



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

EL MEZCAL: UNA REVISIÓN QUÍMICA, TECNOLÓGICA, E
HISTÓRICA.

TRABAJO MONOGRÁFICO DE ACTUALIZACIÓN

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
QUÍMICO DE ALIMENTOS

PRESENTA

JOSÉ ANTONIO GONZÁLEZ VIZZUETT



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

LABORATORIO 321, EDIFICIO E, FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM.

**DIRECCIÓN: CIRCUITO DE LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA, CIUDAD UNIVERSITARIA,
COLONIA COPILCO COYOACÁN, C.P. 04510, DELEGACIÓN COYOACÁN.**

ASESOR DEL TEMA: FRANCISCO RUIZ TERÁN

SUSTENTANTE: JOSÉ ANTONIO GONZÁLEZ VIZZUETT

CONTENIDO

RESUMEN	6
OBJETIVO GENERAL	7
OBJETIVOS PARTICULARES	7
CAPÍTULO I . GENERALIDADES DEL MEZCAL	8
1.1. DEFINICIÓN DE MEZCAL	8
1.2. MATERIA PRIMA PARA LA ELABORACIÓN DEL MEZCAL	8
1.2.1. EL GÉNERO AGAVE	8
1.2.2. AGAVE MEZCALERO	10
1.2.2.1. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL AGAVE	13
1.2.3. MICROORGANISMOS PARTICIPANTES EN LA FERMENTACIÓN DEL MOSTO DE AGAVE PARA LA PRODUCCIÓN DE MEZCAL	17
1.2.3.1. BACTERIAS	18
1.2.3.2. LEVADURAS TIPO NO- <i>Saccharomyces</i>	20
1.2.3.3. LEVADURAS TIPO <i>Saccharomyces</i>	22
1.3. ESPECIFICACIONES Y CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL MEZCAL	23
1.3.1. ÁCIDOS GRASOS Y ORGÁNICOS GENERADOS DURANTE LA FERMENTACIÓN DEL MOSTO DE AGAVE	25
1.3.2. ALCOHOLES GENERADOS DURANTE LA FERMENTACIÓN DEL MOSTO DE AGAVE	26
1.3.3. ALDEHÍDOS GENERADOS DURANTE LA PRODUCCIÓN DE MEZCAL	29
1.3.4. ÉSTERES GENERADOS DURANTE LA FERMENTACIÓN DEL MOSTO DE AGAVE	32
1.3.5. TERPENOS GENERADOS DURANTE LA FERMENTACIÓN DEL MOSTO DE AGAVE	33

1.4. CLASIFICACIÓN DEL MEZCAL	35
1.5. DENOMINACIÓN DE ORIGEN DEL MEZCAL	35
CAPÍTULO II . PROCESO DE ELABORACIÓN DEL MEZCAL	38
2.1. SIEMBRA DEL AGAVE	38
2.2. COSECHA DEL AGAVE	40
2.3. COCCIÓN DEL AGAVE	41
2.4. MOLIENDA DEL AGAVE	43
2.5. FERMENTACIÓN DEL MOSTO DE AGAVE	45
2.6. DESTILACIÓN DEL MOSTO FERMENTADO	47
2.7. MADURACIÓN DEL MEZCAL	49
2.8. ENVASADO Y ETIQUETADO DEL MEZCAL	50
CAPÍTULO III . HISTORIA DEL MEZCAL EN MÉXICO	52
3.1. EL USO DEL AGAVE EN MESOAMÉRICA PREVIO A LA CONQUISTA ESPAÑOLA.....	52
3.2. SURGIMIENTO, POPULARIZACIÓN E IMPORTANCIA DEL MEZCAL DURANTE LA ÉPOCA COLONIAL EN MÉXICO	54
3.3. INDUSTRIA MEZCALERA EN MÉXICO EN LA ÉPOCA POSTCOLONIAL. CONSOLIDACIÓN DEL TEQUILA SOBRE EL MEZCAL	61
3.4. EL MEZCAL CONTEMPORÁNEO EN MÉXICO (1990-ACTUAL)	63
CONCLUSIONES	66
REFERENCIAS	68

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1. AGAVES MÁS USADOS PARA LA ELABORACIÓN DE MEZCAL EN MÉXICO, Y SU LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA	11
TABLA 1.2. ANÁLISIS COMPOSICIONAL DE LAS ESPECIES DE AGAVE	13
TABLA 1.3. BACTERIAS PRESENTES EN FERMENTACIONES DEL MOSTO DE ALGUNOS AGAVES PARA LA PRODUCCIÓN DE MEZCAL	19
TABLA 1.4. LEVADURAS TIPO NO- <i>Saccharomyces</i> PRESENTES EN FERMENTACIONES DEL MOSTO DE AGAVE PARA LA PRODUCCIÓN DE MEZCAL.....	21
TABLA 1.5. ESPECIFICACIONES DEL MEZCAL	24
TABLA 1.6. ALGUNOS COMPUESTOS VOLÁTILES IDENTIFICADOS EN DISTINTOS TIPOS DE MEZCAL	34
TABLA 1.7. ESTADOS PERTENECIENTES A LA DOM	36

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1. SÍNTESIS DE ÁCIDO ACÉTICO POR OXIDACIÓN DE ETANOL	25
FIGURA 1.2. SÍNTESIS DE ÁCIDOS GRASOS A PARTIR DE ACETIL-COA Y MALONIL-COA	26
FIGURA 1.3. SÍNTESIS DE ETANOL A PARTIR DE FRUCTOSA DURANTE LA FERMENTACIÓN DEL MOSTO DE AGAVE	27
FIGURA 1.4. ACCIÓN DE LA ENZIMA PECTILMETILESTERASA SOBRE LA PECTINA	28
FIGURA 1.5. MECANISMO GENERAL DE SÍNTESIS DE ACEITES DE FUSEL A PARTIR DE UN AMINOÁCIDO	28
FIGURA 1.6. FORMACIÓN, A PARTIR DE FRUCTOSA, DE ACETALDEHÍDO	29
FIGURA 1.7. FORMACIÓN DE HIDROXIMETILFURFURAL (HMF)	30
FIGURA 1.8. GENERACIÓN DE ALGUNOS COMPUESTOS FURÁNICOS Y MELANOIDINAS POR MEDIO DE LA REACCIÓN DE MAILLARD	31
FIGURA 1.9. GENERACIÓN DE ACETATO DE ETILO A PARTIR DE ÁCIDO ACÉTICO Y ETANOL	33
FIGURA 1.10. SÍNTESIS DE LIMONENO	33
FIGURA 1.11. ESTADOS PERTENECIENTES A LA DOM	36
FIGURA 2.1. QUIOTE DE AGAVE MEZCALERO PREVIO AL CASTRADO	40
FIGURA 2.2. QUIOTE REMOVIDO DE LA PLANTA DE AGAVE	40
FIGURA 2.3. JIMADOR REMOVIENDO LAS PENCAS DE AGAVE	41
FIGURA 2.4. TRANSPORTE DE LAS PIÑAS DE AGAVE EN CAMIÓN	41
FIGURA 2.5. PIÑAS LISTAS PARA COCCIÓN EN HORNO TRADICIONAL DE TIERRA	43
FIGURA 2.6. PIÑAS AL TÉRMINO DEL COCIMIENTO EN HORNO TRADICIONAL DE TIERRA	43
FIGURA 2.7. CORTADO DE PIÑAS PREVIO A LA COCCIÓN EN AUTOCLAVE	43

FIGURA 2.8. PIÑAS AL TÉRMI NO DEL COCIMIENTO EN AUTOCLAVE	43
FIGURA 2.9. AGAVE MACERADO EN TAHONA TRADICIONAL DE PIEDRA	45
FIGURA 2.10. AGAVE EN DESGARRADORA MECÁNICA	45
FIGURA 2.11. FERMENTACIÓN ARTESANAL DEL MOSTO FRESCO EN UN TANQUE DE MADERA	47
FIGURA 2.12. FERMENTACIÓN TECNIFICADA DEL MOSTO FRESCO EN TANQUES DE ACERO INOXIDABLE	47
FIGURA 2.13. ALAMBIQUES ARTESANALES DE COBRE Y MADERA	49
FIGURA 2.14. DESTILADORES DE ACERO INOXIDABLE USADOS EN LA INDUSTRIA DEL AGAVE	49
FIGURA 2.15. BARRICAS DE MADERA DURANTE LA MADURACIÓN DE UN DESTILADO DE AGAVE	50
FIGURA 2.16. PROCESO DE ENVASADO DEL MEZCAL	51
FIGURA 2.17. MÁQUINA ETIQUETADORA AL TÉRMI NO DE LA PRODUCCIÓN DE MEZCAL	51
FIGURA 3.1. DESTILADORES MODERNOS CON INFLUENCIA ASIÁTICA EN EL TUITO, CABO CORRIENTES, JALISCO	57
FIGURA 3.2. DESTILADORES MODERNOS PARA PRODUCIR LA BEBIDA JAPONESA SHOCHU	57
FIGURA 3.3. MAPA DE LA DIFUSIÓN DEL MEZCAL	59

RESUMEN

El mezcal es una bebida alcohólica regional, obtenida por destilación de mostos de los azúcares extraídos de las cabezas maduras del agave, previamente cocidas, y sometidos a fermentación alcohólica. Su sabor y aroma están derivados del tipo de agave utilizado y de las características del proceso. México cuenta con la Denominación de Origen del Mezcal, la cual establece que nueve estados de la República Mexicana pueden elaborar esa bebida.

En las diferentes etapas del proceso de elaboración del mezcal, se sintetizan varios compuestos volátiles y no volátiles, que son los responsables de darle las características sensoriales al producto terminado; algunos de estos productos, en altas concentraciones, generan olores y sabores no deseados.

La diferencia entre las grandes y pequeñas casas productoras de mezcal está muy marcada, en especial por el proceso que utilizan para la elaboración de la bebida; las mezcalerías artesanales utilizan instrumentos y equipos de piedra, madera, tierra, ladrillo, y algunos de cobre, sin control alguno sobre las condiciones del proceso; mientras que los productores a gran escala, que poseen un proceso tecnificado de producción, utilizan equipos e instrumentos de acero inoxidable, y el control de las etapas del proceso es total.

Las culturas prehispánicas sólo elaboraban fermentados de agave. Con la introducción de la industria cocotera en Colima, en la década de 1570, se introdujo el método de destilación filipino, el cual comenzó a ser utilizado para destilar los fermentados de agave existentes.

La industria del mezcal ha resurgido en los últimos años, con consumidores nacionales e internacionales en busca de esta bebida.

OBJETIVO GENERAL

Realizar una revisión bibliográfica sobre el mezcal, analizando la generación de compuestos durante las etapas de producción, comparando los procesos artesanal y tecnificado para su elaboración, y determinando su origen e historia en México.

OBJETIVOS PARTICULARES

Revisar las características químicas del agave mezcalero, así como del destilado.

Analizar la generación de compuestos volátiles y no volátiles durante las diferentes etapas de producción de mezcal.

Proponer mecanismos de reacción que permitan explicar la generación de los compuestos más importantes durante la elaboración de mezcal.

Determinar la importancia de bacterias y levaduras durante la fermentación para la producción de mezcal.

Detallar las etapas de elaboración del mezcal, comparando el método tradicional con el método tecnificado.

Revisar la historia del mezcal en México, desde sus orígenes hasta la época contemporánea.

Determinar el origen del mezcal en México.

CAPÍTULO I. GENERALIDADES DEL MEZCAL

1.1 DEFINICIÓN DE MEZCAL

La palabra mezcal deriva de la palabra náhuatl Mexcalli, compuesta por dos partes: *metl*, que significa "maguey"; e *ixcalli*, que significa "cocido". Por lo tanto, la palabra *mezcal* significa "maguey cocido". (Salvatierra-García, 2003).

El mezcal es una bebida alcohólica regional, obtenida por destilación de mostos preparados directa y originalmente con los azúcares extraídos de las cabezas maduras del agave, previamente cocidas, y sometidas a fermentación alcohólica con levaduras, cultivadas o no, siendo susceptible a ser enriquecido con hasta en 20% de otros carbohidratos, en la preparación de dichos mostos, siempre y cuando no se eliminen los componentes que le dan las características a este producto, no permitiéndose las mezclas en frío. Es un líquido de olor y sabor de acuerdo con su tipo. (NOM-070-SCFI-1994, 1997).

1.2. MATERIA PRIMA PARA LA ELABORACIÓN DEL MEZCAL

1.2.1. El género *Agave*.

El agave es una planta de la familia de las Amarilidáceas, de hojas largas y fibrosas de forma lanceolada, de color verde cuya parte aprovechable para la elaboración de mezcal es la piña o cabeza (NOM-070-SCFI-1994). Esta planta se caracteriza por su difícil clasificación taxonómica, pues algunos autores reconocen al género *Agave* dentro de la familia Agavaceae, mientras que otros en la familia

Amarylidaceae, o en la Liliaceae. La clasificación propuesta por Dahlgren, basada en análisis morfológicos y moleculares, ubica al agave en la familia Agavaceae, y es la más aceptada hoy en día (Háhuad-Marroquín, *et al.*, 2010).

La palabra "agave" proviene del griego *Agavos*, que significa magnífico, noble, ilustre o admirable, y es el término científico otorgado por Linneus para reunir a las 273 especies de magueyes alrededor del mundo. De esas 273 especies, 205 de ellas viven en México. Entre las especies mexicanas, 58% (119) son endémicas de nuestro país (CONABIO, 2014). El agave también recibe el nombre de maguey, de origen antillano; los náhuatl lo conocían como *metl* (Hernández y Hernández, 2011). Esta planta vive entre cinco y setenta años, según la especie, antes de producir flores (hualumbos) que pueden llegar a medir doce metros; estas flores se pueden desarrollar en ramas, o en una inflorescencia formada por un eje principal llamado espiga, calehual o quiote (del náhuatl *quiotl*= tallo o brote) (Enríquez, 2016).

El maguey es una planta monocárpica; esto significa que sólo florece una vez en su vida, para posteriormente morir (Castro-Díaz y Guerrero-Beltrán, 2013). Tiene forma de piña, de la cual crecen sus hojas o pencas, dispuestas en roseta, las cuales tienen diferentes formas dependiendo de la especie de agave, pero siempre son duras, verdes, gruesas, carnosas, con bordes espinosos, y terminan con una punta afilada (Castro-Díaz y Guerrero-Beltrán 2013; Háhuad-Marroquín, *et al.*, 2010; Enríquez, 2016). Típicamente, el maguey es una planta xerófita (adaptada a ambientes secos, áridos y semiáridos), pero debido a su adaptación morfo-fisiológica, y a su CAM (metabolismo ácido de las crasuláceas, por sus siglas en inglés), es

altamente tolerante a condiciones ambientales extremas (Alanís-Flores y González-Álvarez, 2010; Castro-Díaz y Guerrero-Beltrán, 2013; Martínez-Hernández, *et al.*, 2010). Esta planta se desarrolla mejor, tanto en nivel individual como poblacional, sobre planicies extensas con suelos aluviales, de profundidad y textura medias, y pH de neutro a ligeramente alcalino (García-Herrera, *et al.*, 2010).

Los agaves se reproducen de manera sexual y asexual. La reproducción sexual se logra mediante la polinización efectuada por animales, como los murciélagos nectarívoros (polinización nocturna), y por insectos (abejas, palomillas) y aves (colibríes) (polinización diurna) (García, 2007; Gómez-Aíza y Zuria, 2010). La reproducción asexual es realizada por la mayoría de los agaves, produciendo clones en diferentes partes de la roseta o la inflorescencia (García, 2007).

