

# Determinación de las propiedades físico-mecánicas de la caña de azúcar como objeto de la extracción de su jugo para la producción de panela

## *Determination of the physical-mechanical properties on the sugar cane process juice extraction for the panela production*

M.Sc. Alexander Díaz<sup>1</sup>, Dr.C. Ciro E. Iglesias Coronel<sup>II</sup>

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica de Pereira (UTP), Pereira, Colombia.

<sup>II</sup> Universidad Agraria de La Habana (UNAH), San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

**RESUMEN.** La presente investigación reporta los resultados de la determinación de las propiedades físico-mecánicas de la caña de azúcar involucradas en el proceso de extracción de jugo de caña para la fabricación de panela. Mediante un ensayo de compresión uniaxial se determinan experimentalmente, los coeficientes de ensanchamiento lateral, resistencia y plasticidad. Estos se obtienen en función de los diferentes lugares geométricos, biológicos y diámetros de los tallos de caña, para tres variedades de caña. Requeridos en un modelo matemático para la determinación de la energía requerida en el proceso de extracción de jugo.

**Palabras clave:** caña de azúcar, compresión uniaxial, extracción de jugo, propiedades físico-mecánicas, compresión de caña, panela.

**ABSTRACT.** This paper refers to the results of the determination of the physical-mechanical properties on the sugar cane process juice extraction for the panela production. By means of compression test obtain the coefficients of lateral expansion strength and plasticity. These are obtained in function of the different geometric biological places and diameters on the cane stalks for three cane varieties.

**Keywords:** sugar cane, uniaxial compression, juice extraction, physic-mechanical properties, compression cane, panela.

## INTRODUCCIÓN

En el mundo cerca de treinta países producen panela (Brasil, Costa Rica, Guatemala, México, Venezuela, India, Pakistán, etc.). Colombia es el segundo productor mundial después de la India, con un volumen que representa más del 9% de la producción mundial registrada por la FAO (Rodríguez, 2004). La producción de panela es una de las principales actividades agrícolas de la economía nacional, entre otras razones por su participación significativa en el Producto Interno Bruto (PIB) agrícola, fuente alimenticia de alta capacidad calorífica para los sectores más pobres de la población.

La mayoría de las actividades de producción de panela se realizan dentro de un esquema de economía campesina en unidades de pequeña escala, con alta utilización de mano de obra y bajo nivel tecnológico. El método de extracción de jugo

usado en Colombia es el de la compresión, a través de molinos de rodillos cilíndricos. Estos equipos generalmente son construidos como copias de algunos que fueron introducidos al país en siglos pasados; los que a través del tiempo han sufrido modificaciones, que no siempre han conducido a mejor su desempeño. En la literatura científico-técnica consultada (Cimpa, 1991; Hugot, 1986; Reins, 2006.) no se tiene reporte de una expresión que a partir de las propiedades físico-mecánicas de la caña sin preparar (caña sin desmenuzando, ni desfibrado previo), se determine la demanda energética y la solicitud de carga en los diferentes elementos del molino.

Procedimientos para la determinación de las propiedades físico-mecánicas de la caña preparada, con el objetivo de ser empleadas en los modelos matemáticos desarrollados y comprobados experimentalmente han sido realizadas por algunos autores tales como Bullock

(1956), Crawford (1959), Murry (1962), Salomon (1966), Shann (1960). En la última década se ha profundizado en la investigación experimental y modelación de los procesos de compresión de caña preparada para la obtención de las propiedades físico-mecánicas, como parte de las investigaciones realizadas por: Britton (2003), Kannapiran (2003), Lougram (2002), Plaza (2002). A partir del proyecto de la investigación Fundamentación de los Parámetros Racionales de Diseño y Regímenes de Trabajo de un Molino de Caña, para la Elaboración de Panela en la República de Colombia, se fundamentó un modelo matemático que a partir de la determinación de las propiedades físico-mecánicas de los tallos de caña se determina la energía y carga requerida en dicho proceso. El presente trabajo reporta los describe los procedimientos utilizados y los resultados obtenidos en la determinación de las propiedades físico-mecánicas de los tallos de caña involucrados en el dicho modelo.

**MÉTODOS**

**Análisis teórico del proceso de compresión**

Al comprimir una muestra de material experimental, se obtiene que para cada incremento de la fuerza de compresión (*F*), la dimensión inicial (*H*) disminuye en un valor ( $\Delta h$ ) y la dimensión lateral (*l*) aumenta en un valor ( $\Delta l$ ) se toma que la longitud inicial (*b*) no varía su dimensión. Figura 1.

