



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Mejoramiento de la eficiencia en la molienda en el proceso
de elaboración de mezcal potosino**

por

CHRISTIAN MICHEL CUELLO



Tesis presentada como requisito parcial para obtener el
título de Ingeniero Agroindustrial

San Luis Potosí, S.L.P.

Mayo de 2004





Facultad de Ingeniería



Universidad Autónoma
de San Luis Potosí

26 de febrero del 2004

AL PASANTE SR. CHRISTIAN MICHEL CUELLO
P R E S E N T E.-

En atención a su solicitud de autorización de Temario, presentada por el Dr. Héctor Martín Durán García, Asesor del Trabajo Recepcional que desarrollará usted, con el objeto de sustentar su Examen Profesional en la Licenciatura de Ing. Agroindustrial. Me es grato comunicarle que en la Sesión de Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 26 de febrero del presente año, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

"MEJORAMIENTO DE LA EFICIENCIA EN LA MOLIENDA EN EL PROCESO DE ELABORACIÓN DE MEZCAL POTOSINO".

INTRODUCCIÓN.

1. USOS DEL MAGUEY.
 2. PROCESO DE ELABORACIÓN DEL MEZCAL.
 3. MOLIENDA.
 4. CARACTERIZACIÓN DE LOS MOLINOS.
 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.
- CONCLUSIONES.
BIBLIOGRAFÍA.

Ruego a Usted tomar debida nota de que en cumplimiento con lo especificado por la Ley de Profesiones, debe presentar Constancia de Servicio Social como requisito indispensable para sustentar su Examen Profesional.

"MODOS ET CONCTARUM RERUM MENSURAS" AUDEBO"

ING. JOSÉ ARNOLDO GONZÁLEZ ORTIZ
DIRECTOR

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN

"mog".

El trabajo titulado “Mejoramiento de la eficiencia en la molienda en el proceso de elaboración de mezcal potosino” fue realizado por Christian Michel Cuello en la Facultad de Ingeniería y en el Instituto de Investigación de Zonas Desérticas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, bajo la dirección del Dr. Héctor Martín Durán García y con la asesoría del Dr. Rogelio Aguirre Rivera y del Dr. Erich Dietmar Rössel Kipping.

DEDICATORIA

A Dios, Gracias por la vida y por no dejarme caer en el
desaliento.

A mis padres María de Lourdes Cuello Luévano y
Fernando Michel Rosales, por darme la vida, su apoyo en
todo momento y por el ejemplo de responsabilidad, trabajo y
dedicación que me inculcaron siempre.

A mis abuelitos Estela Luévano Cerda y Ramiro Cuello
Morales por su cariño, su apoyo y por el impulso para el
trabajo de todos los días.

A Lucía Gabriela García Pedraza por su amor, apoyo,
paciencia y por esa chispa de trabajo y alegría que me
contagia todos los días

A Carlos y Jorge Cuello, Hugo Campos Cuello y Jorge
Torena, por su respaldo, amistad fraterna y entusiasmo.

A mi Familia por su apoyo y solidaridad.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, por el conocimiento, infraestructura y por el apoyo de beca a través del Instituto de Investigación de Zonas Desérticas.

Al Instituto de Investigación de Zonas Desérticas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, por el equipo, transporte y material bibliográfico facilitados.

Agradecimiento especial al Dr. Héctor Martín Durán García por la dirección de este trabajo, por sus conocimientos, experiencia, apoyo, confianza y amistad.

Al Dr. Rogelio Aguirre Rivera por sus conocimientos, tiempo, paciencia y apoyo brindado.

Al Dr. Erich Dietmar Rössel Kipping por su experiencia, compromiso y conocimientos para la realización de este trabajo.

Al Ing. Juan Manuel Pérez Juárez, al Sr. Pablo Díaz del Castillo Fraga y al Sr. Francisco Gallegos de la fábrica de mezcal Laguna Seca por sus conocimientos, experiencia, amistad y por el hospedaje brindado.

Al Sr. Juan Zarur Flores de la fábrica Saldaña; a los Sr. José Hernández Torres y Sr. Candelario Barajas de la fábrica Santa Isabel; al Sr. Mauro Mendoza de la fábrica Santa Teresa; al C.P. Eduardo Lomelí Robles de la fábrica Ipiña y a los trabajadores de la fábrica Jarillas por la valiosa información proporcionada para este trabajo.

A mis padres y familia por su comprensión y apoyo durante la realización de esta Tesis.

A quienes involuntariamente he omitido.

CONTENIDO*

ÍNDICE DE CUADROS	III
ÍNDICE DE FIGURAS	IV
RESUMEN	VI
INTRODUCCIÓN	VII
1 USOS Y GENERALIDADES DEL MAGUEY.....	1
1.1 QUE ES EL MEZCAL.....	1
1.2 GENERALIDADES DEL MAGUEY.....	2
1.3 DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DEL MAGUEY.....	4
1.4 USOS DEL MAGUEY	4
1.5 HISTORIA DEL MEZCAL.....	6
2 PROCESO DE ELABORACIÓN DE MEZCAL.....	8
2.1 MANEJO PRERECOLECTA.....	8
2.1.1 <i>Castración</i>	8
2.1.2 <i>Periodo de sazón</i>	8
2.2 RECOLECTA.....	9
2.2.1 <i>Desvirado</i>	9
2.2.2 <i>Tumbar</i>	9
2.2.3 <i>Transporte</i>	9
2.3 PROCESO EN LA FÁBRICA.....	10
2.3.1 <i>Cocción</i>	10
2.3.2 <i>Molienda</i>	13
2.3.3 <i>Lavado</i>	13
2.3.4 <i>Prensado</i>	13
2.3.5 <i>Fermentación</i>	14
2.3.6 <i>Destilado</i>	14
2.3.7 <i>Almacenamiento</i>	15
2.3.8 <i>Dilución</i>	15
2.3.9 <i>Filtrado</i>	15
2.3.10 <i>Envasado</i>	15
3 MOLIENDA.....	17
3.1 GENERALIDADES	17
3.1.1 <i>Tipos de molienda</i>	17
3.1.2 <i>Orígenes del molino chileno</i>	18
3.1.3 <i>Teoría de molienda</i>	19
3.1.4 <i>Historia de la reducción de los tamaños del material</i>	22
3.1.5 <i>Energía de la superficie</i>	23
3.1.6 <i>Trabajo físico para la reducción del tamaño</i>	26
3.1.7 <i>Principios de molienda (presión, tensión, choque y corte)</i>	27
3.1.8 <i>Esfuerzo y deformación</i>	27
3.2 MOVIMIENTO DE LA RUEDA	28
3.2.1 <i>Cinemática de la rueda</i>	28

3.2.2 <i>Dinámica de la rueda</i>	29
3.2.3 <i>Problemática presente</i>	33
3.3 FIBRAS VEGETALES	34
4 CARACTERIZACIÓN DE LOS MOLINOS	35
4.1 EVALUACIÓN DEL PATINAJE O DESLIZAMIENTO	35
4.2 ANÁLISIS DE FIBRAS	36
4.2.1 <i>Resistencia a la tensión</i>	36
4.2.2 <i>Diámetro de las fibras</i>	36
4.2.3 <i>Porcentaje de compresión del bagazo</i>	36
4.2.4 <i>Determinación de humedad y materia seca</i>	37
5 RESULTADOS	39
5.1 ELEMENTOS DEL MOLINO	39
5.2 CARACTERÍSTICAS DE LA RUEDA	40
5.3 RESISTENCIA DE FIBRAS	40
5.4 DIÁMETRO DE FIBRAS	40
5.5 PORCENTAJE DE COMPRESIÓN	42
5.6 PORCENTAJE DE HUMEDAD	44
5.7 ESTRUCTURA DE LOS MOLINOS.....	45
5.7.1 <i>Laguna Seca</i>	45
5.7.2 <i>Saldaña</i>	46
5.7.3 <i>Santa Teresa</i>	49
5.7.4 <i>Jarillas</i>	51
5.7.5 <i>Santa Isabel</i>	53
5.8 DIMENSIONES DE LOS MOLINOS.....	55
5.9 DISTANCIA MÁXIMA RECORRIDA POR LA RUEDA CON PATINAJE.....	62
5.10 PRESIÓN ORIGINADA POR EL PESO DE LA PIEDRA A DIFERENTES PROFUNDIDADES EN EL BAGAZO	62
5.11 DEFORMACIÓN VERTICAL.....	65
5.12 MOLINO MODELO	66
BIBLIOGRAFÍA	70

* El índice del contenido original de la presente tesis fue modificado como requisito para ser aprobado por el H. Consejo Técnico Consultivo de la Facultad de Ingeniería. Los capítulos 1, 2 y 3 corresponden a antecedentes; capítulo 4 a Materiales y Métodos y el capítulo 5 corresponde a Resultados y Discusión.

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1 Usos del Maguey	5
Cuadro 2 Calendario de cultivo del maguey en Oaxaca	10
Cuadro 3 Formas de producción de Mezcal en Oaxaca	16
Cuadro 4 Características de la rueda	40
Cuadro 5 Resistencia de las fibras	41
Cuadro 6 Diámetro de las fibras (mm) de cabezas de maguey	42
Cuadro 7 Compresión ejercida por el paso de la rueda sobre el maguey en la mezcalera Saldaña	43
Cuadro 8 Compresión del peso de la rueda sobre el maguey en la mezcalera Laguna Seca	44
Cuadro 9 Efecto de la molienda actual sobre el porcentaje de humedad	44
Cuadro 10 Distancia máxima (m) de avance de la rueda de piedra por patinaje	62
Cuadro 11 Presión (t/m^2) originada por la rueda de piedra a diferentes profundidades de la capa de material de maguey cocido	62
Cuadro 12 Deformación vertical provocada por la presión de la rueda de piedra	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Proceso de elaboración de mezcal	11
Figura 2	Diagrama de flujo del proceso de elaboración del mezcal	17
Figura 3	Trabajo de corte	19
Figura 4	Energía de deformación	24
Figura 5	Clases de esfuerzo	28
Figura 6	Rodadura pura de una rueda rígida sobre una superficie	28
Figura 7	Diagrama de cuerpo libre de una rueda con rodadura pura	29
Figura 8	Fuerzas en el proceso de molienda	30
Figura 9	Fuerzas que actúan sobre el material	31
Figura 10	Diagrama de momentos de fuerza	32
Figura 11	Fuerza cortante del material	33
Figura 12	Partes de un molino chileno o tahona	39
Figura 13	Porcentaje de compresión en la mezcalera Saldaña	42
Figura 14	Porcentaje de compresión en la mezcalera Laguna Seca	44
Figura 15	Dimensiones del molino de la fábrica de mezcal Laguna Seca	55
Figura 16	Molino de la fábrica de mezcal Laguna Seca	55
Figura 17	Dimensiones del molino mayor de la fábrica de mezcal Saldaña	56
Figura 18	Molino mayor de la fábrica de mezcal Saldaña	56
Figura 19	Dimensiones del molino menor de la fábrica de mezcal Saldaña	57
Figura 20	Molino menor de la fábrica de mezcal Saldaña	57
Figura 21	Dimensiones del molino menor de la fábrica de mezcal Santa Teresa	58
Figura 22	Molino menor de la fábrica de mezcal Santa Teresa	58
Figura 23	Dimensiones del molino mayor de la fábrica de mezcal Santa Teresa	59
Figura 24	Molino mayor de la fábrica de mezcal Santa Teresa	59
Figura 25	Dimensiones del molino de la fábrica de mezcal Jarillas	60
Figura 26	Molino de la fábrica de mezcal Jarillas	60
Figura 27	Dimensiones del molino de la fábrica de mezcal Santa Isabel	61
Figura 28	Molino de la fábrica de mezcal Santa Isabel	61

Figura 29	Vista superior del molino donde se aprecia la longitud de avance máximo de una rueda con patinaje (B).....	62
Figura 30.	Efecto del grosor de la capa de maguey sobre la presión ejercida por la piedra de cada uno de los molinos.....	64
Figura 31.	Molino modelo.....	69

RESUMEN

El mezcal es una bebida alcohólica que se obtiene de la fermentación y destilación de los jugos azucarados extraídos de las cabezas maduras y cocidas de los magueyes, silvestres y cultivados, nativos de las regiones áridas y semiáridas de México. El proceso de elaboración de mezcal comienza con la cocción, con el propósito de provocar la hidrólisis de los polisacáridos de reserva del maguey, ya que la inulina es poco soluble en agua y no fermentable en forma directa. Las cabezas o piñas a continuación pasan a la molienda que se realiza en una tahona o molino chileno con el propósito de extraer las mieles que contienen los azúcares fermentables. El bagazo después del proceso de molienda todavía tiene un alto contenido de azúcares, por lo que es re-hidratado en una tina de lavado junto con los efluvios provenientes de los hornos. Este bagazo es colocado entonces en una prensa para extraer aun más jugos. Las mieles así obtenidas pasan a las tinas de fermentación en donde se agrega fosfato diamónico para favorecer el desarrollo de las levaduras. A continuación el vino resultante de la fermentación pasa al destilador en donde por diferencia en el punto de ebullición se fracciona en cabezas (metanol), cuerpo o corazón (etanol) y colas (propanol o butanol). Finalmente es envasado. El objetivo de este trabajo fue aumentar la eficiencia de la molienda en el proceso de elaboración de mezcal para obtener mejores rendimientos. Para este estudio se analizaron las fuerzas que actúan en el proceso de molienda, los fenómenos que se desarrollan dentro de las cabezas de maguey y del bagazo, en las fibras y la resistencia de éstas; en cuanto a la rueda de piedra se estudio la cinemática y dinámica para mejorar la tracción de la rueda, se analizaron los materiales del molino y la forma de efectuar la molienda. Los resultados obtenidos del análisis conducen a considerar cinco parámetros para evaluar a los molinos. El primero es la presión ejercida por la rueda de piedra la cual depende del peso y del área de aplicación de la fuerza; el siguiente parámetro es la deformación causada por la presión en el bagazo hasta llegar al punto plástico: la dirección del perfil de la superficie de rodamiento de la rueda de piedra y el perfil del metate o base del molino; además del ángulo óptimo de inclinación vertical, y finalmente las practicas de molienda que realizan en cada fabrica de mezcal

INTRODUCCIÓN

El mezcal es una bebida alcohólica obtenida por fermentación y destilación de mieles preparada directa y originalmente de las cabezas maduras y cocidas de maguey. Es un líquido de olor y sabor sui géneris de acuerdo con su tipo. Es incoloro o ligeramente amarillento cuando es reposado o añejado en recipientes de madera de roble o encino, o cuando se aboque sin reposarlo o añejarlo. De los magueyes se obtienen dos clases de bebidas alcohólicas, una fermentada (pulque) y una destilada (mezcal). El mezcal tiene su origen en un alimento muy apreciado que obtenían los indígenas al cocer las cabezas o piñas del maguey denominado *mezcalli*, que es el antecedente directo de la palabra mezcal. Antes de la conquista, las bebidas destiladas eran desconocidas en México, pues no existe alguna evidencia del uso de destiladores antes de este periodo, y posteriormente fue introducido el alambique por la Nao de Manila. Respecto a San Luis Potosí, en la segunda mitad del siglo XIX, existían en el estado 168 haciendas y de ellas 11 eran haciendas mezcaleras; cada una de éstas tenía un promedio de cuatro destilerías, para un aproximado de 44 fábricas de mezcal en el estado, en la actualidad solo cuatro fábricas están laborando: Ipiña, Laguna Seca, Jarillas y Santa Isabel. El proceso de elaboración del mezcal en las distintas fábricas que se localizan en la región es similar y las etapas que lo conforman en general son las siguientes: cocción, molienda, fermentación y destilación. En la molienda se presentan diversos problemas que merman el rendimiento de las mieles extraídas a las piñas o corazones del maguey; entre ellos podemos mencionar el patinaje y deslizamiento, el alto porcentaje de humedad en el bagazo lo que indica que una gran cantidad de mieles remanentes entre las fibras y desperfectos estructurales en el molino. El objetivo general de este trabajo fue aumentar la eficiencia de la molienda en el proceso de elaboración de mezcal para obtener mejores rendimientos y así proponer un modelo de molino chileno que pueda ser aplicado en las fábricas a partir el equipo existente.

1 USOS Y GENERALIDADES DEL MAGUEY

1.1 Que es el mezcal

Según la NOM-070-SCFI-1994 “es una bebida alcohólica regional obtenida por destilación y rectificación de mostos preparados directa y originalmente con los azúcares extraídos de las cabezas maduras de los siguientes agaves:

- *Agave angustifolia* Haw.
- *Agave asperrima* Jacobi.
- *Agave weberi* Cels ex Poissons.
- *Agave potatorum* Zucc.
- *Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck ssp. *crassispina* (Trel.) Gentry
- Otras especies de agave, siempre y cuando no sean utilizadas como materia prima para otras denominaciones de origen dentro del Estado.

El mezcal es un líquido de olor y sabor sui géneris de acuerdo a su tipo. Es incoloro o ligeramente amarillento cuando es reposado o añejado en recipientes de madera de roble o encino, o cuando se aboque sin reposarlo o añejarlo”

Según la Real Academia Española el término mezcal proviene del nahua *Mezcalli* y establece dos definiciones: Variedad de agave y como Aguardiente que se obtiene por fermentación y destilación de las cabezas de esta planta. Cabe señalar que lo que se fermenta y destila son las mieles que han sido extraídas de las cabezas de maguey cocidas.

El aguardiente de mezcal, que ha sido impropriamente llamado vino mezcal, es un líquido espirituoso, incoloro y diáfano, muy fluido, más ligero y movable que el agua destilada, con olor y sabor peculiares y característicos, y que permiten distinguirlo fácilmente de otros aguardientes (Segura, 1901). En cada región, en cada pueblo y aun de una destiladora a otra, el mezcal ha adquirido características propias, esto por el tipo de maguey empleado o por la mezcla de éstos; el modo de cocción, el tiempo y la forma de fermentación de las mieles y por el número de veces que ha sido destilado el producto. Así nacieron los diferentes mezcales que todavía conocemos: tequila, comiteco de Chiapas, el

bacanora de Sonora, la raicilla y barranca de Nayarit y Jalisco, la tuxca o quitupán de Colima y el yahuytzingu en la mixteca. (Torretera, 2001).