El agave se encuentra desde 34° latitud norte, hasta 60° latitud sur, por lo que en México se encuentra el 75% de las especies de agave que crecen en el continente americano (Castro-Díaz y Guerrero-Beltrán, 2013). Al norte se encuentra en zonas áridas y semiáridas de Estados Unidos y México, bajando por las islas del Caribe hasta Colombia y Venezuela (Háhuad-Marroquín, *et al.*, 2010).

1.2.2. Agave mezcalero.

De las 205 especies de agave existentes en México, se tienen reportadas alrededor de veinte para la elaboración de bebidas destiladas, de las cuales, doce son las más importantes: *Agave tequilana* Weber, *A. angustifolia* Haw, *A. karwinski* Zucc., *A. marmorata* Roezl, *A. potatorum* Zucc., *A. americana* L. var. *oaxacensis*

Gentry, *A. cupreata* Trel. & Berger, *A. rhodacantha* Trel., *A. salmiana* Otto ssp. *crassispina* (Trel.) Gentry, *A. wocomahi* Gentry, *A. duranguensis* Gentry, y *A. maximiliana* Baker (Colunga-GarcíaMarín y Zizumbo-Villarreal, 2007). Para producir mezcal se utilizan 14 especies diferentes de agaves, de acuerdo con la NOM-070, pero debido a que esta bebida es un producto artesanal, se produce también para consumo local en distintos puntos de la República Mexicana, y se han utilizado extra oficialmente hasta 39 especies de agave que no están certificados por la COMERCAM (Consejo Mexicano Regulador de la Calidad del Mezcal) (TodoMezcal) (Tabla 1.1).

Tabla 1.1. Agaves más usados para la elaboración de mezcal en México, y su localización geográfica.

ESPECIE	LOCALIZACIÓN	AGAVE
<p><i>Agave angustifolia</i> Haw (NOM-070-SCFI - 1994)</p>	<p>Sonora, Oaxaca, Tamaulipas, Yucatán, Chiapas, Quintana Roo, Guerrero (Alcázar, 2011; Soto-García, <i>et al.</i>, 2009).</p>	
<p><i>Agave salmiana</i> Otto (NOM-070-SCFI - 1994)</p>	<p>Jalisco, Querétaro, San Luis Potosí, Puebla, Oaxaca, Zacatecas (Alcázar, 2011;</p>	

	Soto-García, <i>et al.</i> , 2009).	
<i>Agave durangensis</i> (Soto-García, 2009)	Durango	
<i>Agave potatorum</i> (NOM-070-SCFI -1994)	Oaxaca, Guerrero (Soto-García, 2009)	
<i>Agave cupreata</i> (Alcázar, 2011)	Michoacán, Guerrero (Alcázar, 2011)	
<i>Agave esperrima</i> Jacobi (NOM-070-SCFI -1994)	San Luis Potosí (García-Mendoza, 2012)	

1.2.2.1. Composición química del agave.

Tabla 1.2. Composición química de las especies de *Agave* en base húmeda (Enríquez, 2016).

COMPONENTE	% (EN PIÑA DE AGAVE)
Agua	70-85
Carbohidratos	10-28
Celulosa	2-5.7
Lignina	3-5
Proteínas	0.2-0.5
Resinas y lípidos	0.6-0.9

- Carbohidratos presentes en el agave

Entre las especies de agave se presentan diferencias en la distribución de carbohidratos como sacarosa, fructosa y glucosa; pero los fructanos representan el 60% del total de carbohidratos solubles en este tipo de planta (Escalante-Minakata, *et al.*, 2012). Los fructanos son polímeros (oligo y polisacáridos) de fructosa de cadena lineal, unidos por enlaces **glucosídicos β (2,1)** (inulina) y **β (2,6)** (levanas), sólo contienen un residuo de glucosa en el extremo reductor de la molécula, y pueden alcanzar grados de polimerización de hasta 200 unidades de fructosa, lo cual depende de la fuente botánica, así como de las condiciones agronómicas del cultivo y de la edad de la planta (Banguela y Hernández, 2006; Montañez, *et al.*, 2011; Montañez-Soto, *et al.*, 2011) (Tabla 1.2).

Los fructanos son la principal fuente de carbohidratos de reserva en el agave, se sintetizan (y almacenan) en la vacuola de la célula a partir de sacarosa, y en algunos casos, como en *A. tequilana* Azul, su estructura es

ramificada, y reciben el nombre de agavinas. (Mellado-Mojica y López-Pérez, 2013; Montañez-Soto, *et al.*, 2011; Ortega, 2009). Fructanos con grados de polimerización de 2 a 10 unidades de fructosa reciben el nombre de fructooligosacáridos, y son de bajo peso molecular (FOS) (Banguela, 2006; Montañez-Soto, 2011). Durante la cocción del agave para la elaboración del mezcal, la inulina se hidroliza, y las moléculas resultantes de fructosa (en mayor proporción), glucosa, y xilosa, son los carbohidratos fermentados por microorganismos para producir etanol (Escalante-Minakata, *et al.*, 2012; Pérez, *et al.*, 2016).

- Proteínas presentes en el agave

Durante una fermentación, la concentración de biomasa generada por levaduras aumenta cuando la concentración inicial de nitrógeno en el mosto es alta (Nissen, *et al.*, 2003). Debido a que el porcentaje de proteínas (principal fuente de nitrógeno) en el agave es bajo, y a la generación de productos de Maillard durante el cocimiento de la piña, la concentración de nitrógeno se reduce considerablemente, por lo que algunos productores de mezcal adicionan fuentes de nitrógeno extra, como sulfato de amonio, o mezclas de aminoácidos, para acelerar el proceso de fermentación (Enríquez, 2016; De los Rios-Deras, *et al.*, 2015; Alcázar, 2011). A pesar de que está comprobado que el sulfato de amonio afecta la calidad sensorial del producto terminado, y que favorece la síntesis de metanol durante la fermentación, se sigue utilizando, por ser un aditivo más barato y de más fácil obtención que la mezcla de aminoácidos (Vera-Guzmán, *et al.*, 2012) (Tabla 1.2).

- Lípidos presentes en el agave

Los ácidos grasos son importantes durante la elaboración del mezcal, pues aportan, junto con los terpenos, olores y sabores deseados al producto terminado (Martínez-Aguilar y Peña-Álvarez, 2009). A pesar de que la mayor concentración de ácidos grasos se encuentra en las hojas de la planta, si la remoción de estas es incompleta, cierto porcentaje de ácidos grasos puede estar presente en etapas posteriores de elaboración del mezcal.

Por concentraciones altas de ácidos grasos generados durante la fermentación, el mezcal presenta notas no deseadas, como: rancias por presencia de ácidos cáprico, caprílico y capróico, o a queso, por ácido butírico (Peña-Álvarez, *et al.*, 2004). La presencia de ácidos grasos insaturados es mayor a la de ácidos grasos saturados, y el ácido linoleico es el lípido mayoritario en la planta de agave. *Agave salmiana* es el maguey con mayor concentración de ácidos grasos (Peña-Álvarez, *et al.*, 2004).

Algunos ácidos grasos identificados en agaves para la producción de mezcal son: ácido laúrico, ácido mirístico, ácido pentadecanoico, ácido palmítico, ácido palmitoleico, ácido margárico, ácido esteárico, ácido oleico, ácido linoleico, y ácido linolénico (Peña-Álvarez, *et al.*, 2004). Gracias a este perfil de ácidos grasos, es posible identificar a un mezcal 100% agave, de uno mixto (Martínez-Aguilar y Peña-Álvarez, 2009) (Tabla 1.2).

- Terpenos presentes en el agave.

Los terpenos son un grupo de compuestos lipídicos importantes en la elaboración del mezcal, pues aportan aromas y sabores característicos a esa bebida (Alcázar, 2011). En el agave se encuentran de dos formas: libres (monoterpenos) o glicosidados (sesquiterpenos). Los monoterpenos son compuestos con diez átomos de carbono, y aportan aromas frutales y herbales (Arellano, *et al.*, 2012). Se han identificado 9 terpenos en *Agave salmiana*, 8 en *A. angustifolia*, y 32 en *A. tequilana* Weber var. Azul (Soto-Simental, *et al.*, 2016; Gueguen, *et al.*, 1995; Alcázar, 2011).

- Saponinas presentes en el agave.

Las saponinas son glicósidos localizados principalmente en la hoja del maguey, formado por una parte no glucídica (sapogenina) de origen terpénico, esteroidal (presentes en agave), o esteroidal alcaloide, y por una parte glucídica, que es una cadena ramificada de hasta cinco moléculas (usualmente glucosa, arabinosa, ácido glucurónico, xilosa y ramnosa) unida al extremo no glucídico por el hidroxilo del carbono-3 de este (Alcázar, 2011; Díaz, 2009). Las saponinas son compuestos con alta actividad antimicótica; forman complejos con los esteroides de la membrana celular de las levaduras, se generan poros que afectan la permeabilidad de membrana, provocando lisis celular (Armah, *et al.*, 1999). Puesto que las levaduras son los principales microorganismos productores de etanol durante la fermentación, es importante conocer la concentración de saponinas en el mosto del agave, para tener un rendimiento deseado durante el proceso de elaboración.

1.2.3. Microorganismos participantes en la fermentación del mosto de agave para la producción de mezcal.

En la mayoría de los procesos para producir bebidas fermentadas y destiladas de agave en México, se lleva a cabo una fermentación compleja y espontánea, en donde bacterias (lácticas y acéticas) y levaduras (tipo *Saccharomyces* y no-*Saccharomyces*) están presentes en poblaciones mixtas y estables, o una después de la otra (Escalante-Minakata, *et al.*, 2008; Lappe-Oliveras, *et al.*, 2008). Estos microorganismos pueden provenir tanto del agave, como del ambiente dentro de la industria de la producción (González-Hernández, *et al.*, 2012; Pérez, *et al.*, 2013). La población microbiana cambia conforme avanza el proceso de fermentación, incluso bajo condiciones industriales controladas, debido a varios factores, como la región de origen de la materia prima, el proceso de producción, la temperatura, y el pH (Escalante-Minakata, *et al.*, 2012; Páez-Lerma, *et al.*, 2013).

Todos los microorganismos presentes en la fermentación contribuyen a la transformación de los azúcares en etanol, y en glicerol, ácidos orgánicos, y compuestos volátiles, sustancias que contribuyen directamente en el sabor y el aroma del mezcal (González-Hernández, *et al.*, 2012). Las vías de síntesis, tipos y concentración de estos compuestos dependen de la presencia de cierto tipo de microorganismos (Vera, *et al.*, 2012). La evolución de las especies de levaduras y bacterias, y su metabolismo, pueden también estar involucradas en la obtención de las características sensoriales del producto terminado (Andorrá, *et al.*, 2010). Además, se obtienen características sensoriales típicas en cada zona mezcalera en función de la microbiota presente, algo que no sería posible si se utilizara un inóculo de cepas cultivadas (Escalante-Minakata, *et al.*, 2012).

1.2.3.1. Bacterias.

Algunas bacterias juegan un papel importante como promotoras de crecimiento de la planta de agave (proteobacterias como *Acinetobacter* sp.), y otras en las etapas iniciales de la fermentación (bacterias ácido lácticas); las últimas participan en la generación de compuestos volátiles (Martínez-Rodríguez, *et al.*, 2014; Páez-Lerma, *et al.*, 2013). Las bacterias ácido lácticas (BAL) son cocos o bacilos Gram +, anaerobios facultativos, monofermentativos o heterofermentativos: los primeros generan ácido láctico como único producto de la fermentación; los segundos, además de ácido láctico, pueden generar etanol, ácido acético, ácido fórmico, ácido succínico, o CO₂ (Parra, 2010).

Algunas BAL están presentes en todas las etapas de la fermentación, como las pertenecientes a los géneros *Lactobacillus* y *Pediococcus*, mientras que otras están presentes en sólo algunas, como *Leuconostoc*, presente en etapas tempranas de la fermentación (Narváez-Zapata, *et al.*, 2010). La heterogeneidad de la microbiota presente en el mosto disminuye conforme la fermentación avanza, pasando de estar presentes varios géneros de BAL y levaduras al inicio, a sólo *Saccharomyces cerevisiae* y unos pocos géneros de bacterias al término del proceso (Páez-Lerma, 2013). Lo anterior se debe a la baja tolerancia al etanol por parte de la mayoría de bacterias ácido lácticas. Bacterias reportadas en fermentaciones de mosto de agave para la producción de mezcal, se presentan en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3. Bacterias presentes en fermentaciones del mosto de algunos agaves para la producción de mezcal.

AGAVE	BACTERIAS	REFERENCIAS
<i>Agave salmiana</i>	<i>Zymomonas mobilis</i> subsp. <i>mobilis</i> ; <i>Z. mobilis</i> subsp. <i>pomaceae</i> ; <i>Weissella cibaria</i> ; <i>W. paramesenteroides</i> ; <i>Lactobacillus pontis</i> ; <i>L. kefiri</i> ; <i>L. plantarum</i> ; <i>L. farraginis</i>	Escalante-Minakata, <i>et al.</i> , 2008; Hernández, 2009; Páez-Lerma, <i>et al.</i> , 2013
<i>Agave angustifolia</i> , <i>Agave lechuguilla</i> , <i>Agave americana</i>	<i>Pediococcus parvulus</i> ; <i>L. brevis</i> ; <i>L. composti</i> ; <i>L. parabuchneri</i> ; <i>L. plantarum</i> ; <i>Leuconostoc paramesenteroides</i> ; <i>Weissella</i> spp., <i>Bacillus</i> spp.	Hernández, 2009; Narváez-Zapata, <i>et al.</i> , 2010; Páez-Lerma, <i>et al.</i> , 2013
<i>Agave univitatta</i> , <i>Agave montium</i> , <i>Agave sancticaroli</i> , <i>Agave angustifolia</i> , <i>Agave americana</i>	<i>Acetobacter pasteurianus</i> , <i>Tanticharoenia sakaeratensis</i> , <i>Methylobacterium</i> sp., <i>Enterococcus</i> sp., <i>L. hilgardi</i> , <i>L. sakei</i> , <i>L. rhamnosus</i> , <i>L. paracasei</i>	Hernández, 2009.

1.2.3.2. Levaduras tipo no-*Saccharomyces*

Los procesos de fermentación espontánea están mediados principalmente por levaduras no-*Saccharomyces* o no convencionales, las cuales poseen la capacidad de producir etanol bajo distintas condiciones operativas y nutricionales durante la fermentación, mostrando distintos rendimientos en la producción de biomasa y etanol (Verdugo, *et al.*, 2011; Pérez, *et al.*, 2013). En estudios preliminares de estas levaduras, eran conocidas como levaduras silvestres o de descomposición, por ser aisladas de vinos con perfiles sensoriales y analíticos no característicos (Ciani, *et al.*, 2010).

Las levaduras no-*Saccharomyces* suelen ser las primeras en incrementar su población, alcanzando hasta un valor de 4×10^7 células/mL en etapas tempranas de la fermentación (primeras 24 horas), pero están expuestas a condiciones extremas, pues el mosto de agave debe tener entre 200 y 350 g de azúcares reductores por kg de fibra de agave, provocando estrés osmótico (Lappe-Oliveras, *et al.*, 2008; Arellano-Plaza, *et al.*, 2013). Para disminuir el estrés osmótico, las levaduras deben generar etanol, pero al alcanzar su límite de tolerancia al mismo, y a otras características adversas en el mosto (disminución nutrimental, cambios de temperatura, disponibilidad de oxígeno), sufren una autólisis, liberando nutrientes que sirven como sustrato a *Saccharomyces* (De la Torre, 2010; Lappe-Oliveras, *et al.*, 2008; Martell, *et al.*, 2011; Ciani, *et al.*, 2010).

