

Propuesta de una cosechadora-desmenuzadora de *Agave tequilana* Weber para la producción de bioetanol y revisión de los procedimientos existentes

Noé Saldaña Robles*, César Gutiérrez Vaca*, Ryszard Serwatowski Hlawinska*, Alberto Saldaña Robles*, Adrián Flores Ortega*, Concepción Quiroz Ramírez*, José Manuel Cabrera Sixto*, Salvador García Barrón*, Armando Juárez Guani*

RESUMEN

El *Agave tequilana* Weber es una opción para la producción de bioetanol combustible. La cosecha manual del agave representa el 75 % de los costos de producción del cultivo, lo que ocasiona un mayor costo de producción del bioetanol que para otros cultivos. En este trabajo se presenta una propuesta de cosechadora-desmenuzadora de agave, para lo cual se consideran: propuestas existentes, la metodología de cosecha actual, máquinas agrícolas con mecanismos de interés y los requerimientos de la materia prima para producir bioetanol. La cosechadora propuesta considera el desmenuzamiento de hojas y piña en campo, retomando ideas de mecanismos empleados en molinos de piña de agave y desmenuzadoras agrícolas. La cosecha mecanizada de agave para producción de bioetanol presenta viabilidad técnica que requerirá una investigación para diseñar el mecanismo desmenuzador, su disposición geométrica y dimensiones, así como la potencia requerida en el desmenuzamiento, con el fin de dimensionar distintos elementos de la cosechadora.

ABSTRACT

Agave crop (*Agave tequilana* Weber) is an option to produce bioethanol as biofuel. By-hand-harvesting of agave is 75 % of crop production costs, resulting in a higher production cost of bioethanol than for other crops. This paper presents a proposal of agave shredder-harvester, for which are considered: existing proposals, the methodology of current crop harvest, agricultural machines and mechanisms of interest, requirements of the raw material for bioethanol production. Agave harvester proposed considers shredding of leaves and pineapple retaking ideas of gridding mechanisms such as milling of agave, shredding crop residues machines. The mechanization of the harvest of agave for production of bioethanol presents feasibility that will require a research to design, the crushing mechanism, its blades, geometry and dimensions, and the power required to measure different elements of the combine harvester in the crushing operation, as well as other variables.

Recibido: 26 de mayo de 2011
Aceptado: 24 de enero de 2012
Artículo basado en las instrucciones para
autores vigentes hasta septiembre 2011

INTRODUCCIÓN

Los combustibles fósiles fueron el sustento energético del siglo XX, no obstante, los daños causados al medio ambiente y el agotamiento de las reservas a mediano plazo han ocasionado la búsqueda de fuentes de energía renovable. El bioetanol se ha convertido en una de las opciones de energía más importantes en el mundo. México produjo 56 millones de litros en 2008, lo que representó menos del 0,1 % de la producción mundial, y aún tiene como meta producir 412 millones de litros para el año 2012 (Sierra, 2011). En investigaciones recientes se demostró la factibilidad técnica para obtener rendimientos mayores en la producción de bioetanol a partir de las hojas de agave (Madrigal, 2009; González, 2008; Whitney *et al.*, 2002), cifras claramente mayores a las de la producción a partir de maíz y de caña de azúcar. Balat y colaboradores (2009) presentaron información de los cultivos que recientemente se han adoptado para la producción de bioetanol; a esa información se anexaron los hallazgos para producir bioetanol a partir de las

Palabras clave:

Molinos de agave; biocombustibles; desmenuzamiento mecánico de agave; recolección mecanizada.

Keywords:

Agave mills; biofuels; mechanical shredding of agave; mechanized harvesting.

*Departamento de Ingeniería Agrícola. División de Ciencias de la Vida. Universidad de Guanajuato. km 9, carretera Irapuato-Silao, Irapuato, Gto., México, apartado postal 311. C. P. 36500. Tel. (462) 6242484, fax (462)6245215. Correo electrónico: saldanar@ugto.mx

hojas de agave (González, 2008; Nuñez *et al.*, 2011), los cuales se presentan en la tabla 1. Actualmente existe una gran reserva de superficie sembrada con agave, y parte de esta superficie sembrada no tiene mercado porque se encuentra fuera de territorio con denominación de origen (TDO). Tan sólo el estado de Guanajuato tiene 7 634 ha sembradas con agave, de entre las cuales el 25 % están fuera de TDO (SAGARPA, 2009). Del agave cosechado en México, un 97 % se destina a la producción de bebidas alcohólicas (Macías y Valenzuela, 2009), que sólo aprovecha la piña y deja las hojas en campo. La cosecha actual de agave en su totalidad se realiza manualmente. El costo de la cosecha representa el 75 % de la producción del agave, de acuerdo con información proporcionada por productores. Por lo anterior, para aumentar la viabilidad económica de la producción de bioetanol es necesario reducir el costo de la cosecha y aprovechar las hojas de agave (González, 2008), mediante la búsqueda de una solución mecánica para la cosecha de este elemento. En el presente escrito se analiza la cosecha actual del agave para la producción de tequila y los requerimientos de la cosecha de agave para la producción de bioetanol, así como las cosechadoras de agave propuestas en otros trabajos y el resto de las máquinas trituradoras de uso agrícola que cobran importancia para el presente estudio. Finalmente, se describe una propuesta para la mecanización de la cosecha de agave empleado en la producción de bioetanol.

Tabla 1.
Principales cultivos empleados en la producción de bioetanol en el mundo.

Cultivo	Rendimiento (t/ha/año)	Rendimiento de bioetanol (l/ha/año)	Costo (US \$/m ³)
Caña de azúcar	70	4 900	~ 60
Yuca	40	6 000	700
Sorgo dulce	35	2 800	200-300
Maíz	5	2 050	250-420
Trigo	4	1 560	380-480
Agave	43	7 000	~300

METODOLOGÍA

Para realizar la propuesta de cosechadora-desmenuzadora de agave que ofrezca la materia prima para producir bioetanol se realizó: 1) la revisión de las características físicas generales del agave, 2) la revisión de la metodología de cosecha actual, 3) la definición de los requerimientos de la materia prima para producir bioetanol, 4) la revisión de propuestas para la cosecha de agave y equipos agrícolas existentes con elementos y principios de interés para la propuesta, 5) la revisión de los trabajos realizados para llegar al

diseño conceptual presentado, 6) la definición de las funciones y restricciones deseadas en la cosechadora-desmenuzadora, y 7) el desarrollo de una propuesta.