El agave es un término castellanizado dado en 1753 por el botánico sueco Carl Von Linné (Dewey, 1965) a las cerca de 200 especies del género (agave = admirable) llamadas popularmente magueyes desde México hasta Venezuela. No obstante que el nombre mismo de maguey es una voz de origen caribeño (taíno) traído por los conquistadores, parece ser que ya era el más usado en México si se considera su relación con el nombre de "Mayaguel" diosa del maguey.

Esta ambigüedad de llamar agaves (por su nombre botánico) a los magueyes (por su nombre ancestral) ha dado lugar a confusión sobre todo en el habla popular, porque en la región del tequila se ha pretendido llamar magueyes solo a las especies pulqueras o mezcaleras de talla grande y hojas anchas y agave a la especie más popular actualmente que es maguey tequilero.

Otra confusión se da cuando a la planta se le llama "mezcal", palabra proveniente de mexcal o mexcalli, *mexl* = maguey en nahuatl y *calli* = cocido, dando a entender que son las plantas de las cuales se extrae un destilado producto del cocimiento, fermentación y destilación de sus azúcares (Parra, 2001).

1.2 Generalidades del maguey

El maguey utilizado para la elaboración de mezcal en el estado es el comúnmente llamado maguey verde o cimarrón, dicha planta en su taxonomía pertenece a la familia de las agaváceas, género *Agave*, y especie *salmiana*.

Los magueyes generalmente son monocárpicos, esto es que sólo tienen una floración al cabo de la cual la planta muere. Aun cuando exista alta producción de semilla en la reproducción sexual, debido a su gran depredación y también a que las condiciones de germinación no suelen ser las adecuadas por el deterioro, el maguey cimarrón generalmente se reproduce por hijuelos.

El maguey mezcalero potosino presenta peculiaridades como se anota enseguida con base en las descripciones de Antonio Ramírez Laguna y de Howard Scott Gentry y en observaciones de Aguirre *et al.* (2001). Este maguey es una planta en forma de roseta vigorosa, compuesta por un tallo grueso y corto, sobre el que se insertan en espiral las hojas ya desplegadas, y las que no lo han hecho y con distinto grado de desarrollo conforman un

apretado cono central prismático de tres ángulos que corona a la planta, llamado *cogollo* o *metzoll*, aunque en la actualidad erróneamente también se le da el nombre de "meyolote". Las hojas jóvenes recién desplegadas, son rectas y ligeramente separadas del eje central; las adultas se separan del eje en ángulos cada vez mayores, y las seniles se aprecian extendidas casi horizontalmente y luego se encorvan hacia el suelo (Aguirre *et al.*, 2001).

Las pencas del maguey potosino son de color mate, que va desde el verde grisáceo al verde o verde blanquecino, son carnosas, rígidas, lanceoladas con la punta afilada desde la tercera o cuarta parte superior, y estrechas hacia la cuarta parte inferior, formando una especie de cuello o cintura pues hacia su inserción en el tallo se ensanchan de nuevo. Las pencas maduras tienen una longitud generalmente de 1 a 2 m y su anchura puede ser de hasta 40 cm dependiendo de las variantes y la calidad del sitio en que se encuentra. El haz o cara superior de las pencas es convexa del cuello hacia la base ensanchada, plana en el cuello y acanalada desde su parte media hasta su ápice; el ápice de la penca presenta una curvatura sigmoidal bien marcada y característica; el envés o cara inferior es convexo en toda su extensión, el margen de las pencas es desde ligeramente ondulado como en la variante liso, hasta fuertemente festonado y mamilífero (con prominencias como *pezones*) como en la variante chino. La penca culmina con una espina terminal recta, pequeña, rígida y alesnada que aún se le usa como aguja con las propias fibras y como clavo, profundamente acanalada hasta la mitad inferior de su cara superior, y con el material corneo de sus bordes prolongándose desde unos 10 cm hasta casi la mitad de la penca, hasta confundirse con el fino margen cornificado que une entre sí las espinas laterales.

Las espinas laterales, espinas marginales o dientes, son de color castaño oscuro a castaño grisáceo oscuro, miden de 3 a 20 mm y se apartan de 0.5 a 5.0 cm entre sí; las del tercio medio o porción más ancha de la penca son más grandes y separadas, y en el tercio inferior son muy pequeñas y juntas.

El escapo floral o quiote mide de 6 hasta 10 m; está cubierto de brácteas grandes, de forma triangular, las cuales pueden ser carnosas. Las 15 a 20 ramas secundarias son encorvadas en forma de S, inclinadas hacia abajo, con una bráctea pequeña en su base y soportan una umbela compuesta. Flor monoperiantada, de ovario ínfero, hermafrodita, con pedúnculos cortos y encorvados, perianto tubuloso o infundibuliforme; el tubo hinchado y sub-hexágono, de color verdoso; lacinas oblongo-agudas amarillas en la base y tomando insensiblemente un color rojizo hacia la extremidad. Estambres, seis, amarillos y fértiles.

filamentos subulados; anteras lineares bilobadas y versátiles. Ovario turbinado subhexágono; de tres lóculos multiovulados; óvulos anátropos, de presentación axilar. Estilo central, largo, cilíndrico; estigma capitado, trígono y del mismo color que el estilo. El fruto es una cápsula oblonga, con seis costillas longitudinales de tres lóculos polispermos. Semillas negras, deprimidas, triangulares, violadas, coriáceas, de embrión recto y endosperma carnosos. (Aguirre *et al.*, 2001; Segura, 2001; Granados, 1993).

1.3 Distribución geográfica del maguey

De acuerdo con el área geográfica donde se ha aprovechado históricamente el maguey mezcalero potosino, se deriva que tiene su crecimiento óptimo en lugares ubicados entre los 0 a los 2250msnm, con un clima que va de semiseco (BS₁) a seco (BS₀), la precipitación pluvial puede ir de los 320 a 720 mm anuales. El régimen térmico va de templado a semicálido extremo con una temperatura promedio anual de 16 a 22°C. El sustrato geológico donde el maguey logra su desarrollo óptimo es el ígneo, y el grado de desarrollo del suelo es variable, principalmente son los xerosoles los que le dan mejor sustento, estos suelos presentan un espesor de más de 30 cm, contenidos de moderados a altos de arcilla y en general sin impedimentos para el desarrollo de las raíces de las plantas (Aguirre *et al.*, 2001).

1.4 Usos del Maguey

Desde tiempos prehispánicos la relación del hombre con el maguey ha sido muy estrecha. El hombre lo ha cultivado y ha encontrado en él innumerables usos: alimentario, vestido, construcción, protección, religioso, agrícola etc. (Cuadro 1).

Cuadro 1. Usos del maguey

Forma de uso	Origen	Forma de uso	Origen
Aguamiel	Piña del maguey	Clavos	Púas terminales
Jugo dulce	Quiote	Aguja con hilo incluido	Púa terminal con fibra
Jarabe	Aguamiel concentrada	Recipiente para comida	Pencas
Pulque	Aguamiel fermentada	Bateas para masa y otros alimentos	Pencas
Miel	Aguamiel concentrada	Recipiente para agua	Mezontete
Vinagre	Aguamiel fermentada	Material para cubrir barbacoa	Pencas
Aguardiente	Pulque destilado	Tapones para castañas y barriles	Pencas
Mezcales	Piña de agaves mezcateros	Estropajos y estopas	Pencas
Atoles	Quiote	Escobetas	Pencas
Gusanos blancos	Piña	Cunas para bebé	Pencas
Gusanos rojos	Piña	Aljabas para flecha	Quiote
Sal de gusano	Piña	Combustible	Pencas y piñas secas
Tegumentos para barbacoa	Penca	Maceta para plantas de hogar	Mezontete
Guiso de gualumbo	Flores	Bancos para sentarse	Quiote seco
Postre	Quiote asado, piña horneada	Mueble para guardar objetos pequeños	Quiote seco
Azúcar	Aguamiel concentrada	Bebida ritual	Mezcal, aguamiel y pulque
Saborizante de tamales y pan	Aguamiel y piña	Instrumento de auto sacrificio	Púas terminales
Levadura	Residuos de pulque	Adornos navideños	Maguey completo
Condimento	Pulque	Base para adornos de pluma y oro	Pencas
Tortillas	Quiote	Fibras para arcos florales	Pencas
Barbacoa	Penca verde	Adornos corporales	Semillas
Mezcal dulce	Penca asada u horneada	Juguetes para niños	Semillas
Fructuosa	Jugo de piña horneada	Sonajas	Semillas
Vigas	Quiote seco	Formar y proteger terrazas	Maguey completo
Garrochas y pilotes	Quiote seco	Cercas protectoras	Maguey completo
Cercas para delimitar terrenos	La planta completa y el quiote seco	Abono	Cenizas de pencas y piñas secas
Techos a modo de tejado	Pencas frescas	Protección contra erosión	Maguey completo
Canales para recolectar agua de lluvia	Quiote ahuecado	Alimento para aves	Residuos de pulque
Bateas para mezcla	Penca	Piensos para ganado mayor y porcino	Pencas frescas y raspas de la piña
Aditivo para mezcla	Baba de la penca	Medicinal	Aguardiente mezcal
Jabón para ropa	Raíces y pencas	Papel para códices	Fibras de las pencas golpeadas
Cepillos para lavar y escobas	Raíces	Relleno de asientos de automóvil	Bagazo
Canastas	Raíces	Obtención de sustancias químicas	Mieles de maguey

Fuente: Almaguer (2001), Rodríguez (2001), Torrentera (2001), Anónimo (1997) y Granados (1993).

1.5 Historia del mezcal

Existe la leyenda de que en la región mixteca la princesa Mayahuel descubrió en el Popoconaltepec –monte de la espuma– la manera de extraer el corazón de la planta llamada meztli un líquido delicioso y enervante. A la llegada de los españoles el meztli fue rebautizado como maguey, nombre dado a la planta por los tainos de Haití (Anónimo., 1997).

De los agaves se obtienen 2 clases de bebidas alcohólicas, el pulque y un licor destilado llamado mezcal (Rivera, 1988). El aguardiente conocido como mezcal tiene su origen en un alimento muy apreciado que obtenían los indígenas al cocer las piñas del agave denominado *mezcalli*, que es el antecedente directo de la palabra mezcal (Sánchez, 1989).

Las bebidas destiladas seguramente fueron desconocidas en México antes de la conquista pues no existen evidencias históricas ni arqueológicas sobre los destiladores y su uso previamente. Según Walton en 1935 se esclareció este misterio al demostrar Henry Bruman que el destilador utilizado por los Coras y Huicholes de la Sierra Madre Occidental en Nayarit para la elaboración de mezcal descrito por Carl Lumholtz era de origen asiático, específicamente filipino y que esos destiladores fueron introducidos al país por la Nao de Manila a través de la costa occidental de México. (Aguirre *et al.*, 2001)

Durante la primera mitad del siglo XVII la destilación clandestina del vino mezcal se extendía por Jalisco y Nayarit y desde allí fue introducido por los españoles en sus avances hacia el norte. Entre 1764 y 1772 el visitador José de Gálvez promovió una serie de decretos que requirieron que se documentaran las bebidas alcohólicas y sus lugares de producción, y para entonces sólo se hablaba del vino mezcal de Guadalajara. Entre las localidades que persiguió el tribunal de La Acordada destacaban en nuestro estado Charcas y Valles. Para el 3 de mayo de 1785 se expidió una real orden que prohibía la producción y venta de bebidas fermentadas y destiladas, pero en 1795 fue abolida por Carlos IV quien autorizó la primera destilería industrial a José María Guadalupe Cuervo. Es probable que para principios del siglo XVIII se comenzara a plantar maguey en la región de Tequila y que para mediados del siglo nacieran las primeras fábricas pequeñas que comenzaron a acreditar el vino mezcal o vino mezcal de tequila, que pasara luego a ser conocido como vino tequila y finalmente sólo como tequila a partir de los primeros años del siglo XX (Aguirre *et al.*, 2001. Torrentera, 2001).

Respecto al estado de San Luis Potosí, en la segunda mitad del siglo XIX, existían 168 haciendas y de ellas 11 eran haciendas mezcaleras, cada una tenía un promedio de cuatro destilerías, para un aproximado de 44 fábricas de mezcal en el estado. En la actualidad sólo cuatro fábricas están laborando: Ipiña, Laguna Seca, Jarillas y Santa Isabel. Estas cuatro fábricas tienen dueño, pues debido a la repartición de tierras durante la revolución, los dueños podían quedarse con los lugares donde tuvieran construcciones.

Los ejidatarios laboran en la fábrica pero también le venden las piñas que se recolectan en las tierras ejidales, y estos recursos son aplicados para las mejoras y mantenimiento del ejido. La producción de mezcal continuó siendo la principal actividad de los ejidos formados después de la revolución. Y aun continúan siendo utilizadas las construcciones y la mayoría de las herramientas para la elaboración del mezcal (Granados, 1993).

2 PROCESO DE ELABORACIÓN DE MEZCAL

2.1 Manejo pre recolecta

2.1.1 Castración

La castración se lleva a cabo cuando la planta tiene una edad generalmente mayor de ocho años, es la práctica más importante para el aprovechamiento persistente de las magueyceras, y a la vez la más significativa para la calidad del maguey, como materia prima para la producción de mezcal. La función de la castración es impedir que el maguey continúe con el proceso de reproducción, el cual implica la culminación de su vida, y la utilización de las reservas acumuladas durante el largo periodo vegetativo en la creación de las estructuras reproductivas y en miles de semillas. Con la castración el maguey prolonga el período óptimo de su vida funcional; esto es, continúa acumulando carbohidratos, en tanto que se retrasa su senectud y muerte. En cambio, el maguey que no se castra oportunamente, cuando mucho tarda dos años en concluir su ciclo vital con el inicio de la dispersión de sus semillas. (Aguirre *et al.*, 2001). Los "picadores", es decir los hombres que realizan la castración, reconocen a los magueyes que están listos para ello por: el tamaño del maguey, el tamaño de los dientes en las pencas (a partir de los ocho años las pencas nuevas se presentan de menor tamaño) y por la consistencia y dureza del cogollo (de donde se desprenden las pencas y surge el tallo floral). Finalmente las piñas permanecen en el campo de 6 a 18 meses después de castradas.

2.1.2 Periodo de sazón

Según la opinión de expertos campesinos el maguey castrado se debe sazonar durante 18 meses. Con el inicio de la reproducción se suspende la formación de hojas o pencas; a la vez se inician cambios en la fisiología de la planta asociados con los eventos de la reproducción. Así, aunque con la castración se retrase la senectud, y el maguey bien castrado puede permanecer hasta cuatro años en condiciones para ser recolectado, es posible que los tejidos fotosintéticos pierdan gradualmente su eficiencia a partir del momento cuando la reproducción debiera concluir, y desde entonces la capacidad de síntesis de la planta empieza a ser insuficiente para cubrir sus necesidades de mantenimiento y comienzan a utilizarse las reservas acumuladas previamente. Así el periodo de sazón recomendable es de 18 a 24 meses (Aguirre *et al.*, 2001).

2.2 Recolecta

2.2.1 Desvirado

Anteriormente esta labor se realizaba con un implemento llamado barra o fierro desvirador, pero actualmente se realiza con un machete, a la persona que realiza esta actividad se le conoce como desvirador. La labor consiste en localizar al maguey señalado para ser recolectado, al cual en pie se le cortan todas las hojas o pencas hasta dejar solamente el tallo y la base de las hojas formando una estructura llamada cabeza o piña. Para que ésta pueda ser localizada al momento de la recolección, se coloca un trozo de las pencas desechadas en la espina terminal de las pencas más altas del maguey más próximo. (Aguirre *et al.*, 2001)

2.2.2 Tumbar

La herramienta utilizada en esta labor se le conoce como barra tumbadora y a la persona que la realiza, tumbador. El trabajo consiste en desprender la cabeza o piña cortándola casi al nivel del suelo, para esto el tumbador corta una porción basal de la cabeza para dejarla expuesta y después con la barra da algunos golpes en la base del tallo e introduce la barra haciendo palanca hasta romperlo. Un problema que se presenta es que las piñas o cabezas que se dejan en el campo de un día para otro es que el ganado hambriento come el corazón de las piñas, que es donde se encuentran las mayores reservas de azúcares y por consiguiente baja su rendimiento (Aguirre *et al.*, 2001).

2.2.3 Transporte

Por medio de camiones las piñas o cabezas son recolectadas para trasladarlas a la fábrica; los camiones se detienen en los lugares de mayor concentración de pinas para recogerlas, y va desplazándose por la magueyera. Las piñas de tamaño promedio son levantadas con esfuerzo por un solo trabajador pero con las piñas de más de 70 kg es necesaria la participación de casi toda la cuadrilla para levantarlas (Aguirre *et al.*, 2001, Granados, 1993)

En Oaxaca la mayoría de los magueyes utilizados en la fabricación de mezcal son silvestres, aunque una pequeña parte son cultivados; las actividades que se realizan en orden cronológico para obtener estos últimos se resumen en el cuadro 2.

Cuadro 2. Calendario de cultivo del maguey en Oaxaca.

1 año	2 a 5 años	6 a 10 años
Preparación de terreno	Poda	Capado
Arado	Desyerba y cajeteo	Sazonado
Rastra	Fertilización orgánica	Cosecha
Tumba, roza y quema (en caso de que el terreno no esté abierto al cultivo)	Control de plagas y enfermedades	
Incorporación de abonos orgánicos	Se puede asociar con maíz, frijol y / o higuerrilla hasta los cuatro años	
Selección de la planta		
Transporte de la planta		
Surcado y plantación		
Desyerba y cajeteo		
Control de plagas y enfermedades		

Fuente: Anónimo (1997)

De igual manera en la Figura 1 se muestra gráficamente las diversas etapas que se siguen en la producción del mezcal potosino.

