

Estudio de la eficiencia de troceado de *Agave tequilana* Weber empleando un molino con cuchillas articuladas

Alberto Saldaña Robles¹, César Gutiérrez Vaca^{1§}, Ryszard Jerzy Serwatowski Hlawinska¹, Noé Saldaña Robles¹, José Manuel Cabrera Sixto¹, Oscar Alejandro Martínez Jaime¹, J. Concepción Quiroz Ramírez¹, Adrián Flores Ortega¹, Salvador García Barrón¹ y José Armando Juárez Guani¹

¹Departamento de Ingeniería Agrícola. Campus Irapuato-Salamanca. Universidad de Guanajuato. Ex-Hacienda "El Copal". Carretera Irapuato-Silao, km 9. Irapuato, Guanajuato, México. C. P. 36820. Tel: 52 462 6245215. Ext. 1590. salasm@ugto.mx; ryszard@ugto.mx; noesr@hotmail.com; jmcabrera@ugto.mx; oscarja@ugto.mx; quirozgc@ugto.mx; adriflorte@hotmail.com; salvagb@ugto.mx; guani@dulcinea.ugto.mx. [§]Autor para correspondencia: cesarg@ugto.mx.

Resumen

En el presente estudio se evaluó la eficiencia de troceado de hojas y piña del *Agave tequilana* Weber, empleando un molino con cuchillas articuladas acopladas en forma de "Y". Los factores estudiados que influyen en la eficiencia de troceado se emplearán en el diseño del cabezal de troceado de un prototipo de cosechadora-troceadora de agave, cuyo fin es obtener la materia prima para la difusión y obtención de bioetanol. La eficiencia de troceado se definió como el porcentaje de trozos de agave menores a 5 mm medidos transversalmente a la fibra, valor recomendado para una difusión eficiente. La eficiencia de troceado de las hojas se evaluó mediante un arreglo factorial 2 * 2 completamente al azar con cuatro repeticiones. Los factores fueron: velocidad angular del rotor a 1 500 y 2 000 rpm; y posición angular de alimentación de la hoja respecto al eje del molino: 45 y 90 grados. Los resultados mostraron que la posición de la hoja no influye en la eficiencia de troceado, mientras que para las velocidades de 1 500 y 2 000 rpm los valores de eficiencia resultaron de 91.25 y 94.95, respectivamente, mostrando una diferencia estadísticamente significativa. En la eficiencia de troceado de piña se estudió la influencia de la velocidad a 1 500 y 2 000 rpm usando la prueba de 't' bajo muestras aleatorias independientes con cuatro repeticiones, lo cual mostró una eficiencia muy superior para 2 000 rpm.

Palabras clave: *Agave tequilana* Weber, cosechadora, desmenuzador, mecanización, eficiencia.

Introducción

La demanda excesiva de combustibles fósiles así como su impacto ambiental, generan no solo en nuestro país, sino en todo el mundo, la necesidad de aprovechar fuentes de energía alternativa. El bioetanol es un producto de origen biológico que ha demostrado ser un excelente sustituto de los combustibles fósiles (UNESCO, 2007). En México se produjeron 56 millones de litros de bioetanol en 2008, pero su consumo en ese mismo año fue de 164 millones, importando el restante (Honty, 2008). Para el 2012 México tiene como meta producir 412 millones de litros de bioetanol, utilizando principalmente como materia prima el maíz y la caña de azúcar, siendo estos dos cultivos considerados en primera instancia como fuente alimenticia (Sierra, 2011).

En los últimos años se han realizado diversas investigaciones para el aprovechamiento de biomasa como fuente de energía (Whitney *et al.*, 2002; González, 2008; Madrigal, 2009), las cuales demuestran que es viable biológicamente producir bioetanol de la planta de *Agave tequilana* Weber obteniéndose un mayor rendimiento que de la caña de azúcar y el maíz, hasta 7 000 L ha⁻¹ año⁻¹ únicamente de las hojas. La producción de bioetanol resulta viable en lo biológico más en lo económico sería necesario mecanizar algunas etapas del proceso, que reduzcan el costo de producción, entre ellas la cosecha (jima).