Características físicas generales del agave

El agave es una planta que en su estado de madurez para cosecha mide de 1,5 m a 2,5 m de alto; tiene un tallo reducido y cubierto por las hojas, las cuales se encuentran aglomeradas formando una roseta que abarca una circunferencia horizontal de 2,5 m. Las hojas del agave miden de 1 m a 1,25 m de largo y 7 cm a 11 cm de ancho en la parte media. El peso de la planta de agave (hojas y piña) oscila entre 100 kg y 120 kg (Saldaña *et al.*, 2011a). Estos datos dependen de las condiciones de producción, el suelo y el estado de maduración (que dura de 6 a 8 años). Las plantaciones más comunes son en hilera con un marco de plantación de 1 m-1 m, 1 m × 2,5 m-2,8 m, siendo su densidad de aproximadamente 3 000 plantas/ha. Es deseable que los suelos presenten buen drenaje y sean laborables mecánicamente, con pendientes bajas (INIFAP, 2007). Los principales productos derivados del agave son el tequila, la miel de agave y la inulina, pero recientemente se ha propuesto la producción de bioetanol, biogás y pellets. En todos los productos citados se utilizan como materia prima los azúcares extraídos de la planta. La producción de bioetanol, biogás y pellets podría realizarse a partir de las hojas dejadas en campo, esto es, de los residuos de la industria tequilera y las plantas de agave fuera de TDO (González, 2008).

Metodología de cosecha actual del agave

En la actualidad, la cosecha de agave es manual en su totalidad. De acuerdo con datos proporcionados por productores de *Agave tequilana*, una cuadrilla (8 trabajadores) tarda 16 días en cosechar una hectárea. Para conocer el procedimiento detallado de cosecha, se llevó a cabo una serie de visitas a campo en varios municipios en TDO de los estados de Jalisco y Guanajuato. La cosecha se realiza en forma tradicional en tales sitios: una persona capacitada (jimador) emplea una coa (un tubo largo con un disco delgado y afilado soldado en su extremo), la cual se utiliza para cortar algunas hojas del agave y acceder a la raíz. Una vez que ha cortado parte de la raíz, emplea la coa como palanca para derribar la planta (figura 1a); posteriormente, apoyando un pie sobre la planta, corta las hojas (figura 1b) hasta dejar solamente la piña en el campo (figura 1c). Este trabajo demanda un esfuerzo físico considerable. Una vez separada la piña, se coloca en camiones con tolva de volteo para su descarga en la destiladora de destino. Las piñas

en las destiladoras son partidas en dos o cuatro partes mediante hachas. Las hojas de agave son abandonadas en el campo e integradas al suelo durante su siguiente preparación (figura 1d).



Figura 1. Cosecha tradicional de agave empleando la coa: (a) extracción de la planta; (b) corte de hojas; (c) planta completamente jimada; (d) hojas abandonadas en campo.

Definición de los requerimientos de la materia prima para producir bioetanol

La extracción de los azúcares de la planta de agave para la elaboración de los productos se puede realizar por dos procesos:

- **Cocimiento.** La piña de agave dividida en 2 o 4 partes se coloca en hornos de mampostería y se cuece por 24 h para degradar los carbohidratos (algunos productores utilizan autoclaves que reducen el tiempo de cocción a 7 h). De ahí, la piña cocida pasa al tren de molienda para la extracción del jugo con los azúcares simples.
- **Difusión.** El agave no es cocido previo a la extracción de azúcares, sino que es triturado y desmenuzado en finas tiras de fibra que son lavadas para extraer los azúcares de la planta. Posteriormente, los jugos son hidrolizados dentro de autoclaves. En la actualidad, el proceso de difusión ha tomado gran auge en la industria tequilera de México, debido a la eliminación del tiempo de cocimiento y

a que el proceso de molienda en la caña de azúcar presenta un costo 70 % u 80 % mayor que el de la extracción por difusión (Rein, 1995).

Sierra (2011) recopiló información de la industria tequilera del estado de Jalisco para caracterizar la geometría del material que resulta del proceso de desmenuzado de la fibra de agave (proceso realizado mediante molinos y demandado en el proceso de difusión para producir tequila –tabla 2-). A diferencia de la producción de mieles y tequila, que emplea solo la piña con el fin de evitar la generación de sabores y olores generados por la clorofila de las hojas de agave, la producción de bioetanol, biogás y pellets puede emplear las hojas para incrementar la biomasa disponible y los rendimientos por planta de agave. Por lo anterior, atendiendo el objetivo de ofrecer soluciones a la cosecha mecanizada de agave empleado en la producción de bioetanol, biogás o pellets, las propuestas de mecanización deben considerar la piña y hojas de agave y entregar el agave desfibrado listo para el proceso de difusión (logrando mayor extracción de azúcares que por cocimiento -tabla 2- e integrando la molienda al proceso de la cosecha). Siguiendo esas consideraciones, se reducirá significativamente el volumen ocupado por las plantas durante el transporte.

Tabla 2.

Clasificación de los trozos de agave con base en su medida más grande en la dirección transversal a la fibra (A) y su utilidad en el proceso de difusión para la extracción de azúcares (Sierra, 2011).

Clases	Muy bueno	Bueno	Regular (cm)	Malo
Dimensiones de la fibra	A < 0,5 cm	0,5 cm < A < 5 cm	2,5 cm < A < 5 cm	A > 5 cm

Propuestas existentes para cosechadoras de agave y maguey

Cosechadora mecánica de maguey

Ortiz y Rösel (2006) diseñaron y patentaron un dispositivo para cosechar maguey (figura 2). El dispositivo se diseñó para el corte total o parcial de la planta al nivel del suelo. El dispositivo está conformado por tres elementos principales: contra-cuchillas, brazo pivotante con cuchilla y un cable con polea para efectuar el corte mediante la transmisión de fuerza (la cual puede ser humana, animal o mecánica). Los autores proponen el siguiente funcionamiento: dos contra-cuchillas paralelas se colocan abrazando parcialmente la periferia del maguey, y se aplica fuerza al cable que pasa por la polea transmitiéndola al brazo pivotante, generando el cierre de la cuchilla y contra-cuchillas. De este modo se efectúa un corte tipo tijera sobre la base de la planta.