2.3 Proceso en la fábrica

2.3.1 Cocción

En Laguna Seca se utilizan dos tipos de hornos elevados de piedra, uno es calentado por vapor proveniente de una caldera, se requieren alrededor de 30 horas para la cocción y tiene una capacidad promedio de 20 toneladas; el otro horno es de calentamiento por leña, el periodo de cocción es de una semana, su capacidad es de 40 toneladas aproximadamente: este horno le da un mejor sabor a las mieles debido a que toma cierto sabor ahumado de la leña y su cocción es más lenta. La temperatura promedio alcanzada en los hornos es de 120 °C. Terminado el tiempo de cocimiento se dejan enfriar por 8 horas hasta alcanzar una temperatura de 60 a 70 °C, para que las piñas puedan ser extraídas. Los efluvios de los hornos de vapor se almacenan en una tina de gran capacidad para ser utilizados posteriormente en el lavado de bagazo, o ser condensadas antes de canalizarse a las pilas de fermentación. El propósito de la cocción es el de conseguir la hidrólisis de los polisacáridos de reserva del maguey, ya que la inulina es poco soluble en agua y no fermentable en forma directa; la graduación de azúcares de estas mieles es de 9 a 10 °Brix. (Pérez, 1997).

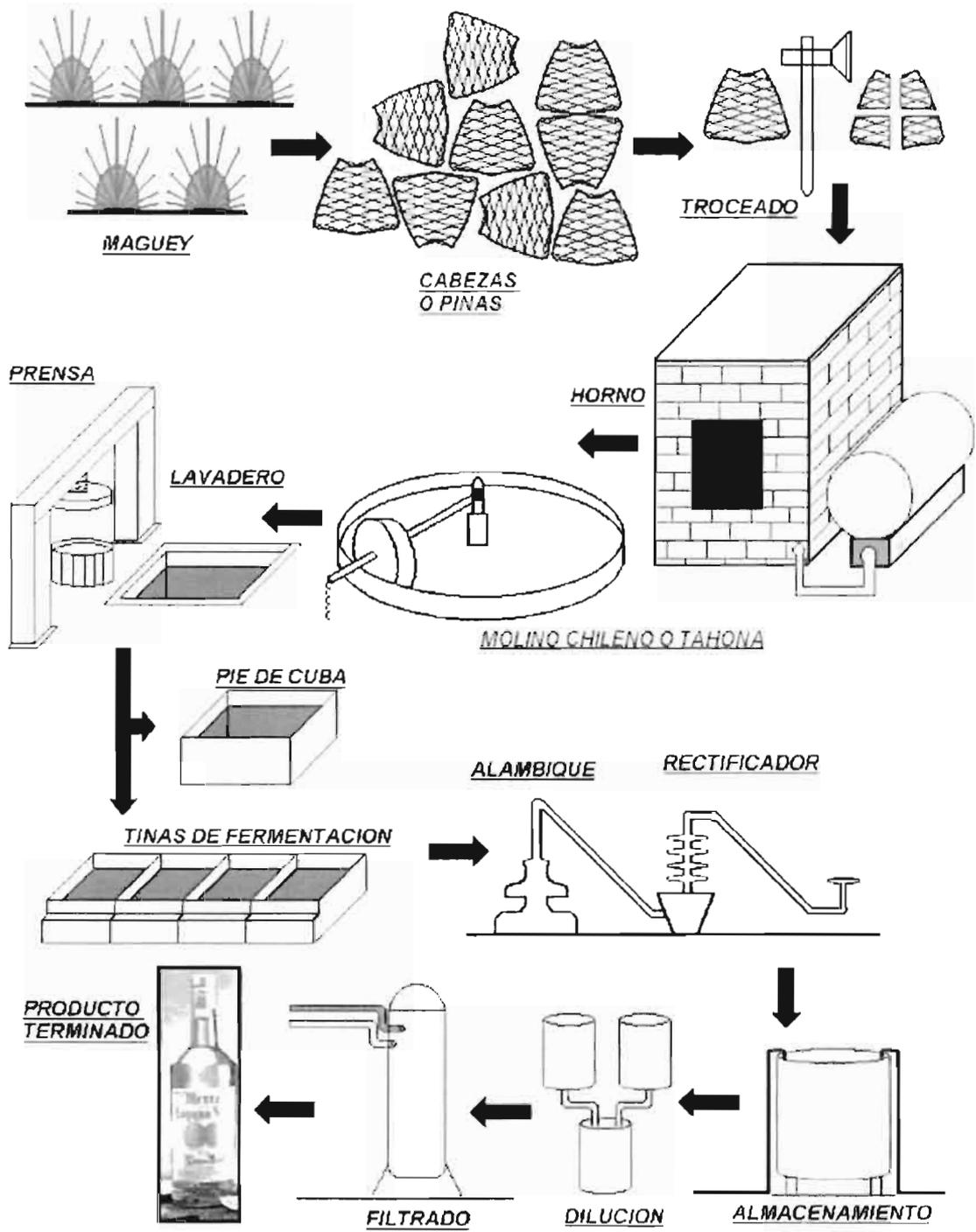


Figura 1. Proceso de elaboración de mezcal.

También en el siguiente diagrama de flujo se observan los pasos que se llevan a cabo en el proceso de producción de mezcal. (Figura 2)



Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de producción de mezcal.

2.3.2 Molienda

Las piñas cocidas son transportadas al molino por medio de un carro montado sobre rieles, donde son colocadas sobre la cama o metate del molino que tiene una capacidad de 3 a 3.5 t (unas de 40 a 50 piñas), ahí son partidas con hachas en cuatro a seis trozos. Los trozos de piña son colocados con un biello al paso de la rueda de piedra, los molineros quienes remueven el material volteándolo para lograr que la piedra exprima la mayor cantidad de miel. (Agustino *et al.*, 1995). Luego el bagazo resultante se retira y se arroja al "lavadero". Entonces colocan más trozos de piñas al paso de la rueda para seguir extrayendo las mieles. En otras mezcaleras dejan que se acumule el bagazo sobre sí mismo en el paso de la rueda del molino hasta formar una capa anular o colchón como lo llaman los trabajadores, con el inconveniente de que las mieles que son extraídas del bagazo de la parte superior son absorbidas por el bagazo de la parte inferior de la capa. En la fábrica de Laguna Seca el tiempo promedio requerido para exprimir cada carga del molino de 3.5 t es de 1 h con 50 min si el maguey proviene del molino de vapor, y de 2 h con 10 min si el maguey fue cocido en el horno de leña.

2.3.3 Lavado

En la pila de lavado se deposita el bagazo de la molienda junto con agua caliente o con los efluvios provenientes de los hornos de vapor y son calentados a una temperatura de 35 a 40 °C, ahí el bagazo es agitado por un operario equipado con un biello y con botas de hule para que se re-hidrate y así extraer los azúcares que hayan quedado aún en el bagazo.

2.3.4 Prensado

El bagazo re-hidratado y lavado es colocado en una prensa de tornillo para extraer las mieles que aún queden atrapadas entre las fibras; estas mieles escurren a la pila de lavado. En las mezcaleras que carecen de prensa, el lavado lo efectúan en el mismo molino de extracción o en otro de lavado; para ello primero extienden el bagazo sobre toda la superficie del piso del molino y agregan agua caliente para re hidratarlo y posteriormente hacen pasar la rueda por encima para extraer las mieles que quedaron en el bagazo.

2.3.5 Fermentación

La fermentación es el proceso bioquímico mediante el cual los azúcares contenidos en la miel del maguey son transformados en alcohol por el microorganismo *Saccharomyces cerevisiae* (Rodríguez, 2001).

En las pilas de fermentación se juntan las mieles del prensado y del lavado, pero antes con lo mejor de estas mieles se prepara el pie de fermento. Este fermento es acondicionado con fosfato diamónico con una formulación de 1kg x 4000 litros de mieles (Pérez, 2003) como nutriente para las levaduras existentes en las mieles, se les agrega aire comprimido como fuente de oxígeno, y vapor para mantener su temperatura a 30 °C; todo esto se realiza en pilas pequeñas de 400 litros. El pie de fermento preparado se agrega a las pilas mayores con capacidad de 4000 y 5000 litros con las mieles restantes; en este punto la concentración de azúcares es de 6 a 7 °Brix. A estas pilas también se les agrega oxígeno, y vapor para mantener las mieles a 35 °C (esta temperatura favorece la fermentación), y fosfato diamónico; la fermentación concluye a las 48 horas. Terminada esta etapa, el vino se deja en reposo para propiciar la generación de compuestos aromáticos importantes en el producto; para entonces su concentración disminuye hasta 1 °Brix (Pérez, 1997).

2.3.6 Destilado

Las mieles fermentadas son canalizadas a un alambique de cobre, compuesto por una cucúrbita u olla de 1000 L y de un serpentín interior calentado por vapor, en la parte superior de la olla se coloca la cabeza o turbante que recoge los vapores y los conduce a los platos refinadores bañados por fuera con agua fría circulante donde comienza su condensación, pasando posteriormente al refrigerante consistente en un serpentín sumergido en agua a temperatura ambiente donde concluye la condensación de los alcoholes evaporados.

La destilación se realiza por etapas o pasos controlando la presión de vapor (temperatura) y el flujo del destilado, para generar los primeros 3 L que salen del destilador, las llamadas cabezas (50 a 80 °GL), son separados pues están compuestos principalmente de metanol; posteriormente sale en corazón o mezcal en si (etanol) hasta llegar a los 45° Brix. En este momento comienzan a salir las colas (40° GL) siendo aproximadamente de 5 a 7 L principalmente compuestas de propanol, butanol y agua. Al resto que permanece en el alambique le llaman vinaza y es desechado (Pérez, 2003).

2.3.7 Almacenamiento

En la fábrica de Laguna Seca utilizan contenedores de plástico, acero inoxidable y toneles grandes de madera conocidos como pipones, para almacenar temporalmente el mezcal. El mezcal para añejar se filtra y es sometido a un proceso de maduración de por lo menos seis meses en barricas de roble. El mezcal reposado es madurado durante 3 meses. Según la **NOM-070-SCFI-1994** el mezcal añejo es el producto susceptible de ser abocado, sujeto a un proceso de maduración de por lo menos un año, en recipientes de madera de roble blanco o encino, cuya capacidad máxima sea de 200 litros y el mezcal reposado es el producto susceptible de ser abocado que se deja por lo menos 2 meses en recipientes de madera de roble blanco o encino, para su estabilización.

2.3.8 Dilución

En dependencia del tipo o variedad de mezcal, cada mezcalera tiene su formulación en la que utiliza mezcal con diferente graduación alcohólica y mezcales producidos a partir de maguey cocido con leña o con vapor.

2.3.9 Filtrado

Se utilizan filtros de celulosa para eliminar partículas que se encuentran suspendidas en el mezcal, aclarar su color y reducir algunos olores, para dilución se utiliza agua purificada y filtrada con carbón activado.

2.3.10 Envasado

Para este propósito se utilizan botellas de vidrio de diferentes estilos y calidades, en dependencia del tipo de mezcal. En las fábricas también se comercializa mezcal a granel, con o sin tratamiento de refinado (filtración y dilución)

El rendimiento promedio es de 28 kg de piña por litro de mezcal (Pérez, 2003)

Debemos señalar que el proceso anterior se encuentra entre la forma de producción tradicional y la forma de producción moderna; Este varía dependiendo principalmente del lugar donde se produce y de la finalidad que se le ha de dar a la bebida terminada, como se aprecia en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Formas de producción de mezcal en Oaxaca.

Formas de producción / actividad	Producción artesanal	Producción tradicional	Producción moderna
Especie (s) de maguey	Varias, sobre todo las silvestres.	Una sola, preferentemente el espadín (<i>Agave angustifolia</i> Haw.)	Uso exclusivo de maguey espadín.
Cocimiento	En horno de tierra.	En horno de piedra o tierra.	En horno de piedra o autoclaves.
Molido o triturado	Con mazos de madera o de piedra.	En molinos con rueda de piedra jalada por bestias de tiro.	Con desgarradoras mecánicas.
Fermentación	En cueros de res, ollas de barro o canoas.	En tinas de madera fabricadas ex profeso.	En recipientes cilíndricos de acero.
Destilación	En ollas de barro con carrizo como tubería.	En alambiques de cobre con el uso de leña.	En alambiques de cobre o acero de mayor capacidad, con uso de leña o gas.
Producción	Muy pequeña. Su uso se reserva para las fiestas patronales, normalmente no se comercializa.	Para consumo casero y comercial.	Eminentemente comercial.
Características del mezcal	Inmejorable. Sabor suave y complejo. Olor característico. No produce resaca.	De buena calidad. Fuertes variaciones en sus características en función del toque particular que cada productor le imprime	De buena calidad, sin grandes variaciones en sus características, con sabores menos complejos y aromáticos.

Fuente: Blomberg (2001).

3 MOLIENDA

3.1 Generalidades

3.1.1 Tipos de molienda

Existen dos formas tradicionales de molienda de las piñas: la primera es de manera manual y la segunda auxiliándose con un molino chileno llamado también molino egipcio o tahona.

La molienda manual se lleva a cabo con instrumentos primitivos como mazos de madera con dos diferentes formas: en forma barrote y en forma de marro; para la fabricación de los mazos se utilizan maderas duras, como el encino, tepehuaje, enebro o quebracho y sus dimensiones son de 1.00 a 1.30 m de largo y un diámetro de 0.25 m. Si se utiliza el mazo de madera en forma de barrote es necesario que los trozos de maguey se coloquen en una canoa que puede ser de madera o de concreto, para someterlo a la acción mecánica del mazo; el trabajo no es continuo ya que exige un gran esfuerzo físico. Esta forma de molienda se observa en las numerosas fábricas familiares o palenques de Oaxaca, con bajo nivel de producción, y en donde se elabora el mezcal en ollas y en forma tradicional. Esta forma manual de molienda ha sido desplazada por el molino chileno.

La otra forma de molienda se realiza con el molino chileno o tahona que consiste en una piedra amonedada de cantera o cemento de aproximadamente 500 a 3000 kg de peso que puede ser dentada o lisa en su área de contacto. Esta piedra tiene un tubo metálico o un barrote de madera que la atraviesa por su centro y la une al mismo tiempo con un eje vertical de hormigón o de madera permitiendo un movimiento de traslación, sobre la superficie del suelo en su circunferencia, existe un borde de piedra o cemento que impide la salida las mieles y del bagazo. El movimiento del molino se logra gracias a un motor, un tractor o animales de tiro (Rössel *et al.* 2002; Sánchez; 1989).

La rueda presenta movimientos de giro, torsión y traslación alrededor del eje central, las piñas de maguey se parten en trozos y se colocan al paso de la piedra para ser trituradas y exprimidas de su miel gracias al giro y traslación; la torsión afloja y desgarras las fibras de la piña para que las mieles salgan con facilidad; después de tres o cuatro pasadas de la piedra el bagazo es retirado y se colocan nuevos trozos, todo esto para que haya un mayor contacto con el bagazo y menor distancia entre la rueda y el piso. Pérez (1997) menciona que los trozos de las piñas son acomodados en el anillo por el que es girada la piedra,

prensando y exprimiendo los líquidos; al paso de la piedra el bagazo se compacta, se agregan más trozos de piñas y se vuelve a exprimir, esta operación se repite hasta considerar que el bagazo ha agotado sus líquidos. La superficie de la cama del molino tiene una ligera inclinación y pequeños canales para conducir las mieles obtenidas a las tinas de fermentación.

Es necesario mencionar que la molienda es muy ineficiente en términos del esfuerzo requerido para la extracción del jugo y muy eficiente en términos de la extracción de los azúcares disponibles (Rössel *et al*, 2002)

El proceso de molienda es un punto crítico en la elaboración de mezcal, ya que este paso tiene gran influencia en el rendimiento de producto terminado. Las fábricas de mezcal que lo elaboran de forma tradicional cuentan con un molino chileno o tahona cuyo principio de funcionamiento es similar entre ellas, pero con algunas diferencias en cuanto a su diseño y forma de trabajo que hacen variar su rendimiento.

El diseño de los molinos utilizados no es el adecuado ya que fueron planeados para la molienda de trigo, y después se adaptaron para extracción de mieles en las piñas cocidas. El material a moler es diferente en cuanto a tamaño, forma y consistencia, por lo que es necesario que se contemple un mejoramiento en el diseño y forma de trabajo para aplicarlo al maguey.

Cada una de las fábricas de mezcal visitadas cuenta para la molienda con una tahona o molino chileno. La rueda de piedra gira con un movimiento de traslación alrededor de un eje de madera u hormigón llamado vástago, al cual está unido por un tubo metálico; el movimiento de la rueda no es uniforme, ya que el eje es frágil y oscila con facilidad. Además la rueda tiende a deslizarse al girar, ya que no tiene la suficiente fricción con los trozos y bagazo de maguey cocido.

3.1.2 Orígenes del molino chileno

En 1550 el español Bartolomé Flores introdujo a Chile el primer molino harinero artesanal llamado originalmente molino hispano-portugués, pero este molino no fue creado expresamente en la península ibérica, pues se sabe que la forma más antigua y popular de estos molinos está documentada en Rumanía, Bulgaria, algunos valles de Suiza, sur de Francia, Irlanda y noroeste de Asia menor. Lo anteriormente expresado nos permite inferir que fueron los conquistadores y colonizadores españoles quienes trajeron consigo sino el

instrumento completo si partes del mismo, esto debido a la dificultad de transportarlo hasta Chile, o al menos la idea de construirlo en América para resolver la necesidad doméstica de elaborar harina de trigo, alimento que ellos también introdujeron a nuestro continente (Ramírez, 2003). Para el tequila Valenzuela (1997) señala que en la molienda se sustituyó la tahona de mediados del siglo XIX por molinos que se usaban para caña de azúcar de los años cincuenta del siglo XX.

3.1.3 Teoría de molienda

La reducción del tamaño de los materiales es la división del material en pedazos partículas. El proceso de molienda es muy complicado y es una función de diferentes características del material como tamaño, forma, dureza, humedad, homogeneidad, tipo de herramientas, resistencia de fractura, resistencia de compresión, módulos de elasticidad, valores tecnológicos de las máquinas, etc.

