

Cálculo de la resistencia a la penetración en hojas de aloe vera (*Barbadenses Miller*)

Calculation of the resistance to penetration in aloe vera (*Barbadenses Miller*) leaves

Giovanni Torres Charry¹

¹Magíster en Ingeniería Mecánica, Docente asistente, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira. *Autor para correspondencia: gtorres@utp.edu.co

Rec.: 07.06.13 Acep.:28.12.13

Resumen

Para caracterizar la resistencia a la penetración de hojas de aloe vera, variedad *Barbadenses Miller*, se diseñó una máquina y se establecieron los protocolos de medición para desplazamiento y fuerza necesarios para medir la resistencia a la penetración en tres puntos diferentes de las hojas. Los resultados mostraron que no existe una relación lineal entre el desplazamiento del indentador en la hoja y la fuerza de penetración. Por otro lado, se encontró que no existen diferencias en los valores de la fuerza de penetración al evaluar ésta en distintos puntos para una misma hoja. Se hallaron diferencias en los valores obtenidos entre hojas diferentes, lo que permite suponer que existe influencia de las características dimensionales de las hojas en el valor de la fuerza de penetración. Los valores máximos obtenidos para la fuerza de penetración variaron entre 22 y 27 N, para una velocidad de avance de la herramienta de 2.6 mm/s.

Palabras clave: Aloe Vera, caracterización mecánica, penetrabilidad, resistencia.

Abstract

The research was conducted in order to mechanically characterize aloe vera leaves, of the *Barbadenses Miller* variety, to do this a specialized machine was designed, measurement protocols to estimate displacement and force were established and tests for evaluating the penetration strength were performed.; three different areas of the leaves were tested. In the results obtained are evidence that there is no linear relationship between the movement of the indenter into the leaf and the penetration force. On the other hand, it may be concluded that there are no significant differences in the values of the penetration force, when evaluating this at different points to one leaf; differences are exhibited in the values obtained among different leaves, which seems to suggests that there isn't influence of the dimensional characteristics of the leaves on the value of the penetration force.

Key words: Aloe vera, mechanical characterization, penetrability, strength.

Introducción

El aloe vera (sábila) es cultivado en Colombia desde hace varios años por pequeños productores, grupos de mujeres y productores independientes, quienes actualmente atraviesan dificultades para su comercialización ya que las empresas e industrias en el país, con excepción de las pocas plantas procesadoras que existen, no compran las hojas de esta planta sino el producto en forma de cristales o preservado en forma de gel.

Actualmente, los agricultores extraen el gel de manera manual; no obstante la cantidad y la calidad, medidas en términos de contaminación por aloína, no satisfacen la demanda local y menos la internacional, por lo que se requiere un método mecanizado de extracción de gel de aloe. En el mercado internacional es posible conseguir máquinas para la extracción, sin embargo los costos de adquisición y operación se encuentran lejos del alcance de los pequeños productores en Colombia; en consecuencia una alternativa es el diseño de máquinas apropiadas para satisfacer las necesidades de procesamiento de la hoja de aloe vera en el país. Las principales dificultades para el desarrollo local de este tipo de máquinas son la ausencia de caracterización de las propiedades físicas de la hoja de esta planta y de mecanismos de extracción del gel.

A pesar de que el gel de aloe se extrae industrialmente desde hace varios años, no se han encontrado evidencias documentadas sobre la caracterización de las propiedades físicas de las hojas y su uso para el diseño de las máquinas y herramientas de extracción. En ingeniería, la resistencia a la penetración (penetrabilidad) define la dureza como la propiedad de los materiales de no dejarse penetrar o rayar, intrínsecamente la dureza es una condición de la superficie del material y no representa las propiedades fundamentales de la materia (Beer *et al.*, 2013). Los pasos preliminares descritos en la mayoría de los procesos de extracción de gel de hojas de Aloe son el corte de la punta, el peciolo y las espinas laterales (Restrepo, 2006); se considera que la determinación del tipo de material y el filo de las herramientas de corte que se deben

emplear están relacionados con la resistencia a la penetración de la hoja, ésta, a su vez, influye en el establecimiento de la velocidad y la fuerza de operación de la máquina; por tanto, se busca que los esfuerzos soportados por la herramienta no superen los máximos admisibles calculados en el diseño.