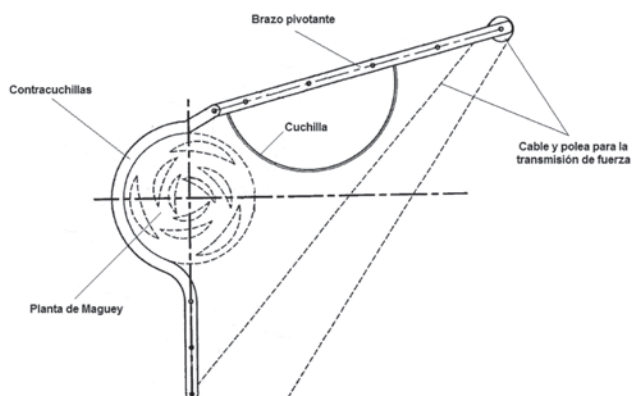


Figura 2. Cosechadora mecánica de maguey.

Cosechadora jimadora de *Agave tequilana* Weber

Otra patente existente consiste en una cosechadora-jimadora de *Agave tequilana* Weber propuesta por Castillo y colaboradores, (2001) en el Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología del Estado de Jalisco (CIATEJ). Esta máquina está diseñada para cortar la planta de agave a nivel del suelo y, posteriormente, realizar la jima (figura 3). De acuerdo con los autores, se construyó la horquilla, pero el resto del dispositivo no ha sido construido y no se han realizado pruebas. La cosechadora-jimadora consta de tres elementos, los cuales son:

- 1) Horquilla de corte. Dispositivo en forma de tenaza acoplado al tractor agrícola en la parte frontal, fabricado en acero y cuenta con un filo al interior; su función es cortar la planta de agave a nivel del suelo, empleando el empuje del tractor para el corte.
- 2) Transportador de cadena inclinado. Una vez cortada la planta, un mecanismo transportador accionado por el sistema hidráulico del tractor, y formado por arreadores articulados tipo peine, traslada la planta a un tambor rotatorio donde serán cortadas las hojas.
- 3) Tambor rotatorio. Mecanismo encargado de jimar la planta, constituido por un marco rectangular que tiene en su interior dos series de cuchillas. Una serie es fijada al marco en arreglo helicoidal y la otra es de cuchillas móviles, sujeta a los travesaños de la estructura de un tambor rotatorio. La estructura puede inclinarse de 15° a 45° con respecto a la horizontal. El ángulo proporcionado define el tiempo de residencia del agave en el tambor y el resultado de jimado deseado. Una vez jimada la planta, la piña cae por gravedad al suelo.

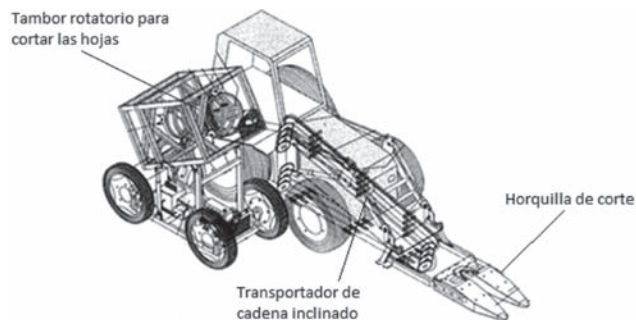


Figura 3. Máquina cosechadora-jimadora de *Agave tequilana* Weber.

Mecanización de la cosecha, recolección y transporte de agave sisal

Tanzania es uno de los principales proveedores de fibra natural en el mundo, no obstante, ha experimentado disminución en su producción desde 1960. El principal obstáculo que ha enfrentado es la excesiva y onerosa mano de obra empleada en la cosecha del sisal, la cual demanda 100 horas de trabajo por tonelada de fibra. Como resultado, hay escasez en la mano de obra para la cosecha, de tal suerte que surge la necesidad de mecanizar parcial o totalmente la cosecha (Majaja y Chancellor, 1997). Los autores proponen dos formas para contribuir a la mejora de la cosecha de agave sisal: a) mecanizar el corte, la recolección y el transporte en una máquina, y b) semi-mecanizar el corte de las hojas para disminuir el arduo trabajo manual y mecanizar la recolección y el transporte.

Propuesta para mecanizar la jima, recolección y transporte

Los autores esquematizaron una propuesta general de jimadora mecánica autopropulsada (figura 4) conformada por elementos laterales de corte para desprender las hojas de la piña y transportadores verticales para trasladar las hojas recién cortadas a otros transportadores horizontales que las depositan en un remolque.

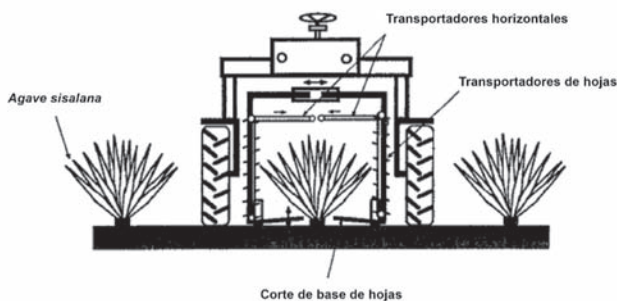


Figura 4. Cosechadora mecánica autopropulsada para agave sisal.