Kluyveromyces marxianus es una de las levaduras mayoritarias durante las fermentaciones espontáneas de mosto de agave, y tiene una capacidad fermentativa similar a las levaduras del género *Saccharomyces*; a pesar de eso, al término de la fermentación, sólo *S. cerevisiae* sigue presente en el mosto, debido probablemente a un efecto negativo general de esta levadura sobre las no-*Saccharomyces* (Lappe-Oliveras, *et al.*, 2008; Casas, *et al.*, 2015; Fernández, *et al.*, 2014).

Algunas cepas de *K. marxianus* (como la UMPe-1) presentan mayor tolerancia osmótica, mayor tolerancia a etanol, y producen más compuestos volátiles que *S. cerevisiae* (Amaya-Delgado, *et al.*, 2013; Fernández, *et al.*, 2014; López-Álvarez, *et al.*, 2012). En la Tabla 1.4 se presentan algunas levaduras no-Saccharomyces identificadas en fermentaciones espontáneas de mosto de agave para la producción de mezcal.

Tabla 1.4. Levaduras tipo no-Saccharomyces presentes en fermentaciones del mosto de agave para la producción de mezcal.

AGAVE	LEVADURAS	REFERENCIAS
<i>Agave salmiana</i>	<i>Candida lusitaniae</i> ; <i>C. ethanolica</i> ; <i>Kluyveromyces marxianus</i> ; <i>Pichia fermentans</i> ; <i>P. kluyveri</i> ; <i>Zygosaccharomyces bailii</i>	Verdugo, <i>et al.</i> , 2011; Lappe-Oliveras, <i>et al.</i> , 2008
<i>Agave cupreata</i>	<i>Candida sp.</i>	Flores, <i>et al.</i> , 2005
<i>Agave duranguensis</i>	<i>K. marxianus</i>	Lappe-Oliveras, <i>et al.</i> , 2008
<i>Agave fourcroydes</i>	<i>C. parapsilosis</i> ; <i>Clavispora lusitaniae</i> ; <i>Debaryomyces hansenii</i> ; <i>K. marxianus</i> ; <i>Pichia caribbica</i> ; <i>P. guilliermondii</i> ; <i>Torulaspota delbrueckii</i>	Lappe-Oliveras, <i>et al.</i> , 2008
<i>Agave angustifolia</i> ; <i>Agave karwinskii</i> ; <i>Agave potatorum</i>	<i>Candida spp.</i> ; <i>Hanseniaspora spp.</i>	Lappe-Oliveras, <i>et al.</i> , 2008

1.2.3.3. Levaduras tipo *Saccharomyces*

Las levaduras del género *Saccharomyces* son fundamentalmente fermentativas, utilizan monómeros como glucosa, fructosa o galactosa, acumulando estas fuentes de carbono en forma de intermediarios energéticos como etanol, convirtiendo un sustrato fácilmente asimilable por microbiota competente, en un sustrato que pocas especies pueden asimilar (Benítez, *et al.*, 2004). A pesar de que, durante una fermentación espontánea, hay presentes distintos géneros y especies de levaduras (Tabla 1.4), es *Saccharomyces cerevisiae* la que tiene un control mayoritario sobre la fermentación, como resultado de un proceso de selección natural producto de las condiciones de este tipo de fermentaciones (González-Hernández, *et al.*, 2012; Arrizon, *et al.*, 2006).

Saccharomyces cerevisiae es un organismo eucariote unicelular, por lo que contiene organelos asociados a membrana, como núcleo y mitocondria. Las células de esta levadura son esféricas, ovales o cilíndricas, y tienen un tamaño promedio de 5 µm de diámetro (Martínez, 2014; Duina, *et al.*, 2014). Esta levadura realiza gemación (reproducción de tipo asexual) bajo condiciones óptimas de crecimiento, pero cuando entra en estrés por falta de nutrientes, puede realizar meiosis y esporular, formando cuatro ascosporas haploides a partir de una célula diploide con 32 cromosomas (González y Valenzuela, 2002; Duina, *et al.*, 2014; Martínez, 2014).

Durante la producción del mezcal, en el mosto inicial hay una alta concentración de azúcares (alrededor de 18 °Bx), lo que genera estrés osmótico en los microorganismos presentes. *S. cerevisiae* se adapta a este estrés al aumentar la producción de glicerol intracelular como

principal soluto compatible, generando un balance en la presión osmótica (De la Torre, 2010).

S. cerevisiae es una levadura con alta tolerancia y altos rendimientos de producción de etanol, y aproximadamente en cuatro días es el microorganismo predominante en una fermentación espontánea, pero posee baja capacidad de generar compuestos secundarios que brindan características sensoriales al producto final (Casas, *et al.*, 2015). Incluso en condiciones de aerobiosis, *S. cerevisiae* realiza la fermentación de azúcares sencillos como vía principal de obtención de energía, pero si la concentración de esos azúcares disminuye, la levadura puede ocupar el etanol generado durante la fermentación como fuente de carbono, cambiando de un metabolismo fermentativo a uno no fermentativo (Gasmi, *et al.*, 2014).

1.3. ESPECIFICACIONES Y CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL MEZCAL

El sabor y el aroma de las bebidas alcohólicas son las características más importantes para la aceptación por parte de los consumidores. Los compuestos principales que determinan estas características son los compuestos volátiles, generados durante todas las etapas de producción del mezcal, pero es durante la fermentación del mosto de agave que son generados en mayor concentración (Arellano, *et al.*, 2012; Martell, *et al.*, 2011). El aroma de las bebidas alcohólicas puede dividirse en dos categorías: primario, en el cual participan los compuestos provenientes de la materia prima; y secundario, dado por los compuestos formados durante la fermentación, destilación y maduración del producto (Álvarez-Ainza, *et al.*, 2015).

Varios factores intervienen en la composición química y perfil sensorial del mezcal: las condiciones de la fermentación del mosto de agave, la población microbiana participante en la misma, el tipo de maguey cosechado y su ubicación geográfica (Martell, *et al.*, 2011). Se han identificado componentes en el mezcal que por su naturaleza química se clasifican en acetales, ácidos orgánicos, alcoholes, cetonas, aldehídos, ésteres, fenoles y terpenos, siendo los grupos más abundantes en componentes y concentraciones, los alcoholes, ésteres y ácidos (Pérez, *et al.*, 2013; Hernández, 2009). Los alcoholes con tres o más átomos de carbono, y los ésteres etílicos, son las principales moléculas responsables del aroma (De León-Rodríguez, *et al.*, 2006).

En la Tabla 1.5 se muestran las especificaciones de algunos compuestos volátiles presentes en el mezcal, de acuerdo con la NOM-070-SCFI-1994.

Tabla 1.5 Especificaciones del mezcal. Fuente: NOM-070-SCFI-1994

ESPECIFICACIONES	MÍNIMO	MÁXIMO
% v/v de alcohol a 20 °C	33.0	55.0
Extracto seco (g/l)	0.2	10.0
mg/100 cm ³ (referidos a alcohol anhidrido)		
Acidez total (como ácido acético)	-	170.0
Alcoholes superiores (mg/100ml)	100.0	400.0
Metanol (mg/100ml)	100.0	300.0

1.3.1. Ácidos grasos y orgánicos generados durante la fermentación del mosto de agave.

La mayoría de los ácidos presentes en el mezcal aportan sabores a grasa y queso; los más abundantes reportados son los ácidos acético, hexanoico y butanoico (Molina-Guerrero, *et al.*, 2007). El ácido acético puede ser generado durante o después de la fermentación por la oxidación del etanol en condiciones de aerobiosis por la bacteria *Acetobacter aceti*, la cual puede estar presente durante la fermentación debido a que este proceso es no controlado (Christoph y Bauer-Christoph, 2007) (Figura 1.1).

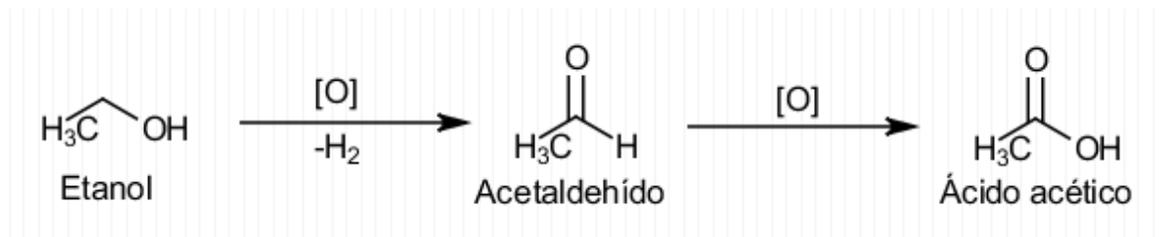


Figura 1.1. Síntesis de ácido acético por oxidación de etanol

La biosíntesis de ácidos grasos durante la fermentación (como se muestra en la figura 1.2) inicia con la generación de acetil coenzima A en la levadura, y su conversión a malonil coenzima A; por acción de una enzima transacilasa, acetil coenzima A se convierte en acetil-ACP, y malonil coenzima A en malonil-ACP; estos productos reaccionan entre sí para generar ácidos grasos no ramificados saturados (en su mayoría), de 4 a 18 átomos de carbono de longitud (Christoph y Bauer-Christoph, 2007). La presencia de ácidos grasos insaturados, o con número impar de átomos de carbono, depende de las características de la fermentación. Algunos ácidos identificados en el mezcal se presentan en la Tabla 1.6.

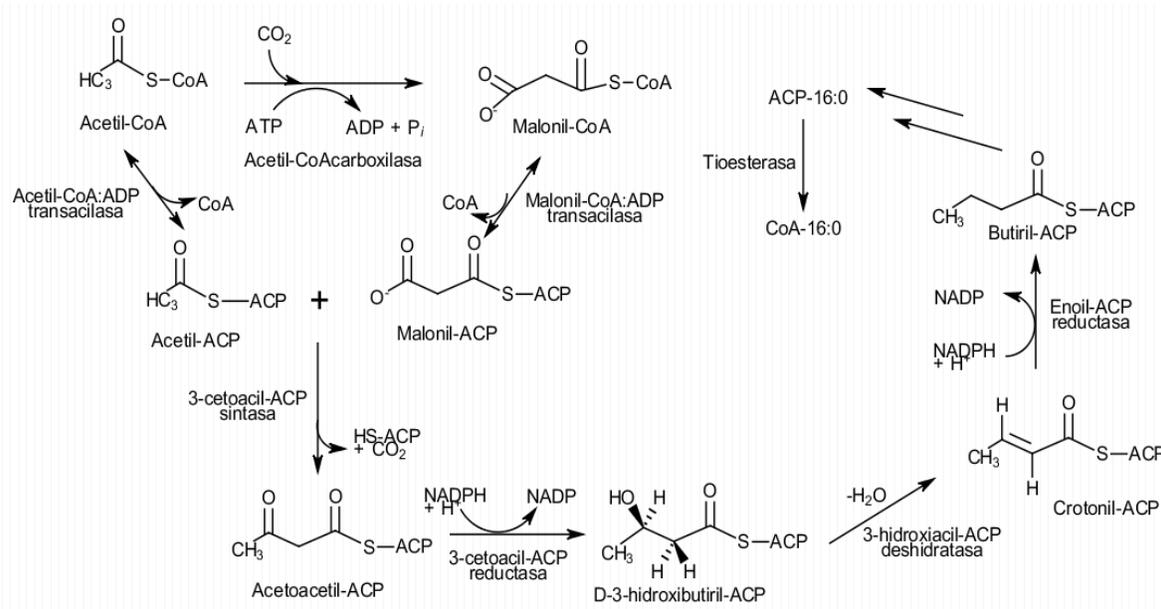


Figura 1.2. Síntesis de ácidos grasos a partir de Acetil-CoA y Malonil-CoA. Después de la generación de butiril-ACP, el ciclo continúa, adicionándose en cada término una molécula de Malonil-ACP (dos átomos de carbono por ciclo). Para generar ácidos grasos de 16 carbonos, el ciclo se repite siete veces; para generar ácidos grasos de 18 carbonos, se repite ocho veces (AOCs).

1.3.2. Alcoholes generados durante la fermentación del mosto de agave.

La fermentación alcohólica genera principalmente alcoholes a partir de azúcares presentes en el mosto; de estos alcoholes, el etanol es el mayoritario y representa el 95% del contenido total (Enríquez, 2016) (Figura 1.3).

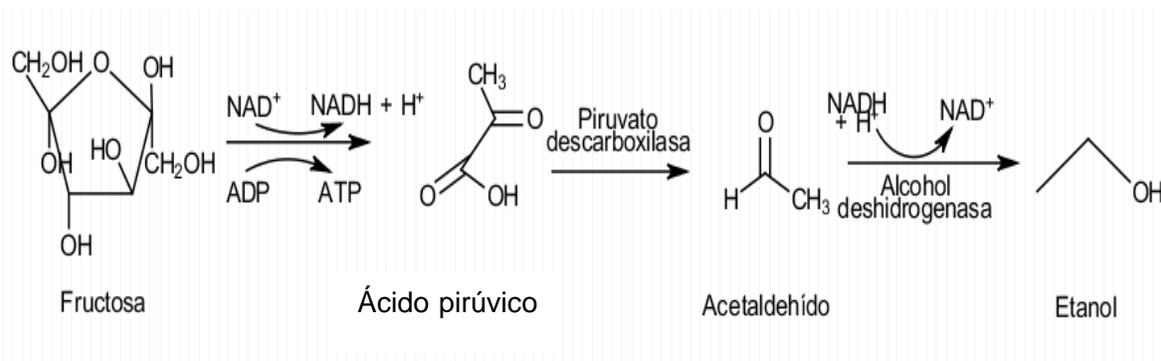


Figura 1.3. Síntesis de etanol a partir de fructosa durante la fermentación del mosto de agave

Otro alcohol importante presente en el mezcal es el metanol, producido a partir de pectina y lignina que se encuentra en la pared celular del maguey (De León-Rodríguez, *et al.*, 2006). La pectina del agave tiene grupos metoxilo, los cuales se rompen a altas temperaturas durante el cocimiento de la piña. Algunas cepas de levaduras poseen actividad pectilmetilesterasa (PME) (Figura 1.4), las cuales provocan una ruptura del enlace entre la pectina y los grupos metoxilo que no fueron hidrolizados durante el cocimiento de la piña, y generan metanol durante la fermentación (Arellano, *et al.*, 2013; Enríquez, 2016; Arrizon, *et al.*, 2006).

La formación de metanol depende de varios factores, entre ellos están un cocimiento no uniforme de la piña (provocando diferentes grados de desmetilación de la pectina), y las especies de levaduras que puedan tener actividad pectilmetilesterasa (Vera, *et al.*, 2012). Este alcohol es un componente no deseado, pues presenta un efecto neurotóxico en humanos (Vera-Guzmán, *et al.*, 2010; De León-Rodríguez, *et al.*, 2006).