Macías *et al.* (2007), entre otras características, midieron la resistencia a la penetración de la hoja en diez biotipos de aloe vera en diferentes estados de crecimiento y desarrollo; en este estudio se encontró que existen diferencias significativas en el valor de la resistencia a la penetración entre los diferentes tipos de Aloe vera evaluados. Algunos trabajos en otros cultivos y que sirvieron como referencia en el presente trabajo fueron realizados por Ciro (2005b), Buitrago *et al.* (2004), Chen *et al.* (1987), y Kramer (1984). Ciro (2005a) en fruta de banano midió la penetración en tres puntos (25, 50 y 75% de la longitud total) y encontró valores de fuerza pico para la penetración de la corteza y valores de fuerza promedio en la penetración de la pulpa, este comportamiento sugirió pruebas similares en hojas de Aloe Vera; Buitrago *et al.* (2004) realizaron análisis de pruebas mecánicas en papa cultivada en Colombia; y Chen *et al.* (1987) ejecutaron pruebas para determinar los efectos de la compresión en peras asiáticas.

En este artículo se presentan los resultados obtenidos en la fase de caracterización física y mecánica de la hoja de aloe vera, en el proyecto de investigación: Caracterización mecánica de la hoja de aloe y diseño de máquinas para la extracción y transformación de gel de aloe vera, desarrollado en la Universidad Tecnológica de Pereira. En particular, se presentan los resultados obtenidos en la determinación de la resistencia a la penetración.

Materiales y métodos

Para el estudio se utilizaron hojas de aloe vera de la variedad *Barbadenses Miller*, cosechadas en cultivos con edades entre 18 y 24 meses, en tres regiones localizadas a 1500 m.s.n.m. en el departamento de Risaralda, Colombia. Los cultivos se seleccionaron por zonas de muestreo y en cada una de ellas se escogieron de manera aleatoria las plantas

para la recolección de dos hojas de la parte inferior. Las hojas recolectadas fueron trasladadas en canastas plásticas hasta el sitio de evaluación dentro de las 72 h siguientes a la cosecha, para evitar la pérdida de sus características físicas.

Antes de las pruebas de caracterización de penetrabilidad, las muestras recolectadas fueron sometidas al protocolo establecido para la medición de las dimensiones físicas de las hojas de aloe vera. En la Figura 1 aparecen el nombre y la ubicación en hojas de aloe vera de las zonas de medición de las características físicas, y en el Cuadro 1 se presentan las características físicas de ocho de las muestras utilizadas.

Para la determinación de la resistencia a la penetración se construyó una máquina específica denominada ‘máquina AMTM100’, cuyo diseño fue documentado por Torres y Ozaeta (2011). En operación, esta máquina registra la fuerza y el avance de la herramienta (indentador) en cada prueba; la fuerza aplicada es medida utilizando una cinta FlexiForce®, mientras que la penetración o avance de la herramienta se mide con el uso de un transformador diferencial de variación lineal (LVDT). La máquina permite establecer velocidades de avance desde 2.6 hasta 6.0 mm/s con el fin de posibilitar la evaluación de la influencia de la velocidad en los valores de la fuerza de penetración. Los desplazamientos