Hasta hoy no es posible describir este proceso con una ecuación matemática. La bibliografía presenta para el material sólido dos teorías comunes. Ellas son la teoría de la superficie y la teoría de espacio. La más antigua, la teoría de superficie parte de la siguiente hipótesis: El trabajo para la reducción del tamaño es proporcional a la nueva superficie de las partículas.

Para reducir un cubo de 1cm por lado a la mitad es necesario un trabajo A (mkp). Para reducir el cubo original a cubos de 0.5 cm por lado se tiene que cortar el cubo original con tres cortes, por eso se necesita $3A$ (mkp). Esto se explica gráficamente en la Figura 3

Se reciben $2^3 = 8$ cubos chicos.

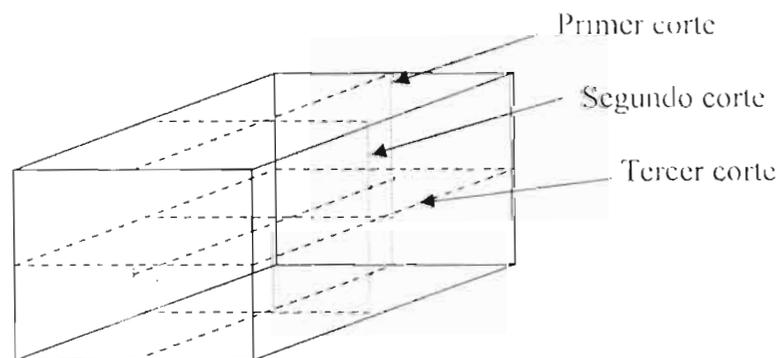


Figura 3. Trabajo de corte.

Por eso se divide un cuerpo (cubo) de 1 cm por lado en cubos con el tamaño $1/n$ y se necesitan para la división $3(n-1)$ cortes. El trabajo en este caso es $A_n = 3A(n-1)$

En el caso de que se reduzca el cubo al tamaño 1/m se necesita la siguiente cantidad de trabajo:

$$A_m = 3 A(m-1) \dots\dots\dots(1)$$

Donde A_n y A_m son los trabajos necesarios para la reducción de un cubo de $3(n-1)$ o de $3(m-1)$ cortes. n y m son los escalones de la reducción del material, que representan cuántas veces se reduce el tamaño original.

El trabajo relativo necesario se determina de la siguiente forma:

$$A_n/A_m = 3A(n-1)/3A(m-1) = n-1/m-1 \dots\dots\dots(2)$$

En el caso de las cifras grandes de m y n , $A_n/A_m = n/m$

Por eso el trabajo de la reducción de los tamaños del material es proporcional al escalón de la reducción de los tamaños del material.

La teoría de la superficie se desarrolló más tarde en otra forma:

El tamaño del cubo no es de 1 cm, es del valor B .

Con los escalones (m y n) de la reducción de tamaños a los valores b_1 y b_2 .

$$n = B/b_1$$

$$m = B/b_2 \dots\dots\dots(3)$$

Con estos valores queda el trabajo

$$A_n = 3A(B/b_1 - 1) \text{ y } A_m = (B/b_2 - 1) \dots\dots\dots(4)$$

Donde el área del corte es B^2 y no 1cm^2 . Entonces:

$$A_1 = 3 A (B/b_1 - 1) \text{ y } A_2 = (B/b_2 - 1) \text{ mkp} \dots\dots\dots(5)$$

Bajo la condición de que el cubo con el tamaño de 1cm sea una parte de $1/B^3$ de un cubo de tamaño de B . para el trabajo de reducción de los tamaños por unidad del material (1cm^3) resulta:

$$A_1 = 3 A B^2 (B/b_1 - 1) 1/B^3 \dots\dots\dots(6)$$

$$A_2 = 3 A B^2 (B/b_2 - 1) 1/B^3 \dots\dots\dots(7)$$

$$A_1 = 3 A (1/b_1 - 1/B)$$

$$A_2 = 3 A (1/b_2 - 1/B)$$

En el caso de que el material tenga el tamaño B y se divide en tamaños de valor b_1 y b_2 , el trabajo necesario tiene la siguiente relación:

$$A_1 / A_2 = 3 A (1/b_1 - 1/B) / 3 A (1/b_2 - 1/B) = b_2 / b_1 \times B - b_1 / B - b_2 \dots \dots \dots (8)$$

Esto significa que se necesita más trabajo en el caso de los tamaños finos

La teoría del espacio tiene como base para el cálculo del trabajo necesario la deformación del material. De la teoría de elasticidad se conoce que el trabajo de compresión de un material se regula por la siguiente ecuación:

$$A = \sigma^2 V / 200 E \text{ mkp} \dots \dots \dots (9)$$

Donde:

σ = Esfuerzo de compresión kp/cm^2

E = modulo de elasticidad. E = 1000- 5000 kp/cm^2 del material seco al aire (12% de humedad)

V = volumen del material reducido de tamaño (cm^3)

De la ecuación 9 resulta:

$$A_1 / A_2 = V_1 / V_2 = a_1^3 / a_2^3 \dots \dots \dots (10)$$

Donde:

a_1 y a_2 son los tamaños de las partículas. Pero como trabajo = fuerza x distancia (camino), entonces

$$A_1 / A_2 = F_1 \times s_1 / F_2 \times s_2 \dots \dots \dots (11)$$

Donde:

F_1 y F_2 fuerza necesaria para la reducción del tamaño (kp)

s_1 y s_2 igual de la deformación (m)

Si se cambian en la ecuación s_1 / s_2 por a_1 / a_2 , la ecuación queda de la siguiente forma

$$A_1 / A_2 = F_1 \times a_1 / F_2 \times a_2 = a_1^3 / a_2^3 \dots \dots \dots (12)$$

ó

$$A_1 / A_2 = a^3_1 / a^3_2 \text{ y}$$

$$F_1 / F_2 = a^3_1 / a^3_2 \dots\dots\dots(13)$$

En conclusión: con la teoría del espacio, el trabajo de la reducción del tamaño es proporcional al volumen, y la fuerza de la reducción del tamaño es proporcional al área del corte de las partículas a reducir.

La teoría del espacio sólo es aplicable a los esfuerzos en amplitud de la elasticidad. La reducción del tamaño siempre necesita pasar el límite de fuerza última. Por eso se usa la teoría del espacio en cálculos aproximados.

En todos los procesos de reducción del tamaño las teorías del espacio y de la superficie son explicables sin embargo, la teoría de la superficie explica mejor los procesos de molienda de cereales y la teoría del espacio es más útil para la explicación del proceso de golpe y de presión de partículas grandes (mayor masa).

Los valores importantes en el proceso de la reducción de tamaño son, fuerza para quebrar el material F (kp / partícula), resistencia contra la presión σ_d (kp / cm^2), reducción absoluta s (mm), estructura del material y tipo de molino.

3.1.4 Historia de la reducción de los tamaños del material

Ya en la prehistoria hubo la necesidad de la reducción de los tamaños del material con el objetivo de mejorar el uso de la energía biológica en diferentes alimentos como granos o raíces. Los fenómenos usados se refieren a fricción y golpe.

La forma más primitiva se presentó en el imperio de Roma en forma del molino accionado por agua; y por eso es posible presentar toda la historia del desarrollo de las máquinas mediante el desarrollo del molino para la producción de alimentos.

La reducción de los tamaños es una sub función del proceso de división. En el caso de la reducción de los tamaños del material actúan fuerzas mecánicas. Los procesos que siguen de la reducción definen el tamaño necesario y la distribución de los tamaños, y son la forma de los granos, la estructura del material, la dureza, la capacidad de romper, fragilidad, etc.

Para la reducción de tamaños se consideran los siguientes principios: mecánico, hidráulico, neumático, térmico, eléctrico, óptico y acústico. El trabajo de reducción de tamaños contiene tres elementos, la energía de la superficie, el trabajo físico para la reducción del tamaño y el trabajo técnico de reducción de tamaños.

3.1.5 Energía de la superficie

Para generar una nueva superficie se necesita energía que se recibe de la deformación (energía elástica) del material sólido. La destrucción de un material sólido homogéneo inicia, en un lugar del cuerpo donde el esfuerzo supera la magnitud de la tensión posible por la teoría molecular.

Los cuerpos reales no son homogéneos, no tienen orden, tienen grietas internas, espacios sin material, materiales internos diferentes, etc. Estas fallas son la causa de la fractura. La primera fractura comienza en la falla más grande.

Un aspecto importante en la molienda tiene que ver con la energía de deformación (U); la cual es igual al trabajo efectuado por las cargas.

$$U = W = \int^{\delta} F_1 d\delta_1 \dots\dots\dots(14)$$

$$\text{Si } \delta = \frac{F * L}{E * A} \dots\dots\dots(15)$$

Entonces,

$$U = W = \frac{F^2 * L}{2 * E * A} \dots\dots\dots(16)$$

o

$$U = W = \frac{E * A * \delta^2}{2 * L} \dots\dots\dots(17)$$

Esto indica que al aumentar la fuerza sobre el material, se aumenta la cantidad de energía necesaria al cuadrado, y lo mismo pasa con la deformación δ . Por eso el proceso lento es más exitoso energéticamente. Esto se observa gráficamente en la figura 4

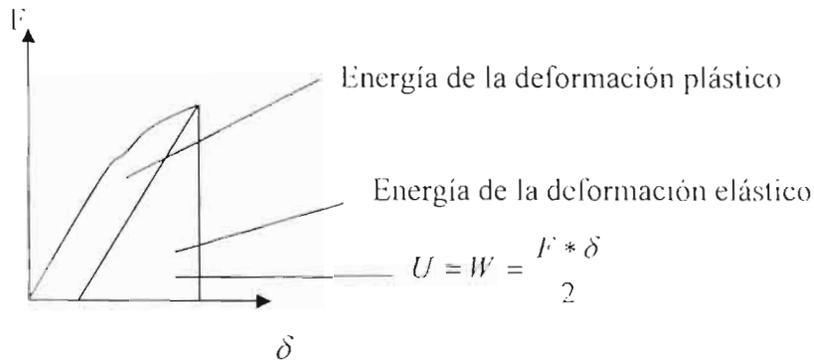


Figura 4. Energía de la deformación.

Algunas veces a la energía de deformación se le refiere como trabajo interno para distinguirla del trabajo externo W. En general la deformación total en varias partes con diferentes fuerzas axiales y cortantes puede determinarse mediante la ecuación (18).

$$\delta = \sum_{i=1}^n \frac{F_i L_i}{E_i A_i} \dots \dots \dots (18)$$

Donde:

F_i = Fuerza.

L_i = Longitud del material (grosor o espesor).

A_i = Área del material que recibe el esfuerzo

E_i = Módulo de elasticidad (función de masa líquida, masa sólida, estructura y textura).

$$E = F_B \cdot L^3 / 48 \cdot F_c \cdot I \dots \dots \dots (19)$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad.

F_B = Fuerza de flexión sobre el material

L = Longitud del tronco

F_c = Deflexión del material

I = Momento de inercia del área del corte

Según la teoría, el trabajo es mayor si la deformación es alta. De la interacción del material reológico con el cuchillo se deduce que el desplazamiento (δ_1) es más pequeño con el cuchillo que con molinos de piedra por la alta velocidad de la herramienta. Por eso se usan altas revoluciones para aumentar la superficie. El inconveniente es el desplazamiento reducido, y extracción pobre de líquidos.

Así la fórmula (17) nos indica que a mayor desplazamiento se produce la mayor extracción posible con una reducción del área (por destrucción) por una magnitud pequeña del módulo de elasticidad, una gran fuerza de presión por el peso enorme de la piedra y fuerzas que resultan de la velocidad angular y de la geometría del molino. La longitud l es un compromiso, pues por un lado δ_1 se aumenta con la magnitud del l , por otro lado con la magnitud del l se reduce la superficie, lo cual implica la reducción de la salida libre de mieles del material.

Así

1.) Hay más superficie por el principio de molienda con cuchillos pero se necesita un segundo escalón para la extracción efectiva del líquido.

2.) Con la piedra la reducción de tamaño y la extracción del líquido se realiza en un escalón con menos efecto del aumento de la superficie, pero con más efecto de la extracción, en comparación con el principio de los cuchillos.

Por eso las cargas verticales del peso y de la fuerza centrífuga, además de las fuerzas horizontales, como la fuerza cortante, patinaje traslativo y angular, se acumulan en una deformación resultante más grande que las deformaciones parciales. El mismo resultado se presenta por la acumulación de los esfuerzos axiales y cortantes. Esta es la causa de la destrucción más amplia del material orgánico, lo cual facilita la extracción de las mieles del maguey.

Ahora bien es necesario precisar algunos términos. Estructura es el orden de las masas sólidas y líquidas: Textura es el porcentaje de masa sólida en función de la masa total. El módulo de elasticidad es una función de la temperatura del material; en cambio, la viscosidad del líquido es una función de la temperatura y de otros elementos químicos solubles y dispersables.

Con las dos fórmulas siguientes y su interpretación es posible seleccionar los parámetros óptimos más eficientes de estos dos tipos de molinos.

Según la fórmula (17) la reducción de la longitud L sólo aumenta el área. Pero un aumento del área compromete siempre los efectos de la reducción de la longitud en cuanto a la deformación δ_1 , por la relación lineal de la longitud y cuadrático del área. Por ello el objetivo de la molienda es aumentar la fuerza del molino encima del material y aumentar el área de la superficie del material. El módulo de Elasticidad (E) no es posible cambiarlo mecánicamente con el molino, pues solo es posible hacerlo con medios térmicos, biológicos y químicos. El aumento de la fuerza sobre el material es posible a través de los siguientes efectos:

- 1.) Aumento del peso de la piedra (m x g).
- 2.) Aumento del componente vertical del momento giratorio de aceleración que significa: gran radio r = gran, por $J_p = A \times r^2$ y $\theta = J_p / r$ con efecto exponencial
- 3.) Aumento del componente vertical de la fuerza centrífuga $F_c = m * r * \omega^2$
- 4.) Introducción de un componente horizontal de fricción superficial y fuerza interna del sistema mecánico del molino: $F_r = F_N * \mu$ como resultado del patinaje debido al ángulo entre el eje del giro de la piedra y el centro de la plataforma (fondo) y, además del giro del eje de la piedra en dos direcciones ($yy' = \beta$ y $zz' = \alpha$). Maguey verde con 35% de la masa seca, encima de una lámina de hierro tiene el valor estático de fricción de 0.61 hasta 0.69. Densidad de masa del maguey de 620 hasta 680 kg/ m³
- 5.) Por este patinaje hay una fuerza de Coriolis entre la piedra y el material que se mueve en el sistema giratorio con la fórmula: $F_{co} = m * v * \omega$ la cual actúa en forma perpendicular al movimiento relativo del material debajo de la piedra.
- 6.) Aumento de la presión sobre el material por reducción del área del contacto debido al perfil circular de la piedra.

Por eso la deformación total es la suma vectorial de la deformación horizontal en dos direcciones, vertical y de giro (torsión)

$$\delta_{total} = \delta_{hx} + \delta_{hz} + \delta_{\alpha} + \delta_{\alpha z} \dots\dots\dots(20)$$

3.1.6 Trabajo físico para la reducción del tamaño

El trabajo físico contiene el aumento de la energía física, la energía de fricción y el trabajo para el cambio de la forma del cuerpo. El trabajo físico para la reducción de los

tamaños es una función de la estructura del cuerpo, del tamaño del material, y de la temperatura, tipo de carga y tiempo de la acción de la carga.

El trabajo técnico incluye el trabajo físico y las pérdidas adicionales. La energía superficial = 1% del trabajo físico. El trabajo físico = 10% del trabajo técnico. En resumen del 90 al 99 % del trabajo (energía) es pérdidas, esto es trabajo perdido.

La capacidad para moler un material sólido es menos una función de la dureza, y mas una función del espesor del material. Los procesos simples de moler son: romper, moler, deshilar, cortar, amolar, afilar y triturar.

3.1.7 Principios de molienda (presión, tensión, choque y corte)

La presión se define como la magnitud de la fuerza normal por unidad de área de la superficie. La presión se transmite a los límites sólidos o a través de secciones arbitrarias de un fluido, perpendicularmente a esos límites, o de secciones en todos sus puntos (Resnik *et al.*, 1973).

Cuando una fuerza actúa perpendicularmente a una superficie, la presión que se ejerce es igual a la razón entre la magnitud de dicha fuerza y el área de la superficie (White 1995, Beiser, 1988).

3.1.8 Esfuerzo y deformación

Según Beiser (1988), el esfuerzo al que se somete un cuerpo cuando sobre él actúa una fuerza que le produce o tiende a producir una deformación, es igual a la magnitud de la fuerza F aplicada, dividida entre el área A de la sección transversal sobre la que actúa. La unidad de esfuerzo en el sistema MKS (SI) es el N / m^2 ; en el sistema inglés usualmente se utiliza la $lb / pulg^2$. Existen tres clases de esfuerzo, la tensión, la compresión, y el esfuerzo cortante mostrados en la siguiente figura (figura 5)

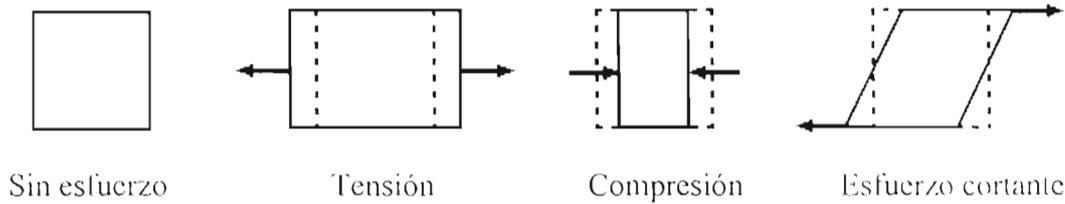


Figura 5. Clases de esfuerzo.