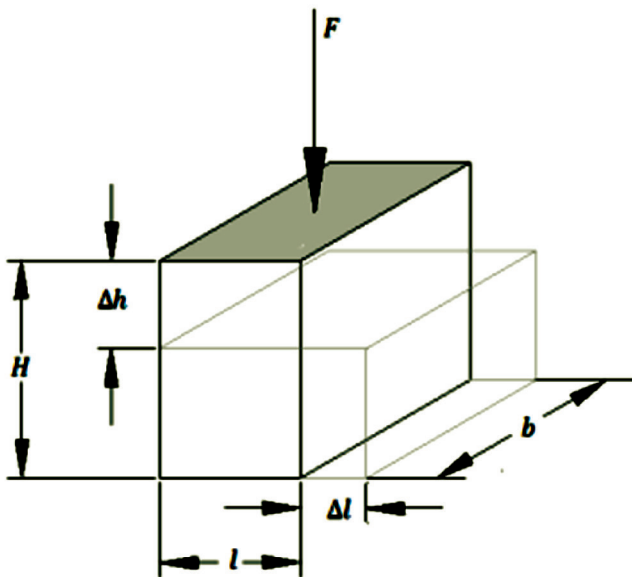


FIGURA 1. Esquema de compresión no confinada.

A partir de la relación existente entre la deformación unitaria lateral  $\epsilon_l = \Delta l / l$  y la deformación unitaria en altura  $\epsilon_h = \Delta h / H$ , se obtiene el coeficiente de ensanchamiento lateral ( $\epsilon$ ), Ecuación 1.

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta h}{H} \tag{1}$$

La valoración de los resultados de fuerza (*F*) y deformación ( $\Delta h$ ), permite determinar la dependencia de la presión (*P*) material (Ecuación 2), en función de su cambio volumétrico unitario ( $\Delta V / V_0$ ) (Ecuación 3), por medio de la Ecuación 4. El cambio volumétrico unitario relaciona la variación volumétrica de la muestra ( $\Delta V$ ), con el volumen inicial de la misma ( $V_0$ ) (Díaz, 2012).

$$P = \frac{F}{l \cdot b \cdot \left(1 + \epsilon \frac{\Delta h}{h}\right)} \tag{2}$$

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\Delta h}{h} \left(1 - \epsilon \left(1 - \frac{\Delta h}{h}\right)\right) \tag{3}$$

$$P = Ke \frac{n \Delta V}{V_0} \tag{4}$$

El coeficientes de resistencia a la compresión (*K*) tiene las mismas unidades de la presión (*P*) y el coeficiente de plasticidad (*n*) es adimensional. La adimensionalidad de la variación volumétrica unitaria permite la generalización de dichos coeficientes.

**Toma de muestras**

Las muestras de caña se tomaron en la finca la Restrepo del corregimiento San Antonio del Chami municipio de Mistrato, departamento de Risaralda. La toma de estas se realizó por el método de la diagonal al azar para evitar el efecto de borde. Se recolectaron muestras de cañas en óptimo estado de madurez con fines de producción de panela. Las investigaciones se realizaron en tres variedades de caña (POJ 28-78, CO 421, CC 84-75) dada la importancia de estas, en la producción de panela. Recolectados los tallos para la obtención de las muestras se dividieron en tres partes de acuerdo al lugar geométrico (LG) en parte superior (st), media (mt) e inferior (it) de los tallos. Posteriormente estos tres grupos se clasificaron de acuerdo al diámetro de los tallos en diámetro mayor (Dma), medio (Dme) y menor (Dmi), (Tabla1). Realizadas estas clasificaciones se procedió a cortar muestras de caña a una longitud de 60 mm de acuerdo al lugar biológico en muestras de nudo (N) y entrenudo (E).