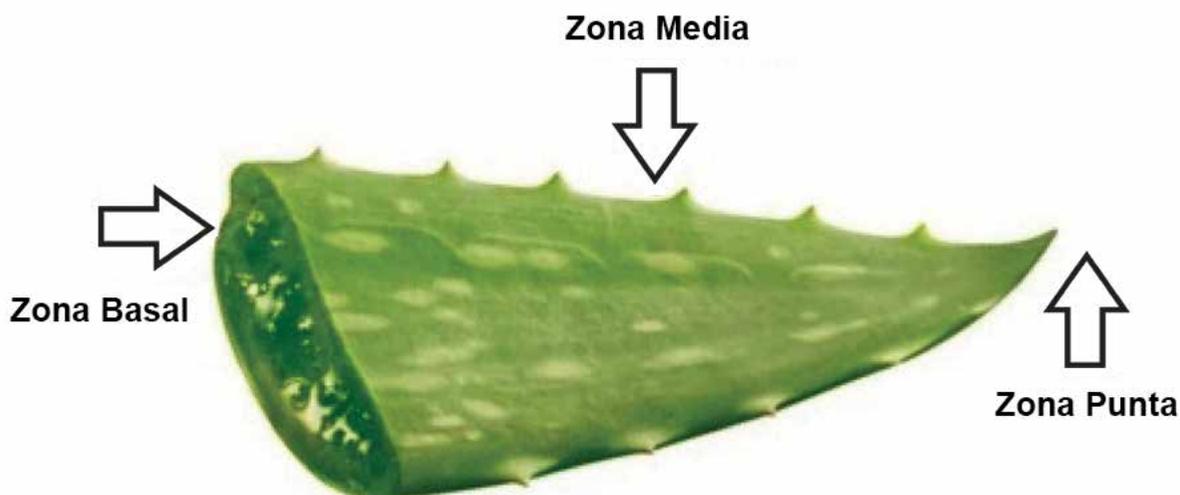


Figura 1. Identificación de las zonas en hoja de aloe vera para mediciones de las características físicas.

Cuadro 1. Características físicas de las hojas de Aloe Vera evaluadas.

Hoja	M (kg)	L (cm)	AB (mm)	EB (mm)	AM (mm)	EM (mm)	AP (mm)	EP (mm)
8	0.262	52.0	67.7	17.7	37.4	11.4	7.4	2.9
11	0.296	40.5	79.7	17.0	50.4	18.7	5.0	1.0
25	0.272	44.0	77.7	18.7	44.7	15.1	3.8	1.0
35	0.524	41.5	89.9	20.5	63.1	25.6	28.6	3.5
38	0.444	53.0	86.1	25.6	44.0	17.4	7.1	4.4
42	0.424	55.6	86.3	20.6	46.7	15.6	5.5	2.8
57	0.556	41.6	90.4	25.8	60.8	28.8	12.0	1.1
63	0.402	54.5	82.6	19.3	51.9	17.4	6.9	2.5

m: masa de la hoja de aloe vera (kg); L: longitud de la hoja de Aloe Vera (cm).

AB: Ancho basal de la hoja de aloe vera (mm).

EB: Espesor Basal de la hoja de aloe vera (mm).

AM: Ancho medio de la hoja de aloe vera (mm).

EM: Espesor medio de la hoja de aloe vera (mm).

AP: Ancho de la punta de la hoja de aloe vera (mm).

EP: Espesor de la punta de la hoja de aloe vera (mm).

y la fuerza son almacenados en línea con un sistema de captura de datos.

Método para la medición de la resistencia a la penetración

Para estandarizar la forma de medición de la resistencia a la penetración de la hoja de aloe vera se estableció un protocolo que tiene como aspectos relevantes los siguientes: (1) el experimento se diseñó de forma completamente aleatoria en todas sus fases, desde la recolección de las muestras en campo hasta la aplicación de las pruebas de penetrabilidad; (2) como herramienta se utiliza un indentador cilíndrico de 7.9 mm de diámetro (Figura 2) que se acopla al sistema de desplazamiento vertical de la máquina de ensayos; (3) las pruebas se aplican en tres puntos diferentes, localizados 25%, 50% y 75 % de la longitud de la hoja, medidos en el lado convexo sobre el eje axial, como se muestra en la Figura 3. En la recolección de los datos de las pruebas, estos puntos fueron identificados como posición 1 (P1), posición 2 (P2) y posición 3 (P3), respectivamente; y (4) para medir la incidencia de la velocidad en el valor de la fuerza de penetración, la primera se hizo variar de manera aleatoria para las pruebas entre hojas, siendo los valores evaluados 2.6; 3.5 y 4.2 mm/s.

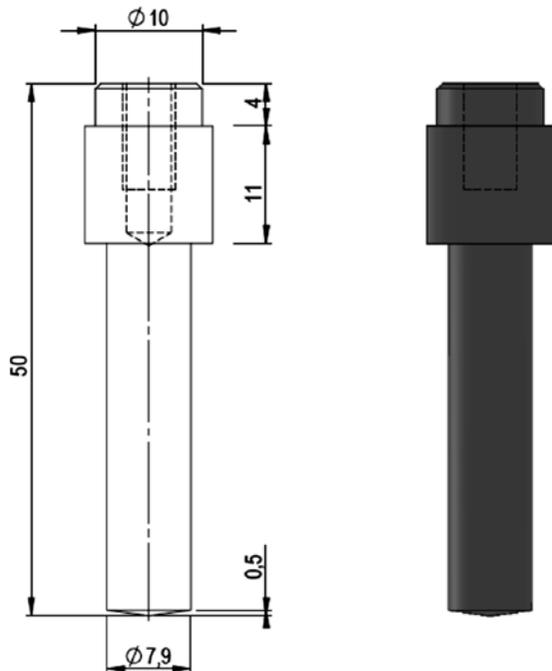


Figura 2. Indentador utilizado en la prueba de penetrabilidad.

