

Análisis de la Molienda en el Proceso de Elaboración de Mezcal

Hector. M. Durán y Jose L. Pulido

Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), Facultad de Ingeniería,
Av. Dr. Manuel Nava 8, CP 78290 San Luis Potosí, S.L.P.-México (e-mail: jpulido@uaslp.mx)

Resumen

Se presenta y analiza el proceso de molienda de maguey para elaboración de mezcal, en las fabricas de la zona de San Luis Potosí, México. Las fábricas de mezcal cuentan con un molino chileno que consiste en una piedra amonedada de cantera o cemento que gira y presiona el material extrayendo sus jarabes. La rueda de piedra del molino presenta problemas de patinaje, que consiste en el deslizamiento sobre el material, por lo cual el bagazo conserva una cantidad considerable de jarabes o mieles utilizables. Se analizan diversos molinos y se estudia el comportamiento de las fuerzas que ejerce la rueda, para determinar las condiciones óptimas de diseño y operación. Se concluye que la densidad de la piedra tiene que ser la máxima posible, el área de contacto debe ser la más pequeña posible, y los canales sobre la superficie de la piedra deben tener una dirección hacia el centro del molino, para que el jugo salga en dirección de las fuerzas del material comprimido.

Palabras clave: mezcal, maguey, molienda, eficiencia de extracción

Analysis of Agave Milling in the Process of Mescal Manufacturing

Abstract

In this work, the process of grinding of agave for making mescal, in the factories of the zone of San Luis Potosi, Mexico is presented and analyzed. The mescal factories employ a Chilean mill which has a millstone wheel of that presses the material extracting its juices. The wheel presents problems of skating, which consists of the sliding of the wheel on the material, so the bagasse retains a considerable quantity of syrups and honeys. Several mills are analyzed and the forces exerted on the bagasse are studied, to determine the optimum design and operating conditions. It is concluded that the thickness of the stone has to be as big as possible, the contact area has to be as small as possible, and the channels on the surface of the stone must be directed towards the center of the mill, so that the juice goes out in direction of the forces of the compressed material.

Keywords: mescal, agave, milling, extraction efficiency

INTRODUCCIÓN

El agave es una planta de la familia de las Amarilidáceas, de hojas largas y fibrosas de forma lanceolada, de color verde azulada cuya parte aprovechable para la elaboración de mezcal es la piña o cabeza (tallo y base de sus hojas). De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-070-SCFI-1994, Bebidas Alcohólicas -Mezcal- Especificaciones, (Diario Oficial de la Federación el 12 de Junio de 1997), el mezcal es una bebida alcohólica regional obtenida por destilación y rectificación de los mostos preparados directa y originalmente con los azúcares extraídos de las cabezas maduras de los siguientes agaves: *Agave angustifolia* Haw (maguey espadín); *Agave esperima* Jacobi, Amarilidáceas (maguey de cerro, bruto o cenizo); *Agave weberi* Cela, Amarilidáceas (maguey de mezcal); *Agave potatorum* Zucc, Amarilidáceas (maguey de mezcal); *Agave salmiana* Otto Ex Salm SSP Crassispina (Trel) Gentry (maguey verde mezcalero). Previamente hidrolizadas o cocidas, y sometidas a fermentación alcohólica con levaduras, cultivadas o no, siendo susceptibles de ser enriquecido, para el caso del mezcal tipo II, con hasta 20% de otros carbohidratos permitidos por la Secretaría de Salud en la preparación de dichos mostos, pero sin eliminar los componentes que dan las características a este producto, no permitiéndose las mezclas en frío. Hay dos formas de moler las piñas cocidas de maguey para la extracción de mieles: la primera es la extracción manual y la segunda es la extracción auxiliada con un molino chileno, llamado también molino egipcio o tahona. La molienda manual se hace con instrumentos primitivos como mazos de madera, trabajados en forma de bate y martillo, se practica en fábricas familiares o palenques de Oaxaca, donde el volumen de producción es bajo y elaborado de forma tradicional (Sánchez, 1989). El molino chileno o tahona consiste en una piedra amonedada de cantera o cemento (peso de 500 kg a 3000 kg) y puede ser dentada o lisa en su área de contacto con el metate; el movimiento de esta piedra se efectúa por un tubo metálico o un barrote de madera que la atraviesa por su centro y une al mismo tiempo con un eje vertical (de hormigón o madera), clavado en el centro del área de la molienda, con el cual se regula el movimiento de traslación. Alrededor de la superficie de molienda, existe un borde de

