamaño medio del orden de 10 μm y distribución bastante homogénea (Figura 5), cuya composición (alto silicio y oxígeno) se

verificó mediante microanálisis EDS como se indica en la Figura 6. En el corte longitudinal no se registraron contenidos de sílice en ninguna de las regiones analizadas (Figura 7), lo que indica que este constituyente se localiza preferencialmente en la corteza.

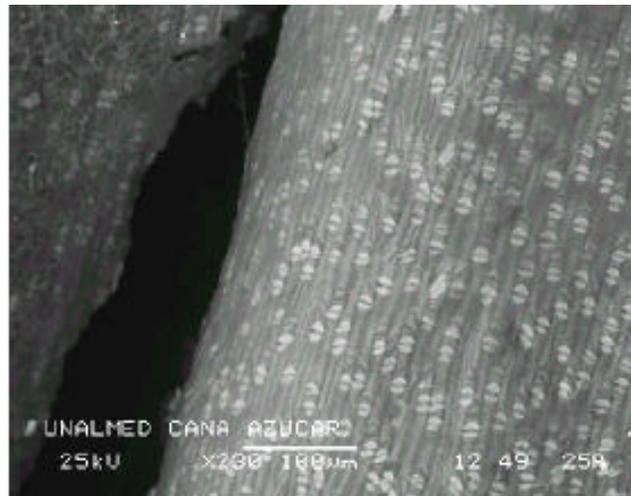


Figura 5. Aspecto típico de la corteza del tallo en caña de azúcar, con partículas de sílice sobre la superficie.

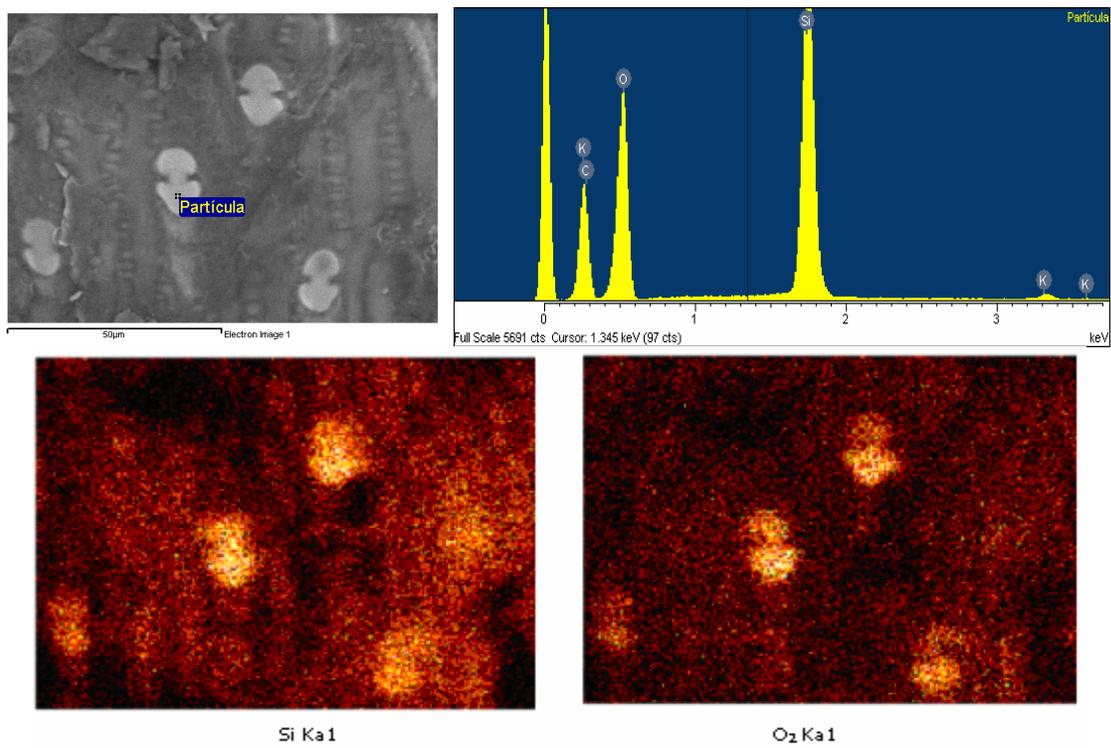


Figura 6. Análisis EDS de una región de la corteza del tallo de caña de azúcar: distribución de Si y O₂ en la región de la corteza.