Propuestas para semi-mecanizar la jima

En esta opción Majaja y Chancellor (1997) consideraron los siguientes objetivos: ayudar a reducir el arduo trabajo de la jima, evitar la posición encorvada de los trabajadores durante el corte, la posibilidad de utilizar una fuente de energía externa y mecanizar la extracción de cada hoja desde su posición dentro de la planta. Con base en lo anterior, propusieron las siguientes soluciones: 1) **Poste con cuchilla.** Dispositivo de corte manual accionado tangencialmente a la hoja provocando el corte de ésta, similar a la coa, empleada para jimar el *Agave tequilana* Weber (figura 5a). 2) **Dispositivo de corte tipo sierra.** En la figura 5b se muestra una herramienta de corte que se ajusta rodeando la hoja, perpendicular al eje longitudinal de la misma y con un elemento dentado tipo sierra. 3) **Dispositivo de corte tipo cizalla.** Un elemento de corte impulsado por resorte o aire comprimido; realiza el corte por cizallamiento sobre las hojas. La figura 5c muestra la vista superior de un dispositivo en forma de paraguas invertido que sirve para recoger las hojas.

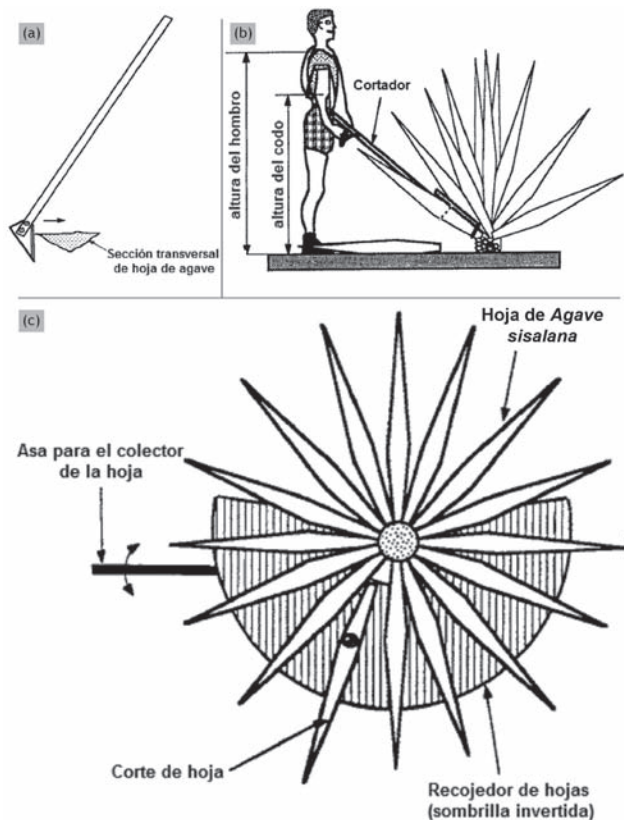


Figura 5. Dispositivos mecánicos para disminuir el arduo trabajo de la cosecha de agave sisal: (a) poste con cuchilla; (b) dispositivo de corte tipo sierra; (c) dispositivo de corte tipo cizalla.

Propuestas de mecanización para la recolección y el transporte

Chancellor y Majaja (1997) presentaron a grandes rasgos una propuesta para un sistema recolector de hojas acoplado al tractor agrícola (figura 6). Según ésta, un primer paso sería la jima de la planta, dejando las hojas tiradas en el suelo, y después se pasaría al sistema recolector. Dicho sistema recogería las hojas mediante dos tambores: el primero ayudaría a levantarlas y el segundo (mediante dedos flexibles) las depositaría en un sistema formado por dos elevadores, llevándolas hasta un remolque posicionado por detrás del tractor.

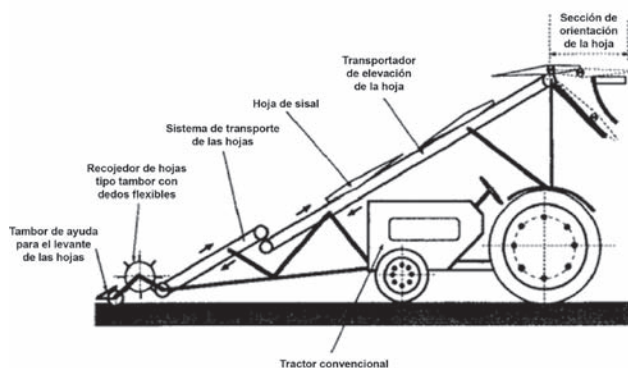


Figura 6. Esquema conceptual del dispositivo mecánico para recolección de la hoja de sisal.

Máquinas desmenuzadoras de uso agrícola

Puesto que la propuesta de cosechadora de agave contempla que las hojas y piña de agave se puedan aprovechar en la generación de bioetanol, biogás y pellets, las máquinas desmenuzadoras de agave existentes, y aquellas de uso en productos agrícolas más comunes y sus mecanismos de molienda, se convierten en una opción a revisar.

Molino picador de piña de agave

En Tepatitlán, Jalisco se fabrica un molino picador de piña de *Agave tequilana*, *Agave sisalana* y nopal (MAGRITTEP, 2010). La capacidad de trabajo reportada por el fabricante es de $8 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$. El molino posee una tolva de alimentación por donde se introduce la piña manualmente, enseguida, la piña es desmenuzada por dos tambores provistos de series helicoidales de cuchillas soldadas en la periferia e inclinadas (las cuales se encuentran girando a velocidades mayores a $1\ 740 \text{ r/min}$ en el mismo sentido). De acuerdo a la geometría de las cuchillas, éstas cubren el ancho de trabajo de los tambores. El material picado cae por gravedad a un tercer tambor que cuenta con series lineales de cuchillas fijas que realizan una segunda fase de desmenuzamiento-desfibrado, obteniendo un material adecuado para la difusión. El material desmenuzado-desfibrado puede