piedra o cemento que impide la salida de jarabes o mieles y el bagazo, la superficie del molino tiene una ligera inclinación y pequeños canales para conducir los jarabes obtenidos a las tinajas de fermentación (Valenzuela 1997.). El movimiento del molino se logra con un tractor, motor o tiro animal (Rossel et al., 2002). La molienda es un punto crítico en el proceso de elaboración del mezcal, por su influencia en el rendimiento del producto terminado (Durán, et al. 2002).

Las fábricas de mezcal potosino cuentan con un molino chileno o tahona, cuyo principio de funcionamiento es similar entre ellas, pero con algunas variantes en diseño y forma de trabajo. La molienda es un proceso complicado y es una función de características como material, tamaño, forma, dureza, humedad, tipo de herramienta, resistencia de fractura, resistencia de compresión, módulo de elasticidad, valores tecnológicos de la máquina, etc. Por tanto se planteó como objetivo de este trabajo, estudiar y eficientar el uso en la molienda de maguey para elaboración de mezcal

MATERIALES Y MÉTODOS

Se visitaron las fábricas de mezcal Saldaña, Santa Teresa, Laguna Seca, Jarillas y Santa Isabel; para caracterizar elemento del molino (tamaño, forma, peso, patinaje, deslizamiento, eficiencia en extracción de mieles y materiales de construcción).

Para abrir mecánicamente las células del material biológico (piña de maguey) existen cuatro principios; la presión, el golpe, el choque y el corte. En estos principios se aplican los fenómenos de romper, moler y cortar. La selección de la máquina adecuada para estos procesos es muy reducida debido a las características del material; de importancia para la molienda son las referencias sobre la fricción y la resistencia al corte de la piña de maguey. Debido a la presencia de material sólido y líquido en la planta, hay tres elementos básicos en el modelo para caracterizarlas, esos son el cuerpo viscoso, elástico y plástico. Desde el punto de vista energético, las máquinas accionadas por el principio de corte por deslizamiento reducen más efectivamente el material (piñas de maguey), pero la cantidad de células abiertas es menor que con los otros principios. El uso de impacto y choque se distingue en las

máquinas del tipo molino de martillos; porque en éstos, las células se abren más en comparación con el corte únicamente, pero el coeficiente de energía requerida para cada nueva área de material reducido de tamaño es muy deficiente. Las máquinas del tipo de rueda rodante con pivote central (molino chileno o tahona), aplican en su accionar tres efectos; de fricción, presión y corte. Con esta combinación se prepara adecuadamente el material para una extracción sencilla y completa de las mieles.

PROCESOS DE MOLIENDA

Al hablar de molienda se tiene forzosamente que hablar de la reducción de tamaño del material, para lo cual existen dos teorías, la de espacio (volumen) y la de superficie (Kanafojski, 1961). La teoría de espacio solo es aplicable en el caso de los esfuerzos en el rango de la elasticidad; la reducción del tamaño siempre necesita pasar el límite de la resistencia última del material. La teoría del espacio se utiliza para cálculos aproximados y es más útil para la explicación del proceso de molienda por golpe y por presión de partículas grandes (volumen). La teoría de superficie explica mejor los procesos de molienda de cereales. La teoría del volumen explica la deformación de la masa mediante la teoría de elasticidad, donde se define la proporcionalidad de la fuerza de deformación en relación a la deformación del cuerpo; de esta forma el trabajo se determina con la ecuación:

$$T = \frac{\sigma^2 V}{200 E} \quad (1)$$

Donde: V; es el volumen de las partículas, E; siendo el módulo de elasticidad y σ ; es el esfuerzo de presión.