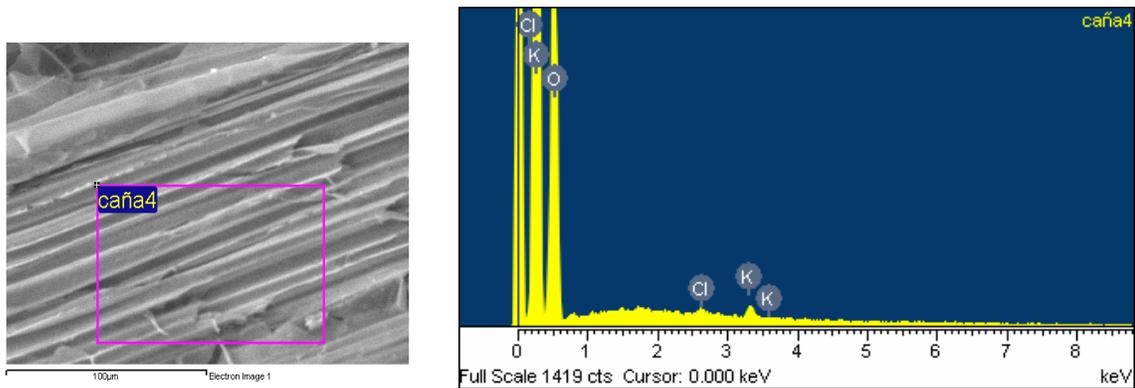


Figura 7. Corte longitudinal interno del tallo de caña de azúcar que muestra las células de parénquima y un análisis EDS sobre un área de las mismas, donde no se encontró presencia de sílice.

En la Figura 8 se muestran las cortezas de las tres variedades. Obsérvese las partículas de sílice y la variación apreciable que se presenta en su cantidad relativa: mientras la variedad V 7151 registra

aproximadamente 430 partículas/mm², la variedad PR 61632 la supera en más del doble (900 partículas/mm²).

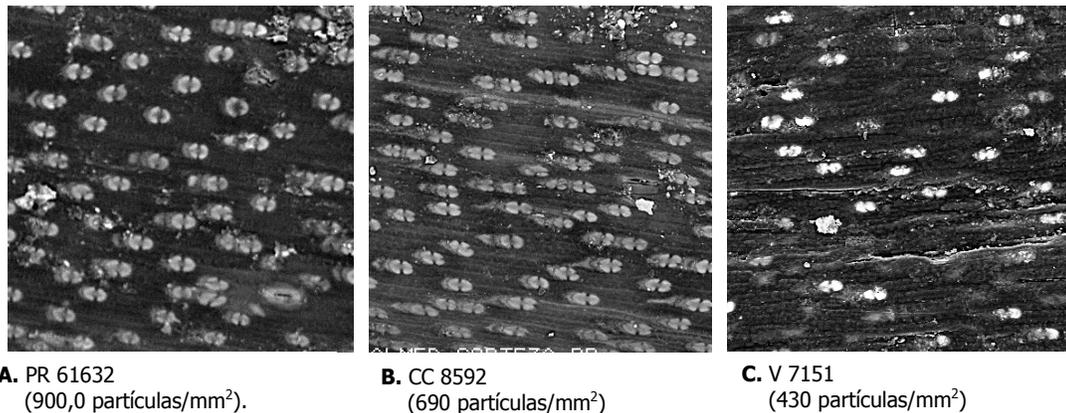


Figura 8. A., B. y C. Cortezas de las variedades de caña de azúcar PR 61632, CC 8592 y V 7151 respectivamente, en un área de 300 µm x 300 µm.

Flexión estática. El análisis de los valores medios de los resultados de flexión estática (Tabla 3), indican que se presentaron diferencias estadísticamente significativas al comparar la variedad V 7151 (con los menores valores) con las variedades CC 8592 y PR 61632 sólo en los resultados de deflexión (F) y módulo de elasticidad

(MOEf), y no se presentaron diferencias al comparar la CC 8592 y PR 61632. Es importante recordar que las condiciones de los ensayos de la V 7151 fueron diferentes en longitud de probetas y luz entre apoyos, dadas las características anatómicas propias de esta variedad.

Tabla 3. Valores para las pruebas de flexión estática en tallos de caña de azúcar.