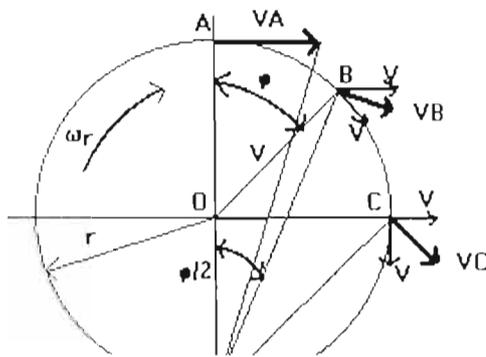
3.2 Movimiento de la rueda

3.2.1 Cinemática de la rueda

La cinemática es el estudio del movimiento, en sus componentes de posición, velocidad, aceleración, pero sin especificar la naturaleza de la partícula u objeto cuyo movimiento se estudia, ni tampoco se consideran las fuerzas que causan la aceleración (Orcar, 1977; Resnik *et al.*, 1973).

El movimiento de las ruedas sobre una superficie es provocado por la aplicación sobre ellas de un par o por la aplicación de una fuerza en el eje, paralela a dicha superficie. El par aplicado a una rueda hace surgir en su periferia una fuerza tangencial denominada fuerza tractiva. Esta fuerza actúa sobre el camino provocando en el mismo una reacción dirigida de acuerdo con la dirección del movimiento de la rueda. La existencia de esta reacción es necesaria para provocar el movimiento de la rueda.

En la figura 6, la rueda rígida hace contacto con el camino en los puntos de la recta perpendicular al plano de la figura y que pasa por el punto O_1 . Esta recta se llama línea de contacto (Szczepaniak, 1982).



Donde:

ω_r = Velocidad angular de la rueda y

r = Radio exterior de la rueda.

3.2.2 Dinámica de la rueda

La dinámica es el estudio de ciertas relaciones generales que describen la interacción de los cuerpos materiales. Se verá que una enorme variedad de fenómenos pueden describirse o explicarse en términos de las leyes de Newton. Una propiedad general de los cuerpos materiales es su masa inercial (Orear, 1977; Resnik *et al.*, 1973).

En la Figura 7 se muestra una rueda libre sobre una superficie rígida y se señalan todas las fuerzas y pares que actúan sobre la misma:

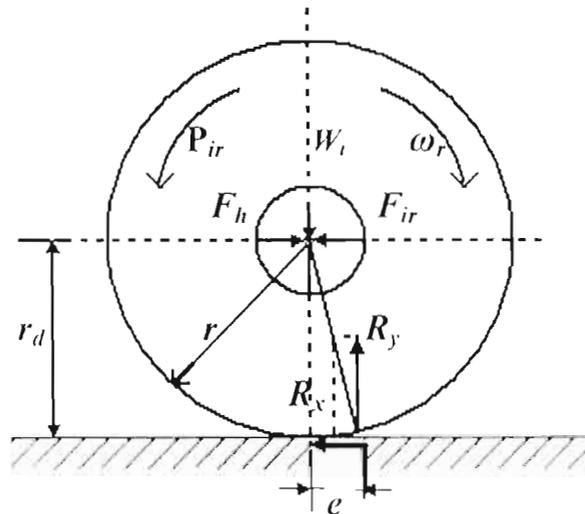


Figura 7. Diagrama de cuerpo libre de una rueda con rodadura pura.

Donde:

W_t = Carga vertical sobre la rueda libre, la cual considera también el peso propio de la rueda.

F_h = Fuerza horizontal que provoca el movimiento de la rueda,

F_{ir} = Fuerza de inercia de la rueda debida al movimiento no uniforme de la misma.

P_{ir} = Par debido a la inercia de la rueda, en el caso del movimiento no uniforme de la misma.

R_x = Componente horizontal de la reacción al camino.

R_y = Componente vertical a la reacción del camino.

r = Radio,

r_d = Radio dinámico de la rueda,

e = Distancia del punto de aplicación de la reacción resultante del camino al eje vertical de la rueda y

ω_r = Velocidad angular.

Según Mosqueira (1949), la dinámica estudia la relación entre los movimientos, las causas que los producen y los efectos que originan. Las fuerzas que actúan en el molino chileno o tahona se pueden observar en las Figuras 8 y 9; y en la figura 10 los momentos y en la figura 11 las fuerzas cortantes encima del material.

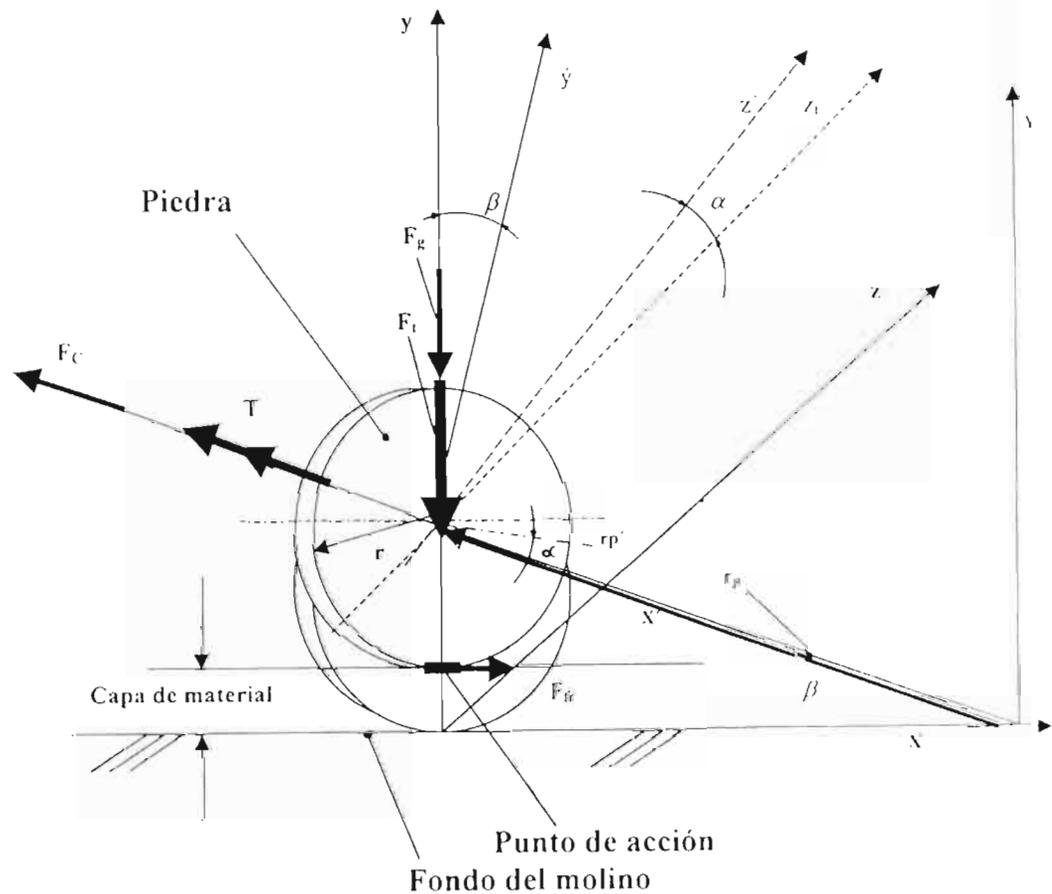


Figura 8. Fuerzas en el proceso de la molienda.

Donde:

r_p = Radio de la planta tahona,

r_p' = Eje de giro de la piedra encima del material,

F_t = Fuerza total = $F_g + (F_c \text{ sen } \beta) + (T \text{ sen } \beta)$,

F_g = Peso de la piedra,

F_c = Fuerza centrífuga = $m (r_p \times \omega^2)$,

$T = \theta \varphi \theta =$ Momento polar inerte de la piedra; φ = aceleración angular,

F_v = Aumento de la fuerza vertical por la dinámica = $(F_c \text{ sen } \beta) + (T \text{ sen } \beta)$,

β = Inclinación del eje de la piedra respecto a la horizontal,

α = Ángulo entre r_p y r_p' y

r = Radio de la piedra.

(Rossel *et al.*, 2002)

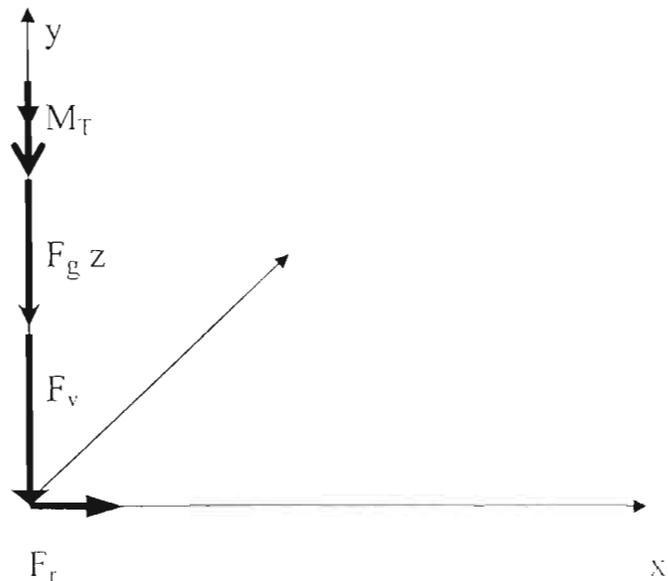


Figura 9. Fuerzas que actúan sobre el material.

Donde:

$F_r = (F_g + F_v)$.

μ = Fuerza de fricción por patinaje radial,

$F_v = \text{sen } \beta (F_c + F_t) =$ Fuerza vertical de la fuerza centrífuga más fuerza del momento polar de inercia por la aceleración angular,

F_g = Fuerza del peso de la piedra y

M_T = Momento de giro por el eje vertical.

(Rossel *et al.*, 2002).

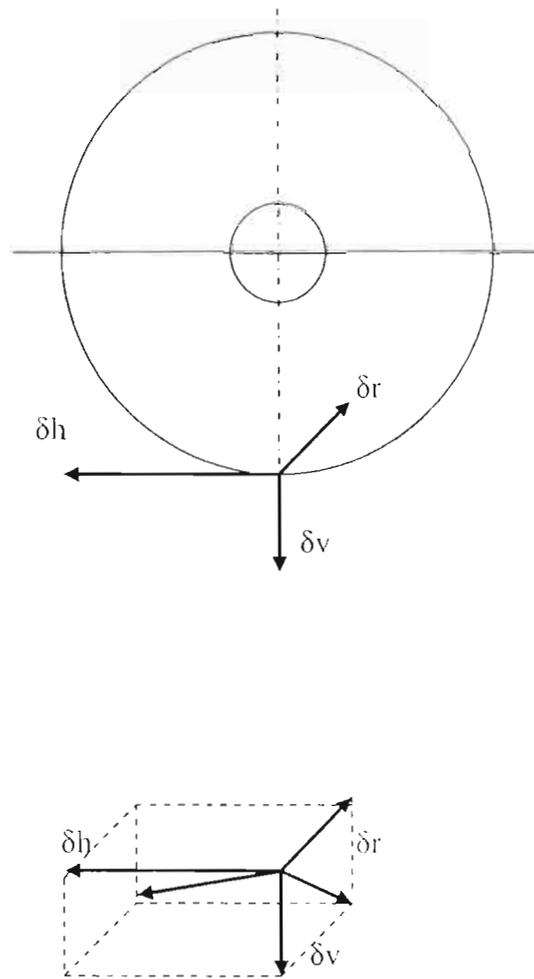


Figura 10. Diagrama de momentos de fuerza

Donde:

δh = Deformación de la fuerza de momento de tracción o tangencial.

δr = Deformación de la fuerza por patinaje.

δv = Deformación de la fuerza provocada por el peso.

$r \times \delta h = M$ = Momento de tracción.

$\mu \geq 1$ y

$$\sum \vec{r} \times \vec{y} \cdot \vec{z} = \Sigma \delta.$$

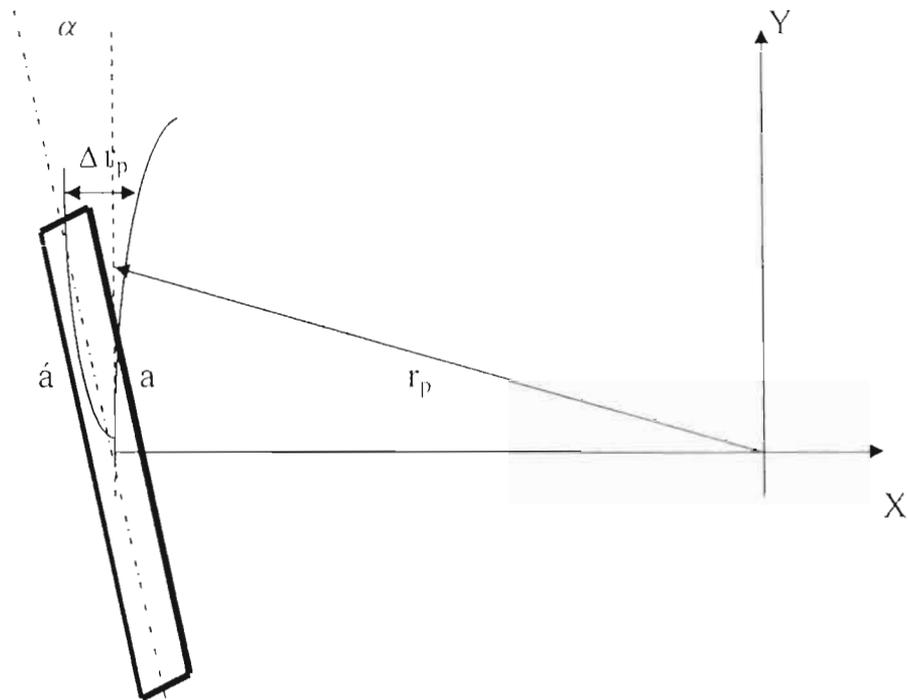


Figura 11. Fuerza cortante en el material.

Donde:

Δr_p = Patinaje radial por el ángulo α , que produce la deformación horizontal radial.

a = Camino del centroide de la piedra.

\acute{a} = Camino del borde de la piedra.

α = Ángulo entre el eje de giro y el eje de giro de la piedra y

$\Delta r_p = r_p \times \varphi \times \text{sen } \alpha$ patinaje radial que produce por fricción una fuerza cortante

(Rossel *et al.*, 2002).

3.2.3 Problemática presente

Si el eje instantáneo de rotación de la rueda en movimiento está ubicado por arriba del punto O_1 , la línea de contacto de la rueda con el camino se traslada en dirección contraria al movimiento de la rueda. Tal traslación de la línea de contacto se llama **patinaje**.

Si el eje instantáneo de rotación de la rueda se encuentra situado más abajo que el punto O_1 , entonces la línea de contacto de la rueda con el camino se trasladará en la misma dirección que su movimiento. Tal traslado de la línea de contacto se llama **deslizamiento** (Szczeplaniak, 1982).

3.3 Fibras vegetales

Las fibras vegetales son sustancias complejas con una combinación peculiar de diferentes constituyentes celulares heterogéneos, entre los cuales destacan la celulosa, la lignina y la pectina. La celulosa forma el esqueleto de las paredes de la célula y la hemicelulosa forma los materiales adherentes que las unen. La manera en que todas estas células constituyentes se orientan es todavía un misterio en las ciencias de la fibra. Durante los últimos años se han realizado considerables avances para la comprensión de la arquitectura molecular de las paredes de las células de la planta, pues la combinación peculiar de sus propiedades físicas se atribuye a la estructura molecular y a los constituyentes celulares de la planta. La física moderna ha sido de gran ayuda para conocer la estructura molecular de los materiales biológicos; así, se conoce que las propiedades peculiares de las células de la pared vegetal se deben a la presencia de celulosa, aunque no puede descartarse la incrustación de otros materiales, que modifican considerablemente los rasgos de la pared celular, en una extensión considerable. La celulosa forma regiones cristalinas y la hemicelulosa la región amorfa (Maiti, 1995).

La diversidad de nombres con que se designan a las fibras y las plantas textiles causan con frecuencia confusión y duda, y en algunos casos pérdidas de alguna consideración. En la mayoría de los casos el mismo nombre vulgar sirve para designar tanto la fibra como la planta que la produce. El nombre "maguey" se emplea en muchas regiones de México, América Central y las Antillas para indicar casi todas las especies de agaves de hojas largas. El uso de este nombre se ha extendido hacia las islas Filipinas donde una de las plantas textiles de mayor importancia es un maguey que se introdujo de México. En Yucatán el nombre de maguey se emplea muy rara vez, pero el de "henequén" se le aplica no solamente al agave que allí se cultiva por su fibra, sino también a otras especies de agave que no producen fibras de valor alguno (Dewey, 1965).

4 CARACTERIZACIÓN DE LOS MOLINOS

4.1 Evaluación del patinaje o deslizamiento

El patinaje o deslizamiento que presentan los molinos visitados es un problema provocado debido al alto índice de humedad que tiene el maguey cocido, pero también influye el tipo de perfil de la rueda de piedra que proporciona la tracción.

Cuando la rueda pierde tracción sobre el material solamente ejerce presión sobre ella y la tensión, el choque y el corte sobre las fibras disminuyen; por ello es importante conocer qué tipo de problema se presenta, si es patinaje o deslizamiento, y así cuantificarlo para evaluar su eficiencia.

$$I_{ef} = \frac{Dt}{Dr} \dots\dots\dots(21)$$

Donde:

I_{ef} = Índice de eficiencia.

Dt = Distancia teórica recorrida y

Dr = distancia real recorrida.

La distancia teórica se obtuvo calculando la circunferencia del círculo por donde se desplaza la rueda y tomando como radio la longitud del brazo de palanca desde el centro del vástago hasta el punto medio del ancho de la rueda.

Para obtener la distancia real recorrida por la piedra en una traslación se contabilizó el número de vueltas que requiere la rueda para llegar al mismo punto sobre el metate o superficie del molino, y se multiplicó por la circunferencia de la rueda (perímetro)

Si el valor del índice de eficiencia obtenido es menor a 1.0 entonces existe patinaje en la rueda; por el contrario, si el índice obtenido es mayor a 1.0 tenemos que se presenta deslizamiento. Si el valor es de 1.0 entonces no existe patinaje ni deslizamiento.