ser depositado en camiones por medio de una banda transportadora que tiene el molino. El molino picador puede ser accionado mediante la toma de fuerza de un tractor (~30 HP) en campo (figura 7a), o mediante un motor eléctrico (figura 7b) con potencia de 20 HP para operar en la industria. Por otro lado, las piñas transportadas a la industria tequilera son desmenuzadas en dos fases. En la primera, las piñas son colocadas, empleando una retroexcavadora, en una tolva que alimenta a un elevador de banda. Las piñas son elevadas y caen por gravedad a un molino de cuchillas articuladas, en donde son retenidas por una contra-cuchilla (figura 8a); posteriormente las cuchillas se encargan del troceado (figura 8b). El molino cuenta con 4 filas periféricas de cuchillas, en cada fila se tienen 8 cuchillas; para accionarlo se emplea un motor eléctrico de 100 HP que gira a 1 740 r/min con relación de transmisión de 3:1 motor-molino. La capacidad de una máquina es aproximadamente $9,4 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$ de piña, según información proporcionada por la industria tequilera. En la segunda fase, el producto obtenido es transportado por otra banda hasta donde se emplean dos molinos de martillos, sirviéndose de cadenas como órganos desmenuzadores en serie (figura 9a). Cada molino posee 8 filas periféricas de cadenas, en cada fila se tienen 10 cadenas; para accionarlos se emplean motores eléctricos de 75 HP y 1 740 r/min con una relación de transmisión 1,4:1 motor-molino. Los trozos obtenidos en la primera fase son separados en forma longitudinal y paralela a la fibra por el golpeteo de las cadenas, pero no son cortados, por lo que la longitud a la salida no cambia significativamente (figura 9b). El material resultante es trasladado por otra transportador tipo peine hacia los difusores para la extracción de azúcares.

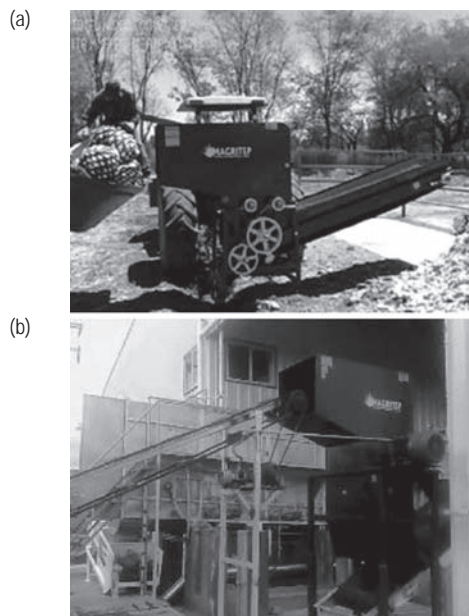


Figura 7. Molino picador de agave: (a) accionado por el tractor; (b) con motor eléctrico.

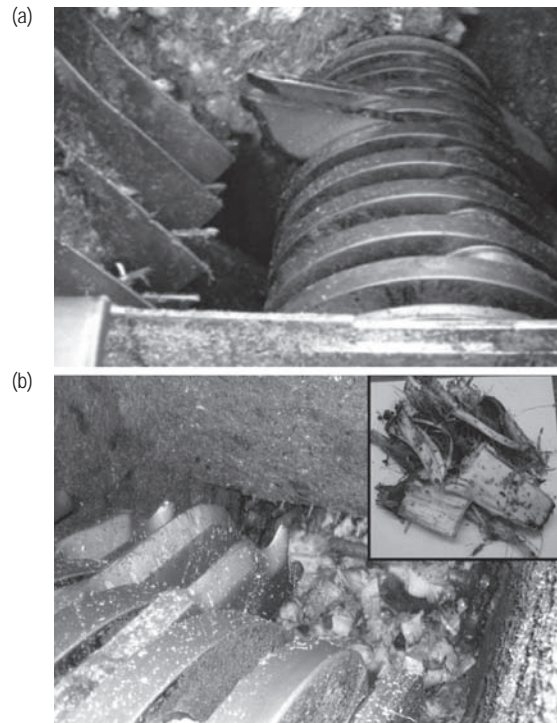


Figura 8. Fase de trituración; (a) rotor de cuchillas articuladas; (b) troceado en la primera fase.

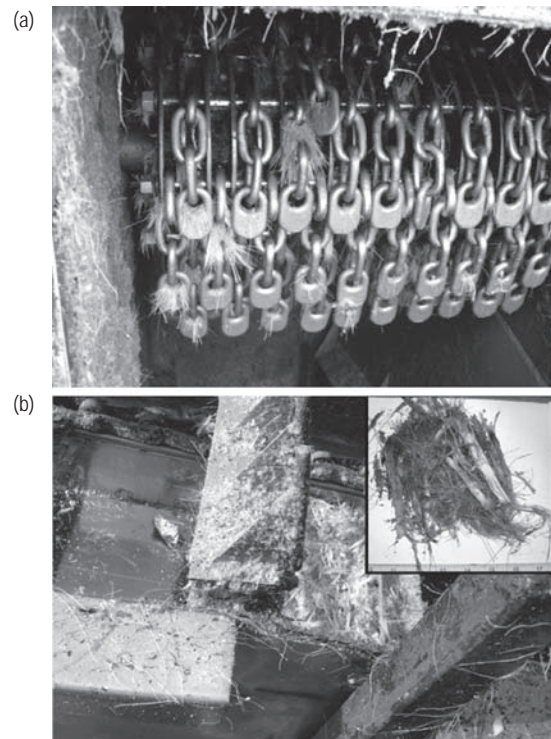


Figura 9. Fase de desmenuzado; (a) molino de cadenas; (b) desfibrado de la segunda fase.

Molinos de martillos de uso agrícola

En el mercado se puede encontrar una amplia gama de molinos de martillos, aunque, en general, el molino de martillos de uso agrícola (figura 10) tiene una tolva de alimentación, un rotor formado por un eje, discos equidistantes, pernos acopladores de los discos y martillos articulados (que mediante impactos trituran y desfibran el material). Abajo del rotor, se halla una criba en diferentes presentaciones y tamaños que no deja pasar al material hasta que tenga la dimensión apropiada. El material desmenuzado es expulsado por la succión de un extractor mediante un tubo de descarga. En estos molinos, la cuchilla más común es una placa rectangular que puede presentar un lado afilado o no. Los molinos de uso agrícola son comúnmente accionados mediante la toma de fuerza del tractor, la cual hace girar un juego de poleas para incrementar la velocidad angular del rotor que alcanza las 3 200 r/min en la mayoría de los casos.