Variedad	F (cm)	ELPf (kgf cm ⁻²)	Emf (kgf cm ⁻²)	MOEf (kgf cm ⁻²)	C.H. bs (%)
CC 8592	0,56	56,87	207,50	19005,57	235,4
V 7151	0,38	46,67	171,82	10203,24	272,5
PR 61632	0,67	57,00	206,08	16604,04	283,3

Donde,

F (deflexión máxima en el límite proporcional)

ELPf (esfuerzo unitario en el límite de proporcionalidad)

Emf (esfuerzo unitario máximo)

MOEf (módulo de elasticidad)

C.H. bs (contenido de humedad base seca).

Energía al corte. En las Tablas 4 a 6 se presentan los resultados medios de la energía al corte (kgf-m) y específica (kgf-m cm⁻²) de las tres variedades de caña. La energía específica al corte se calculó como la energía al corte dividida por el área transversal del tallo.

Tabla 4. Energía total y específica al corte, para la variedad de caña de azúcar CC 8592 (diámetro medio de tallos: 3,07 cm)

Lugar de corte	Energía total al corte (kgf-m)		Energía específica al corte (kgf-m cm ⁻²)	
	Ángulo de corte 20°	Ángulo de corte 25°	Ángulo de corte 20°	Ángulo de corte 25°
Entrenudo	6,39	8,33	0,93	1,26
Nudo	7,27	10,22	0,87	1,27

Tabla 5. Energía total y específica al corte, para la variedad de caña de azúcar Venezuela 7151 (diámetro medio de tallos: 2,98 cm).

Lugar de corte	Energía total de corte (kgf-m)		Energía específica al corte (kgf-m cm ⁻²)	
	Ángulo de corte 20°	Ángulo de corte 25°	Ángulo de corte 20°	Ángulo de corte 25°
Entrenudo	5,06	7,83	0,87	1,17
Nudo	3,95	6,68	0,61	0,87

Tabla 6. Energía total y específica al corte, para la variedad de caña de azúcar PR 61632 (diámetro medio de tallos: 3,22 cm).

Lugar de corte	Energía total al corte (kgf-m)		Energía específica al corte (kgf-m cm ⁻²)	
	Ángulo de corte 20°	Ángulo de corte 25°	Ángulo de corte 20°	Ángulo de corte 25°
Entrenudo	8,52	7,73	0,91	1,15
Nudo	7,47	7,73	0,71	1,00

Efecto del área transversal efectiva de fibra (ATEF) sobre la energía específica al corte. La Figura 9 indica que mayores valores de ATEF llevan a mayores valores de energía específica al corte, independientemente del ángulo de filo de las cuchillas. Este resultado demuestra la importancia de las características anatómicas de las fibras en su respuesta frente a acciones de corte. Por otro lado, las dimensiones de las fibras juegan un papel importante en la resistencia a flexión de los tallos.

En la Figura 10 se observan diferencias evidentes en el coeficientes de flexibilidad (L/D), donde la variedad CC 8592 presenta los mayores valores, lo cual se explica por las dimensiones mayores del diámetro del lumen de sus fibras en relación con el de las otras dos variedades. Al comparar estos valores con los de resistencia a flexión, se encuentra una relación de proporcionalidad entre el coeficiente de flexibilidad (L/D) y el módulo de elasticidad en flexión (MOEF).

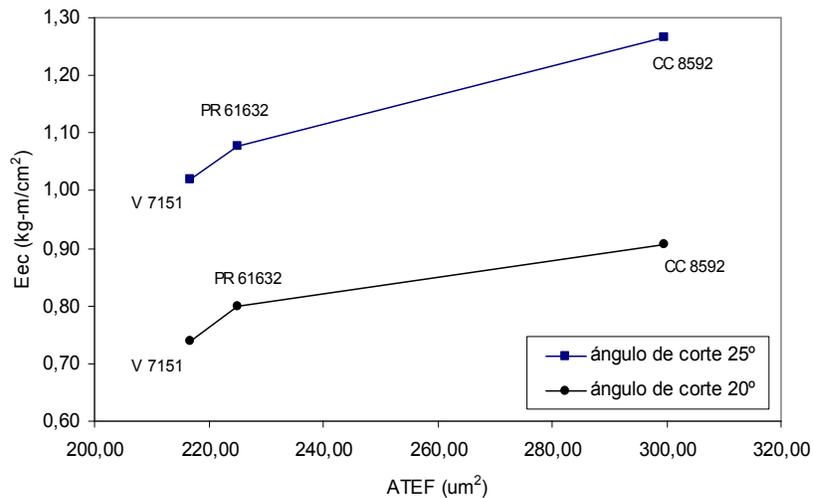


Figura 9. Variación de la energía específica al corte (Eec) con el área transversal efectiva de fibra (ATEF), en el tallo de tres variedades de caña de azúcar y dos ángulos de corte de la cuchilla (20° y 25°).