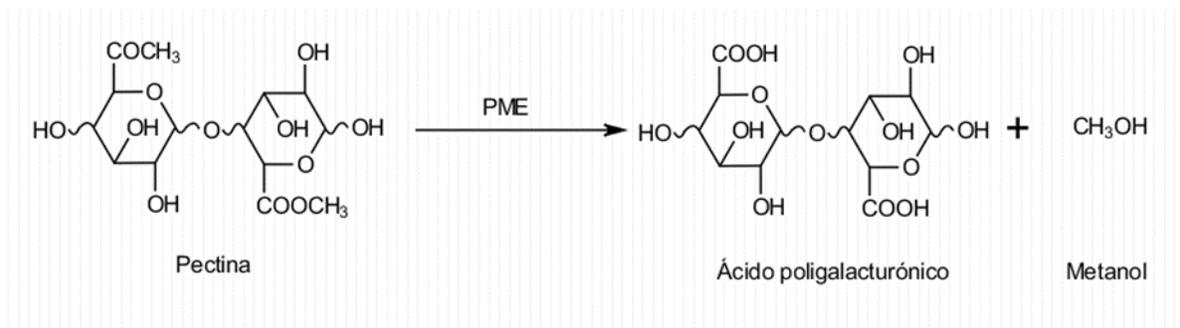


Figura 1.4. Acción de la enzima pectilmetilesterasa sobre la pectina, generando metanol y ácido poligalacturónico

Los alcoholes superiores o aceites de fusel tienen aromas fuertes, se encuentran frecuentemente en bebidas alcohólicas, y su formación se lleva a cabo durante la fermentación del mosto a partir de aminoácidos por reacciones catabólicas o anabólicas (Enríquez, 2016; Arellano, *et al.*, 2012). La reacción catabólica comienza con una desaminación del aminoácido, seguida de una descarboxilación, para producir un aldehído, el cual es catalizado a alcohol por medio de una alcohol deshidrogenasa. Durante la reacción anabólica, cuando no hay suficientes grupos amino **para generar aminoácidos**, los α -cetoácidos se descarboxilan, produciendo aldehídos, los cuales son transformados a alcoholes superiores (Arellano, *et al.*, 2012) (Figura 1.5). El alcohol isoamílico es el aceite de fusel mayoritario identificado en el mezcal (Molina-Guerrero, *et al.*, 2007).

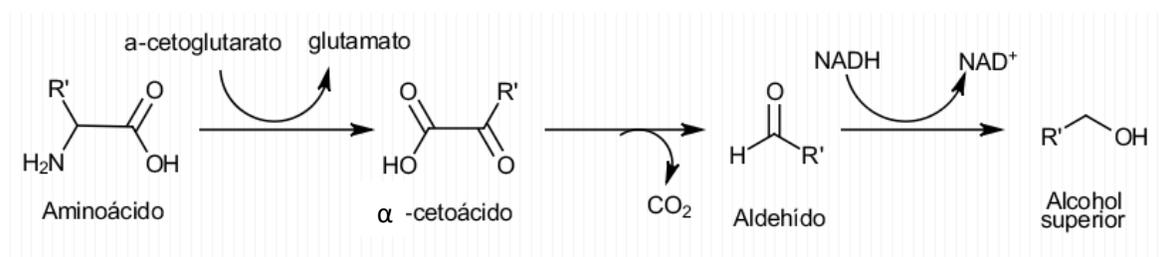


Figura 1.5. Mecanismo general de síntesis de aceites de fusel a partir de un aminoácido.

Se han encontrado alcoholes de doble cadena en su estructura, como el 6,9-pentadecadien-1-ol, o el 9,12-tetradecadien-1-ol, que son feromonas encontradas en insectos; la primera se encontró en mezcales a los cuales se les adiciona el gusano del maguey en la botella (Molina-Guerrero, *et al.*, 2007; De León-Rodríguez, *et al.*, 2006).

Algunos alcoholes identificados en el mezcal se presentan en la Tabla 1.6.

1.3.3. Aldehídos generados durante la producción de mezcal.

Durante las etapas de cocción de la piña del agave y la fermentación del mosto, se generan aldehídos que contribuyen a dar sabor y aroma al mezcal, aunque algunos de estos compuestos se incorporan durante la maduración en barrica por la oxidación de alcoholes (Ávila, 2010, Arellano, *et al.*, 2013). Estos compuestos, en altas concentraciones, son responsables de aromas y sabores desagradables. Los aldehídos más importantes por aporte de aroma son el acetaldehído y el isovaleraldehído (Arellano, *et al.*, 2013; Medina, *et al.*, 2011; Christoph y Bauer-Christoph 2007) (Figura 1.6).

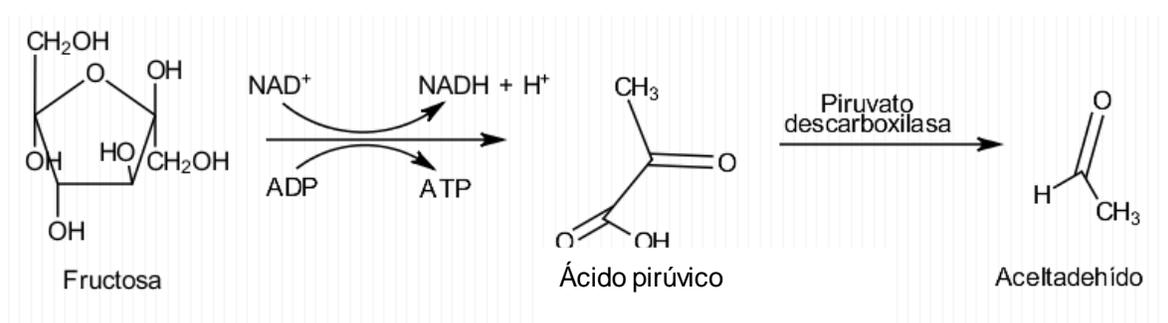


Figura 1.6. Formación, a partir de fructosa, de acetaldehído, uno de los aldehídos que aportan más aroma en el mezcal.

Otro tipo de aldehídos presentes en el mezcal son los compuestos furánicos. La producción de estos compuestos ocurre durante el cocimiento de las piñas de maguey por medio de una reacción de caramelización o pirólisis de azúcares (Muñoz-Muñoz, *et al.*, 2010). Esta caramelización sucede cuando azúcares en estado cristalino o en jarabe (que es el caso de los azúcares del agave) son sometidos a temperaturas mayores a su punto de fusión. Los azúcares sufren isomerización y deshidratación, llevando a una ruptura de sus moléculas. Los residuos se reagrupan generando nuevos compuestos, entre ellos, el furfural (Figura 1.7). Algunos derivados insaturados del furfural se polimerizan consigo mismos o con otras sustancias semejantes para formar melanoidinas, macromoléculas que aportan pigmento a la piña del agave (Delgadillo, 2014).

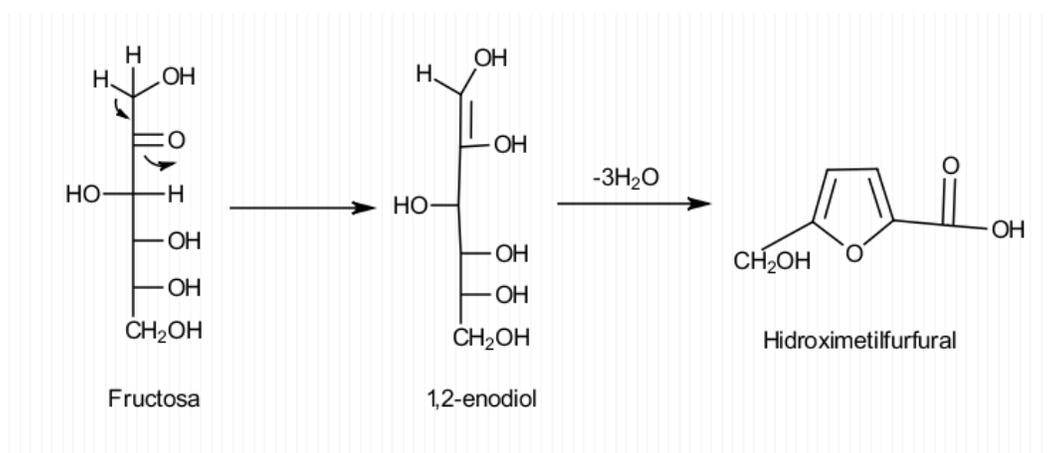


Figura 1.7. Formación de hidroximetilfurfural (HMF), un compuesto furánico generado durante el cocimiento de la piña de agave.

La reacción de Maillard (oscurecimiento no enzimático) también genera compuestos furánicos durante el cocimiento de la piña. Esta reacción comienza con un ataque nucleofílico del grupo amino de un aminoácido al

grupo carboxilo de un azúcar reductor (producto de Amadori), y es seguida por una cascada de reacciones que generan compuestos volátiles aromáticos con gran impacto en el producto final (Muñoz-Muñoz, *et al.*, 2010; Vera, *et al.*, 2009; Ledl y Schleicher, 1990). Estos productos de oscurecimiento no enzimático pueden inhibir tanto el crecimiento de microorganismos fermentadores, como la excreción de etanol de *Saccharomyces cerevisiae* (Banerjee, *et al.*, 1981) (Figura 1.8).

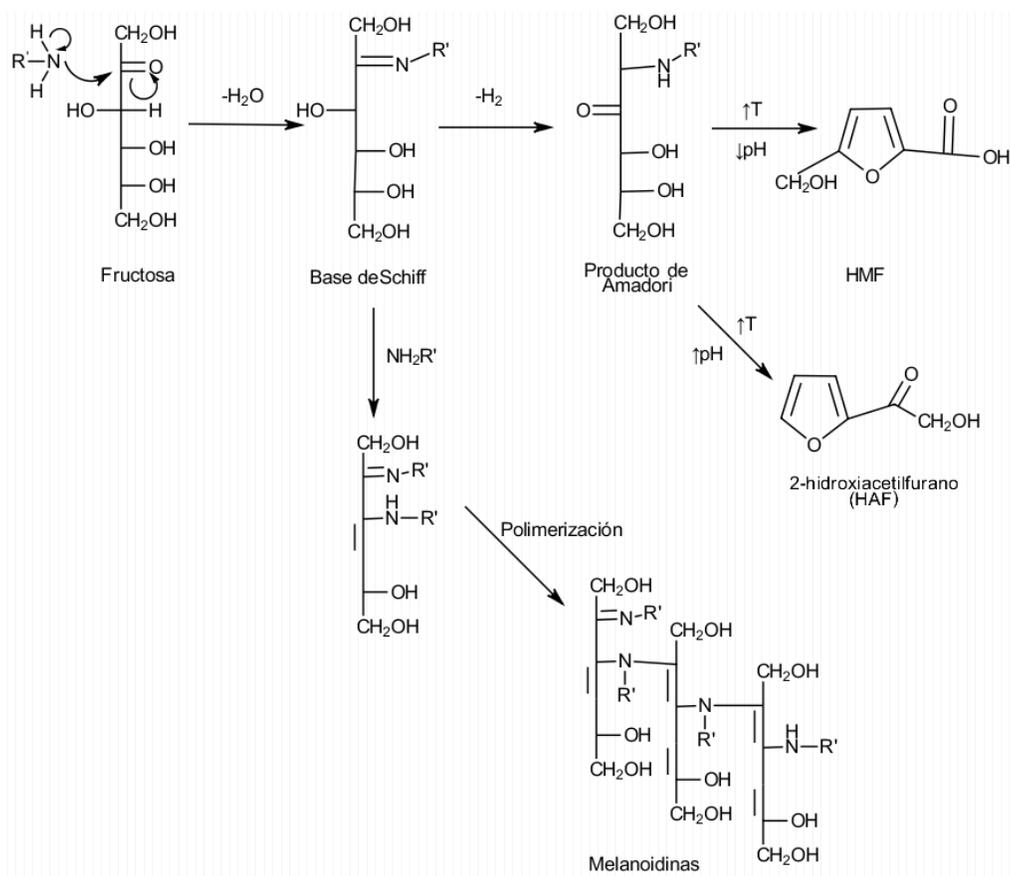


Figura 1.8. Generación de algunos compuestos furánicos y melanoidinas por medio de la reacción de Maillard durante el cocimiento de la piña de agave.

1.3.4. Ésteres generados durante la fermentación del mosto de agave

Los ésteres son un grupo amplio de compuestos que dan aromas y sabores frutales y florales a las bebidas, con un umbral de olor bajo, y generados tanto por el metabolismo de las levaduras durante la fermentación (condensación de coenzima A con ácidos grasos o alcoholes), como por una esterificación de ácidos grasos en altas concentraciones de etanol durante el almacenamiento y/o maduración del mezcal (Arellano, *et al.*, 2013; Martell, *et al.*, 2011; Christoph y Bauer-Christoph, 2007; Escalante-Minakata, *et al.*, 2012; Molina-Guerrero, *et al.*, 2007). La producción de ésteres está relacionada con la concentración de aminoácidos: cuando el contenido de nitrógeno es alto, la concentración de ácidos grasos disminuye, y la enzima aciltransferasa, que hidroliza ésteres alifáticos y aromáticos, no es inhibida (Arellano, 2013). Los ésteres más importantes en el perfil sensorial del mezcal son los ésteres etílicos y los acetatos (Christoph y Bauer-Christoph, 2007).

El acetato de etilo es el éster más abundante en bebidas fermentadas y sus destilados, aportando sabores frutales, pero en altas concentraciones aporta sabor a removedor de esmalte (Molina-Guerrero, *et al.*, 2007; Enríquez, 2016; Vera-Guzmán, *et al.*, 2010). Es generado por esterificación del ácido acético (en su mayoría), o por la acción de la enzima acetil alcohol transferasa, la cual une al grupo acetato de la acetil-coenzima A con una molécula de etanol (Vera-Guzmán, *et al.*, 2010; Arellano, *et al.*, 2013) (Figura 1.9). El aumento en la temperatura de fermentación favorece la formación de acetato de etilo (Enríquez, 2016).

Algunos ésteres identificados en el mezcal se presentan en la Tabla 1.6.

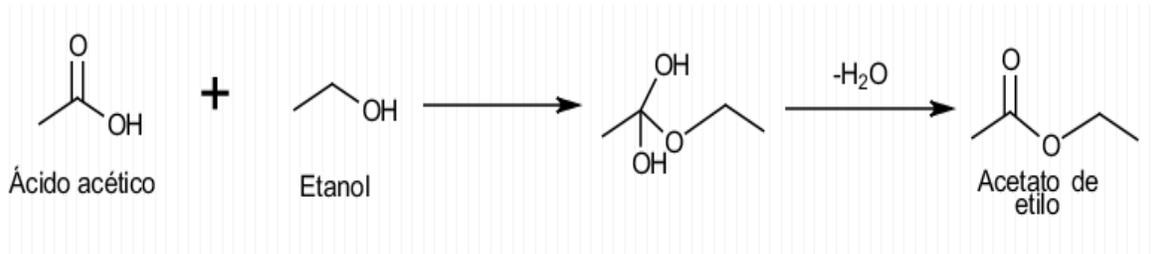


Figura 1.9. Generación de acetato de etilo a partir de ácido acético y etanol

1.3.5. Terpenos generados durante la fermentación del mosto de agave.

Durante la fermentación, los terpenos glicosidados son hidrolizados a monoterpenos por la acción de la enzima β -glicosidasa producida por levaduras (Figura 1.10); algunas levaduras como *Saccharomyces cerevisiae*, *Kluyveromyces lactis*, y *Torulaspora delbrueckii*, producen enzimas que transforman a unos monoterpenos en otros (Alcázar, 2011; Arellano, *et al.*, 2012; Molina-Guerrero, *et al.*, 2007). Algunos terpenos identificados en el mezcal se presentan en la Tabla 1.6.