TABLA 1. Diámetros de las muestras de caña por variedades y lugar geométrico

LG	Variedad								
	POJ 28-78			CO 421			CC 84-75		
Dma, mm	Dme, mm	Dmi, mm	Dma, mm	Dme, mm	Dmi, mm	Dma, mm	Dme, mm	Dmi, mm	Dma, mm
st	38	32	25	38	33	28	28	25	21
mt	39	34	28	37	32	28	28	25	23
it	39	35	31	40	35	30	30	26	24

Se obtuvieron 18 tipos de probetas en función del lugar geométrico, el diámetro y el lugar biológico; de cada tipo de muestras se cortaron tres probetas, para un total de 54 probetas por variedad (P), las cuales se clasificaron de acuerdo al lugar geométrico en tres grupos de 18 muestras, de acuerdo al diámetro en tres grupos de 18 muestras y de acuerdo al lugar biológico en dos grupos de 27 muestras. Lo anterior permitió obtener una representación para investigar la compartición de los diferentes lugares del tallo de caña que intervienen en las propiedades físico-mecánicas, lo que permite un análisis complejo del objeto estudiado.

**Determinación de los coeficientes de ensanchamiento lateral, resistencia y plasticidad.**

Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Resistencia

de Materiales de la Universidad Tecnológica de Pereira, República de Colombia. Para lo cual se empleó la Máquina Universal de Ensayos, marca IBERTEST Modelo UMIB-600-SW, con capacidad de 560 kN,

La compresión uniaxial de los tallos de caña se realizó a una velocidad de 1,67 mm/s, con desplazamientos constantes ( $\Delta h$ ) de 2 mm y detenimientos de un segundo. La compresión se realizó con un aditamento conformado por dos placas ranuras de paso 4 mm y ángulo de la ranura de 60° (Figura 2a). La carga se aplicó en dirección perpendicular a la fibra de las muestra de caña y estas se ubicaron paralelas a las ranuras. Para determinar el valor de las deformaciones ( $\Delta l$ ) ( $\Delta h$ ), se imprimió en un acetato una malla con cuadrículas de un milímetro (Figura 2b), dispuesta en la parte frontal de las placas de compresión.

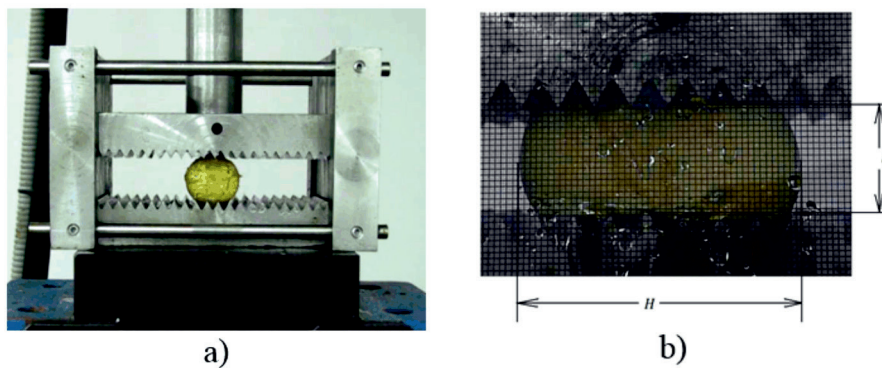


FIGURA 2. Prueba de compresión de los tallos de caña. a). Aditamento ranurado; b). Medición de la deformación lateral.

De cada ensayo se obtuvo un registro filmico lo que permitió, determinar los valores iniciales  $H$ , mm;  $l$ , mm. Para cada valor de carga aplicada  $F$ ,  $H$ ; se determinaron las deformaciones laterales  $\Delta l$ , mm en altura  $\Delta h$ , mm de las muestras. A partir de la obtención de los valores anteriores se calculan las deformaciones unitarias  $\epsilon_h, \epsilon_l$  y se registran gráficamente contra la fuerza aplicada ( $F$ ) se trazaron sendas líneas de aproximación para cada conjunto de puntos y se determinaron las pendientes de las mismas. El valor del coeficiente de ensanchamiento lateral ( $\epsilon$ ),

se determinó a través de la Ecuación 1. Los valores obtenidos se procesaron en una hoja de cálculo de Excel, Figura 3a. Con los valores de fuerza  $F$ ,  $H$ ; y deformación  $\Delta h$ , mm resultado de la ensayo, los valores iniciales  $H$ , mm;  $l$ , mm y  $b$ , mm y el coeficiente de expansión lateral ( $\epsilon$ ), se determinaron los valores de la presión  $P$ , MPa y el cambio volumétrico unitario ( $\Delta V/V_0$ ); a partir de las Ecuaciones (2) y (3), se obtuvo la dependencia  $P$  vs ( $\Delta V/V_0$ ), con el cual se determinan los valores de los coeficientes  $K$  y  $n$ , Figura 3b.