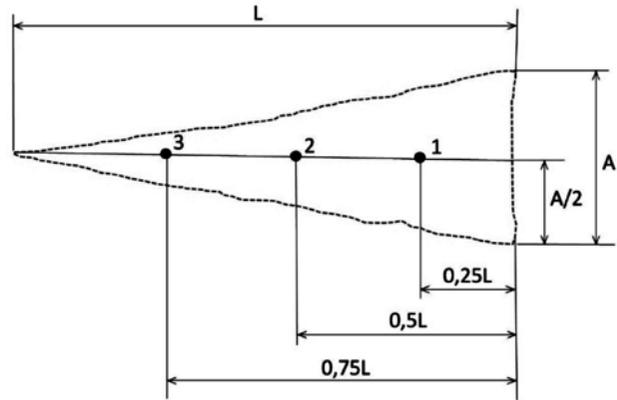


Figura 3. Puntos de la hoja, para la prueba de penetrabilidad.

Medición de la resistencia a la penetración

Las muestras recolectadas en cada finca fueron caracterizadas por sus dimensiones y de acuerdo con el diseño aleatorio del experimento se les aplicó la prueba de penetrabilidad en tres posiciones, para cada hoja y para cada velocidad. Para establecer el número de réplicas se estimaron a priori los intervalos de confianza, con un ancho deseado para estos intervalos. Para ello se utilizó la Ecuación 1 propuesta por Montgomery (2007) con un intervalo de confianza de 95% con el fin de que la diferencia en la fuerza de penetración, estimada en dos pruebas al azar, fuera de ± 2 N con un cálculo previo de la desviación estándar (σ) de 1.8 N (tomando a σ^2 como una estimación de MS_E).

$$\pm t_{/2,N} a \sqrt{\frac{2MS_E}{n}} \tag{1}$$

donde, MS_E es el cuadrado medio del error en la prueba de ANOVA, n es el número de réplicas y t es el estadístico de prueba para comparación de medias.

Las pruebas se realizaron con avance del indentador a velocidad constante, de tal manera que aplicara fuerza hasta romper la epidermis de la hoja, momento en el cual ocurre el valor de la fuerza máxima de penetración. La toma de datos se extendió más allá del punto de ruptura por facilidad y control de la prueba. En este estudio se evaluó la penetrabilidad en tres puntos con tres velocidades diferentes en hojas de aloe vera y un total de ocho repeticiones para cada

prueba. Para el análisis estadístico de los resultados se utilizó el software SPSS 16.0; para la determinación de las regresiones matemáticas entre la fuerza aplicada y el valor de la penetración del indentador en la hoja se empleó el software LabFit.

Resultados y discusión

Se presentan sólo los resultados correspondientes a las pruebas de penetrabilidad desarrolladas a una velocidad de avance del indentador de 2.6 mm/s, ya que los resultados de las pruebas a velocidades de 3.5 y 4.2 mm/s no resultaron apropiados debido a la baja velocidad de muestreo del elemento captador de señales de la máquina, lo cual no permitió obtener datos suficientes para establecer y analizar regresiones matemáticas apropiadas.

En la Figura 4 se observa el perfil fuerza-deformación obtenido en las pruebas de penetrabilidad para varias hojas, a una velocidad de avance del indentador de 2.6 mm/s. La fuerza de penetración llega hasta el punto en el cual se obtiene el primer máximo local (ubicado entre 2.5 y 4.5 mm). Los valores obtenidos para la fuerza de penetración en las tres posiciones evaluadas se encuentran en el rango entre 23 y 28 N. Se observa que una vez se alcanza la fuerza máxima de penetración hay una disminución de ésta, debido al rompimiento súbito de la cáscara de la hoja; después de esto la fuerza se incrementa nuevamente de manera continua pero con una pendiente menor que aquella observada en la zona previa al rompimiento de la cáscara.