Tan sólo para la producción de tequila el precio de dicha actividad es de \$ 22 500 por ha, que corresponde a 75% de los costos de producción (Sierra, 2011). La jima le da un sentido

artesanal al proceso de producción de tequila, más si el destino es la producción de bioetanol, carece de importancia, por lo que, una máquina cosechadora-troceadora de agave permitiría aprovechar la planta completa, reducir tiempos y gastos de mano de obra evitando en campo la extracción, jima y recolección, así como en la industria procesadora el desmenuzado, además de poder realizar la hidrólisis durante el transporte.

El proceso adoptado recientemente por empresas del ramo del tequila para la obtención de los azúcares del agave, es la difusión, por tener una mayor eficiencia que los métodos tradicionales de cocimiento. El proceso de difusión requiere de un material previamente preparado, que se logra mediante dos etapas bien diferenciadas, en ambas etapas se emplean molinos. La primera etapa se encarga de la reducción de la planta en trozos pequeños y la segunda realiza el desfibrado de los mismos.

Lo anterior ha llevado al grupo de Diseño de Maquinaria y Equipo Agroindustrial del Departamento de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Guanajuato (UG), a desarrollar un prototipo de cosechadora-troceadora de agave que sea capaz de conseguir, mediante dos procesos consecutivos, la materia prima adecuada para la difusión con orientación a la obtención de bioetanol. El presente estudio cubre una de las necesidades de dicho proyecto, y tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de troceado de la planta de agave (hojas y piña), empleando un molino de cuchillas articuladas acopladas en forma de "Y".

Los factores estudiados que influyen sobre la eficiencia en el troceado se emplearán en el diseño del cabezal troceador de un prototipo de cosechadora-troceadora de agave, dicho cabezal estará conformado por dos tambores verticales contra-rotantes provistos de cuchillas acopladas en forma de "Y". El diseño de la máquina pretende un implemento acoplado, accionado y tirado por el tractor cuya labor será el troceado-desmenuzado de la planta de agave completa sin extraerla del suelo. La investigación se realizó en las instalaciones de la División de Ciencias de la Vida (DICIVA), de la Universidad de Guanajuato, localizada en la ciudad de Irapuato, estado de Guanajuato, México.

Materiales y métodos

Evaluación de la eficiencia de troceado del molino. Sierra (2011) reporta una serie de visitas a industrias tequileras del estado de Jalisco cuyo objetivo fue obtener

la caracterización geométrica del material que resulta de la etapa de troceado y de la etapa de desmenuzado que se emplean en el proceso de difusión para la producción de tequila, obteniendo también la caracterización geométrica del material resultante posterior a la difusión. El autor clasificó el tamaño de los trozos de agave de acuerdo a lo mostrado en el Cuadro 1, con base en la información proporcionada por las empresas, para la etapa de troceado. Dicha información se empleó para evaluar la eficiencia del presente estudio.

Cuadro 1. Clasificación del troceado de agave como función del tamaño de los trozos para su uso en la difusión.

Clasificación	Muy bueno (MB)	Bueno (B)	Regular (R)	Malo (M)
Dimensiones de la fibra	$A < 0.5 \text{ cm}$	$0.5 \text{ cm} < A < 2.5 \text{ cm}$	$2.5 \text{ cm} < A < 5 \text{ cm}$	$A > 5 \text{ cm}$

A= medida más grande en dirección transversal a la fibra.

Preparación de la maquinaria y materia prima para los ensayos. Para la realización del estudio la DICIVA proporcionó los siguientes equipos; un tractor New Holland de potencia mediana (78 hp) con 66.4 hp a la toma de fuerza; un molino de martillos para picar forraje marca "Triunfo" serie: 05069811 (Figura 1a) cuyo órgano de trabajo es un tambor rotativo provisto de 11 discos, 30 martillos, 30 bujes separadores (para los martillos) y 6 pernos para posicionar los martillos en diferentes arreglos (Figura 2b). El molino es accionado por la toma de fuerza del tractor y tiene un juego de poleas con un incremento de uno a seis, por lo que, el tambor puede alcanzar una velocidad rotacional máxima de 3 240 rpm, dicha velocidad varía dependiendo de la velocidad aplicada del tractor a la toma de fuerza.

Los martillos que posee el molino fueron diseñados y fabricados especialmente para el triturado de forraje seco, siendo éste un material frágil y ligero, características muy diferentes a las que posee la planta de *Agave tequilana* Weber, compuesta por 40% de fibra y 60% de jugo, por lo que dichos elementos no resultan convenientes para la etapa de troceado de agave. La construcción del molino ofrece la ventaja de ensamblado y desensamblado rápido tanto de ejes, bujes y martillos, ventaja que permitió sustituir, estos últimos, por cuchillas tipo "Y" que son las más empleadas en máquinas trituradoras y picadoras de uso agrícola para el troceado de material fibroso con características similares a las del agave.