Por lo tanto, el trabajo para la reducción del material es proporcional al volumen, y la fuerza para la reducción del material es proporcional a la superficie de corte. La aplicación de la teoría muestra que el coeficiente de rendimiento en un molino mecánico va de 7% hasta 12%; por lo que, la selección del molino es fundamental para una buena preparación del material, logrando que la integración tecnológica encuentre su máximo en el proceso de producción. La integración tecnológica, la textura y estructura del bagazo optimizará la extracción de las

mieles. Con el molino de cuchillos (o incluso el hacha, que es una herramienta muy utilizada en las mezcaleras) es posible realizar un corte donde interviene el estiramiento y la formación de astillas con grietas. El corte por deslizamiento reduce la fuerza necesaria para el corte, y si la superficie de la astilla es muy áspera, es decir, la superficie es muy extensa y con gran topografía, la extracción es simple y efectiva, además por la deformación plástica del material vegetal se reduce la fuerza de fricción entre la cuchilla y el material.

El molino chileno o tahona presenta movimientos de rotación, torsión y traslación alrededor del eje central (Figura 1); las piñas de maguey se parten en trozos y se colocan al paso de la piedra para ser trituradas y exprimidas gracias al giro y traslación.

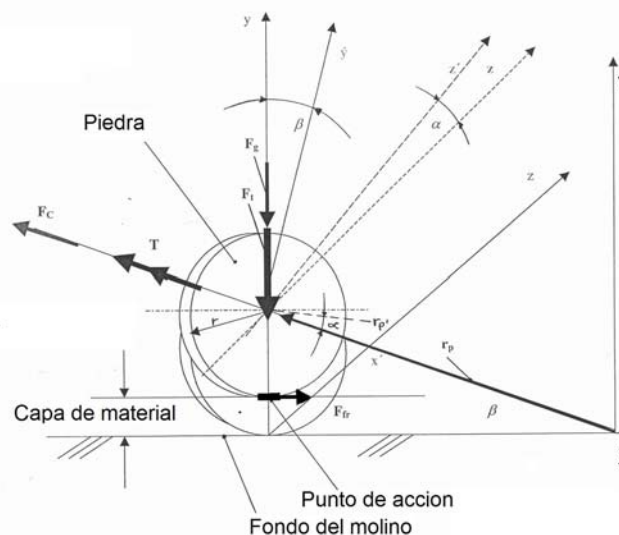


Fig.1: Fuerzas en el proceso de Molienda

La torsi6n afloja y desgarras las fibras de la piña, facilitando la salida de las mieles. Los trozos de las piñas son acomodados en el metate frente a la piedra, prensando y extrayendo las mieles (Fish et al. 1985). Al paso de la piedra el bagazo se compacta, se agregan más trozos de piña y se da el número de pasos que se considere necesario hasta que se haya extraído la mayor cantidad de mieles. Con lo anterior, surge el concepto "energía de deformaci6n (U); que es igual al trabajo efectuado por las cargas".

En la figura 1:

rp; siendo radio de la planta tahona
rp'; es el eje de giro de la piedra encima del material

F_t ; es la fuerza total = $F_g + F_c \times \sin \beta + T \times \sin \beta$

F_g ; es el peso de la piedra

F_c ; es la fuerza de coriolis = $m \times r_p \times \omega^2$

$T = \theta \varphi$; siendo momento polar inerte ; y

φ ; es la aceleración angular

F_v ; es el aumento de la fuerza vertical por la dinámica = $F_c \times \sin \beta + T \times \sin \beta$

β ; es la inclinación del eje de la piedra.

$$U = \int_0^{\delta} P_1 d\delta \tag{2}$$

Por lo que la deformación total en varias partes con diferentes fuerzas axiales y cortantes se pueden determinar mediante la ecuación:

$$\delta = \sum_{i=1}^N \frac{P_i L_i}{E_i A_i} \tag{3}$$

Donde :

P_i ; es la fuerza

L_i ; es el longitud del material (grosor, espesor)

A_i ; es la área del material que recibe el esfuerzo

E_i ; es el módulo de elasticidad (función de la masa líquida, masa sólido, estructura y textura).