4.2 Análisis de fibras

4.2.1 Resistencia a la tensión

La rueda de piedra al pasar sobre las fibras aplica fuerzas que provocan tensión, presión golpe y choque; por lo tanto, es importante conocer su resistencia antes de su fractura para determinar la fuerza necesaria para romperlas y permitir que las mieles fluyan y salgan de la piña y el bagazo, que es el objetivo del molino.

Para determinar la resistencia a la tensión se utilizó una maquina universal de ensayo de materiales de laboratorio marca Monsanto. Se utilizaron muestras de una y de cinco fibras, con diámetro y longitud similar, y se les aplicó tensión hasta su ruptura. Se aplicaron 20 repeticiones de cada una.

4.2.2 Diámetro de las fibras

La presión es una fuerza aplicada sobre una unidad de área, y solamente nos servirá para caracterizar la fibra. Para obtener el diámetro de las fibras se utilizó un micrómetro digital, y se realizó la medición en cuatro puntos localizados a lo largo de la fibra con el fin de obtener el diámetro medio. Se realizaron 20 repeticiones.

4.2.3 Porcentaje de compresión del bagazo

Durante la molienda las piñas o cabezas del maguey previamente cocidas son colocadas al paso de la rueda de piedra para extraerles las mieles; después de dos o tres pasadas las piñas se convierten en bagazo, y éste es apilado sobre sí mismo. Conforme la rueda va circulando por encima, el bagazo se comprime debido a la presión ejercida por la rueda

$$C = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{\Delta_2} * 100 \dots\dots\dots(22)$$

Donde:

C = Porcentaje de compresión.

Δ_1 = Altura inicial y

Δ_2 = Altura final

Es importante conocer el % de compresión para conocer la cantidad óptima de pasadas que se le debe dar al bagazo para extraer la mayor cantidad de mieles pero que siga siendo rentable

4.2.4 Determinación de humedad y materia seca

La determinación del contenido de materia seca total se basa en la evaporación total del agua entre 100 y 105° hasta peso constante; se considera que la pérdida de peso solo se debe a la eliminación del agua.

Los materiales secados a temperaturas superiores a los 55 °C se alteran significativamente en algunos de sus componentes (Van Soest, citado por Sosa, 1979). Por lo tanto, si un material se va a secar con el objeto de someterlo a análisis diferentes del de humedad, no deberá sobrepasarse los 55 °C. Si el material se va a secar para medir exclusivamente el contenido de agua pueden emplearse temperaturas superiores a los 55 °C, siempre que no haya pérdida de sustancias por volatilización o por descomposición.

La determinación de la materia seca total permite conocer el porcentaje de humedad que aún tiene el bagazo de las piñas de maguey al salir del molino chileno: este porcentaje puede servir de referencia para evaluar las mejoras propuestas al molino.

Material:

- Crisoles de porcelana.
- Horno de ventilación forzada hasta 200 °C.
- Espátula de acero inoxidable.
- Pinzas para crisol.
- Desecador con cloruro de calcio o gel de sílice y
- Balanza analítica.

Procedimiento:

Acondicionamiento de los crisoles.

- 1) Lavar los crisoles perfectamente con agua y detergente.
- 2) Enjuagarlos con agua destilada y posteriormente con éter.
- 3) Secarlos en la estufa a 100-105 °C hasta peso constante (aproximadamente 4 h)
- 4) Enfriarlos en el desecador para evitar la hidratación.
- 5) Pesar con la balanza analítica.

Determinación de humedad

1. Depositar dentro del crisol de 1.0 a 1.5 gr de muestra y registrar el peso exacto.
 2. Secarlos en la estufa a 100-105 °C hasta peso constante (aproximadamente cuatro horas).
 3. Retirar los crisoles con su contenido.
 4. Pesar en la balanza analítica.
- Usar pinzas en todas las manipulaciones.

CÁLCULOS:

$$\% \text{ de humedad total} = \frac{\text{pérdida de peso en gramos}}{\text{gramos de muestra}} \times 100 \dots\dots\dots(23)$$

$$\% \text{ de materia seca total} = 100 - \% \text{ de humedad total.} \dots\dots\dots(24)$$

Nota: La determinación se hizo para cada muestra por triplicado.

5 RESULTADOS

5.1 Elementos del molino

Se visitaron las fábricas de mezcal Saldaña, Santa Teresa, Laguna Seca, Jarillas y Santa Isabel, para caracterizar cada uno de los elementos de sus molinos, su funcionamiento, las condiciones y materiales con que están elaborados y la forma de realizar la molienda. Los molinos de las diferentes fábricas en general son similares, aunque difieren las prácticas de molienda. En general están compuestos por los mismos elementos que se pueden observar en la Figura 12.



Figura 12. Partes de un molino chileno o tahona.

5.2 Características de la rueda

En el Cuadro 4 se resumen las características de los molinos analizados, y a partir de estas se calcularon las características físicas y mecánicas.

Cuadro 4. Características de la rueda

	Laguna seca	Saldaña ¹	Saldaña ²	Santa Teresa ¹	Santa Teresa ²	Jarillas	Santa Isabel
Volumen de la rueda (m ³)	1.005	0.849	1.230	1.250	1.650	0.904	0.936
Peso (ton)	2.312	1.953	2.829	2.875	3.795	2.079	2.153
Área de contacto mayor (m ²)	0.551	0.487	0.491	0.603	0.635	0.496	0.532
Presión mayor (kg/cm ²)	0.762	0.715	0.971	0.911	1.251	0.761	0.724
Ángulo vertical (°)	85	74	89	82	87	85	86
Ángulo horizontal(°)	88	85	86	87	86	88	87
Velocidad (m/s)	0.190	0.170	0.160	nd	nd	nd	nd
Índice de eficiencia	0.874	0.778	0.944	nd	nd	nd	nd

¹ = molino menor; ² = molino mayor; nd = no disponible

5.3 Resistencia de fibras

La rueda del molino al avanzar sobre el bagazo produce presión y algún efecto de corte en las fibras, lo cual provoca que las mieles fluyan. En el Cuadro 5 se puede observar la resistencia que presentan las fibras al corte, estos datos sólo nos sirven como caracterización de las fibras, al igual que su diámetro que se presenta en el Cuadro 6.

5.4 Diámetro de fibras

Para obtener el diámetro de las fibras se tomaron cuatro mediciones: a través de su longitud, dos de ellas con el micrómetro colocado verticalmente (V^1 y V^2) y dos horizontalmente (H^1 y H^2), debido a que las fibras no son uniformes. Los resultados de estas mediciones se presentan en el Cuadro 6.

Cuadro 5. Resistencia (N) de las fibras

Tipo de fibra	Resistencia en haces de cinco fibras.	Resistencia individual.	Promedio.
Seca	25.5	5.1	4.68
	17.5	3.5	
	22.5	4.5	
	27.5	5.5	
	22.5	4.5	
	27.5	5.5	
	22.5	4.5	
	25.0	5.0	
	27.5	5.5	
	22.5	4.5	
		4.5	
		3.5	
		4.5	
		5.5	
		6.0	
		3.5	
		4.5	
	4.0		
	5.0		
	4.5		
Húmeda	27.5	5.5	6.52
	30.0	6.0	
	32.5	6.5	
	35.5	7.1	
	33.5	6.7	
	27.5	5.5	
	37.0	7.4	
	35.0	7.0	
	34.0	6.8	
	37.5	7.5	
		5.5	
		8.0	
		7.5	
		5.5	
		5.0	
	7.5		
	6.0		
	6.5		
	7.5		
	5.5		

Cuadro 6. Diámetro de las fibras (mm) de cabezas de maguey.

Tipo de fibra	Muestra	H ¹	H ²	V ¹	V ²	Promedio
Seca	1	0.144	0.166	0.183	0.156	0.162
	2	0.386	0.303	0.285	0.404	0.344
	3	0.202	0.222	0.306	0.303	0.258
	4	0.132	0.134	0.191	0.226	0.170
	\bar{X}	0.233				
Húmeda en agua	5	0.269	0.207	0.191	0.177	0.211
	6	0.210	0.280	0.316	0.260	0.266
	7	0.145	0.212	0.256	0.245	0.214
	8	0.101	0.081	0.170	0.166	0.129
	\bar{X}	0.205				
Húmeda en vinazas	9	0.203	0.266	0.378	0.284	0.282
	10	0.143	0.218	0.194	0.134	0.172
	11	0.252	0.229	0.199	0.249	0.232
	12	0.259	0.232	0.210	0.173	0.218
	\bar{X}	0.226				
Promedio general	0.221					

V¹ = vertical 1, V² = vertical 2, H¹ horizontal 1 y H² horizontal 2.

5.5 Porcentaje de compresión

a) Molino de la fábrica Saldaña

En la fábrica de mezcal Saldaña permiten que se forme un colchón de bagazo acumulado sobre el paso de la piedra. Por esa razón dan aproximadamente 29 vueltas o pasadas por molinada. El porcentaje de compresión se observa en el Cuadro 7, y gráficamente en la Figura 13

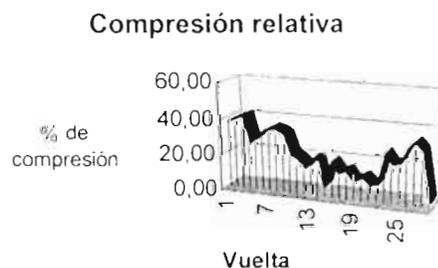


Figura 13. Porcentaje de compresión en la mezcalera Saldaña.

$$\text{Compresión total} = \frac{\text{Espesor inicial} - \text{Espesor final}}{\text{Espesor inicial}} \times 100$$

$$= \frac{42 - 30}{42} \times 100 = 28.57\%$$

El porcentaje de compresión en este molino es de 28.5% con una presión de 0.971 t/m

Cuadro 7. Compresión ejercida por el paso de la rueda sobre el maguey en la mezcalera Saldaña.

Vuelta	Espesor previo (cm)	Espesor posterior (cm)	Compresión (%)
1	42	26	38.10
2	30	18	40.00
3	34	20	41.18
4	30	22	26.67
5	33	23	30.30
6	36	24	33.33
7	31	20	35.48
8	29	19	34.48
9	34	23	32.35
10	28	22	21.43
11	26	21	19.23
12	27	23	14.81
13	25	20	20.00
14	35	28	20.00
15	32	30	6.25
16	25	20	20.00
17	28	24	14.29
18	31	26	16.13
19	28	25	10.71
20	24	21	12.50
21	22	20	9.09
22	20	18	10.00
23	30	22	26.67
24	28	22	21.43
25	31	24	22.58
26	33	23	30.30
27	35	23	34.29
28	30	21	30.00
29	31	30	3.23

b) Molino de la fábrica Laguna Seca

En la fábrica de Laguna Seca. No dejan que se forme el "colchón" ya que sólo dan aproximadamente 10 pasadas por molinada. En el Cuadro 8 se puede apreciar el porcentaje de compresión, y en la Figura 14 se observa gráficamente el comportamiento de la compresión.

Cuadro 8. Compresión del paso de la rueda sobre el maguey en la mezcalera Laguna Seca.

Vuelta	Espesor previo (cm)	Espesor posterior (cm)	Compresión (%)
1	25	10	60.00
2	10	3	70.00
3	14	10	28.57
4	16	11	31.25
5	13	9	30.77
6	14	12	14.29
7	18	13	27.78
8	15	11	26.67
9	17	12	29.41
10	18	14	22.22

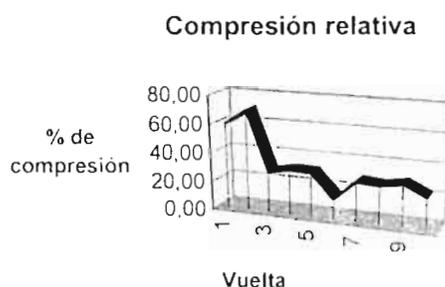


Figura 14. Porcentaje de compresión en la mezcalera Laguna Seca.

$$\text{Compresión total} = \frac{\text{Espesor inicial} - \text{Espesor final}}{\text{Espesor inicial}} \times 100$$

$$= \frac{25 - 14}{25} \times 100 = 44\%$$

El porcentaje de compresión en este molino es de 44% con una presión de 0.162 t/m²

5.6 Porcentaje de humedad

Los resultados de la determinación del porcentaje medio de humedad se muestran en el Cuadro 9. Si se aplicara el rediseño a los molinos este porcentaje debería disminuir si las mejoras fueron adecuadas.

Cuadro 9. Efecto de la molienda actual sobre el porcentaje de humedad.

Muestra	Humedad
Trozo de piña	69.44
Bagazo	53.40

5.7 Estructura de los molinos

5.7.1 Laguna Seca (figuras 15 y 16)

a) Metate

Problema.- Por la necesidad del drenaje de las mieles la superficie del metate no es completamente horizontal y no cuenta con el perfil necesario para dar mayor tracción a la rueda sobre de él.

Solución.- Aplicar un nuevo perfil al metate, acorde con el de la rueda y practicar en éste cortes transversales de aproximadamente 0.5 cm de profundidad.

b) Vástago

Problema.- Este elemento ya ha dado problemas ya que es de madera y oscila cuando la rueda está en movimiento. Además no tiene la resistencia necesaria para que el eje central o pivote mantenga firme al brazo de palanca, por lo cual también la rueda de piedra tiende a oscilar.

Solución.- Construir un vástago de hormigón tomando como ejemplo el de la mezcalera Santa Teresa, el cual además está reforzado con una camisa metálica.

c) Unión

Problema.- La unión presenta un desgaste significativo debido a que la corona que abraza al eje central oscila hacia arriba y abajo, pues la superficie del metate no es completamente horizontal. Esto provoca su desgaste por fricción.

Solución.- Aplicar grasa o lubricante regularmente, y darle nivel a la superficie del metate, resolviendo el drenaje a base de pendiente en los canalillos.

d) Eje central

Problema.- Desgaste significativo.

Solución.- Aplicación de lubricante periódicamente.

e) Brazo de palanca

El tubo que forma el brazo de palanca es suficientemente robusto; además tiene algunos refuerzos que le dan más firmeza.

f) Unión rueda brazo

Problema.- El orificio central de la rueda es cuadrado pero el brazo de palanca redondo; para mantener la rueda firme y que no se deslice por el brazo de palanca han colocado cuñas de madera que gradualmente se aflojan y tienen que ser ajustadas constantemente.

Solución.- Aplicar rodamientos en cada lado de la rueda, para que gire libremente y limite al mismo tiempo el movimiento de la rueda a lo largo del brazo de palanca.

g) Rueda de piedra

Problema.- La rueda gira muy cerca del centro del molino, lo que provoca que ruede sobre la superficie del metate que está inclinada hacia arriba, reduciendo el área de contacto entre sus superficies.

Solución.- La rueda debe reubicarse hacia afuera del molino, donde la superficie del metate es plana y esta acondicionada con un perfil transversal a la dirección de avance de la rueda.

h) Perfil de la rueda

Problema.- La superficie de contacto de la rueda cuenta con orificios que le aportan un poco más de tracción al momento de avanzar, pero así tiende a patinar cuando el material está muy húmedo.

Solución.- Labrar en el perfil líneas transversales para aumentar su tracción.

i) Punto de arrastre

El punto de arrastre no presenta ningún problema visible. Solamente es recomendable aplicar lubricante periódicamente para evitar su desgaste.

5.7.2 Saldaña

Esta fábrica cuenta con dos molinos en funcionamiento, similares en general, excepto en el tamaño de la piedra.

5.7.2.1 Molino mayor (figuras 17 y 18)

a) Metate

No se aprecia ningún problema con el metate; el perfil está desgastado pero aunque sigue funcionando adecuadamente, se podría recomendar marcarlo más.

b) Vástago

Problema.- El vástago es de hormigón, el uso y el tiempo provocó que oscilara, y este problema se solucionó parcialmente con una camisa metálica que le dio más robustez.

Solución.- Es recomendable que se sustituya este vástago por uno más ancho en su base para evitar la oscilación.

c) Unión

Problema.- La abrazadera del eje central está inclinada hacia abajo lo que provoca fricción en la parte inferior y por consiguiente desgaste en dicho eje.

Solución.- Nivelar la abrazadera para que quede completamente horizontal, y lubricar periódicamente.

d) Eje central

Problema.- Es de acero y está desgastado por la fricción la abrazadera de la unión.

Solución.- Nivelando la abrazadera se corrige el problema

e) Brazo de palanca

El tubo es robusto y fuerte: no presenta problema alguno.

f) Unión rueda brazo

Está bien diseñada, ya que no permite que la rueda se deslice sobre el brazo de palanca, pero si que la rueda gire adecuadamente. Sólo se recomienda la lubricación periódica.

g) Rueda de piedra

El tamaño es el adecuado solamente hay que considerar la presión que ejerce sobre el bagazo.

h) Perfil de la rueda

Problema.- El perfil está muy desgastado pero aun así conserva buena tracción.

Solución.- Labrar nuevamente el perfil para darle mayor profundidad a las muescas.

i) Punto de arrastre.

No presenta problemas, se recomienda sólo su lubricación constante.

5.7.2.2 Molino menor (figuras 19 y 20)

a) Metate

Tampoco presenta problemas; el perfil está aun bien marcado, lo cual favorece la tracción.

b) Vástago

Problema.- Tiende a oscilar con el movimiento de la rueda de piedra, pues es de madera y más estrecho en su base.

Solución.- Aunque se le han aplicado refuerzos metálicos, debería considerarse sustituirlo por un vástago de hormigón y camisa metálica.

c) Unión

Este no presenta problemas, solamente requiere de lubricación periódica.

d) Eje central

Como la unión o abrazadera si está nivelada, no presenta ningún problema, y sólo se recomienda su lubricación periódica.

e) Brazo de palanca

Es de acero, lo que le da resistencia y firmeza.

f) Unión rueda brazo

No presenta problemas, el brazo permite el giro de la rueda sin que se deslice a lo largo de él

g) Rueda de piedra

Aunque es la rueda más pequeña de la fábrica, lo importante es considerar la presión que ejerce sobre el al material a exprimir.

h) Perfil de la rueda

Cuenta con un perfil bien marcado y solamente hay que pronunciarlo algo más.

i) Punto de arrastre

Igual que el anterior, no presenta ningún problema.