Figura 1. Molino de martillos: a) vista general del equipo; y b) tambor rotativo.

La cuchilla se diseñó y fabricó de acuerdo a las características geométricas del molino y de los elementos que lo conforman así como por la resistencia de los pernos-pivotes. También se le proveyó un borde liso con un ángulo de ataque de 30°, seleccionado para su fabricación solera comercial (ASTM-A36) de 1.5 pulgadas x 0.25 pulgadas, valores recomendados que precisan la menor fuerza para realizar el corte de la planta de agave (Sierra, 2010) sin perder la rigidez y resistencia. Se fabricaron 30 de ellas (Figura 2a), 15 con borde liso derecho y 15 con izquierdo, que posteriormente se colocaron en arreglos con forma de “Y” (Figura 2b). También se fabricaron 30 bujes, dos para centrar cada arreglo entre discos. La distribución geométrica mostrada en la Figura 3 fue la que permitió cubrir el mayor ancho de trabajo del molino, colocando tres pares de cuchillas equidistantes, en tres ejes, y en los otros tres, dos pares, alternando los ejes.

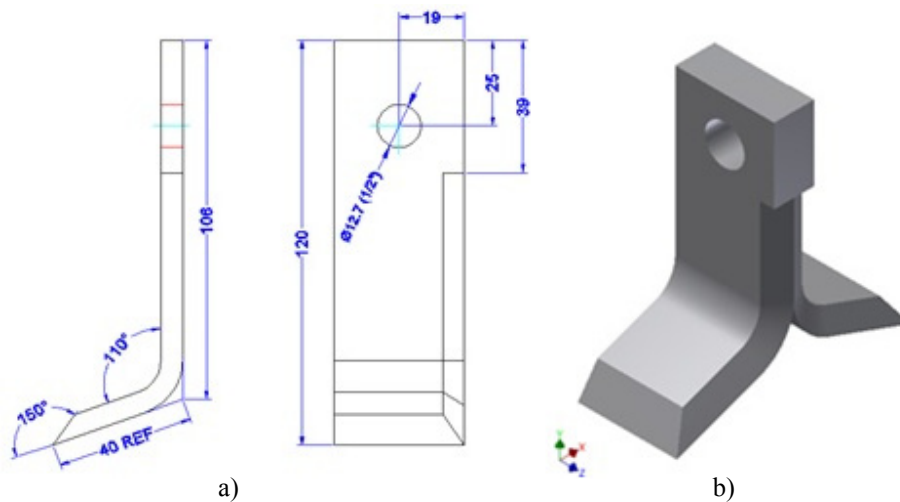


Figura 2. Cuchillas: a) ½ "Y" dimensiones; y b) 1 "Y" modelado 3D en Autodesk Inventor 2010.

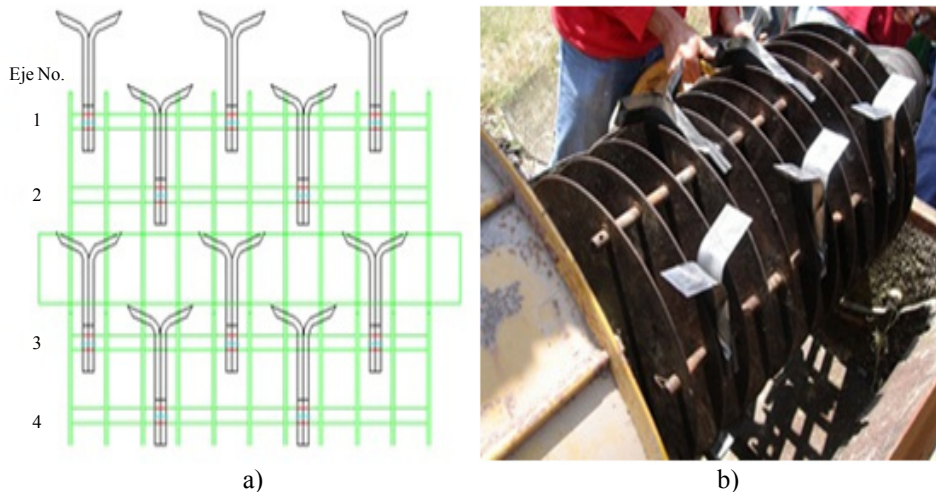


Figura 3. Distribución de cuchillas: a) vista esquemática eje 1 a 4; y b) construidas y acopladas.