Por eso las cargas verticales del peso y de la fuerza centrífuga, además de las fuerzas horizontales, como fuerza cortante, patinaje traslativo y angular se acumulan produciendo una deformación resultante mayor que las deformaciones parciales. El mismo resultado se presenta por la acumulación de los esfuerzos axiales y cortantes. Esa es la causa de la destrucción amplia del material orgánico, que facilita la extracción de mieles con alta calidad de azúcar.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura1, muestra los porcentajes de comprensión para las mezcaleras Saldaña y Laguna Seca (28.5% y 44% con una presión de 0.971 t/m² y 0.762 t/m²) respectivamente. Las características de las piedras se dan en la tabla 1; en la fábrica de mezcal Laguna Seca no permiten se forme una capa de material o colchón. Para ello dan aproximadamente 10 vueltas o pasos por carga; esto es, se distribuye la piña a moler y se pone en

movimiento el molino, después de 10 vueltas se detiene, se retira el bagazo y se vuelve a cargar.

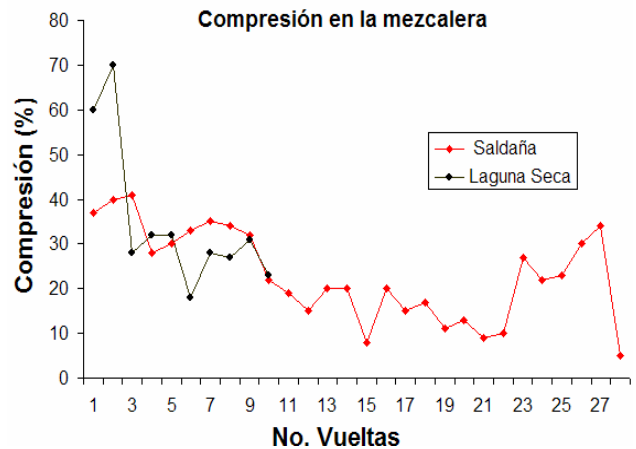


Fig 2: Porcentaje de comprensión

Tabla 1. Variación de la presión (t/m²) ejercida por la rueda. ¹ Molino menor; ² Molino mayor

Espesor colchón (m)	Laguna Seca	Saldaña (1) (2)	Santa Teresa (1) (2)	Jarillas	Santa Isabel
0.01	18.330	17.4842 5.386	20.957 26.570	18.321	17.645
0.05	8.303	7.92311. 484	9.482 12.001	8.299	7.995
0.10	5.968	5.698 8.241	6.806 8.594	5.965	5.749
0.15	4.956	4.735 6.832	5.643 7.109	4.954	4.777
0.20	4.368	4.176 6.010	4.965 6.239	4.366	4.212
0.22	4.195	4.011 5.767	4.765 5.981	4.193	4.046

En la fabrica de mezcal Saldaña permiten que se forme una capa de material o colchón; razón por la cual dan aproximadamente 29 vueltas o pasos por carga antes de retirar el bagazo, esto es, agregan material (piñas) de manera continua y después de 29 vueltas retiran el bagazo. De la información mostrada en las tabla 1 se puede suponer que impedir la formación del colchón o capa de material es lo mejor para llegar a la deformación plástica, evitando que el bagazo recupere su espesor (deformación elástica). La presión que la rueda ejerce es inversamente proporcional al área de aplicación de la fuerza, a mayor espesor del colchón, mayor superficie; lo recomendable es la forma en que realizan la molienda en la fábrica de mezcal Laguna Seca; utilizando una piedra como la de Santa Teresa, incluso biselada para aumentar más la presión y con un perfil

bien labrado para evitar en la medida de lo posible el deslizamiento. Otros puntos importantes en la molienda son los siguientes:

a) Presión ejercida por la piedra sobre el material. En la tabla 1 se muestra como varia la presión ejercida sobre las piñas a medida que el espesor o colchón se incrementa; pues la presión disminuye. b) Deformación causada por la piedra. La deformación vertical del material durante la molienda depende del peso y la forma de la rueda, ya que la presión es inversamente proporcional al área de aplicación. En molienda se presentan dos tipos de deformación; la primera en presentarse es la deformación plástica, la cual se calculó para ocho vueltas o pasos de la rueda; la segunda en presentarse es la deformación elástica; esta deformación se puede despreciar pues el material regresa a su volumen original, y se calculó para 10 vueltas.

Tabla 2. Deformación vertical (m) provocada por el molino. ¹Molino menor; ²Molino mayor

Fábrica (mezcalera)	Peso rueda (t)	Área de presión (m ²) Máxima Mínima	Presión (t/m ²)		Deformación Vertical (cm) 8 vueltas 10 vueltas
			Máxima	Mínima	
Laguna Seca	2.312	0.551 0.126	18.345 4.195		4.125 8.200
Saldaña ¹	1.953	0.487 0.112	17.435 4.010		3.920 7.793
Saldaña ²	2.829	0.491 0.111	25.486 5.762		5.731 11.392
Santa Teresa ¹	2.875	0.603 0.137	20.985 4.768		4.719 9.380
Santa Teresa ²	3.795	0.635 0.143	26.538 5.976		5.967 11.862
Jarillas	2.079	0.496 0.113	18.400 4.192		4.137 8.225
Santa Isabel	2.153	0.532 0.122	17.646 4.047		3.968 7.888

La magnitud de la deformación se presenta en la tabla 2. c) Ángulo óptimo de inclinación vertical. La piedra al avanzar sobre las piñas presenta patinaje, lo cual es favorable para la molienda ya que produce desgarramiento y corte del material.

Donde: Δr_p ; es el patinaje radial por el ángulo α , a; el camino del centroide de la piedra, \acute{a} ; el camino del borde de la piedra, α ; es el ángulo entre el eje de giro y el eje de giro de la piedra; $\Delta r_p = r_p \times \varphi \times \text{sen } \alpha$ patinaje radial que produce por fricción una fuerza cortante

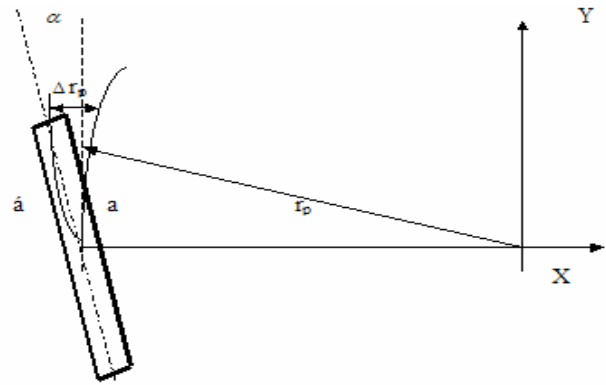


Fig. 3 Fuerza Cortante en el Material

El cateto B que se muestra en la figura 3 indica el patinaje que va desarrollando la rueda al avanzar sobre el bagazo; el valor máximo de B es directamente proporcional al ángulo horizontal entre el brazo de palanca y la piedra, siendo el óptimo de 85° según lo determinado, como se muestra en la tabla 3.

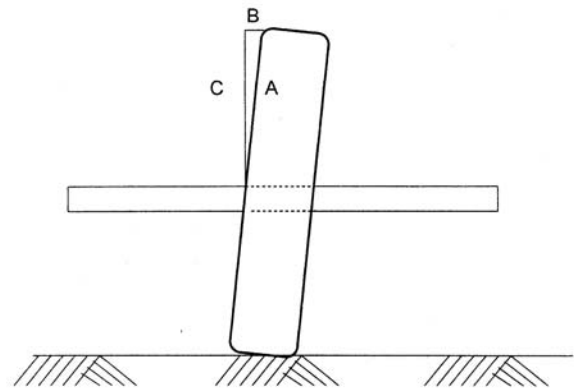


Fig. 4: Rueda con patinaje (B)