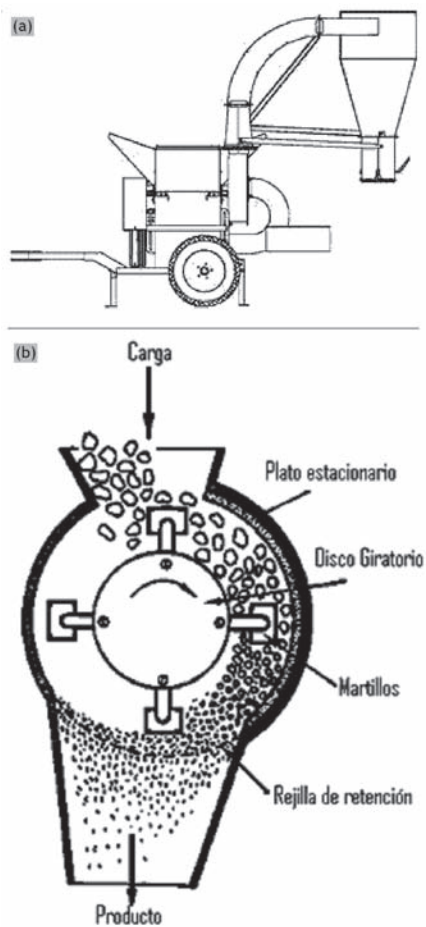


Figura 10. Molino de martillos, (a) máquina completa; (b) principio de funcionamiento.

Desmenuzadoras-picadoras de forraje

El propósito de estas máquinas de forraje puede ser: 1) desmenuzar los residuos de cultivos para integrarlos al suelo, y 2) cortar forraje para picarlo y depositarlo en remolques o camiones. Ambas máquinas cuentan en común con un bastidor, en el cual se encuentra montado un rotor provisto de cuchillas que pueden ser articuladas o fijas de diseño especial. El rotor con cuchillas gira de 1 300 r/min a 2 200 r/min (dependiendo del modelo y la capacidad de trabajo) y desmenuza o pica el material vegetal, proporcionando un corte uniforme. Las picadoras de forraje cuentan (opcionalmente) con un tubo de descarga que gira 360°, un extractor, un deflector y, en algunos casos, el enganche está descentrado (figura 11a). Las máquinas desmenuzadoras (figura 11b) por lo general cuentan con el enganche centrado y esparcen el material sobre el suelo. La mayoría de ésta requieren de acoplarse a la toma de fuerza de tractores de entre 50 HP y 100 HP.

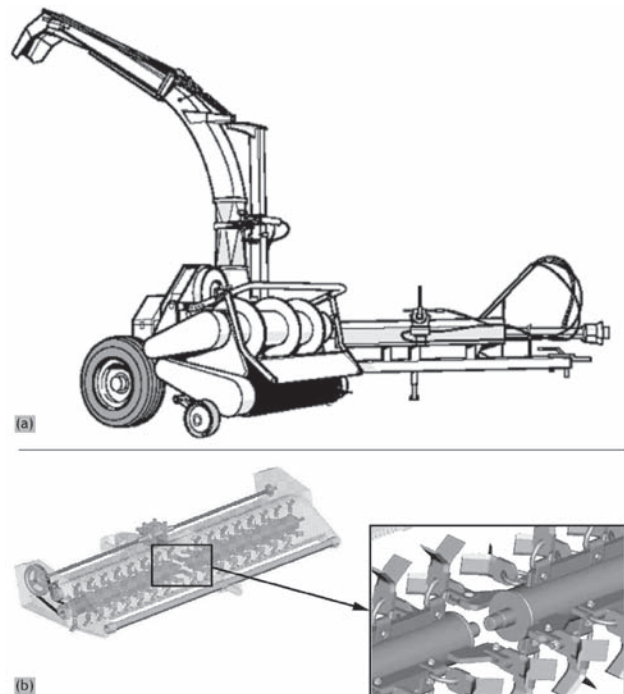


Figura 11. Máquinas de uso agrícola: (a) picadora; (b) rotor de picadora John Deere.

Análisis de las máquinas, mecanismos de interés para la cosecha mecánica de agave

La cosechadora de maguey (Ortiz y Rosél, 2006) dista mucho de entregar la materia prima deseada para la producción de bioetanol (que requiere de hoja y piña desmenuzadas), por lo que se requerirán varios pasos

subsecuentes. El corte de la planta de agave por empuje difícilmente se logrará (Castillo *et al.*, 2001), ya que en pruebas empíricas realizadas para arrancar una planta de agave por empuje con un tractor de 78 HP no se consiguió el objetivo. Majaja y Chancelor (1997) presentaron el diseño conceptual para la mecanización de la jima de la hoja para *Agave sisalana*, sin embargo, en el *Agave tequilana* también se ocupa la piña. Ahora bien, un dato relevante fue la energía de corte transversal que fue similar según estudio realizado por Saldaña y colaboradores (2011a). Sierra (2010) determinó la cuchilla de corte más conveniente para fibra de *Agave tequilana*, probando algunas de las aquí revisadas; Saldaña (2011b) montó una serie de estas cuchillas en la superficie de un cilindro de 0,45 m de diámetro y encontró que a 2 400 r/min generan un triturado de agave adecuado para la difusión. La velocidad registrada coincidió con un estudio realizado por Coates (1999) para discos cortadores del Agave *Hesperaloe funifera*. Saldaña y colaboradores (2011b) estimaron una potencia de 80 HP para una máquina de trituración continua de plantas de agave, cuyo resultado estuvo entre los extremos reportados para la potencia de los motores en molinos industriales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los esquemas conceptuales resultantes, con base en el producto derivado del agave durante la cosecha, las funciones y restricciones del diseño de una cosechadora de agave. De la misma manera, se propone una solución para la mecanización de la cosecha de agave.

Esquemas conceptuales para obtener diversos productos de agave

De acuerdo con las operaciones requeridas en campo para la cosecha de agave, se pueden establecer seis esquemas conceptuales para el desarrollo de propuestas de mecanización (figura 12). Para la producción de tequila, mieles e inulina los mejores esquemas son aquellos en que la piña se separa de las hojas y se entrega como materia prima a la industria. En estos esquemas, las hojas pueden ser aprovechadas o no, por lo que la recolección y el transporte de las mismas son opcionales. Los esquemas en que las hojas y la piña son trituradas antes del transporte son los mejores para la producción de bioetanol, biogás y pellets. Por lo anterior, a continuación se definen las funciones y restricciones, así como el planteamiento de una propuesta de cosechadora para trituración de hojas y piña.