La materia prima empleada para la realización del presente estudio fue una planta de *Agave tequilana* Weber, extraída del campo experimental de agave de la DICIVA, dicha planta se trasladó al laboratorio de prototipos donde fue jimada separando hojas y piña.

Determinación de la eficiencia de troceado de las hojas de agave. Se planteó un arreglo factorial 2 x 2 bajo un diseño completamente aleatorio con cuatro repeticiones, para evaluar la eficiencia de troceado de las hojas de agave, que fue la variable respuesta. Este modelo evaluó el efecto de dos factores que fueron: la velocidad rotacional del tambor (1 500 y 2 000 rpm), y la posición de alimentación de la hoja (entrada de la hoja con ángulo de 45° y 90°, denotados por H45° y H90°).

Niveles de velocidad rotacional. Debido a que no existen datos experimentales de velocidad rotacional reportados en la bibliografía con respecto al troceado mecánico de agave, se propusieron dos velocidades 1 500 (V1) y 2000 (V2) rpm lo que corresponde teóricamente a 75 cortes por segundo con una velocidad lineal de 34.9 m s⁻¹ y 100 cortes por segundo con velocidad lineal de 46.5 m s⁻¹, respectivamente.

Las velocidades elegidas abarcan el rango de velocidades empleadas en plantas tequileras para el troceado de la piña de agave, así como el rango de velocidades empleadas en diversa maquinaria agrícola que tiene la función de trocear material de origen biológico en distintas condiciones. También fueron las que limitaron el intervalo de valores de velocidad que correspondieron a un producto con composición deseada visualmente durante una serie de pruebas preliminares. Cabe mencionar, el material demasiado desmenuzado no es deseable debido a su difícil manejo (apelmazamiento) y pérdida de jugo que contiene los azúcares del agave.

Niveles de posición de alimentación de la hoja. De acuerdo a la geometría de la planta de agave existen tres casos extremos en que la hoja entrará al par de molinos para ser troceada, según la geometría de la Figura 4: que la hoja entre completamente perpendicular al eje del molino (H90°); que la hoja entre paralela al eje (posibilidad no considerada para el estudio debido al evidente corte); o que la hoja entre con un ángulo de 45° (H45°). En el diseño del cabezal se requerirá colocar una tolva que guíe las hojas a los tambores de tal manera que al entrar las de los costados se doblen, por tanto los casos en que la hoja entre paralela al eje se presente en contadas ocasiones.

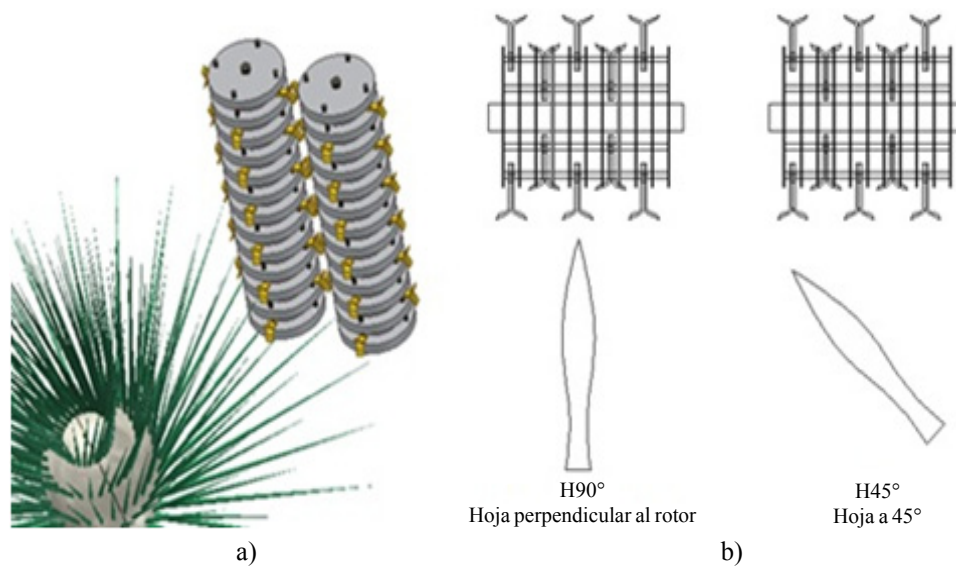


Figura 4. Troceado de hoja: a) esquema propuesto; y b) posiciones extremas de troceado.