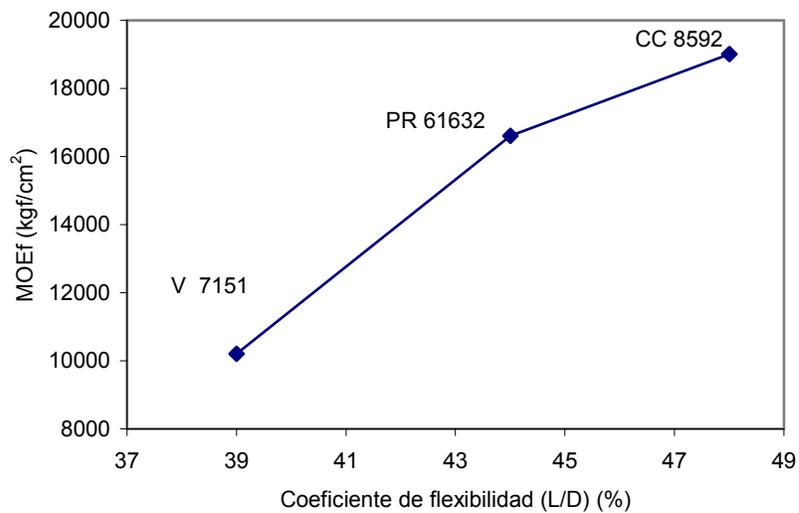


Figura 10. Variación del módulo de elasticidad en flexión (MOEF) y el coeficiente de flexibilidad (L/D), en el tallo de tres variedades de caña de azúcar.

CONCLUSIONES

Las tres variedades de caña de azúcar estudiadas microestructuralmente, poseen fibras de paredes gruesas; al confrontar las dimensiones medias de las fibras, no se presentaron diferencias estadísticas significativas en el espesor de la pared celular de las tres variedades; pero el diámetro de las fibras y diámetro del lumen de la variedad CC 8592 fue mayor con respecto a las variedades PR 61632 y V 7151.

La variedad PR 61632 registró menor cantidad de paquetes de fibras por unidad de área transversal, respecto a las variedades CC 8592 y V 7151 (con cantidades de paquetes de fibras similares).

En la corteza de las tres variedades se observó distribución uniforme de partículas de sílice en la corteza; se presentaron diferencias significativas al medir la cantidad de partículas de sílice por unidad de área, los mayores registros se obtuvieron en la PR 61632, luego en la CC 8592 y los menores registros en la V 7151.

En general los nudos presentaron mayor demanda de energía total al corte que los entrenudos, pero menor energía específica al corte que éstos. Esto se explica porque los nudos tienen una mayor área transversal, pero también son microestructuralmente más discontinuos. En general el diámetro de los tallos presentó el siguiente resultado de mayor a menor: PR 61632, CC 8592 y V 7151.

El área transversal efectiva de fibra (ATEF), valor medio calculado para las tres variedades estudiadas, presentó un incremento proporcional con respecto a la energía específica al corte, para los dos ángulos de cuchilla (20° y 25°).

El incremento del coeficiente de flexibilidad fue proporcional al módulo de elasticidad a la flexión. Donde la variedad CC 8592 registró los valores mayores, seguida de la PR 61632 y con los menores valores la V 7151.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Colciencias, contrato No. 484-2003, por el apoyo recibido para desarrollar esta

investigación; igualmente a las empresas Ingenio Manuelita S.A. y Bonem S.A.

BIBLIOGRAFÍA

American National Standards Institute. 2003. Standard test methods for small clear specimens of timber. D 143-94. West Conshohocken: ASTM. 31 p.

American National Standards Institute. 2003. Standard test methods for direct moisture content measurement of wood and wood-base materials. D4442 – 92. West Conshohocken: ASTM. 6 p.

González, H. 2006. Análisis del corte de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) con cuchillas metálicas. Tesis Magíster en Ingeniería de Materiales y Procesos. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 120 p.

Leonard, M., N. Duthil, B. Hernández e I. Hernández. 1988. Caracterización anatómica morfológica de cinco variedades de caña. pp. 11-14. En: Cuba Azúcar. (abr.- jun.).