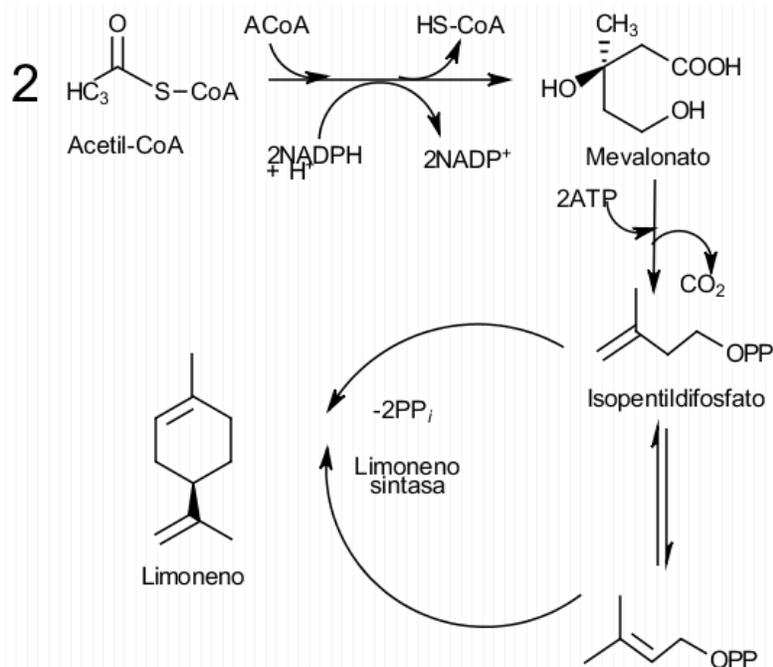


Figura 1.10. Síntesis de limoneno, un terpeno generado durante la producción de mezcal

Tabla 1.6. Algunos compuestos volátiles identificados en distintos tipos de mezcal.

Compuesto	Mezcal	Notas	Referencias	Compuesto	Mezcal	Notas	Referencias
Ácidos				Alcoholes			
Ácido acético	TA	Vinagre	1,2,3,4, 5,7,8	Metanol	TA	-	2,3,4,5, 7
Ácido propanoico	TA	Floral Frutal	1,5,7,8	Propanol	TA	-	1,2,3,4, 5,7,8
Ácido butanoico	TA	Grasa Rancio	1,5,7,8	1-Butanol	TA	Dulce	3,4,5,7
Ácido hexanoico	TA	Queso Rancio	2,3,4,5, 7	Alcohol isoamílico	TA	Dulce	1,2,5,6, 7
Ácido decanoico	Aa, Ad, As	Cítrico Madera	1,2,3,5, 7	2-butanol	Aa, Ad, As	-	3,5
Aldehídos				Ésteres			
Acetaldehído	TA	Dulce	2,3,4,7	Acetato de etilo	TA	Frutal Solvente	1,2,3,4, 5,6,7,8
Benzaldehído	TA	Almendra	3,5	Butanoato de etilo	NE	Plátano Piña	1,3,4,6
Furfural	TA	Almendra Ahumado	1,3,4,6,7	Acetato de feniletilo	NE	Rosas	3
Terpenos				Hexanoato de etilo	NE	Manzana	3,7
Limoneno	Aa, As	Lima	2,4,5,6	Octanoato de etilo	NE	Pera Picante	2,3,7
Linalool	NE	Cítrico	2,3,6	Otros			
Geraniol	NE	Rosas	3	Naftaleno	TA	-	4,5,8
Cariofileno	NE	Clavo	6	Guayacol	TA	Ahumado	1,2,3,6
α -terpineol	Aa	Floral Pino	1,2,6	Eucaliptol	Ap	-	5
Citronelol	NE	Floral	2,3	Vainillina	NE	Vainilla	3
Carvaciol	NE	Orégano	1,2	Eugenol	NE	Clavo	3,7

Nomenclatura de la Tabla 1.6, columnas "Mezcal": Aa: Mezcal de *Agave angustifolia*; Ad: Mezcal de *Agave duranguensis*; Ap: Mezcal de *Agave potatorum*; As: Mezcal de *Agave salmiana*; TA: todos los mezcales; NE: no se especifica en la referencia. Nomenclatura de la Tabla 1.6, columnas "Referencias": 1: Álvarez-Ainza, *et al.*, 2015; 2: Arellano, *et al.*, 2012; 3: Christoph y Bauer-Christoph, 2007; 4: De León-Rodríguez, *et al.*, 2006; 5: De León-Rodríguez, *et al.*, 2008; 6: Enríquez, 2016; 7: Molina-Guerrero, *et al.*, 2007; 8: Vera-Guzmán, *et al.*, 2010).

Las Figuras 1.1-1.10 fueron diseñadas con el programa ChemSketch.

1.4. CLASIFICACIÓN DEL MEZCAL

De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana 070-SCFI-1994, se reconocen dos tipos de mezcal:

- Tipo I (mezcal 100% agave). Obtenido exclusivamente a partir de azúcares del mezcal
- Tipo II (mezcal 80% agave), producido usando 80% de azúcares del agave y 20% de azúcares de otras fuentes.

Además, la norma reconoce tres categorías de mezcal:

- Mezcal joven. Sin maduración.
- Mezcal reposado. Al menos dos meses en recipientes de roble blanco o encino.
- Mezcal añejo. Sujeto a un proceso de maduración de mínimo un año, en recipientes de roble blanco o encino.

Los mezcales pertenecientes a estas tres categorías son susceptibles a ser abocados (proceso por el cual se suaviza el sabor del mezcal, utilizando saborizantes o colorantes permitidos en las disposiciones legales).

1.5. DENOMINACIÓN DE ORIGEN DEL MEZCAL

México cuenta con la Denominación de Origen del Mezcal (DOM), en la cual se establece que ciertos municipios de Durango, Guanajuato, Guerrero, Oaxaca, Michoacán, Puebla, San Luis Potosí, Tamaulipas, y Zacatecas (Figura 1.1, y Tabla 1.8), pueden elaborar esa bebida (Pérez, *et al.*, 2016; Hernández, 2015). La DOM se refiere al nombre de una región geográfica de México que sirve para designar un producto originario de la misma, y cuya calidad o características se deben exclusivamente al medio geográfico, comprendiendo en éste los factores naturales y humanos (Enríquez, 2016).



Figura 1.11. Estados pertenecientes a la DOM (Imagen: Consejo Regulador del Mezcal).

Tabla 1.7. Estados pertenecientes a la DOM (COMERCAM, 2015).

ESTADO	AÑO DE INCORPORACIÓN	NÚMERO DE MUNICIPIOS	PORCENTAJE DEL ESTADO
Durango	1994	39	100%
Guerrero	1994	81	100%
Oaxaca	1994	570	100%
San Luis Potosí	1994	58	100%
Zacatecas	1994	58	100%
Guanajuato	2001	2	4%
Tamaulipas	2003	11	25%
Michoacán	2012	29	26%
Puebla	2015	115	53%

La certificación inicia con el registro de plantaciones de agave (identificación de zona y variedad); continúa con la certificación de la fábrica (pruebas de producto no adulterado); y termina con la certificación del envasado (mezcal elaborado bajo supervisión del Consejo). Si se obtiene la certificación, el mezcal se comercializa portando un sello en la botella, como distintivo que dicho producto está certificado por el Consejo Regulador del Mezcal (CRM) (Consejo Regulador del Mezcal, 2015). Las declaratorias generales de protección a las denominaciones de origen son emitidas por el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI) y publicadas en el Diario Oficial de la Federación (DOF) (Enríquez, 2016).

CAPÍTULO II. PROCESO DE ELABORACIÓN DEL MEZCAL

No existe un único proceso de elaboración de esta bebida destilada. Debido a que los estados y regiones establecidos en la DOM se encuentran distribuidos a lo largo del territorio mexicano, es difícil establecer un proceso único y estandarizado de producción. Esta producción de mezcal está estrechamente ligada a la tecnología involucrada, que en la mayoría de los casos se caracteriza por ser tradicional o artesanal, y es transmitida oralmente de generación en generación (Bautista y Ramírez, 2008); aunque, hoy en día, un proceso tecnificado/industrializado es utilizado cada vez más. En general, el proceso de elaboración del mezcal se puede dividir en ocho etapas: siembra del maguey, cosecha, cocción de la piña, molienda, fermentación, destilación, maduración (opcional), y embotellado.

2.1. SIEMBRA DEL AGAVE

La elaboración del mezcal comienza con la selección del agave: puede ser una especie silvestre o cultivada, pero su desarrollo biológico debe transcurrir dentro del área geográfica comprendida por la DOM (Enríquez, 2016). Dependiendo de la región y del productor, el maguey se puede cultivar en laderas, valles, cerca de ríos o arroyos, pastizales, bosques de roble, bosques secos tropicales, o bosques mixtos (González-Hernández, *et al.*, 2012; Pérez, *et al.*, 2016).

Para recuperar la fertilidad del suelo de manera natural, los campesinos mantienen un periodo de descanso del suelo de mínimo dos años, después del cual se reestablecen los cultivos, ya sean básicos (maíz, frijol, garbanzo y calabaza) o del agave. Algunos productores realizan rotación de esos cultivos básicos mínimo durante un año antes de proceder al establecimiento agrícola del agave mezcalero (Bautista y Smit, 2012).

Otra práctica que se realiza en el campo es la asociación de cultivos, en la cual se intercalan cultivos básicos durante los primeros tres años del establecimiento de la siembra del agave mezcalero (Gerritsen, *et al.*, 2011; Bautista y Smit, 2012). La asociación de cultivos, o policultivos, permite tener menor incidencia de plagas, y mayor eficiencia en la absorción de nutrientes, agua, y radiación solar (Martínez-Ramírez, *et al.*, 2014).

La propagación vegetativa de las plantas de agave (en el caso del cultivado) se realiza trasplantando hijuelos de plantas maduras seleccionadas por su desempeño en cualidades productivas (Zizumbo-Villarreal, *et al.*, 2009). Algunos indicadores del estado de madurez del agave son una coloración pálida, amarillenta tendiente a rojiza, y pencas menos rígidas que comienzan a doblarse, dando un aspecto de planta marchita (Enríquez, 2016).

Una vez que el agave ha alcanzado su madurez (entre siete y diez años; establecida por el productor), inicia el desarrollo de su quiote o inflorescencia, la cual se corta (castrado o capado del agave) a una altura aproximada de 50 cm, y se espera entre seis meses y un año para cosechar el resto de la planta (Soto-García, *et al.*, 2009; Analís-Flores y González-Álvarez, 2010; Ávila, 2010; Zizumbo-Villarreal, *et al.*, 2009). La finalidad de remover el quiote es provocar que la cabeza (tallo y restos de base de las hojas) se ensanche y aumente la concentración de azúcares (Zizumbo-Villarreal, *et al.*, 2009; Ávila, 2010; Bernardino-Nicanor, *et al.*, 2012).



Figura 2.1. Quiote de agave mezcalero previo al castrado (Fotografía: Vicente Hernández Vargas)



Figura 2.2. Quiote removido de la planta de agave (Fotografía: Vicente Hernández Vargas)

2.2. COSECHA DEL AGAVE

La cosecha del agave se lleva a cabo manualmente por una cuadrilla de jimadores, quienes, pasado el tiempo establecido después de castrar la planta, realizan el jimado del agave, el cual consiste en cortar las hojas o pencas con hacha o machete, dejando únicamente la cabeza o piña (las cuales varían entre 25 y 100 kg) (Gutiérrez, *et al.*, 2013; Arellano, *et al.*, 2012; Enríquez, 2016; Soto-García, *et al.*, 2009). Las pencas son cortadas una por una, comenzando por las superiores hasta llegar a la base; terminando el jimado, el maguey se arranca (tumba) del suelo (Serra y Lazcano, 2009).

El traslado de las piñas a los palenques o mezcalerías se hace de distintas maneras, dependiendo de la cantidad de materia prima, el tipo de terreno donde se hace la recolección, y el tipo de proceso (artesanal o tecnificado): se ocupan desde carretones jalados por animales, hasta camiones (Salvatierra-García, 2003).



Figura 2.3. Jimador removiendo las pencas del agave (Fotografía: Elliot D. Woods).



Figura 2.4. Transporte de las piñas del agave en camión (Fotografía: Jean Christian Cottu).

Cada una de las etapas siguientes en el proceso de elaboración del mezcal se puede dividir en artesanal e industrializada. A pesar de que se rigen bajo el mismo principio, presentan diferencias importantes, como el equipo y maquinaria empleados, y la estandarización del producto terminado (Enríquez, 2016). El proceso industrializado se caracteriza por la incorporación de las normas NOM-070-SCFI-1994 para el mezcal e ISO 9000 para los procesos, técnicas agronómicas modernas en la selección y propagación clonal del material vegetativo, esquemas comerciales de propiedad privada y renta de la tierra por las compañías productoras de los destilados, control de plagas y enfermedades, fertilización, y riego (Colunga-GarcíaMarín y Zizumbo-Villarreal, 2007).

2.3. COCCIÓN DEL AGAVE

La cocción del maguey es una reacción heterogénea en una matriz vegetal, la cual tiene tres objetivos: hidrolizar la inulina a azúcares fermentables, principalmente fructosa; generar algunos compuestos volátiles y de Maillard; y suavizar el tejido de la planta para facilitar la molienda (Pérez, *et al.*, 2016; Lappe-Oliveras, *et al.*, 2008).

La cocción artesanal se lleva a cabo en hornos rústicos; la mayoría consisten en hoyos en la tierra, de forma trunco-cónica, con diámetro de 2.5 a 3.5 metros, y revestidos con piedras, con capacidad de cuatro a seis toneladas (Escalante-Minakata, *et al.*, 2008; Hidalgo, *et al.*, 2010; De la Torre, 2010; Lappe-Oliveras, *et al.*, 2008). Se depositan entre 60 y 70 piñas partidas en pedazos pequeños (disminución del tamaño de partícula), se calientan con madera de encino y bagazo de maguey, y se tapan con más bagazo seco, sacos de yute, pencas o lona, y tierra (Analís-Flores y González-Álvarez, 2010; Soto-García, *et al.*, 2009; Carrillo, 2007). El cocimiento dura alrededor de 72 horas, alcanzando entre 90 y 100 °C, y debido a que hay poco control del mismo y de la temperatura de proceso, la hidrólisis térmica no es uniforme (Hidalgo, *et al.*, 2010; Morales, 2008; Arellano, *et al.*, 2010).

En la cocción tecnificada se utilizan autoclaves cilíndricas de acero inoxidable, en las que se inyecta vapor de agua para realizar la hidrólisis térmica. Las piñas pasan por una cortadora mecánica y son transportadas dentro de la autoclave por una banda móvil, donde permanecen de ocho a doce horas a una temperatura de 120 °C (Enríquez, 2016; Pérez, *et al.*, 2016). Alrededor de tres horas después del inicio de la cocción, el autoclave se abre para drenar las mieles amargas generadas, las cuales no son aprovechables por el alto contenido de impurezas que contienen (resinas y ceras), y pueden contaminar al producto (Enríquez, 2016). Debido a que el tiempo y la temperatura son controlados, la hidrólisis térmica es uniforme (Arellano, *et al.*, 2012).