Procedimiento para la realización de los ensayos. El molino se acopló a la toma de fuerza del tractor agrícola proporcionando al eje la velocidad conveniente, empleando un tacómetro digital Cole Parmer 08199, de acuerdo con la repetición y la combinación correspondiente entre velocidad-posición de alimentación. En cada ensayo se alimentaron dos hojas a 90° respecto al rotor (Figura 4a),

o 2 hojas con ángulo de 45° según fue la repetición y la combinación correspondiente empleando un total de 32 hojas, resultado en 16 ensayos. El par de hojas se introdujeron al molino con una velocidad aproximada de 5 cm s⁻¹, que corresponde a la velocidad propuesta de avance del prototipo de cosechadora-troceadora de agave, que pretende cosechar ¼ de hectárea durante una jornada de 8 h.

Posteriormente a cada ensayo se recogió el material troceado y se clasificó de acuerdo con el Cuadro 1, registrando el peso total de los trozos resultantes por clase; para el registro de los pesos se empleó una balanza analítica Scout™ Pro con precisión de ± 0.1 g. Con los valores obtenidos de masa se calcularon los contenidos en porcentaje para cada clase por ensayo. Se definió la eficiencia como la relación de la masa de los trozos resultantes que cayeron en la clase MB entre la suma total de las masas de los trozos de la prueba. Para realizar el análisis estadístico se utilizó el programa SAS (SAS, 2001).

Determinación de la eficiencia de troceado de la piña. En la evaluación de la eficiencia de troceado de piña se estudió únicamente la influencia de la velocidad a 1 500 y 2 000 rpm, ya que su alimentación se realizó de la única forma que ésta pudiera ser troceada al emplear molinos verticales sobre la planta. La piña fue seccionada en ocho partes iguales, número de partes que proporcionaron las dimensiones adecuadas del material, para poder ser introducido por la garganta de alimentación del molino. Se empleó la metodología de los ensayos para las hojas, resultando ocho ensayos. La evaluación de la eficiencia se realizó de la misma manera que en las hojas, con el mismo paquete estadístico.

Resultados y discusión

En las Figuras 5 y 6, se puede apreciar el resultado de los ensayos para hojas a diferente velocidad y posición, asimismo, para la piña.

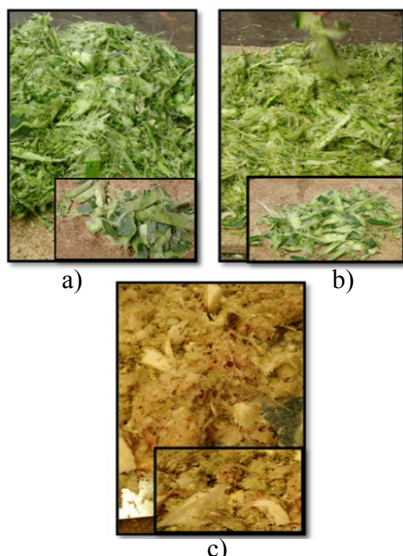


Figura 5. Material troceado a 1 500 rpm a) hojas a 45°; b) hojas a 90°; y c) piña.

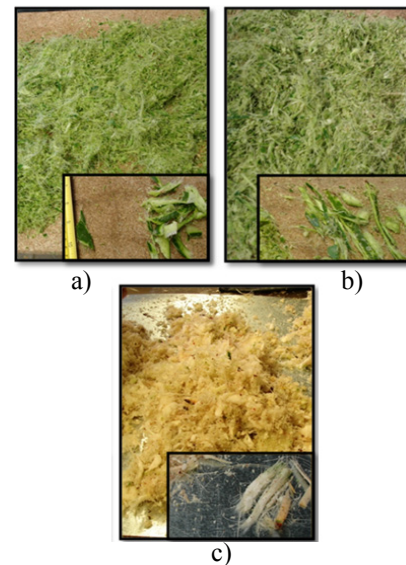


Figura 6. Material troceado a 2 000 rpm: a) hojas a 45 °; b) hojas a 90°; y c) piña.