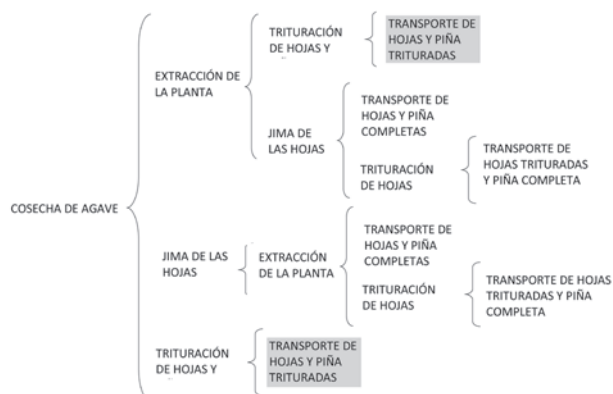


Figura 12. Esquemas conceptuales para cosechar el agave según el producto que se obtendrá.

Funciones y restricciones

Considerando las dimensiones y pesos de hojas y piña de agave, el proceso de cosecha y los requerimientos de la materia prima para la producción de bioetanol, biogás y pellets, las máquinas descritas anteriormente (además de otros equipos agrícolas con principios de utilidad y los esquemas conceptuales establecidos) establecieron las funciones y restricciones específicas para el diseño conceptual del dispositivo de corte y troceado de agave. Dichas funciones y restricciones son detalladas a continuación.

Funciones para un desempeño eficiente: 1) lograr un desmenuzamiento adecuado para que el producto obtenido pueda emplearse como materia prima para el proceso de difusión; 2) la capacidad de trabajo propuesta debe ser al menos 8,5 t/h, lo que representa 0,25 ha en 8 h (considerando la planta completa de 120 kg y no sólo las piñas).

Restricciones para un desempeño eficiente: 1) velocidad de avance mínima de 5 cm/s, que corresponde a triturar 1 planta completa de agave (2,5 m en 50 s, algo que está limitado por la potencia disponible) o 0,25 ha/día; 2) la máquina cosechadora-trituradora de agave deberá ser tirada por un tractor provisto de una transmisión especial tipo *crawler*, que permite velocidades de avance bajas; 3) emplear el sistema hidráulico, o la toma de fuerza del tractor agrícola, como fuente de potencia para activar los elementos de trabajo; 4) adaptar el diseño a las características geométricas de la planta; 5) diseño económico de fácil ensamble, operación y mantenimiento.

Trituración (hojas y piña)-transporte

En este esquema se propuso triturar hojas y piña de agave, mientras está en campo y enraizado al suelo,

para obtener la materia prima adecuada para difusión, descargando el producto obtenido en camiones para el transporte. De esta forma se evitaría la jima, extracción y recolección de hojas y piñas, lo que podría ahorrar energía y tiempo. La solución propuesta se basa en el principio de funcionamiento de los dispositivos observados en las empresas tequileras, consistiendo en dos fases: triturado y desmenuzado, respectivamente. Los dispositivos que conformarían a la máquina cosechadora-trituradora de agave se describen de manera general (figura 13).

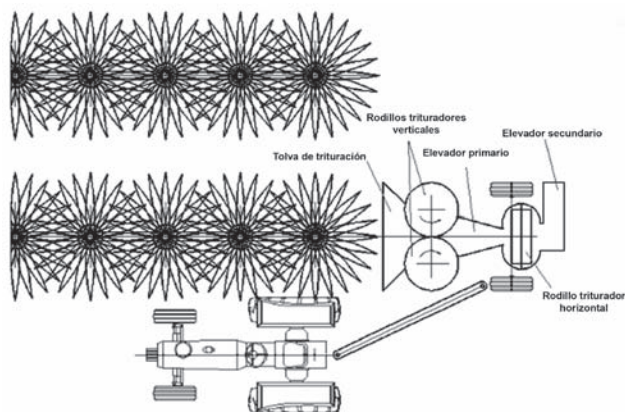


Figura 13. Vista esquemática de la máquina cosechadora-trituradora de agave.

- **Cabezal de trituración.** Una tolva de alimentación (diseñada con base en las características geométricas de la planta de agave) permitiría introducir la planta de agave a dos rodillos trituradores verticales contra-rotantes según diseño de Saldaña (2011b), los cuales estarían encargados de realizar la fase de triturado. Estos rodillos estarían equipados con series de cuchillas como las propuestas por Sierra (2010); dichas cuchillas pueden ser: fijas en un arreglo helicoidal, o en forma de arreglo lineal de cuchillas articuladas (dispositivos con mayor aceptación en la industria tequileras). Se podría colocar una contra-cuchilla entre los rodillos para evitar el paso de hojas completas y pedazos de piña no adecuados. Se proponen molinos verticales, ya que los molinos horizontales funcionan bien cuando el material a triturar cae por gravedad; en este caso, la planta no necesariamente es obligada a entrar entre los rodillos y puede ser expulsada en posición opuesta a la deseada (además las hojas opuestas a la trituración caerían completas al suelo al separarlas de la piña).
- **Elevador primario.** Mecanismo empleado para transportar el producto obtenido de la fase de trituración al rodillo desmenuzador.

- **Rodillo desmenuzador o desfibrador horizontal.** Se emplearía un rodillo horizontal de martillos que separaría el tamaño de los pedazos de la primera fase en fibras más finas y adecuadas para la difusión. Se lograría el desfibrado uniforme mediante una criba removible.
- **Elevador secundario.** Transportaría la materia prima resultante de desmenuzado a la tolva de un camión, para ser llevada a las plantas destiladoras.