5.7.3 Santa Teresa

No fue posible observar el molino en funcionamiento debido a que la fábrica tiene algunos años fuera de operaciones. Se pudo apreciar que los molinos están casi en condiciones óptimas para trabajar y sin indicios de problemas en su funcionamiento, esto se corroboró con algunos ex trabajadores de la misma fábrica.

5.7.3.1 Molino menor (figuras 21 y 22)

a) Metate

El perfil está muy bien marcado, y según comentarios de los ex trabajadores casi no presentaba patinaje ni deslizamiento. El área del metate es completamente plana.

b) Vástago

Este elemento es robusto y fuerte, está construido con hormigón y reforzado con una camisa metálica.

c) Unión

La unión es gruesa y firme; no presenta fricción excesiva y por lo que se puede suponer que era lubricada frecuentemente.

d) Eje central

Muy ancho y adecuado para la unión; sin problemas.

c) Brazo de palanca

El tubo que forma el brazo de palanca es de los más gruesos que se observaron en las fábricas visitadas, lo que le da un peso extra y mayor presión sobre el maguicy por exprimir.

f) Unión rueda brazo

El orificio de la rueda tiene las dimensiones justas del brazo de palanca, sin que la rueda pueda moverse hacia dentro o fuera. Y permite que la rueda gire sin problemas.

g) Rueda de piedra

Es una piedra de gran tamaño, lo que posiblemente provoca suficiente presión. Convendría evaluar si la relación entre la anchura y la altura es la más conveniente.

h) Perfil de la rueda

Problema.- Carece de perfil labrado, solamente presenta el desgaste natural de la piedra causado por el trabajo.

Solución.- Labrar el perfil, con ranuras transversales.

i) Punto de arrastre

No se pudo observar ningún problema.

5.7.3.2 Molino mayor (figuras 23 y 24)

a) Metate

El metate presenta un perfil con ranuras muy bien marcadas, lo cual evita el patinaje y deslizamiento

b) Vástago

Cuenta con el vástago más robusto de todos los observados, incluso con mayor diámetro que el del molino menor de la misma fábrica.

c) Unión

Construida en acero, y justa para el giro.

d) Eje central

Firme y no presenta desgaste excesivo.

e) Brazo de palanca

De gran diámetro, y al ser muy pesado debe transmitir presión adicional sobre el material.

f) Unión rueda brazo

Similar al molino menor, pues deja pasar el brazo de palanca sin perder la firmeza de la rueda sobre él.

g) Rueda de piedra

Es la rueda de mayor tamaño en todos los molinos observados, y por lo tanto la que ejerce la mayor presión calculada sobre el maguey. Por ello como se tomó como modelo para comparar las demás.

h) Perfil de la rueda

Aún conserva el perfil marcado y solamente es necesario darle mayor profundidad.

i) Punto de arrastre

Aunque no se pudo observar trabajando, parece que funcionaba sin problemas.

5.7.4 Jarillas (figuras 25 y 26)

a) Metate

Problema.- su superficie es lisa sin muescas, lo cual provoca deslizamiento y patinaje

Solución.- labrar la superficie tomando como ejemplo los molinos de Saldaña o Santa Teresa.

b) Vástago

Problema.- Es de madera, y aunque está reforzado con un par de cadenas, tiende a oscilar

Solución.- Sustituirlo por un vástago de hormigón armado para que sea más resistente y firme.

c) Unión

Elaborada con acero, con un diseño diferente a los demás, firme y no presenta mucho desgaste.

d) Eje central

Robusto sin problemas, solo se recomienda lubricación periódica.

e) Brazo de palanca

Es un tubo metálico y resistente; sin problemas.

f) Unión rueda brazo

Problema.- Similar al de Laguna Seca, también tiene cuñas de madera para evitar que la rueda se deslice por la longitud del brazo de palanca. Estas cuñas también se desgastan y hay que ajustarlas a intervalos cortos de tiempo.

Solución.- Se puede corregir este problema eliminando las cuñas y colocando en su lugar una pieza que rellene todo el orificio central de la rueda de piedra y solo deje un espacio justo para que se introduzca el brazo de palanca.

g) Rueda de piedra

La rueda es de tamaño promedio y por su anchura, de las que ejerce menor presión.

h) Perfil de la rueda

Problema.- Presenta un alto índice de patinaje y deslizamiento ya que la superficie de contacto es casi lisa.

Solución.- Marcar el perfil para darle mayor tracción.

i) Punto de arrastre

No presenta problemas.

5.7.5 Santa Isabel (figuras 27 y 28)

a) Metale

Problema.- La superficie sólo presenta pequeñas oquedades para aumentar la tracción, pero ya están muy superficiales y esto es insuficiente para evitar el patinaje y deslizamiento notables de la rueda.

Solución.- Labrar la superficie con hendiduras transversales a la dirección de giro de la rueda, para aumentar la tracción.

b) Vástago

Problema.- Oscila y se mueve durante al desplazamiento de la rueda de piedra, pues es de madera.

Solución.- Sustituirlo por uno construido con hormigón y camisa de acero.

c) Unión

No presenta problemas en la unión; similar al de la fábrica de Jarillas.

d) Eje central

De acero, muy firme.

e) Brazo de palanca

Problema.- No es tan grueso como los demás, presenta una ligera flexión

f) Unión rueda brazo

Problema.- El fuerte desajuste en dimensiones requiere de cuñas de madera para evitar el deslizamiento de la rueda de piedra sobre el brazo de palanca, y dichas cuñas se aflojan constantemente.

Solución.- Reparar la unión con hormigón para que la rueda tenga el orificio justo para que lo atraviese el brazo de palanca, y también es recomendable la aplicación de rodamientos en cada lado de la rueda para evitar el desgaste y el movimiento de la rueda a través del brazo de palanca.

g) Rueda de piedra

Problema.- Esta rueda es de tamaño pequeño en comparación con las demás. Y por ello es de las que ejercen la menor presión calculada.

Solución.- Se podría aumentar la presión que ejerce con contrapesos colocados sobre el brazo en ambos lados de la unión con la piedra, o también disminuyendo la superficie de contacto afilando el perfil en la superficie de rodamiento.

h) Perfil de la rueda

Problema.- El perfil es completamente liso, por lo que el patinaje y deslizamiento es muy fuerte.

Solución.- Labrar el perfil con hendiduras transversales con respecto a la dirección de avance de la rueda.

i) Punto de arrastre

Sin problemas, sólo se recomienda mayor lubricación.

5.8 Dimensiones de los molinos

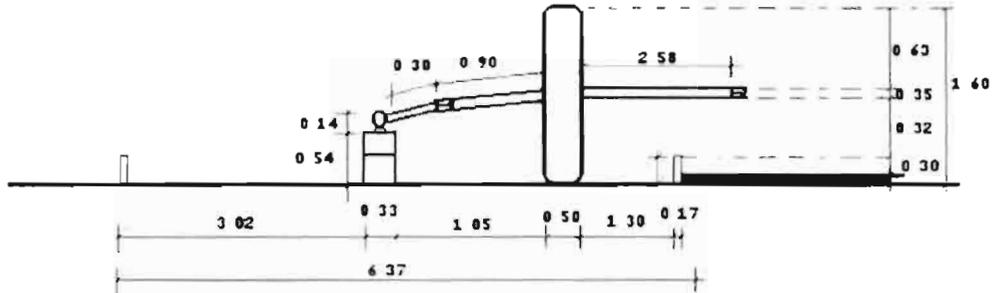


Figura 15. Dimensiones del molino de la fábrica de mezcal Laguna Seca.



Figura 16. Molino de la fábrica de mezcal Laguna Seca.

Mezcalera Saldaña
Molino lado derecho

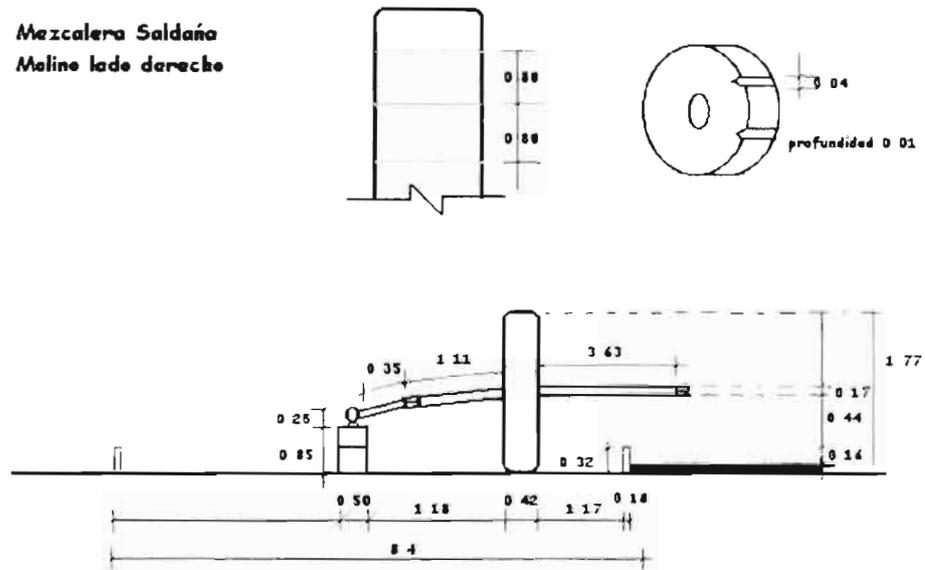


Figura 17. Dimensiones del molino mayor de la fábrica de mezcal Saldaña.



Figura 18. Molino mayor de la fábrica de mezcal Saldaña.

Mezcalera Saldaña
Molino lado izquierdo

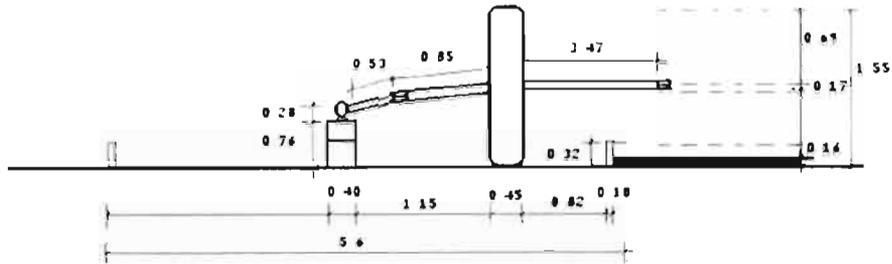
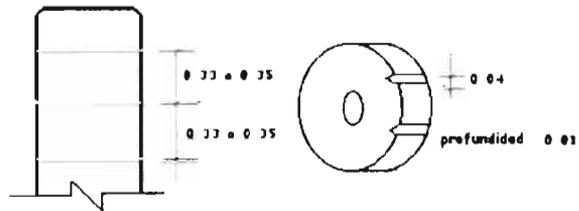


Figura 19. Dimensiones del molino menor de la fábrica de mezcal Saldaña.



Figura 20. Molino menor de la fábrica de mezcal Saldaña.

Molino menor de Santa Teresa

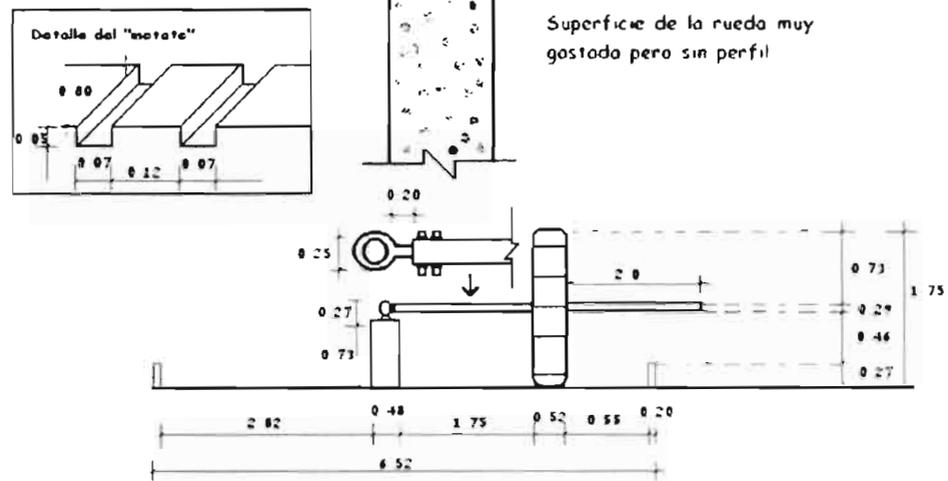


Figura 21. Dimensiones del molino menor de la fábrica de mezcals Santa Teresa.



Figura 22. Molino menor de la fábrica de mezcals Santa Teresa.

Molino mayor de Santa Teresa

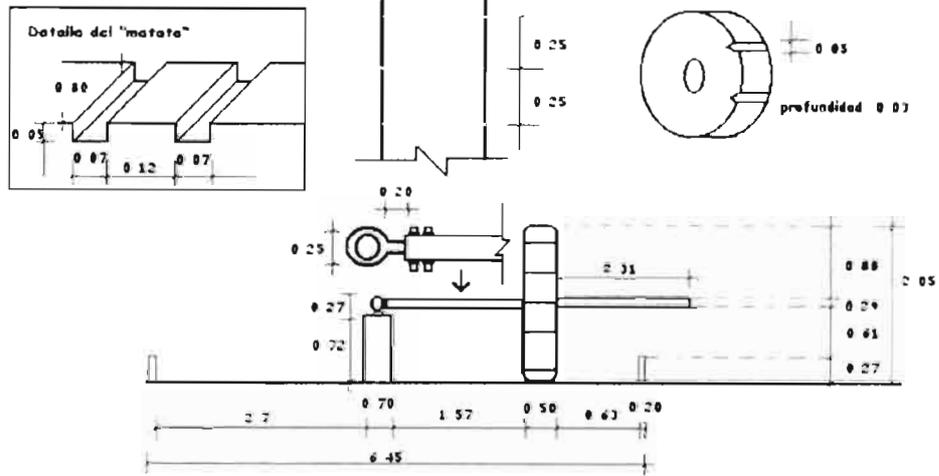


Figura 23. Dimensiones del molino mayor de la fábrica de mezcal Santa Teresa.

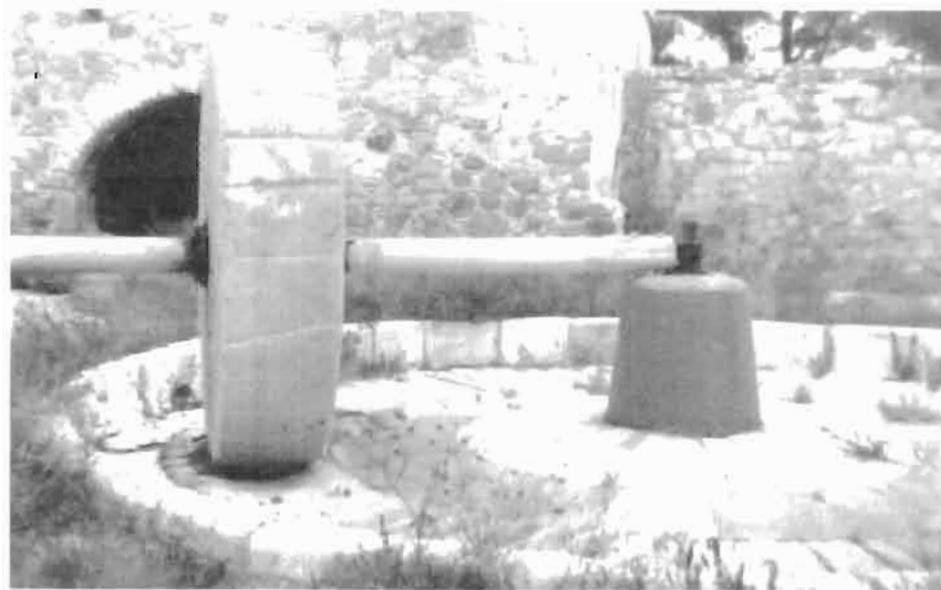


Figura 24. Molino mayor de la fábrica de mezcal Santa Teresa.

La piedra es lisa en la superficie de rodamiento,
no tiene perfil

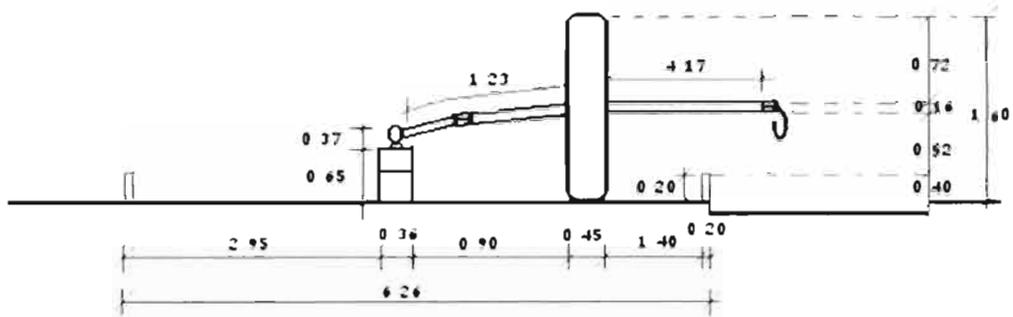


Figura 25. Dimensiones del molino de la fábrica de mezcal Jarillas.



Figura 26. Molino de la fábrica de mezcal Jarillas.

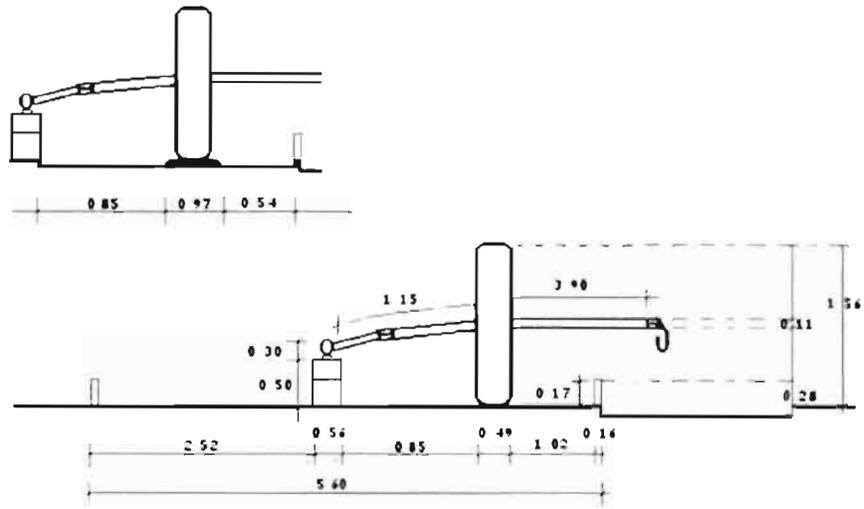


Figura 27. Dimensiones del molino de la fábrica de mezcal Santa Isabel.