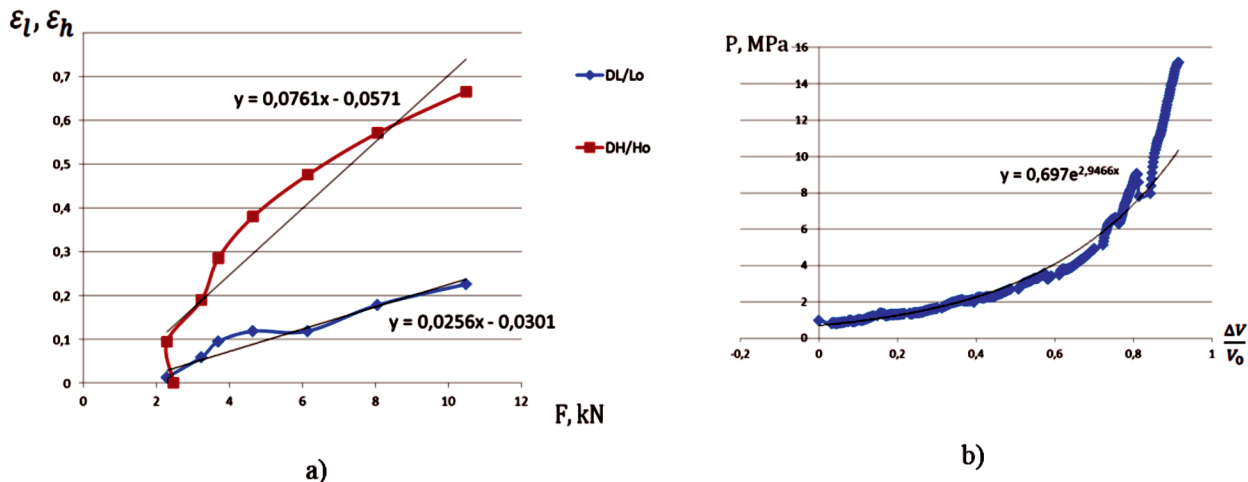


Figura 3. Determinación de los coeficientes a compresión. a). Determinación del coeficiente ( $\epsilon$ ); b). Determinación de los coeficientes ( $K$ ) y ( $n$ ).

### Análisis estadístico

Los resultados se procesaron para su análisis a través del programa Excel. Determinándose la media aritmética, desviación estándar (S), error estándar (ES), coeficiente de variación (CV), prueba de comparación de la media y análisis de varianza, para un nivel de confianza del 95% y indicador (*p*-valor) del nivel de significación.

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### Coefficiente de ensanchamiento lateral

En la Tabla 2 se aprecian los valores del coeficiente de ensanchamiento lateral ( $\epsilon$ ), resultando mayor en la variedad POJ 28-78 con un valor medio de 0,41, menor en la variedad CC 84-75 con un valor medio de 0,26 y la variedad C 421 un valor medio de 0,35.

**TABLA 2. Coeficiente de ensanchamiento lateral de los tallos de caña**

Estad.	Variedad																										
	POJ 28-78									CO421									CC 84-75								
	P	EN	N	st	mt	it	Dma	Dme	Dmi	P	EN	N	st	mt	it	Dma	Dme	Dmi	P	EN	N	st	mt	it	Dma	Dme	Dmi
	0,41	0,41	0,40	0,40	0,42	0,40	0,44	0,41	0,37	0,35	0,35	0,35	0,40	0,32	0,33	0,38	0,35	0,32	0,26	0,26	0,26	0,25	0,28	0,26	0,25	0,27	0,27
S	0,07	0,07	0,07	0,09	0,07	0,05	0,08	0,06	0,06	0,06	0,07	0,05	0,04	0,07	0,03	0,05	0,05	0,06	0,04	0,04	0,04	0,03	0,05	0,03	0,03	0,05	0,04
ES	0,02	0,02	0,02	0,04	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,01	0,03	0,02	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01
CV	0,17	0,17	0,18	0,22	0,17	0,12	0,18	0,14	0,15	0,17	0,19	0,14	0,11	0,20	0,10	0,13	0,15	0,19	0,16	0,15	0,17	0,14	0,19	0,10	0,14	0,18	0,13

Los resultados de comparación de la media y análisis de varianza para el coeficiente ensanchamiento lateral ( $\epsilon$ ); de las tres variedades investigadas, indica que los valores medios en los diferentes tipos de muestra, no revelan diferencias estadísticamente significativas con respecto al valor medio de la población (P), con valores de indicador (p-valor) del nivel de significación mayores a 0,05. Entre las tres variedades investigadas existen diferencias estadísticamente significativas, con valores para el nivel de significación menores a 0,05.