Determinación de la eficiencia de troceado de la hoja de agave. El Cuadro 2 muestra los resultados en forma condensada de los ensayos de hojas, donde se observa que los valores más altos de la clasificación MB definida como la eficiencia del molino, se obtuvieron con V2, al compararlos con los de V1.

La variable dependiente eficiencia, del Cuadro 2, no cumplió el supuesto de normalidad motivo por el cual se realizó la prueba de Kruskal-Wallis (K-W), que constituye la alternativa no paramétrica para la prueba de F de un diseño completamente al azar. Adicionalmente, se utilizó la prueba de comparación múltiple de medias de rangos asignados (medianas) de tratamientos, conocida como la diferencia mínima significativa (DMS) con $p < 0.05$. En resumen los resultados obtenidos de la prueba K-W se muestra en el Cuadro 3.

La prueba de K-W demuestra que el factor velocidad así como la combinación con el factor posición, mostraron diferencias altamente significativas para la eficiencia de troceado de las hojas de agave. Mientras que el factor posición de la hoja no muestra diferencia estadística para esta variable respuesta a un nivel de confianza de 95%.

La prueba (DMS) de comparación múltiple de medias de rangos asignados (medianas) de tratamientos se muestra en el Cuadro 4, donde se observa que los valores de las medianas de la eficiencia para el factor posición de la hoja son casi iguales, y la pertenecen al mismo grupo estadístico, según la

prueba DMS. Por su parte, en el factor velocidad, se observa que las medianas pertenecen a grupos estadísticos diferentes, de acuerdo a la prueba DMS, lo que demuestra que se obtuvo una eficiencia de troceado mayor a la velocidad de 2 000 rpm. En lo que respecta a la combinación de factores se observa

que el peso de la significancia estadística del factor velocidad transfiere su efecto, ya que no existe diferencia significativa entre tratamientos con diferente posición de la hoja, pues pertenecen al mismo grupo estadístico, y la diferencia estadística se observa entre tratamientos con diferente velocidad.

Cuadro 2. Resultados de la clasificación MB para los ensayos de hoja.

Velocidad	V1 (1 500 rpm)		V2 (2 000 rpm)	
	H 45°	H 90°	H 45°	H 90°
Clasificación	MB (%)	MB (%)	MB (%)	MB (%)
Repetición 1	71.5	90.4	94.4	96.2
Repetición 2	81.2	93.2	94.8	96.7
Repetición 3	92.6	92.6	95.6	94.5
Repetición 4	92.1	90.3	95.1	94.1

Cuadro 3. Análisis de Kruskal-Wallis para los factores (posición y velocidad), y la combinación (cuatro tratamientos) con cuatro repeticiones para la variable eficiencia de troceado de hojas en porcentaje.

Variable respuesta	Factor (F)	F (nivel)	Estadístico K-W	Valor - P
Eficiencia de troceado de hojas	Posición (P)	H 90°	0.2237	0.6363 ns
		H 45°		
	Velocidad (V)	V2	11.3108	0.0008**
		V1		
Combinación V-P		V2 (H 90°)	11.6035	0.0089**
		V2 (H 45°)		
		V1 (H 90°)		
		V1 (H 45°)		

ns= diferencia no significativa; y **= diferencia altamente significativa.

Cuadro 4. Prueba DMS para comparar las medias de los rangos asignados (medianas) de tratamientos, para la variable eficiencia de troceado de hojas en porcentaje.

Variable respuesta	Factor (F)	F (nivel)	Medianas	DMS ($p < 0.05$)
Eficiencia de troceado de hojas	Posición (P)	H 90°	93.65 A	0.5314
		H-45°	93.50 A	
	Velocidad (V)	V2	94.95 A	0.3761
		V1	91.25 B	
Combinación V-P		V2 (H 90°)	95.35 A	0.8171
		V2 (H 45°)	94.95 A	
		V1 (H 90°)	91.50 B	
		V1 (H 45°)	86.65 B	

Determinación de la eficiencia de troceado de la piña.

El Cuadro 5 muestra los resultados obtenidos de los ensayos de piña y en el cual se puede observar, al igual que en hojas, que los valores más altos de la clasificación MB se presentaron a V1, comparado con los valores encontrados para V2.