Cuando la piña es despencada, su color es blanco. Al terminar la fase de cocimiento, el agave debe presentar una coloración caramelo, indicador de un proceso correcto, y de que está listo para ser molido (Salvatierra-García, 2003).



Figura 2.5. Piñas listas para cocción en horno tradicional de tierra (Fotografía: Cornelio I. Pérez Ricárdez)



Figura 2.6. Piñas al término del cocimiento en horno tradicional de tierra (Fotografía: Lou Agave)



Figura 2.7. Cortado de piñas previo a la cocción en autoclave (Fotografía: Lou Agave)



Figura 2.8. Piñas al término del cocimiento en autoclave (Fotografía: Lou Agave)

2.4. MOLIENDA DEL AGAVE

Para obtener los jugos en los que los azúcares fermentables se encuentran disueltos (mosto fresco) es necesario triturar o moler las piñas cocidas, reduciendo el tamaño del agave previamente hidrolizado y seccionado (Alcázar, 2011; Hidalgo, *et al.*, 2010).

En el proceso artesanal, la molienda generalmente se realiza con la ayuda de un molino chileno o tahona, que consiste en una rueda amonedada de madera, piedra o cantera, dentada o lisa, de 1.3 a 1.5 m de diámetro, 0.5

m de ancho, y aproximadamente una tonelada de peso, montada en un eje horizontal de metal o madera (Durán y Pulido, 2007; Arellano, *et al.*, 2012; Enríquez, 2016; Lappe-Oliveras, *et al.*, 2008). El eje horizontal (trapiche) gira alrededor de un eje vertical (de hormigón o madera) clavado en el centro del área de molienda, con el cual se regula el movimiento de translación (De la Torre, 2010; Durán y Pulido, 2007). El movimiento del molino se logra con un tractor, motor o tiro animal (Durán y Pulido, 2007).

El piso de rodamiento, donde se coloca un lecho de agave en cada ciclo de molido, es de piedra o cemento, de forma circular, con 4 m de ancho y entre 20 y 30 cm de profundidad (Caballero, *et al.*, 2013; Enríquez, 2016); la finalidad de esa profundidad es impedir la pérdida de bagazo y mosto fresco, el cual es conducido a los tanques de fermentación por pequeños canales en la superficie del molino (Durán y Pulido, 2007). La maceración de las piñas es heterogénea, pues algunos pedazos de las mismas se van acumulando en fisuras del piso del molino, además de tener pérdidas de mosto fresco por filtración a través de esas fisuras (Morales, 2008).

La molienda tecnificada utiliza desgarradoras mecánicas de rodillos, las cuales son cargadas con las piñas por medio de una banda transportadora (Enríquez, 2016; Salvatierra-García, 2003). Los jugos obtenidos salen por una vía separada de las fibras, se filtran, son colocados en una fosa para líquidos, y se recirculan en intercambiadores de calor, para disminuir su temperatura de 50 a 25 °C aproximadamente (Morales, 2008). Una vez que la temperatura disminuye, el mosto fresco es transportado a los tanques de fermentación.



Figura 2.9. Agave macerado en tahona tradicional de piedra (Fotografía: Mezcal Delirio de Oaxaca)



Figura 2.10. Agave en desgarradora mecánica (Fotografía: Ian Chadwick).

2.5. FERMENTACIÓN DEL MOSTO DE AGAVE

El mosto a fermentar debe tener una graduación entre 8 y 14 °Brix, teniendo un aspecto caldoso, de color pardo, y sabor ligeramente alcohólico (Arrizon, *et al.*, 2006; Serra y Lazcano, 2009). La fermentación tradicional es espontánea, alcanzando temperaturas que van de los 28 a los 37 °C, y se puede realizar de dos formas: fermentando únicamente el mosto fresco, o fermentando el mosto junto con el bagazo y la fibra del agave (Arrizon, *et al.*, 2006; Lappe-Oliveras, *et al.*, 2008). Las tinas de fermentación son de tamaños y materiales variados, pudiendo ser de madera de pino, encino, roble o ayacahuite, piedra, pieles curtidas o cemento, y con capacidades que van de 1 000 a 2 000 L (Alcázar, 2011; Morales, 2008; Salvatierra-García, 2003).

Una vez que los jugos del agave son colocados en las tinas, se adiciona entre 5 y 10% de volumen de agua tibia (40 °C) respecto al mosto, y se deja reposar durante uno o dos días, hasta que comienza a aparecer espuma en la superficie del líquido (Hidalgo, 2010; Morales, 2008). Después, se adiciona agua fría (15 °C) mezclando durante dos horas, con la finalidad de disminuir la temperatura de fermentación y homogeneizar el crecimiento microbiano (Ortiz, 2008). Después de eso, se deja reposar

durante 72 horas, o el tiempo que se tarde en terminar la fermentación, que dependiendo de las características del ambiente en donde se lleva cabo, puede tardarse hasta 200 horas (ocho días) (Ortiz, 2006; Hidalgo, *et al.*, 2010). Este tiempo puede reducirse si se adiciona sulfato de amonio, o si el jugo del agave se adiciona a pulque colocado previamente en las tinajas de fermentación (Analís-Flores y González-Álvarez, 2010).

En la fermentación industrializada, el mosto fresco es bombeado a los tanques de inoculación, con capacidad de 5 000 L, en donde se adicionan cepas puras y seleccionadas de microorganismos (Morales, 2008; Colunga-GarcíaMarín y Zizumbo-Villarreal, 2007). El mosto permanece 24 horas en el tanque, tiempo en el que comienzan a proliferar los microorganismos; además, los jugos se pueden enriquecer con sulfato de amonio para aumentar el rendimiento de producción de etanol (Ortiz, 2008). Pasando el tiempo de 24 horas, el mosto es bombeado a los tanques de fermentación, con capacidad de 10 000 a 15 000 L, y hechos de acero inoxidable (Morales, 2008; Ávila, 2010; Lappe-Oliveras, *et al.*, 2008).

Al mosto en el tanque se le adiciona 50% de su volumen en agua, y permanece ahí durante cuatro días o hasta que termine la fermentación; los tanques tienen instalado un termómetro, con el cual se lleva un registro de la temperatura y puede ser regulada: si baja de 25 °C, los productores adicionan vapor de agua; si aumenta a más de 30 °C, el mosto es recirculado por intercambiadores de calor (Morales, 2008).

El porcentaje de etanol obtenido al término de la fermentación va de 3 a 6% (v/v), dependiendo de las características del proceso, como temperatura, tiempo, microorganismos presentes, y concentración inicial de azúcares fermentables en el mosto fresco (González-Hernández, *et al.*, 2012). El mosto fermentado (llamado tepache) es trasladado a los

recipientes donde se realiza la destilación. Además, es durante la fermentación que se pueden adicionar pechugas de pollo y gusanos de maguey, creando los mezcales de ese tipo (Zarco y Bribiesca, 2016).



Figura 2.11. Fermentación artesanal del mosto fresco en un tanque de madera (Fotografía: Mezcal Oro de Oaxaca).



Figura 2.12. Fermentación tecnificada del mosto fresco en tanques de acero inoxidable (Fotografía: TequilaSource).

2.6. DESTILACIÓN DEL MOSTO FERMENTADO

Una vez que la fermentación ha terminado, y que la transformación de azúcares en etanol se ha verificado, el mosto se transporta a los recipientes en donde se lleva a cabo la destilación, técnica que permite obtener al etanol en un estado más puro y concentrado. La destilación consiste en calentar los mostos hasta su temperatura de ebullición, y condensar los vapores que se desprenden, separando los compuestos volátiles de los no volátiles en función de su punto de ebullición (Serra y Lazcano, 2009; Hernández, 2009).

Dependiendo de la región, la destilación tipo artesanal del mosto fermentado se realiza en alambiques de cobre o de barro (Lappe-Oliveras, *et al.*, 2008). Los alambiques están constituidos por cuatro partes: una olla de con capacidad de 300 a 350 L, una montera, una cabeza o turbante, y un serpentín, unidos en secuencia (Morales, 2008). El mosto fermentado es colocado en la olla, la cual es calentada con leña hasta ebullición. El turbante recoge los gases generados que posteriormente son

condensados al pasar por el serpentín, el cual es enfriado con agua. Cada lote tarda entre tres o cuatro horas (Enríquez, 2016). Durante la destilación se obtienen tres fracciones: la primera, llamada punta o cabeza, presenta mayor grado alcohólico, y contiene compuestos con menor punto de ebullición que el etanol; la segunda, llamada cuerpo, contiene principalmente etanol; y la tercera, o cola, contiene compuestos con mayor punto de ebullición que el etanol.

La destilación se realiza dos veces para obtener diferentes graduaciones alcohólicas. Durante la primera destilación, el porcentaje de etanol en el cuerpo es de 20 a 40 % (v/v), y durante la segunda, proceso también **llamado "rectificado"**, de 45 a 60 % (v/v) (Arellano, *et al.*, 2012; Alcázar, 2011). La fracción recogida después de separar las puntas en la segunda destilación se conoce como **"corazón"**, que es propiamente el mezcal (Enríquez, 2016).

El destilador que se utiliza en el proceso tecnificado consta de cinco partes: evaporador, torre de rectificación, condensador, precalentador, y enfriador. Al interior del evaporador hay un serpentín de cobre por el que fluye vapor de agua, con el cual se calienta el mosto. Los vapores que salen de la columna se condensan al contacto con el condensador, el cual es enfriado con agua que corre en tubos por su interior y proviene de una torre de enfriamiento (Morales, 2008). Una fracción del condensado pasa a la torre de rectificación, donde hay sucesión de condensaciones y evaporaciones para purificar el producto, y terminado el paso por esta etapa, pasa a un enfriador sumergido en agua; la otra fracción del condensado se regresa al evaporador (Enríquez, 2016).

Para ajustar el porcentaje de alcohol establecido en la NOM-070-SCFI-1994, de 36 a 55 % v/v, se realizan varios métodos, dependiendo del productor. Algunos utilizan las puntas o las colas del mezcal refinado: si

tiene un porcentaje alto, se adicionan puntas; si tiene un porcentaje bajo, se adicionan colas (Mezcal Los Amantes, 2015); la manera en la que el productor determina el grado alcohólico es ocupando una pipeta de carrizo y un recipiente pequeño donde vierte el mezcal, observa la formación de burbujas (perlado), y según el tamaño de estas, determina si es de buena calidad o no. En los procesos modernos la homogeneización del producto se hace mediante pruebas de laboratorio que permiten dar al destilado una misma graduación alcohólica mediante diversos métodos de dilución, filtración y reposado (Salvatierra-García, 2003).

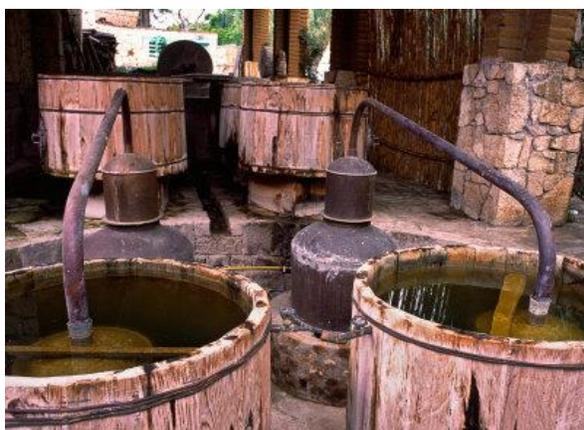


Figura 2.13. Alambiques artesanales de cobre y madera (Fotografía: DestiOaxaca).



Figura 2.14. Destiladores de acero inoxidable usados en la industria del agave (Fotografía: Tequila Professionals)

2.7. MADURACIÓN DEL MEZCAL

La maduración es un proceso opcional, el cual aporta al mezcal características sensoriales diferentes, dependiendo del tiempo de madurado, la adición de alguna sustancia durante el mismo, o el tipo de material del que está hecha la barrica. El mezcal, tanto del proceso artesanal como del industrializado, puede llevar a cabo este proceso, colocándose en barricas de roble blanco o de encino, con una capacidad de hasta 200 L (Enríquez, 2016; Escalante-Minakata, *et al.*, 2012). El tiempo de almacenamiento determina el tipo de mezcal que se obtiene:

si se envasa directamente después de la destilación, se considera mezcal blanco o joven; si se madura entre dos meses y un año, es mezcal reposado; si la maduración dura más de un año, el mezcal es considerado añejo (NOM-070-SCFI-1994). En mezclas de dos o más mezcales añejos, la edad de la bebida resultante es el promedio ponderado de las edades y volúmenes de sus componentes (Escalante-Minakata, *et al.*, 2012).

Las barricas donde se lleva a cabo la maduración deben estar en buen estado, sin contener materia indeseable o fisuras, las cuales se pueden evitar colocando piedras pequeñas con agua hasta la mitad de su capacidad, y las barricas se hacen rodar. Otro método de mantenimiento es la adición de agua hasta su totalidad, evitando que se sequen (Casiano, 2015).



Figura 2.15. Barricas de madera durante la maduración de un destilado de agave (Fotografía: Fotalia México)

2.8. ENVASADO Y ETIQUETADO DEL MEZCAL

Una vez terminada la maduración, o en el caso del mezcal blanco, terminada la destilación, el producto se envasa, proceso que puede ser manual o mecánico, y en donde se deben cumplir cinco etapas: lavado de botellas con mezcal y/o agua, filtración del producto terminado con filtros o carbón activado, llenado, taponado, y sellado (Enríquez, 2016; Colunga-

GarcíaMarín, *et al.*, 2007). El tamaño y tipo de material utilizado para la botella dependen del tipo, categoría y volumen a envasar (Enríquez, 2016). Las presentaciones existentes son de 50 mL, 250 mL, 500 mL y 750 mL, y los materiales que se ocupan para la botella son vidrio y olla de barro (Ramales, 2010).

El mezcal se debe envasar en recipientes nuevos o reciclados propios de la empresa, resistentes a las distintas etapas del proceso de fabricación y a las condiciones de almacenaje, de tal manera que no contengan o generen sustancias tóxicas u otras sustancias que alteren las propiedades físicas, químicas y sensoriales del producto (Enríquez, 2016).



Figura 2.16. Proceso de envasado manual del mezcal (Fotografía: Mezcal Benevá).



Figura 2.17. Máquina etiquetadora al término de la producción de mezcal (Fotografía: Mezcal Benevá).

CAPÍTULO III. HISTORIA DEL MEZCAL EN MÉXICO

Previo al uso del agave para la producción del mezcal, las culturas prehispánicas mesoamericanas ya lo utilizaban para obtener diversos productos: de las pencas de agave se obtenían hilos para tejer costales, tapetes, morrales, redes de pesca, cordeles; las pencas enteras se usaban para techar las casas a modo de tejado y para preparar el forro de algodón que recibía los mosaicos de plumas; la tela de las pencas (mexiote) para envolver carne y cubrir heridas; los quiotes secos se usaban como vigas o cercos; las púas como agujas o clavos para sacrificios o como dardos para jugar tiro al blanco; de las raíces se elaboraban cepillos, escobas y canastas; del jugo de maguey, además de la miel, se obtenía la bebida ritual por excelencia: el pulque (Ramírez, 1995; Lorenzo, 2007). El mezcal era desconocido por los indígenas antes de la conquista de los españoles, pero ya elaboraban bebidas fermentadas usando como materia prima maíz (tesgüino), balché (balché), ciruela (jocote), y de mayor importancia, maguey (pulque) (Walton, 1977).