En las Figuras 5 y 6 se observan las curvas de fuerza contra la penetración del indentador. A pesar de que las curvas presentan pendientes diferentes, no existe significancia en el valor máximo de la fuerza de penetración en función del punto en la hoja en la que se realice la evaluación;

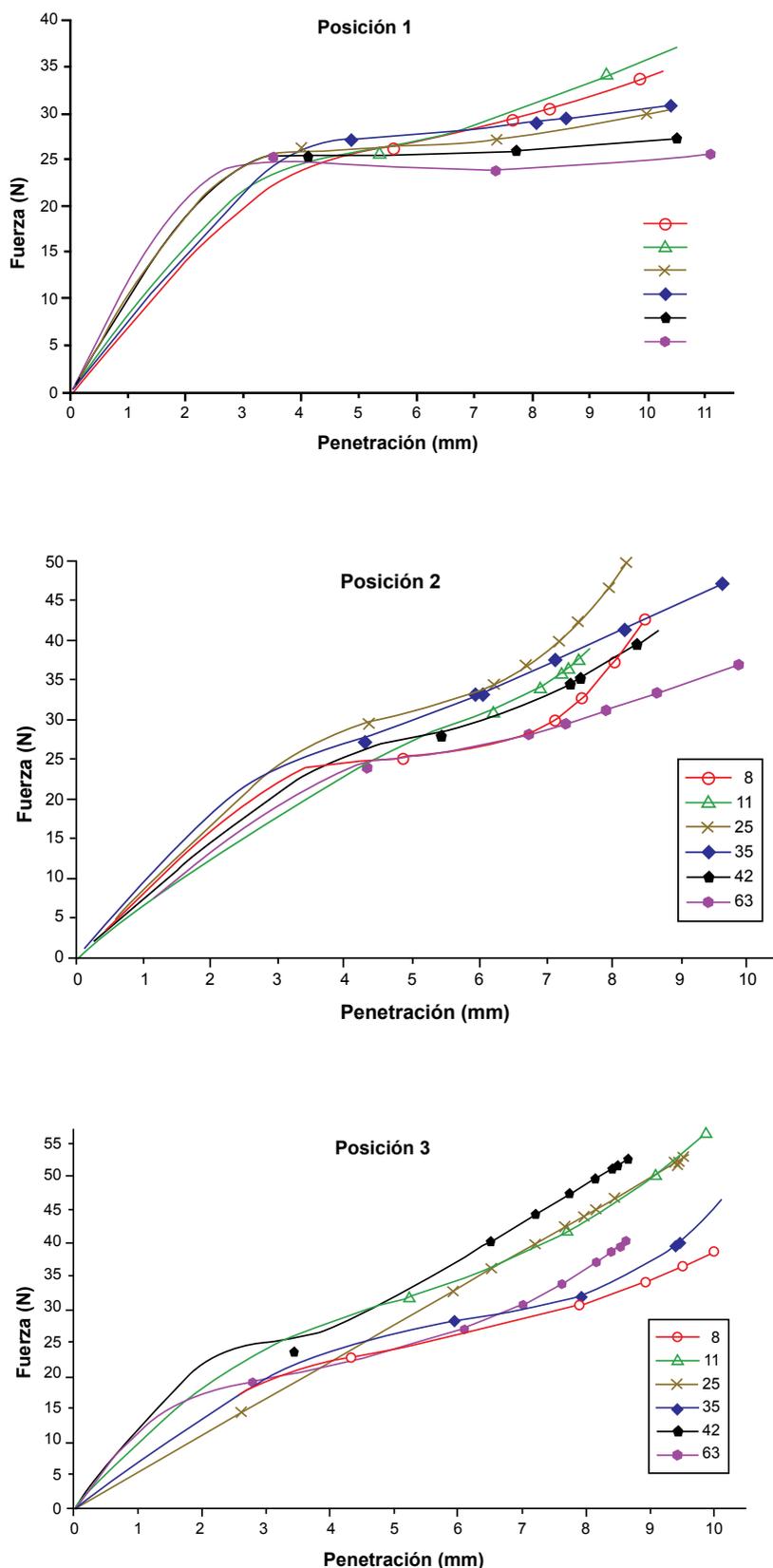


Figura 4. Curva fuerza-penetración en la hoja de aloe vera para una velocidad de 2.6 mm/s