Figura 28. Molino de la fábrica de mezcal Santa Isabel.

5.9 Distancia máxima recorrida por la rueda con patinaje

El cateto B que se muestra en el triángulo de la Figura 29 nos indica el patinaje que va desarrollando la rueda de piedra al avanzar sobre el molino y el bagazo.

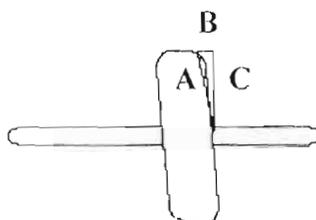


Figura 29. Vista superior del molino donde se aprecia la longitud de avance máximo de una rueda con patinaje (B)

La rueda al avanzar presenta patinaje, que en este caso es positivo para la molienda ya que al presentarse este va desgarrando a su paso debido al corte el material. El cateto B que se muestra en la figura 29 nos indica ese avance máximo y es directamente proporcional al ángulo horizontal entre el brazo de palanca y la rueda de piedra. En la siguiente figura (Cuadro 10) se presentan los resultados obtenidos de cada una de las ruedas de piedra

Cuadro 10. Distancia máxima (m) de avance de la rueda de piedra por patinaje.

Lados	Laguna Seca	Saldaña ¹	Saldaña ²	Santa Teresa ¹	Santa Teresa 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
$\Delta L(A-C)$	0.001	0.003	0.002	0.001	0.002	0.001	0.001

¹ = molino menor; ² = molino mayor

5.10 Presión originada por el peso de la piedra a diferentes profundidades en el bagazo

En el Cuadro 11 se muestran las diferentes presiones provocadas por el peso de la piedra sobre el material, tomadas a diferentes profundidades ya que conforme la rueda lo va presionando el área aumenta y la presión disminuye.

Cuadro 11 Presión (t/m²) originada por la rueda de piedra a diferentes profundidades de la capa de material de maguey cocido.

Profundidad	Laguna Seca	Saldaña ¹	Saldaña ²	Santa Teresa ¹	Santa Teresa ²	Jarillas	Santa Isabel
0.01	18.330	17.484	25.386	20.957	26.570	18.321	17.645
0.05	8.303	7.923	11.484	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

¹ = molino menor; ² = molino mayor

En la gráfica de la Figura 30 se observa el comportamiento de la presión ejercida por cada una de las ruedas de piedra de los diferentes molinos. Se aprecia que la presión depende del peso de la rueda y el tamaño del área donde se esta aplicando. Estos valores nos indican cual de las ruedas es la adecuada para el molino modelo.

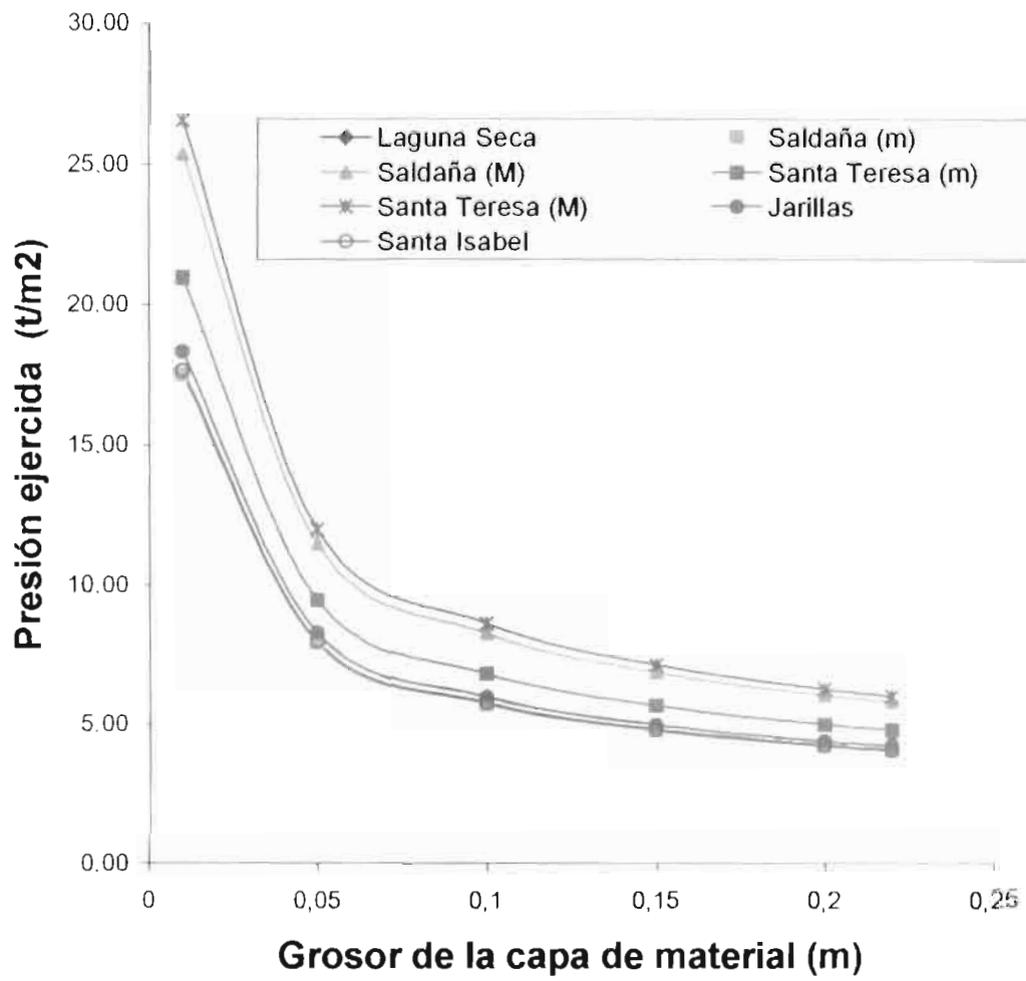


Figura 30. Efecto del grosor de la capa de maguey sobre la presión ejercida por la piedra de cada uno de los molinos

5.11 Deformación vertical

La deformación vertical que se presenta en los molinos depende de las dimensiones de la rueda de cada uno de ellos, ya que la presión es inversamente proporcional al área de aplicación. Existen dos tipos de deformación, la primera en presentarse es la deformación plástica, calculada con ocho vueltas; y la deformación elástica que se presenta enseguida, esta deformación se puede despreciar pues el material regresa a su volumen original; esta se calculó con 10 vueltas. Los resultados de estas deformaciones se presentan en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Deformación vertical provocada por la presión de la rueda de piedra

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

¹ = molino menor; ² = molino mayor.

5.12 Molino modelo

Los parámetros a considerar para diseñar el molino modelo son:

1. Presión ejercida por el peso de la piedra en los trozos de maguey cocido.
2. La deformación causada por la presión de la piedra.
3. La dirección de los canales en la superficie de rodamiento de la piedra o perfil.
4. Ángulo óptimo de inclinación vertical.
5. prácticas de molienda.

Presión ejercida por el peso de la piedra en el maguey cocido. La rueda de piedra que puede ejercer mayor presión sobre la superficie del maguey fue la del molino mayor de la fábrica de mezcal Santa Teresa, con 5.981 t/m^2 . Esta piedra podría aumentar su presión si su perfil se hiciera más angosto, tomando como referencia la rueda del molino mayor de la fábrica Saldaña que mide 0.48m de ancho. Con este grosor aumentaría su presión a 7.73 t/m^2 . Una mejor alternativa es biselar el perfil para conservar casi en su totalidad el peso de la rueda.

Deformación causada por la presión de la piedra. La deformación teórica causada por el molino mayor de la fábrica de Santa Teresa es de 5.967 cm, la mayor calculada.

Dirección de los canales en la superficie de rodamiento de la piedra o perfil. La dirección deberá ser paralela al brazo de palanca para aprovechar la fuerza tangencial, ya que la dirección del flujo en un sistema hidráulico siempre coincide con la dirección de la fuerza.

El ángulo óptimo de inclinación vertical es de 85° ; con lo cual se provoca de 0.047m en la superficie de corte debajo de la rueda como se indica en el punto 5.9.

Prácticas de molienda. Al comparar los resultados de la compresión total en la mezcalera de Laguna Seca, donde se obtuvo un 44% de compresión total, contra la mezcalera de Saldaña que tiene una compresión total de 28.5% pero con una rueda de

pedra de mayores dimensiones, se puede reconocer que impedir que se forme un colchón de bagazo exprimido sobre el paso de la rueda es más eficiente para conseguir solo llegar hasta la deformación plástica, y para evitar así que el bagazo regrese al espesor original de la capa de maguey lo cual se presenta con la deformación elástica. La presión que la rueda ejerce es inversamente proporcional al tamaño de la superficie de aplicación de la fuerza y a mayor grosor del colchón de bagazo aumenta necesariamente su superficie.

Lo recomendable es la forma de molienda que se practica en la fábrica de mezcal de Laguna Seca

Los elementos estructurales del molino modelo siguiente (Figura 31) tienen como base al molino mayor de la fábrica de mezcal Santa Teresa, ya que es el mejor construido y no presenta deficiencias considerables.

a) Metate

Para una mejor aplicación de la presión de la rueda el metate debe ser horizontal y plano. Para conseguir que las mieles fluyan por gravedad debe contar con drenaje basado en la pendiente de los surcos labrados y canalillos recolectores. Los surcos además deben estar bien marcados para evitar el patinaje y el deslizamiento.

b) Vástago

El vástago debe ser robusto, construido de hormigón a una profundidad considerable para darle rigidez, y reforzado en su exterior con una camisa de acero. La forma debe ser trapezoidal con la base mas ancha, lo cual le dará solidez para evitar la oscilación al momento del trabajo.

c) Unión

La unión debe ser construida en acero, compuesta por un rodamiento que embone perfectamente en el eje central para evitar el desgaste y la oscilación

d) Eje central

El eje central debe ser igualmente de acero, con un buen programa de lubricación para evitar el desgaste.

e) Brazo de palanca

Rígido y suficientemente fuerte para transmitir el impulso a la rueda de piedra.

f) Unión rueda- brazo

Debe ser justa, lo suficiente para que la rueda pueda girar libremente, para evitar la fricción y el consiguiente desgaste se puede aplicar rodamientos en los extremos de la rueda y para evitar que esta se deslice a lo largo del brazo de palanca durante la molienda, es necesario aplicar topes limitantes en los extremos.

g) Rueda de piedra

La rueda debe ser al menos como la más grande de Santa Teresa, esta rueda ejerce la mayor presión calculada sobre el maguey, pero se debe considerar la reducción de la anchura de su perfil (biseles), para aumentar más la presión.

h) Perfil de la rueda

Debe tener un perfil muy bien labrado cuando menos igual a la rueda de referencia, pero preferentemente con mayor profundidad.

i) Punto de arrastre

Este elemento no presenta ningún problema en las diferentes fábricas de mezeal; así que podemos tomar de ejemplo a cualquiera de ellos, solamente se recomienda observar una lubricación sistemática.

Las características del diseño del molino modelo que se propone se muestran en la figura 31, en donde podemos apreciar el tamaño y dimensiones de cada uno de sus elementos, estos se determinaron en base a los resultados obtenidos de los cinco parámetros de evaluación de los molinos señalados anteriormente.

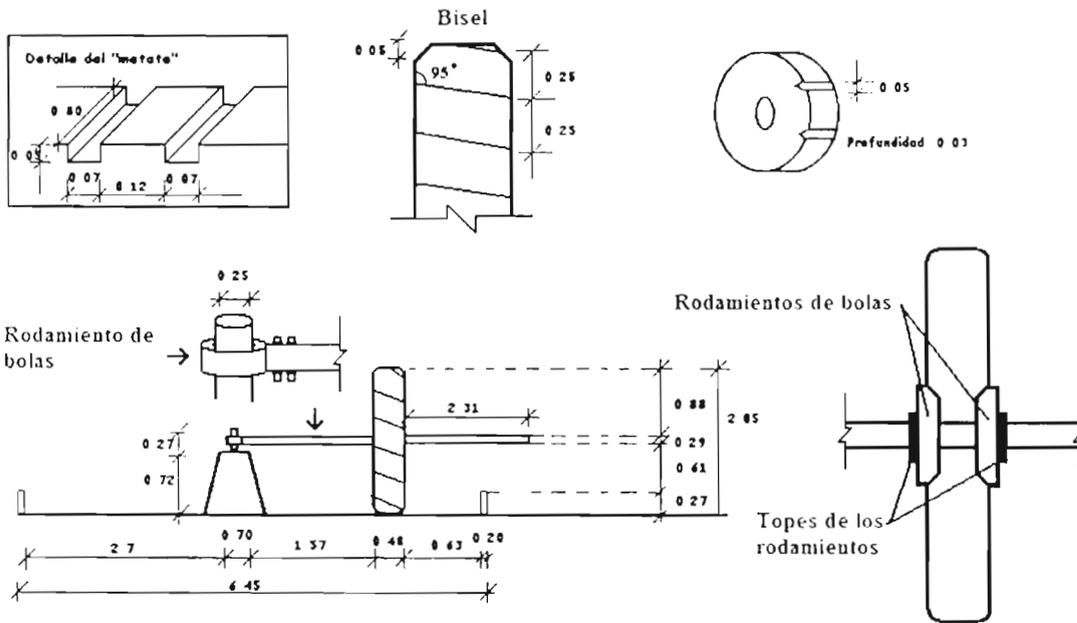


Figura 31. Molino modelo.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre R., J. R; H. Charcas S. y J. L Flores F. 2001. El maguey mezcalero potosino. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Consejo Potosino de Ciencia y Tecnología; San Luis Potosí. S. L. P. México. 87 p.
- Agustino M., A; M. Martínez C; F. J, Palma y F. Córdoba. 1995. La distribución, usos y algunas características químicas de los agaves de Oaxaca (México) *Interciencia*. 20 (1): 14-19.
- Almaguer G., J. A. 2001. Usos medicinales de algunos de los productos del maguey. *Memorias del Primer encuentro sobre el agave en Guanajuato*. Guanajuato. México. pp 31-33.
- Aónimo. 1997. Mezcal elixir de larga vida. Gobierno de Estado de Oaxaca. Cámara Nacional de la industria del mezcal. BANCOMEXT y CVS. México. 120 p.
- Beiser. A. 1988. Teoría y problemas de física aplicada. Series Schaum Mc Graw- Hill México. 274 p.
- Blomberg. L. 2001. Tequila, mezcal y pulque. Diana. México. 314 p.
- Dewey L., H. 1965. Fibras vegetales y su producción en América. 3ª Ed. Unión panamericana. Oficina de Cooperación Agrícola. Washington D.C. Centro Regional de Ayuda Técnica. Agencia para el Desarrollo Internacional. México. 101 p.
- Granados S., D. 1993. Los agaves en México. Universidad Autónoma Chapingo. México. 252 p.
- Matt M., R. 1995. Fibras vegetales en el mundo. Aspectos botánicos, calidad y utilidad. Editorial Trillas. México. 300 p.
- Mosqueira R., S. 1949. Física general. 3ª Ed.. Patria. México. 702 p.
- Orear, J. 1977. Física fundamental. 2ª Ed. Limusa. México. 494 p.
- Parra N., L. A. 2001. La diversidad del agave. En F. Tamayo M y M. S Castro C *Memorias del Primer encuentro sobre el agave en Guanajuato*. Guanajuato. México. pp 70-75
- Pérez Z. M. R. 1997 El mezcal en el altiplano potosino zacatecano. *Bebidas mexicanas*. Febrero- marzo 1997. pp 91-97.
- Pérez J., J. M. 2003. Comunicación personal
- Ramírez S. C; 2003. El molino harinero artesanal Chileno Estudio lingüístico etnográfico <http://www.angelfire.com/nd/molino/> [Consulta: 7 de febrero de 2003]

- Resnik, R. y D. Hallyday. 1973. Física. Parte 1. 6ª Ed.. C.E.C.S.A. México. 922 p.
- Rivera C., J. 1988. Los agaves mezcaleros en México. Información científica y tecnológica. 10 (147): 5-8.
- Rodríguez I., V. 2001. El cultivo del agave Tequilana weber var. azul. Memorias del Primer encuentro sobre el agave en Guanajuato. Guanajuato. México. pp 4.
- Rossel K., E. D.; H. Ortiz y H. M. Durán G. 2002. Optimización de la molienda de maguey para el proceso de producción de mezcal. Memoria del XII congreso Nacional de ingeniería agrícola. II foro de la Agroindustria del mezcal. Oaxaca. México. pp 2-3
- Sánchez. L., A. 1989. Oaxaca, tierra de maguey y mezcal. Instituto Tecnológico de Oaxaca. Oaxaca, México. 179 p.
- Segura, J. C. 1901. El Maguey, memoria sobre el cultivo y beneficio de sus productos. 4ª Ed. Biblioteca del Boletín de la Sociedad Agrícola Mexicana. México. 407 p.
- Sosa P. de E. 1979. Manual de procedimientos analíticos para alimentos de consumo animal. Chapingo. México. pp. 21,22. Tesis.
- Szczepaniak C. 1982. Fundamentos de diseño del automóvil. C.E.C.S.A México. 202 p.
- Torrentera, U. 2001. Mezcalaria. 2ª Ed. Farolito. México. 210 p.
- Valenzuela Z., A. G. 1997. El agave tequilero: su cultivo e industria. Litteris. Guadalajara. Jalisco. México. 215 p.
- White E., H. 1995. Física descriptiva. 9ª Ed. Reverté. México 432 p.