Para hablar de la historia y del surgimiento del mezcal en el continente americano, es necesario revisar los usos y la domesticación del agave previos a la llegada de los españoles, pues fue durante la conquista que distintos métodos de destilación fueron presentados a los indígenas, proceso sin el cuál es imposible hablar de bebidas espirituosas en México.

3.1. EL USO DEL AGAVE EN MESOAMÉRICA PREVIO A LA CONQUISTA ESPAÑOLA

Antes del desarrollo de la agricultura, las poblaciones humanas recolectoras de las zonas áridas y semi áridas al norte del Istmo de Tehuantepec y hasta el río Gila, en Arizona, fueron atraídos al agave gracias al tamaño del quiote de la planta madura, y descubrieron que, si

lo cortaban, el jugo obtenido era dulce y comestible (Colunga-GarcíaMarín, *et al.*, 2007; Walton, 1977; Zizumbo-Villarreal y Colunga-GarcíaMarín, 2008). Después descubrieron que, al cocinar algunas partes de la planta (en hornos de piedra o de tierra), obtenían un alimento dulce y nutritivo, por lo que adoptaron como alimento básico a los tallos, las bases de las hojas, y el pedúnculo floral (Zizumbo-Villarreal y Colunga-GarcíaMarín, 2008).

El maguey fue la principal fuente de obtención de carbohidratos por parte de los pobladores de Mesoamérica, dos mil años antes de la domesticación del maíz (hace nueve mil años, aproximadamente) (García, 2007; Hernández y Hernández, 2011; Colunga-GarcíaMarín, *et al.*, 2007). Fue una de las primeras plantas cultivadas en América media (Lorenzo, 2007). Con el desarrollo de la agricultura, se comenzaron a cultivar otros alimentos, como maíz, frijol y calabaza, que terminaron por desplazar al maguey de su peso específico en la dieta, relegándolo a los tiempos de escasez (Colunga-GarcíaMarín, *et al.*, 2007; Hernández y Hernández, 2011). A pesar de ello, el agave comenzó a diversificarse y a evolucionar, debido a la selección humana con base en: el sabor de los pedúnculos florales (cantidad de azúcares, agua y saponinas); la capacidad de almacenamiento de azúcares y tamaño de la cabeza (cocimiento de la misma para su consumo); y la resistencia a plagas y enfermedades (Colunga-GarcíaMarín, *et al.*, 2007; García, 2007).

En algún punto del uso del agave (finales del Preclásico, 450 a.C.-150 d.C.), se descubrió que el jugo azucarado obtenido de la planta podía servir para generar bebidas alcohólicas fermentadas (Fournier y Mondragón, 2012; Colunga-GarcíaMarín, *et al.*, 2007). Este uso involucró nuevas selecciones de agaves con base en el éxito de la fermentación y en el sabor de la bebida, a través de la selección indirecta de asociaciones específicas de levaduras y bacterias (Colunga-GarcíaMarín, *et al.*, 2007).

El desarrollo de la agricultura en Mesoamérica provocó una reducción de las especies de agave que se mantuvieron bajo selección humana para alimento y bebidas fermentadas, pues las culturas prehispánicas comenzaron a producir diferentes bebidas alcohólicas ocupando diferentes especies de agave como materia prima (Colunga-GarcíaMarín, *et al.*, 2007; Ávila, 2010).

La bebida fermentada del aguamiel del maguey fue llamada *octli*, **“bebida ofrecida a los dioses”**, en náhuatl, actualmente conocida como pulque (Erlwein, *et al.*, 2004). En la cultura azteca recibía tres nombres: *metoctli*, **“vino de agave”**; *iztaoctli*, **“vino blanco”**; y *teoctli*, **“vino dios”** (Castro-Díaz y Guerrero-Beltrán, 2013). Pero cuando los españoles llegaron al Nuevo Mundo, al oír la palabra *poliuh-quiocli*, que **significa “pulque descompuesto o podrido”**, lo pronunciaron pulque, pensando que con esa palabra se referían a la bebida, y no a su mala calidad (Lorenzo, 2007). Tuvo gran auge y control por la cultura azteca en el siglo XIII, pues era usado en rituales religiosos, pero con la caída del imperio azteca perdió su connotación ritual (Castro-Díaz y Guerrero-Beltrán, 2013).

3.2. SURGIMIENTO, POPULARIZACIÓN E IMPORTANCIA DEL MEZCAL DURANTE LA ÉPOCA COLONIAL EN MÉXICO

Existen tres teorías sobre el origen del mezcal en la Nueva España, las cuales se basan en el uso de destiladores de diferentes orígenes en los fermentados de agave. La primera de ellas menciona que los indígenas nativos adaptaron el destilador árabe traído por los españoles; la segunda teoría establece que no fue el destilador árabe el utilizado por los nativos, sino el filipino, introducido en el continente gracias a la industria cocotera;

y la tercera teoría propone la existencia de un destilador rústico previo a la llegada de los españoles y los filipinos (Serra y Lazcano, 2006).

La difusión de la cultura del maguey y del pulque desde su núcleo original en las mesetas mesoamericanas ocurrió inmediatamente después de la conquista, en 1521, cuando los españoles comenzaron la colonización de nuevas regiones, pero aún no se comenzaban a destilar los fermentados de maguey (Hernández y Hernández, 2011; Valenzuela, *et al.*, 2008). Fue hasta la introducción de la industria cocotera que se comenzó a destilar el mosto fermentado del agave. Con base en evidencias arqueológicas, etnohistóricas, botánicas, y lingüísticas, Zizumbo-Villarreal y Colunga-GarcíaMarín (2008), propusieron que la elaboración de mezcal en México comenzó con el uso de *Agave angustifolia*, con una técnica basada en la destilación de fermentado de coco, usado por filipinos asentados en el país, y que fue aprendida y aplicada por los indígenas nativos a bebidas fermentadas previamente conocidas por ellos, sobre todo las hechas con agave.

En 1569 Álvaro de Mendaña, al regresar de sus expediciones por las Islas Solomón, llegó al puerto de Santiago de Colima y trajo con él cocos que fueron sembrados en esa tierra (de León, 2015). Con la posterior llegada en 1571 de nativos filipinos ocupados principalmente en la siembra del coco y la producción de bebidas espirituosas derivadas de esa fruta tropical, comenzó la industria cocotera en la Nueva España (Valenzuela, 2007). El primer registro de una plantación cocotera data de 1577, en la región de Cajitlán. Las bebidas espirituosas de coco eran producidas usando un método filipino de destilación, con el cual producían en Filipinas una bebida llamada lambanog (Zizumbo-Villarreal, *et al.*, 2008) (Figura 3.2).

Los destiladores filipinos podían fabricarse con materiales locales (madera bonete para la torre de destilación, olla de cobre para el condensador, penca de agave para conducir el destilado hasta una olla), y poseían una tecnología diferente a los destiladores de tipo árabe o alambiques, que involucraban el serpentín de cobre y que eran usados por los españoles (Valenzuela, *et al.*, 2008; Zizumbo-Villarreal, *et al.*, 2008; Colunga-GarcíaMarín, 2007). El producto de la destilación era tan atractivo, y los destiladores tan fáciles de elaborar, que las poblaciones indígenas comenzaron a someter las bebidas fermentadas de agave al destilador filipino (Colunga-GarcíaMarín y Zizumbo-Villarreal, 2007) (Figura 3.1).

La teoría que establece que la destilación fue dada a conocer por los filipinos y no por los españoles, está fundamentada en dos evidencias: la primera, que la autoridad española buscaba prohibir la producción de bebidas destiladas en la Nueva España pues competirían comercialmente con el brandy que importaban desde Europa, provocando que en regiones lejanas a esta autoridad, como Colima y Jalisco, se establecieran industrias de elaboración ilícita de destilados; y la segunda, el uso de la palabra *tuba*, de origen tagalo, que los filipinos usaban para referirse al vino de cocos o brandy de coco, y que se comenzó a usar gradualmente para referirse a todas las bebidas fermentadas no destiladas, desde Colima hasta Nayarit, pasando por Jalisco (Walton, 1977).



Figura 3.1. Destiladores modernos con influencia asiática, en El Tuito, Cabo Corrientes, Jalisco. (Fotografía: Valenzuela, 2008),



Figura 3.2. Destiladores modernos para producir la bebida japonesa shochu (Fotografía: TOKI).

La adaptación temprana del destilador filipino para la destilación del mosto de agave ocurrió inicialmente en las cuencas de los ríos Armería-Ayuquila, Coahuayana-Tuxpan, y Coalcomán, produciéndose los licores de agave y de coco al mismo tiempo y en el mismo espacio. Pero, como producto de las prohibiciones coloniales hacia su producción (la primera emitida en 1603), la producción de estas bebidas se difundió a las estribaciones de los volcanes de Colima (Zizumbo-Villarreal y Colunga-GarcíaMarín, 2008). Fue en esta última zona que se comenzaron a llevar a cabo la selección y el cultivo que condujeron a la domesticación y diversificación de los agaves mezcaleros, gracias a las condiciones existentes para ello: poblaciones silvestres de agave, poblaciones indígenas con tradición agrícola y el uso de bebidas fermentadas de agave, y posibilidades geográficas de evasión de las prohibiciones, además de que el destilador filipino era tan pequeño, que sólo permitía la destilación del mosto de uno o muy pocos agaves, lo que provocó la selección de ciertos tipos de agaves para la producción de destilados

(Colunga-GarcíaMarín, *et al.*, 2007; Zizumbo-Villarreal y Colunga-GarcíaMarín, 2008).

El uso de pozos subterráneos tallados en piedra o tepetate, con brocal, sellados con piedra y cubiertos con tierra, que permitieron la fermentación furtiva a temperaturas bajas y estables, y el fácil desmantelamiento de los destiladores filipinos, por poseer partes pequeñas y ligeras, fueron puntos clave para evadir a las autoridades (Zizumbo-Villarreal y Colunga-GarcíaMarín, 2008; Colunga-GarcíaMarín y Zizumbo-Villarreal, 2007).

La prohibición legal de espíritus de coco a inicios del siglo XVII, junto con un aumento en la demanda de destilados en las zonas mineras, promovió la producción de destilados de agave (vino mezcal) y su introducción en zonas más al norte (Zizumbo-Villarreal y Colunga-GarcíaMarín, 2008; Zizumbo-Villarreal, *et al.*, 2009). La primera descripción de mezcal producido en la Nueva España fue hecha por Domingo Lázaro de Arregui, un clérigo español que vivió en la región conocida como Nueva Galicia (Nayarit, Sinaloa, Zacatecas y norte de Jalisco), quien, en 1619, mencionó que los indígenas producían un líquido incoloro como agua, pero más fuerte que el aguardiente y con el sabor de éste (Walton, 1977; Zizumbo-Villarreal y Colunga-GarcíaMarín, 2008; Valenzuela, *et al.*, 2008).

La posterior difusión cultural del mezcal, tanto en el siglo XVII, como en el XVIII, se dio principalmente hacia el norte del país, y para 1643 se tienen registros de su comercialización en Jalisco (Colunga-GarcíaMarín y Zizumbo-Villarreal, 2007; Zizumbo-Villarreal y Colunga-GarcíaMarín, 2008) (Figura 3.3). Esta difusión se vio facilitada por la existencia de una ruta comercial desde Guanajuato hasta Zacatecas, previa a la llegada de los españoles (para comercializar cacao, algodón, sal, tabaco, y conchas) (Colunga-GarcíaMarín y Zizumbo-Villarreal, 2007; Zizumbo-Villarreal y Colunga-GarcíaMarín, 2008). Pero la difusión también se dio hacia

Michoacán, Guerrero y Jalisco, en el sur; y a los centros mineros de Sonora, San Luis Potosí, y Tamaulipas, con el asentamiento de los españoles en esas regiones (Colunga-GarcíaMarín y Zizumbo-Villarreal, 2007; Walton, 1977).

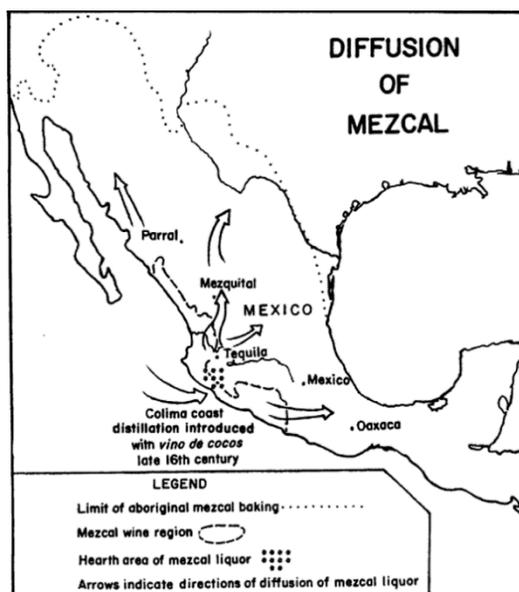


Figura 3.3. Mapa de la difusión del mezcal, desde la llegada de los filipinos al occidente de la Nueva España con lo que se implementó su método de destilación a los fermentados de agave. Las flechas representan las diferentes direcciones de difusión de la bebida (Imagen: Walton, 1977).

La producción de mezcal se convirtió en una actividad económicamente importante en México en el siglo XVII, y los esfuerzos por prohibir la producción y el consumo de destilados en el occidente fueron reconocidos como inútiles (Ávila, 2010; Walton, 1977). En la década de 1670, la autoridad española percibió las ventajas que tenía el establecer mecanismos de control y aplicación de impuestos en lugar de prohibir su uso, pues se dieron cuenta que los indígenas de la Nueva Galicia comenzaron a sustituir el consumo de pulque por el del mezcal, debido a su mayor porcentaje alcohólico (Walton, 1977); esto provocó que en el centro y occidente de la Nueva España numerosas haciendas tuvieran

como actividad principal la obtención del vino mezcal (Ávila, 2010). Los impuestos generados se destinaban para obras públicas en Guadalajara, capital de Nueva Galicia, los cuales duraron hasta que terminó la época colonial (de León, 2015). Excepto por las destilerías que producían mezcal para la industria minera, el resto de la producción estaba dispersa y era a mediana escala, para satisfacer la demanda local durante la época colonial; incluso, muchas mezcalerías operaban de manera clandestina para evitar pagar impuestos (Walton, 1977).

A Pedro Sánchez de Tagle se le asocia la introducción de la primera taberna de tequila en el occidente de México a finales del siglo XVII (1695), aunque no se ha comprobado tal aseveración (Goyas, 2011; Valenzuela, 2006). El mezcal producido en esta región comenzó a tener fama, obteniendo el nombre de la localidad de origen de su producción (Zizumbo-Villarreal y Colunga-GarcíaMarín, 2008). En lo que ahora son los estados de Jalisco, Nayarit, Colima, Aguascalientes, y una fracción Sinaloa, Zacatecas y San Luis Potosí, existió un territorio llamado Teochinchán, poblado por los chimalhuacanos, quienes elaboraban herramientas con obsidiana, a la que denominaban *tecatli*. A los hombres que trabajan este oficio se les llamaba *tecuilos*, y el poblado que ocupaban terminó por llamarse Tecuila, y después Tequila (Martínez, 2014). El origen de la palabra *tequila* tiene varios significados que provienen del náhuatl: “lugar de trabajo” (de *téquitl*, trabajo, y *tlan*, lugar) y “lugar donde se corta” (de *tequi*, cortar, y *tlan*, lugar) (El Portal de México, 2000).