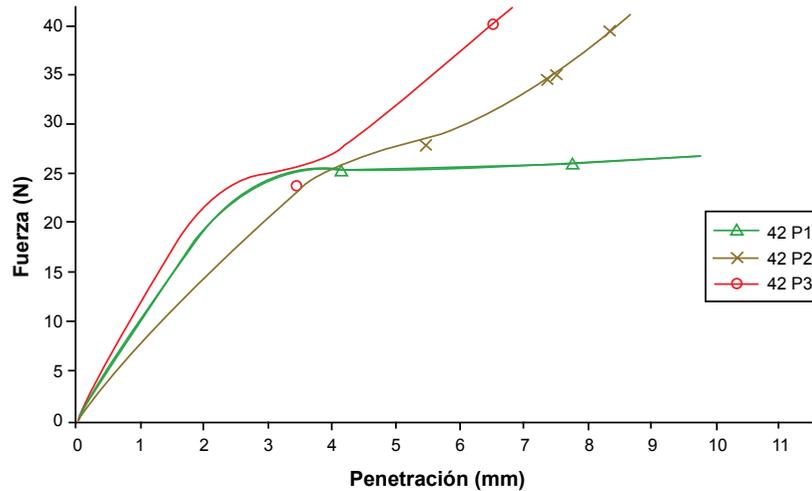


Figura 5. Curva fuerza-penetración en tres posiciones para el espécimen 42 de aloe vera, para una velocidad de 2.6 mm/s.

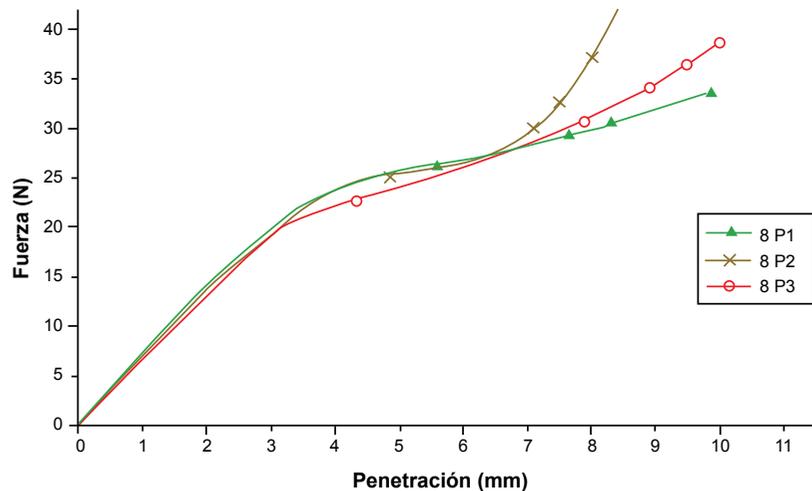


Figura 6. Curva fuerza-penetración en tres posiciones para el espécimen 8 de aloe vera, para una velocidad de 2.6 mm/s.

la Figura 7 muestra el diagrama de cajas respectivo.

Los resultados del ANOVA, con una confiabilidad del 95%, revelaron que la fuerza de penetración es independiente del punto de realización de la prueba dentro de la hoja de aloe vera. Las regresiones matemáticas para la fuerza y la penetración muestran que no existe relación lineal entre la fuerza aplicada en el indentador y la penetración obtenida en la hoja, esto puede explicarse por la naturale-

za viscoelástica de las hojas de aloe vera. Las expresiones obtenidas con mayor coeficiente de correlación fueron, en general, del tipo cuadráticas en la deformación. En la Ecuación 2 se presenta el comportamiento de la fuerza de penetración, cuando el indentador avanza a una velocidad de 2.6 mm/s.

$$Fp = \left[\frac{0,00000106 + x}{-0,00927 + 0,0426x} \right] + 0,0303x^2 \quad (2)$$