#### Coefficiente de resistencia a la compresión

En la Tabla 3 se muestran los valores del coeficiente de resistencia (*K*), resultando mayor en la variedad CC 84-75 con un valor medio de 1,22, la variedad POJ 28-78 con un valor medio de 1,06 y la variedad C 421 un valor medio de 1,10.

**TABLA 3. Coeficiente de resistencia, de los tallos de caña**

Estad.	Variedad																										
	POJ 28-78									CO421									CC 84-75								
	P	EN	N	st	mt	it	Dma	Dme	Dmi	P	EN	N	st	mt	it	Dma	Dme	Dmi	P	EN	N	st	mt	it	Dma	Dme	Dmi
	1,03	0,77	1,28	1,09	0,95	1,04	0,88	0,99	1,21	1,10	0,82	1,38	1,21	1,15	0,94	0,96	1,07	1,28	1,22	0,93	1,52	1,29	1,24	1,13	1,24	1,16	1,27
S	0,32	0,20	0,20	0,30	0,31	0,36	0,22	0,35	0,31	0,39	0,30	0,25	0,39	0,35	0,39	0,30	0,33	0,47	0,40	0,34	0,19	0,35	0,42	0,44	0,44	0,37	0,41
ES	0,07	0,06	0,07	0,12	0,13	0,15	0,09	0,14	0,13	0,09	0,11	0,09	0,16	0,14	0,16	0,12	0,13	0,19	0,09	0,11	0,06	0,14	0,17	0,18	0,18	0,15	0,17
CV	0,31	0,26	0,16	0,28	0,32	0,35	0,25	0,35	0,26	0,35	0,36	0,18	0,33	0,30	0,42	0,31	0,31	0,37	0,33	0,37	0,13	0,27	0,34	0,39	0,36	0,32	0,33

Los resultados de comparación de la media y análisis de varianza del coeficiente de resistencia (*k*) para las tres variedades investigadas, indica que los valores medios en los diferentes tipos de muestra, no revelan diferencias estadísticamente significativas con respecto al valor medio de la población (P), con valores del indicador (p-valor) del nivel de significación mayores a 0,05, excepto para las muestra de entre nudo (EN) y nudo (N) donde existen diferencias estadísticamente significativas con valores del indicador (p-valor) del nivel de significación menores a 0,05. Solo existen diferencias estadísticamente significativas entre las variedades POJ 28-78 y CC 84-75, con valores para el nivel de significación menores a 0,05.

#### Coefficiente de plasticidad

Como se aprecia en la Tabla 4, la variedad CO 421 tiene el mayor valor del coeficiente de plasticidad con una media de 2,73, la variedad CC 84-75 con una media de 2,20 y la variedad POJ 28-78 un valor medio de 2,52.

**Tabla 4. Coeficiente de plasticidad , de los tallos de caña**

Estad.	Variedad																										
	POJ 28-78									CO421									CC 84-75								
	P	EN	N	st	mt	it	Dma	Dme	Dmi	P	EN	N	st	mt	it	Dma	Dme	Dmi	P	EN	N	st	mt	it	Dma	Dme	Dmi
	2,52	2,58	2,46	2,55	2,50	2,51	2,74	2,57	2,26	2,73	2,80	2,66	2,67	2,66	2,86	2,82	2,70	2,67	2,20	2,19	2,21	2,18	2,14	2,28	2,20	2,17	2,24
S	0,41	0,30	0,50	0,61	0,32	0,23	0,56	0,25	0,19	0,23	0,22	0,22	0,21	0,25	0,18	0,16	0,22	0,28	0,20	0,22	0,18	0,16	0,24	0,17	0,20	0,20	0,20
ES	0,09	0,10	0,16	0,25	0,13	0,10	0,23	0,10	0,08	0,05	0,08	0,08	0,09	0,10	0,07	0,07	0,09	0,11	0,05	0,07	0,06	0,07	0,10	0,07	0,08	0,08	0,08
CV	0,16	0,12	0,20	0,24	0,13	0,09	0,20	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,06	0,06	0,08	0,10	0,09	0,10	0,08	0,08	0,11	0,07	0,09	0,09	0,09

El análisis de comparación de la media y análisis de varianza, indican que los valores medios del coeficiente de plasticidad ( $n$ ) en los diferentes tipos de muestra, no revelan diferencias estadísticamente significativas con respecto al valor medio de la población (P), con valores del indicador (p-valor) con niveles de significación mayores a 0,05. Entre las variedades investigadas existen diferencias significativas con valores del indicador (p-valor) del nivel de significación menores a 0,05.