El conjunto de mecanismos sería accionado por un sistema hidráulico independiente, activado mediante la toma de fuerza de un tractor agrícola. Dicho conjunto de mecanismos debería ser tirado por el tractor. Los rodillos del cabezal de trituración trabajarían en disposición casi vertical con ligera inclinación hacia adelante. Por otro lado, retomando los resultados de Sierra (2010) y Saldaña (2011b), se establecería la orientación de las cuchillas y el arreglo de su posición sobre el cilindro, presentando dos propuestas de rodillos de trituración para conformar el cabezal. Uno de ellos con series de cuchillas helicoidales fijas (figura 14a); las cuchillas serían formadas por placas rectangulares con punta en un extremo y filo en la punta. El otro rodillo propuesto llevaría series lineales de cuchillas articuladas en forma de Y con filos en un extremo (figura 14b). En la segunda fase, el molino podría quedar formado por una estructura similar a la mostrada en la figura 9a, en donde los elementos para desmenuzar serían cadenas (entre otras posibilidades).

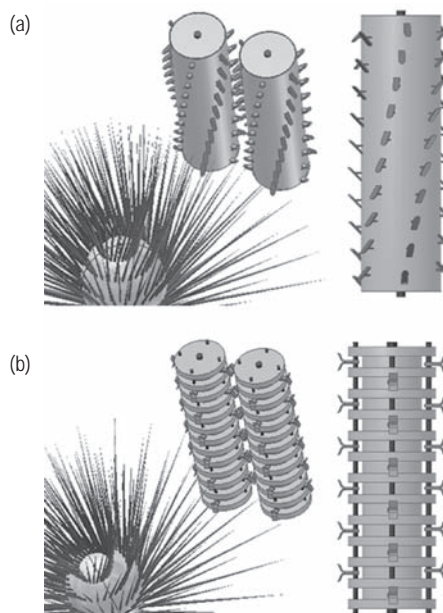


Figura 14. Dispositivos para el corte y troceado (fase de trituración): (a) rodillos de series de cuchillas helicoidales fijas; (b) rodillo de series lineales de cuchillas articuladas.

CONCLUSIONES

La mecanización de la cosecha del *Agave tequilana* Weber ha sido poco incursionada por investigadores y técnicos. Sin embargo, el agave como alternativa para la producción de biocombustible y la adopción de la difusión como técnica para extraer los azúcares, cambia completamente los requerimientos de la materia prima y permite aprovechar la piña y las hojas de la planta. Lo anterior simplifica la cosecha mecanizada y permite la entrega de piña y hojas trituradas para el proceso de difusión. Por otro lado, existen actualmente diversos mecanismos para triturar fibra de agave, y otros materiales fibrosos, que aumentan las posibilidades de éxito de mecanizar la cosecha de agave para la producción de bioetanol. La potencia requerida para desmenuzar el agave se ha reportado entre 20 HP y 175 HP. Existen estudios con datos de energía de corte para fibra de diferentes agaves, detalles de las cuchillas más apropiadas para *Agave tequilana*, su disposición geométrica en un tambor rotatorio, la velocidad óptima y geometría de dicho tambor. La mecanización de la cosecha de agave para producción de bioetanol, aprovechando la piña y las hojas, promete tener una solución viable. No obstante, tal solución requerirá de un largo proceso de investigación para el diseño del prototipo y sus componentes, pruebas de campo y optimización del mismo, así como la adaptación de medios de transporte y arreglos en la plantación.

REFERENCIAS

- Balat, M., Balat, H. (2009). Recent trends in global production and utilization of bio-ethanol fuel. *Applied Energy*, 86(11): pp. 2273–2282.
- Castillo, O. R., De Anda, S. J., Rodríguez, G. E., Fernández, F. O., Perez, M. F., Hoell, E. G. (2006). *Cosechadora y jimadora de agave*. Patente MX 243917.
- Coates, W. (1999). Evaluation of Cutting Devices for Hesperaloe Harvesting. *Applied Engineering in Agriculture*, 15(3): pp. 183–187.
- González, P. 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. Universidad de Guanajuato.
- Macías, M. A., Valenzuela, Z. A. G. (2009). El tequila en tiempos de la mundialización. *Comercio Exterior*, vol. 59(6): pp. 459–472.
- Madrigal Lugo, R. (2009). *Agaves para producir bioetanol*. Seminario: "México después del petróleo ¿Serán los biocombustibles y geotermia una alternativa?". México, D. F., septiembre 21, 2009.
- MAGRITEP. (2010). *Molino-Picadora de agave. Maquinaria Agrícola de Tepatlilán*. <http://magritep.com/moledor1.html>. Consultado: 5 de Abril de 2011. 10:25 hrs.
- Majaja, B. A., Chancellor, W. J. (1997). The potential for mechanical harvest of sisal. *Applied Engineering in Agriculture*, vol. 13(6): pp. 703-708.
- Núñez, H. M., Rodríguez, L. F., Khanna, M. (2011). Agave for tequila and biofuels: an economic assessment and potential opportunities. *GCB Bioenergy* 3, 43–57, doi: 10.1111/j.1757-1707.2010.01084.x.
- Ortiz, L. H., Rösel, K. D. (2006). *Cosechadora mecánica de maguey*. Modelo de utilidad, MX 1609.
- Saldaña, R. A., Serwatowski, H. R., Saldaña, R. N., Gutiérrez, V. C., Cabrera, S. J. M., Flores, O. A., Quiroz, R. J. C., García, B. S., Juárez, G. J. A. (2011a). Determinación de algunas propiedades físicas de la planta de *Agave tequilana* Weber. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. Cuba. (Aceptado para publicación; 1/2012.)
- Saldaña, R. A. (2011b). *Diseño de equipo para corte y troceado de la planta de Agave*. Tesis de Maestría. División de Ciencias de la Vida. Universidad de Guanajuato.
- SAGARPA. (2009). *Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON)*. <http://www.sagarpa.gob.mx>. Consultado: 5 de Abril de 2011. 14:53 hrs.
- 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. Universidad de Guanajuato.
- Rein, P. W. (1995). *A comparison of cane diffusion and milling*. Proceedings of the South African Sugar Technologists' Association. Sugar Limited, La Lucia.
- Whitney Gordon, K., Lioutas, S. Theodore, Henderson, W. Lincoln, Combs, L. (2002). *Production for tequila*. United States Patent US 2002/0119217 A1. August 29. <http://www.freepatentsonline.com/20020119217.pdf>.