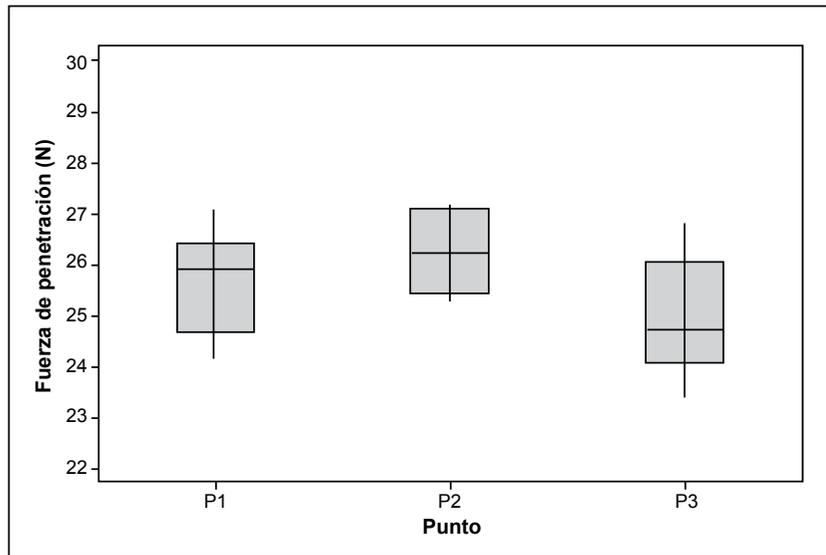


Figura 7. Diagrama de cajas para la fuerza de penetración evaluada en tres puntos de la hoja de aloe vera, para una velocidad de 2.6 mm/s.

donde, F_p es la fuerza de penetración (N) y x es el desplazamiento del indentador en la prueba de penetrabilidad (mm).

Cuando se utilizó el área transversal del indentador para calcular la resistencia a la penetración equivalente, se obtuvieron valores entre 45 y 55 N/cm² (4.6 y 5.6 kg/cm²) que son similares a los reportados por Macías *et al.* (2007).

Conclusiones

- Debido a las características viscoelásticas de las hojas de aloe vera, consistente en la presencia de forma simultánea de las propiedades viscosas de un líquido y las elásticas características de un sólido, la fuerza de penetración no presentó una relación lineal con el avance de la penetración.
- El valor máximo de la fuerza de penetración no presentó variaciones significativas entre los puntos evaluados en la hoja, por tanto se considera constante.
- El avance y la fuerza de la penetración antes de la ruptura de la cáscara están influenciadas por las características físicas de las hojas, por lo que no es posible estandarizar un valor máximo

para estas características en las hojas de aloe vera.

- Los valores máximos obtenidos para la fuerza de penetración variaron entre 22 y 27 N, para una velocidad de avance de la herramienta de 2.6 mm/s.

Referencias

- Beer, F.; Johnston, E.; y Dewolf, J. 2013. Mecánica de Materiales 6 Edición, McGraw-Hill Interamericana Editores S.A de C. V.
- Buitrago, G.; Lopez, A.; Coronado, A.; y Osorno, F. 2004. Determinación de las características físicas y propiedades mecánicas de papa cultivada en Colombia. Rev. Bras. Eng. Agr. e Amb. 8(1):102 - 110.
- Chen, P.; Ruiz, M.; Lu, F.; y Kader, A. 1987. Study of impact and compression damage on asian pears. Trans. ASAE. 30(4):1193 - 1197.
- Ciro, H.; Montoya, L.; y Millán, L. 2005a. Caracterización de propiedades mecánicas del banano (*Cavendish Valery*). Medellín. Rev. Fac. Nal. Agr. 58(2):2975 - 2988.
- Ciro, H.; Vahos, D.; y Márquez, C. 2005b. Estudio experimental de la fuerza de fractura en frutas tropicales: el tomate de árbol (*Cyphomandra betacea sendt.*). Dyna 72(146):55 - 64.
- Kramer, A. 1984. Definition of texture and its measurement in vegetables products. Food Techn. 18:304 - 307.

- Macías, F.; Esparza, G.; Valdez, R.; Cabral, F.; Esparza, E.; y Bañuelos, R. 2007. Propiedades físicas, estructurales y análisis de crecimiento de la sábila (*Aloe spp.*). *Rev. Geografía Agrícola*. 038:41 - 54.
- Montgomery, D. 2007. *Diseño y análisis de experimentos*. John Wiley & Sons. México. p. 21 -125.
- Restrepo, L. J. 2006a Extracción del acíbar. En: <http://higuerilla.lacoctelera.net/post/2006/03/20/extraccion-del-acibar>. 10-08-2011
- Restrepo, L. J. 2006b Proceso de extracción y concentración del mucilago de sábila. En: <http://higuerilla.lacoctelera.net/post/2006/12/30/proceso-extraccion-y-concentracion-del-mucilago-sabila>. 10-08-2011
- Torres, G. y Ozaeta, A. 2011. Diseño de máquina para ensayos mecánicos para hoja de Aloe Vera. *Rev. Scien. Techn.* 16(48):29 - 34.