## CONCLUSIONES

- Los procedimientos y aditamentos diseñados y construidos para la determinación del coeficiente objeto de estudio permitieron la determinación de las propiedades físico-mecánicas objeto de la investigación, con resultados satisfactorios

a pesar de no encontrarse referentes en la determinación de dichos coeficientes.

- Los coeficientes determinados mostraron diferencias estadísticamente significativas entre variedades, lo que indica que cada variedad de caña posee características propias.
- Estadísticamente se evidenció que los coeficientes de ensanchamiento lateral ( $\epsilon$ ) de plasticidad ( $n$ ) son constantes para los diferentes lugares geométricos, biológicos y diámetros de los tallos de caña, para las tres variedades investigadas.
- La valoración del coeficiente de resistencia a compresión de la caña ( $k$ ) evidencia que los segmentos de entrenudo (EN) y nudo (N) presentan valores menores y mayores respectivamente con respecto a la media de la población (P). Este comportamiento se generaliza para las tres variedades de caña.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRITTON, P.F: *Application of image measurement and continuum mechanics to measuring the large strain kinematic behavior of prepared sugar cane and bagasse*, 148pp., Thesis, For the degree of Doctor of Philosophy, James Cook University, Queensland, Australia, 2003.
- BULLOCK, K.J: Self feeding characteristics of an experimental sugar mill, Int. Soc. Sugar Cane Technol. 9<sup>th</sup> Congress, vol. II, India, 1956.
- CIMPA: *Manual para la Selección, Operación y Montaje de equipos de Molienda para la Producción de Panela*, Ed. Barbosa, Colombia, 1991.
- CRAWFORD, W.R: Reabsortion a limiting factor in mill performance, Int. Soc. Sugar Cane Technol., 10<sup>th</sup> Congress, Hawaii, 1959.
- DÍAZ, A.A; C. IGLESIAS: "Bases teóricas para la fundamentación del proceso de extracción de jugo de caña de azúcar para la producción de panela", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 21 (1) 53-57, 2012.
- DÍAZ, A.A; C. IGLESIAS: "Dinámica del proceso de extracción de jugo a compresión de la caña de azúcar para la producción de panela", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 21 (2) 81-85, 2012.
- HUGOT, E: *Handbook of Cane Sugar Engineering*, 3th. edition, ELSEVIER, France, 1986.
- KANNAPIRAN, A: *Computational and experimental modeling of the crushing of prepared sugar cane*. 267pp., Thesis for the degree of doctor of Philosophy. James Cook University, Queensland, Australia, 2003.
- LOUGRAM, J.G; A. KANNAPIRAN: *Finite element modeling of the crushing of prepared cane on bagasse*, Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol. Cairns. Australia, 2002.
- MURRY, C.R; E. HOLT: Experimental determinations of the pressure at a point on roll surface, Int. Soc. Sugar Cane Technol. 12<sup>th</sup> Congress, Mauritius, 1962.
- PLAZA, F: *Measuring, modelling and understanding the mechanical behaviour of bagasse*, 343pp., thesis for the award of Doctor of Philosophy. University of Southern, Queensland. Australia, 2002.
- REINS.P: *Cane Sugar Engineering*, 1th. edition, BATENS Berlin, Gernmay, 2006.
- RODRIGUEZ, G; H. GARCIA: *Producción de panela como estrategia de diversificación en la generación de ingresos en áreas rurales de América Latina*, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Roma, Italia, 2004.
- SALOMON, T.J: The analogue computation of pressures developed by feeder rolls, Proc. Queensland Soc. Sugar Cane Technol., 33<sup>th</sup> conference, Bundabery Queensland, Australia, 1966.
- SHANN, D.S: Milling power, Proc. Queensland Soc. Sugar Cane Technol., 27<sup>th</sup> conference, Cairns, Queensland, Australia, 1960.

**Recibido:** 22 de diciembre de 2012.

**Aprobado:** 28 de enero de 2014.

Alexander Díaz, Ing. Prof., Universidad Tecnológica de Pereira (UTP), AA 97, Pereira, Colombia, Correo electrónico: alexdiaza@utp.edu.co

Nota: La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.