Paul, C., D. Paul y E. Ramírez. 1982. Morfología de la caña de azúcar. En: Cuba - Azúcar. (abr. - Jun.); p. 42 – 45.

Perafán, F. 2005. La caña de azúcar: Descripción general y particularidades en Colombia. En: Azúcar de caña, <http://www.perafan.com/ea02cana.html>. Consulta: Junio 2005.

Porres, C., y J. Valladares. 1979. Producción de pulpa y papel con materias primas autóctonas centroamericanas. Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial. Guatemala. 72 p. Citado por: Villaseñor, J. y J. Rutiaga. La madera de *Casuarina equisetifolia* L., química e índices de calidad de pulpa. 2000. Madera y Bosques. 6 (1): 29-40. En: <http://www.ecologia.edu.mx/publicaciones/myb/resúmenes/6.1/villasenor%20y%20rutiaga%202000r.pdf>. Consulta: Mayo 2005.

Tomolang, F.N. and F.F. Wangaard. 1961. Relationships between hardwood fiber characteristics and pulp properties. Tappi 44(3): 201-216. Citado por Villaseñor, J. y Rutiaga, J. La madera de casuarina equisetifolia L., química e índices de

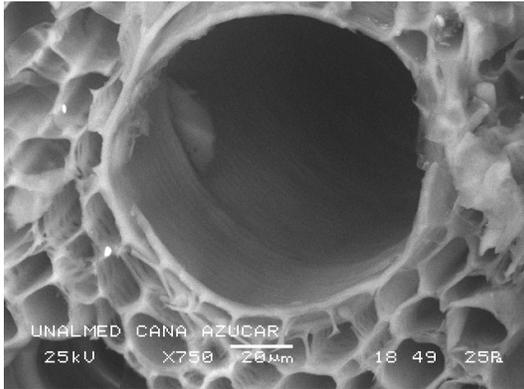
Correlación entre propiedades anatómicas...

calidad de pulpa. En: Madera y Bosques. 6 (1): 29–40, <http://www.ecologia.edu.mx/publicaciones/myb/resúmenes/6.1/villasenor%20y%20rutiaga%202000r.pdf>. Consulta: Mayo 2005.

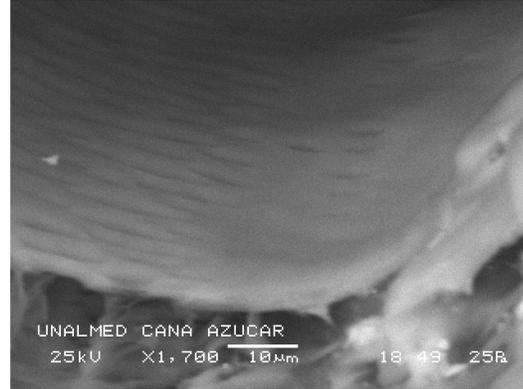
Van Dillewijn, C. 1975. Botánica de la caña de azúcar. pp. 10-23. Editorial Pueblo y Educación. La Habana, Cuba.

Weisz, P., y M. Fuller. 1969. Tratado de botánica. pp. 112-113. Compañía Editorial Continental S.A. México, D.F.

Anexo 1. Algunas observaciones microestructurales en los tallos de caña de azúcar.

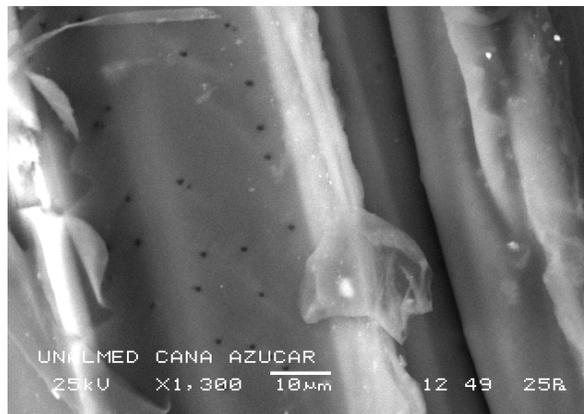


A.



B.

Corte transversal tallos de caña de azúcar: A. Vaso conductor rodeado de células de fibra. B. Paredes internas del vaso conductor, obsérvese las puntaduras por los cuales salen e ingresan sustancias.



Corte longitudinal de las células de parénquima en el tallo de caña de azúcar, donde se observan las puntaduras (puntos negros).