Tabla 3. Distancia máxima (m) de avance de la rueda de piedra por patinaje. ¹Molino menor; ²Molino mayor

Cateto	Laguna Seca	Saldaña (1) (2)	Santa Teresa (1) (2)	Jarillas	Santa Isabel
A	0.551	0.541 0.584	0.580 0.635	0.551	0.543
B	0.019	0.047 0.041	0.030 0.044	0.019	0.028
C	0.550	0.538 0.582	0.579 0.633	0.550	0.542
A-C	0.001	0.003 0.002	0.001 0.002	0.001	0.001

CONCLUSIONES

La rueda de piedra que ejerce mayor presión sobre la superficie del maguey es la de la fábrica de mezcal Santa Teresa², con 5.981 t/m². Si se toma como referencia la rueda del

molino de la fabrica de mezcal Saldaña² que mide 0.48m de ancho; el molino de Santa Teresa² aumentaría su presión a 7.73 t/m². Por lo tanto la densidad de la piedra tiene que ser la máxima posible y el área de contacto pequeña, incrementando así la presión sobre el material. El impedir que se forme un colchón de bagazo al paso de la rueda permite llegar hasta la deformación plástica y se evita que el bagazo recupere su espesor. Por ello lo mejor es la forma de molienda practicada en la mezcalera Laguna Seca. Es útil que los canales sobre la superficie de la piedra tengan una dirección hacia el centro del molino, con el fin de que el jugo salga en dirección de las fuerzas del material comprimido.

AGRADECIMIENTOS

A los cuerpos academicos CA-6/CIVIL y CA-15/Agro; por sus comentarios pertinentes y oportunos.

REFERENCIAS

De Barrios, V. A guíde to tequila, mezcal and pulque. 5^a. Ed. Minutae Mexicana. México. 64 -89. (1997).

Duran G., D. Rossel y J. Aguirre. Procesos de cocción el las mezcaleras potosinas. En: Memoria del XII Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola y II Foro de la Agroindustria del Mezcal. Oaxaca. México. (2002).

Fish S., P. Fish, C. Miksicek, J. Madsen. Prehistoric agave cultivadon southern Arizona. Osier Plains. 107-112 (1985).

García M., Con sabor a maguey. Guía de la colección nacional de agaváceas y nolináceas del Jardín Botánico del Instituía de Biología-

UNAM. UNAM, SIGSA. México. 114-135 (1998).

Gentry, H., Agaves of continental North América. University of Arizona. Tucson, Arizona USA 670-679 (1982).

Kanafojski, C. Halmfruchterntemas-chinen. Verlag Technik. Berlin. Alemania. (1961).

Macedo E., Manual del magueyero. Trueco. México, D.F. 160-169 (1950).

Norma Oficial Mexicana NOM-070-SCFI-1994, Bebidas Alcohólicas –Mezcal – Especificaciones. Diario Oficial de la Federación el 12/Junio /1997.

Rossel K., E. Ortiz y H Durán. Optimización de la molienda de maguey para el proceso de producción de mezcal. En: Memoria del XII Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola y II Foro de la Agroindustria del Mezcal. Oaxaca. México. (2002).

Tello B., E. García, The mezcal industry the Altiplano Potosino-Zacatecano of North-Central México. Desert Plants. 81-87 (1985).

Tello B., E. García, R. Reyna, Atributos poblacionales del maguey mezcalero (Agave salmiana Otto ex Salm ssp. crassispina (Trel.) Gentry): efecto del manejo y de las condiciones ambientales en su dinámica. Agrociencia (Ser Rec.Nat.Ren; 37-56 (1991).

Valenzuela Z., El agave íequilero: su cultivo e industria. 2^a ed. Litteris. Guadalajara, México. 204-224 (1997).

Walton M., The evolution and localization of mezcal and tequila in México. Geográfica: 113.132 (1977).