La variable de eficiencia de troceado de la piña del agave, cumplió con el supuesto de normalidad y la homogeneidad de varianzas entre muestras de ambas velocidades, motivo por el cual se utilizó la prueba de t para comparar las medias de dos tratamientos bajo muestras aleatorias independientes, en el Cuadro 6 se presenta una síntesis de esta prueba.

Cuadro 5. Resultados de la clasificación MB para los ensayos de piña.

Velocidad	V1 (1 500 rpm)	V2 (2 000 rpm)
Clasificación	MB (%)	MB (%)
Repetición 1	87.3	93.5
Repetición 2	70.0	92.6
Repetición 3	77.8	93.0
Repetición 4	73.1	89.7

Cuadro 6. Prueba de t para el factor velocidad con dos niveles y cuatro repeticiones para la variable eficiencia de troceado de piña en porcentaje.

Variable respuesta	Factor	Nivel	Medias	Estadístico T	Valor - P
Eficiencia de troceado de hojas	Velocidad (V)	V2	92.20 A	- 3.9153	0.0078**
		V1	77.05 B		

**= diferencia altamente significativa.

Dada la diferencia estadística significativa de la prueba de t, se deduce que el valor medio 92.20% de eficiencia para el troceado de la piña a la velocidad de 2 000 rpm superó el promedio 77.05% observado en la velocidad de 1 500 rpm.

Conclusiones

El factor velocidad rotacional en el molino de cuchillas articuladas acopladas en forma de “Y” resultó tener un efecto significativo sobre la eficiencia de troceado, tanto en hojas como en piña, de la planta de *Agave tequilana* Weber resultando ser un factor substancial para el troceado. El factor de la posición de la hoja no mostró influencia sobre la eficiencia de troceado de las hojas de agave.

La velocidad rotacional que proporciona mayor probabilidad de ausencia de los trozos de tamaño no deseado, poco apto para un proceso de difusión eficiente, es la velocidad lineal de corte de 46.5 m s^{-1} correspondiente a 2 000 rpm. La investigación cumple con el objetivo de generar los datos recomendables para el diseño del cabezal de trituración en el prototipo de cosechadora-troceadora de agave, cuyo principio de funcionamiento y geometría de los órganos de trabajo serán similares a los utilizados en el experimento descrito.

Agradecimientos

A los organismos de financiamiento: Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Consejo de Ciencia y Tecnología del estado de Guanajuato (CONCYTEG) por la aportación de recursos para el desarrollo del proyecto “Diseño y Construcción de una Cosechadora-Trituradora de Agave” (GTO-2009-02-118718) del cual emerge el presente estudio y la formación de recursos humanos en licenciatura y posgrado. A la División de Ciencias de la Vida (DICIVA) por su aportación de maquinaria y materia prima y a la empresa tequilera Casa Cuervo, S. A. de C. V., por el acceso y la información proporcionados para la realización del presente trabajo.

Literatura citada

- González-Pérez, G. 2008. Producción potencial de bioetanol a partir de diferentes especies de agave en el estado de Guanajuato. Tesis de Licenciatura. Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Guanajuato. 62 p.
- Honty, G. y Gudynas, E. 2008. Agrocombustibles y desarrollo sostenible en América Latina. In: IV Congreso Regional de Ingeniería Química. Montevideo, Uruguay. 34 p.

- Madrigal, R. 2009. Agaves para producir bioetanol. *In: Seminario México después del petróleo. ¿Serán los biocombustibles y geotermia una alternativa?* México, D. F. 15 p.
- Statistical Analysis System (SAS). 2001. SAS User's Guide, Version 8. SAS Institute Inc. Cary, N.C. USA. 250 p.
- Sierra-Sierra, L. A.; Gutiérrez, C.; Saldaña, A. y Serwatowski, R. 2010. Energía necesaria para el corte de la piña de agave con cuchillas de diferente borde cortante. *In: XIX Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola*, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. 100-109 pp.
- Sierra-Sierra, L. A. 2011. Estudio y diseño del mecanismo desfibrador de una cosechadora- trituradora de agave. Tesis de Licenciatura. División de Ciencias de la Vida de la Universidad Autónoma de Guanajuato. México. 198 p.
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), 2007. Problemáticas nuevas e incipientes en relación con la conservación y utilización sostenible de la diversidad biológica. Paris, Francia. 18 p.
- Whitney, G. K.; S.T. Lioutas; W. L. Henderson & L. Combs. 2002. Production for tequila US Patent 2002/0119217 A1. Patent. 1-4 pp.