El siglo XVIII representó el declive de la industria cocotera, y a mitad de este siglo ya no se producía el vino de cocos y, sumado al alto precio de los vinos y destilados importados, la demanda del vino mezcal aumentó aún más, sobre todo los producidos en Tequila, pueblo que comenzó a convertirse en el centro de producción del mezcal (de León, 2015; Ávila,

2010; Walton, 1977). A partir de 1672, a los fabricantes de vino mezcal se les permitió vender sus productos públicamente en tabernas y en tiendas, con un dictamen y certificación previos emitidos por los dos médicos de Guadalajara, y por el Real Protomedicato de España; la certificación reconocía a los mezcales como bebidas saludables y medicinales cuando eran usados con moderación (de León, 2015).

En el último tercio del siglo XVII, la Corona Española decidió utilizar los impuestos obtenidos por la comercialización del mezcal exclusivamente para cubrir los gastos de abastecimiento de agua a la ciudad de Guadalajara, adjudicando un estanco a un solo asentista. El estanco se otorgaba mediante subasta pública, y lo ganaba la persona que ofreciera mayor cantidad de dinero. Estas subastas se llevaban a cabo cada año, y para la década de 1730, el precio que los productores pagaban por ganar el estanco se duplicó. Para finales del siglo XVIII, el precio a pagar por subasta había aumentado 25 veces (de León, 2015).

El mezcal comenzó a tener competencia en ventas por parte de otras bebidas alcohólicas de origen vegetal. Para el último cuarto del siglo XVIII, se registraron 81 bebidas derivadas del agave, caña, cactus y frutas, cada una con su propio proceso de elaboración, y producidas en 91 lugares y regiones diferentes (Walton, 1977).

3.3. INDUSTRIA MEZCALERA EN MÉXICO EN LA ÉPOCA POSTCOLONIAL. CONSOLIDACIÓN DEL TEQUILA SOBRE EL MEZCAL

De la época de la Independencia al Porfiriato, se incrementó la siembra de agave para la producción de destilados en las haciendas, que trajo como consecuencia una disminución en el consumo de bebidas alcohólicas importadas y un importante ingreso económico para el país (Morales, 2008). A mediados del siglo XIX, había mayor producción de mezcal de Pinos, en San Luis Potosí, que del de Tequila, debido a la cercanía de las

zonas mineras de Zacatecas y Guanajuato con aquél estado (Walton, 1977). A finales del siglo XIX, bajo el régimen porfirista y en apoyo al desarrollo capitalista, se introdujeron en Jalisco métodos modernos de destilación (tipo árabe con serpentín) y molienda (molinos mecánicos y prensas), con lo que se inició la clara separación entre el tequila y el mezcal (Morales, 2008; Salvatierra-García, 2003; Zizumbo-Villarreal y Colunga-GarcíaMarín, 2008).

Durante este proceso de industrialización, el tequila tuvo a su favor varios factores que promovieron su consolidación como destilado de agave sobre el mezcal: un amplio desarrollo de comunicación comercial en el occidente del país antes de la introducción del ferrocarril; aislamiento del Istmo de Tehuantepec, gran productor de mezcal en esa época, de los grandes centros de consumo en el país; y la sustitución del barril por envase de vidrio para su venta (Salvatierra-García, 2003; Fundación de Investigaciones Sociales A.C., 2010). Además, Jalisco era uno de los estados con mayor población en el país que formaba un amplio mercado de consumo que dominaba el centro del occidente del país (Salvatierra-García, 2003).

El desarrollo del ferrocarril en el último cuarto del siglo XIX, y la apertura al capital extranjero a inicios del XX, provocaron un aumento del área comercial de las bebidas alcohólicas, causando que muchos pequeños productores fueran sustituidos por grandes productores de marcas comerciales, sobre todo de cerveza, bebida que se convirtió en la predilecta entre los mexicanos (Walton, 1977; Erlwein, *et al.*, 2004). La gran variedad de bebidas reportadas durante el siglo XVIII disminuyó conforme la producción de licores aumentaba, y para los primeros años del siglo XX, el licor de caña era el más popular, con 70% de producción. El mezcal sólo contribuía con el 16%, del cual, 68% era producido en Jalisco como tequila (Walton, 1977).

El proceso revolucionario desembocó en la repartición de las tierras a los campesinos, quienes las destinaron al cultivo de la milpa, provocando entre 1910 y 1940 un decremento en la oferta del maguey (Zizumbo-Villarreal, *et al.*, 2009). En la década de los cuarenta, el proceso de transnacionalización alcanzó a la industria tequilera, incrementando la demanda nacional e internacional del tequila, por lo que se integró la Cámara Regional de la Industria Tequilera, organismo que aseguraba la calidad y certificaba a ese producto (Valenzuela, 2006; Salvatierra-García, 2003). Posteriormente, por escasez de materia prima para elaborar tequila, hubo una repercusión en la elaboración y cadena de producción del mezcal, pues los productores tequileros comenzaron a ocupar los agaves para la elaboración del mezcal, en la elaboración de tequila, a pesar de ir en contra de la Cámara Regional. Lo anterior provocó que en 1949 se estableciera una Norma Oficial del Mezcal, tratando de proteger a la materia prima y al proceso de elaboración de la bebida, pero debido a su falta de especificidad, no surtió mucho efecto (Salvatierra-García, 2003).

3.4. EL MEZCAL CONTEMPORÁNEO EN MÉXICO (1990-actual)

El 17 de agosto de 1994 se publicó, en el Diario Oficial de la Federación, la Norma Oficial Mexicana (NOM-070-SCFI-1994) Bebidas-Alcohólicas-Mezcal-Especificaciones. En el mismo año se hizo la declaración de **protección de la denominación de origen "Mezcal" para la siembra, cultivo y extracción de los géneros de agave con los que se hace la bebida** (Norma Mexicana NMX-V8-1993-SCFI) (Salvatierra-García, 2003). El 12 de diciembre de 1997, se constituyó el Consejo Mexicano Regulador de la Calidad del Mezcal, A.C. (COMERCAM), con la finalidad de ser el

organismo de certificación del mezcal con base a los establecido en la NOM-070-SCFI-1994 (Consejo Regulador del Mezcal, 2015).

Actualmente en México existen tres grupos productores de mezcal: en el grupo I se encuentran las mezcalerías ubicadas generalmente en cascos de haciendas que utilizan tecnología colonial; el grupo II comprende a palenques o vinatas que siguen tradiciones familiares artesanales, trabajando solo en una temporada del año; en el grupo III están las fábricas que utilizan procesos tecnificados (Morales, *et al.*, 2007).

El mezcal ha comenzado a darse a conocer tanto a nivel nacional como internacional. Gracias a la apertura de nuevos mercados y al reforzamiento comercial, la exportación de mezcal se incrementó en 35% en 2016 (El Siglo de Durango, 2017). En el 2016, Oaxaca fue el estado con mayor producción de mezcal, con 83.5% de la producción total, y Zacatecas el segundo, con 9.3%, además de ser el único estado que produce mezcal Tipo II; el 76% del mezcal fue producido con *Agave angustifolia* como materia prima; el 79% del envasado se llevó a cabo dentro de regiones estipuladas en la Denominación de Origen del Mezcal; el 86% del mezcal envasado fue joven, el 12% reposado, y el 2% añejo, y sólo el 8% del mezcal joven fue abocado. El promedio de porcentaje de etanol (v/v) fue de 42.7% (Consejo Regulador del Mezcal, 2017).

Las bebidas espirituosas comprendieron, en el 2016, el 4% de las bebidas alcohólicas en el Mercado Nacional, siendo la cerveza la bebida mayoritaria, con 94%; del 4% de los destilados, 1.5% correspondieron al mezcal, mientras que 28% al tequila; el precio promedio por botella de mezcal de 750 mL fue de \$367.0 M.N., siendo la bebida nacional de mayor precio en el país, y el precio promedio por botella de tequila del mismo volumen, de \$163.0 M.N.; por botella de 750 mL de mezcal, el costo de producción fue de \$128.0 M.N., y se aplicó un promedio de \$128.0 M.N.

en impuestos; la producción de mezcal generó 16 000 empleos directos y más de 48 000 empleos indirectos (Consejo Regulador del Mezcal, 2017). En relación con la exportación de mezcal en el año 2016, 91.1% del mezcal exportado se envasó en el estado de Oaxaca; el 100% fue mezcal Tipo I, y de ese 100%, el 92% correspondió a mezcal joven, 7% a mezcal reposado, y 1% a mezcal añejo; del total del mezcal joven exportado, 78% fue sin abocar; el 63% del mezcal exportado fue a Estados Unidos, 6% a España, y 5% a Francia e Inglaterra; el número de marcas que exportaron su producto fue de 175. El mezcal alcanzó el 0.04% del mercado global de bebidas espirituosas. El valor estimado de la industria mezcalera fue de 2 913 mdp (Consejo Regulador del Mezcal, 2017).

CONCLUSIONES

Los mecanismos de reacción propuestos para la síntesis de los compuestos volátiles y no volátiles permiten entender la influencia que tienen la composición química del agave, la microbiota presente durante la fermentación del jugo, y las condiciones de la cocción de la piña y la destilación del mosto fermentado, en las características sensoriales del mezcal, pues estas están determinadas por la concentración y mezcla de los compuestos mencionados. Si se realizan análisis químicos y microbiológicos del agave a utilizar, del ambiente fermentativo del jugo, y de la piña al término de la hidrólisis, se puede obtener un perfil sensorial esperado para el destilado final.

El proceso tecnificado facilita la elaboración del mezcal, reduciendo tiempo y mano de obra, y aumentando volumen de producción. Aun así, el proceso artesanal perdura, pues la mayoría de las casas productoras son negocios familiares en zonas rurales del país que, por tradición, deciden no adaptar un proceso tecnificado a su mezcalería. El problema de no hacerlo es que, si la demanda de mezcal sigue en aumento, las mezcalerías que utilizan tecnología más avanzada que las mezcalerías artesanales van a terminar por ganar el terreno de venta del destilado, marginando al mezcal artesanal a consumo local.

Gobiernos de varios estados que pertenecen a la Denominación de Origen del Mezcal (como Oaxaca, Durango y Michoacán), a través de SAGARPA, han lanzado propuestas y programas de apoyo a pequeños productores de mezcal, con la idea de disminuir los precios de certificación y apoyar con el equipamiento y modernización de las mezcalerías, lo cual permitirá potencializar la comercialización del destilado artesanal.

La teoría establecida por Serra y Lazcano (2006), al analizar restos dentro de hornos de piedra encontrados en excavaciones del sitio Nativitas, Tlaxcala, y encontrar materia orgánica proveniente de agave cocido, establece que las culturas prehispánicas conocían un método rudimentario de destilación para la producción de mezcal previo a la conquista. Pero dos evidencias importantes contradicen esta teoría: la primera es, que en los equipos encontrados por estos dos autores, no hay presencia de ningún material metálico con el cual se puedan condensar los vapores obtenidos durante la ebullición del mosto fermentado; y la segunda es, que algunos productores de mezcal en Jalisco siguen ocupando el método de destilación filipino para producir raicilla, a pesar del uso casi total del alambique de cobre en el resto del país; si los indígenas hubieran estado familiarizados con la elaboración de destilados en la época precolombina, hubieran seguido utilizando sus propios métodos, al menos al inicio de la conquista, manteniendo la tradición del uso de sus propios destiladores en algunas zonas, sin cambiar abruptamente de método de destilación para adoptar el filipino o el árabe.

Con aumento del 35% en la exportación del mezcal en el 2016, se podría repetir la historia del tequila, que en pocos años (a partir de la década de 1970) su demanda aumentó considerablemente, tanto a nivel nacional, como internacional. Este aumento en la demanda provocó que la industria tequilera se tecnificara por completo, a tal grado de ocupar brotes del agave tequilero para tener un control total desde la siembra de la materia prima. Entonces, es importante que los productores de mezcal preparen estrategias de producción que eviten lo sucedido con el otro gran destilado de agave.

REFERENCIAS

- Alanís-Flores, G., González-Álvarez, M. (2010). Formas de uso de los magueyes (*Agave* spp.) en Nuevo León, México. *Revista Salud Pública y Nutrición*, 5, 287-299.
- Alcázar, E. (2011). Capacidades fermentativas y generación de volátiles de cepas de levadura aisladas en diferentes estados productores de mezcal. Tesis de Maestría. CIATEJ.
- Álvares-Ainza, M., García-Galaz, A., González-Ríos, H., Prado-Jaramillo, N., Acedo-Félix, E. (2015). Sensory analysis and minor volatile compounds of distilled from *Agave angustifolia* Haw (Bacanora). *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud*, 27/3, 22-29.
- Amaya-Delgado, L., Herrera-López, E., Arrizon, J., Arellano-Plaza, M., Gschaedler, A. (2013). Performance evaluation of *Pichia kluyveri*, *Kluyveromyces marxianus* and *Saccharomyces cerevisiae* in industrial tequila fermentation. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 29, 875-881.
- Andorrá, I., Landi, S., Mas, A., Esteve-Zarzoso, B., Guillamón, J. (2010). Effect of fermentation temperature on microbial population evolution using culture-independent and dependent techniques. *Food Research International*, 43, 773-779.
- Arellano, M., Gschaedler, A., Alcázar, M. (2012). Major volatile compounds analysis produced from mezcal fermentation using gas chromatography equipped headspace (GC-HS). En: B. Salih, Ö. Çelikbiçak, eds. *Gas chromatography in plant science, wine technology, toxicology and some specific applications*, Rijeka: InTech, 73-88.
- Arellano-Plaza, M., Gschaedler-Mathis, A., Noriega-Cisneros, R., Clemente-Guerrero, M., Manzo-Ávalos, S., González-Hernández, J.,

Saavedra-Molina, A. (2013). Respiratory capacity of the *Kluyveromyces marxianus* yeast isolated from the mezcal process during oxidative stress. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 29, 1279-1287.

- Armah, C., Mackie, A., Roy, C., Price, K., Osbourn, A., Bowyer, P., Ladha, S. (1999). The membrane-permeabilizing effect of avenacin A-1 involves the reorganization of bilayer cholesterol. *Biophysical Journal*, 76/1, 281-290.
- Arrizon, J., Fiore, C., Acosta, G., Romano, P., Gschaedler, A. (2006). Fermentation behaviour and volatile compound production by agave and grape must yeasts in high sugar *Agave tequilana* and grape must fermentations. *Antonie van Leeuwenhoek*, 89, 181-189.
- Ávila, J. (2010). Evaluación de los parámetros fisicoquímicos del mezcal de Durango para el desarrollo de un índice de calidad. Tesis de Doctorado. Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología, Campus Ciudad de México, Instituto Politécnico Nacional.
- Banerjee, N., Bhatnagar, R., Viswanathan, L. (1981). Inhibition of glycolysis by furfural in *Saccharomyces cerevisiae*. *European Journal of Applied Microbiology and Biotechnology*, 11, 226-228.
- Banguela, A., Hernández, L. (2006). Fructans: From natural sources to transgenic plants. *Biotecnología Aplicada*, 23, 202-210.
- Bautista, J., Ramírez, J. (2008). Agricultura y pluriactividad de los pequeños productores de agave en la región del mezcal, Oaxaca, México. *Agricultura Técnica en México*, 34/4, 443-451.
- Bautista, J., Smit, M. (2012). Sustentabilidad y agricultura en la "región del mezcal" de Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3/1, 5-20.
- Benítez, T., Moreno-Mateos, M., Rincón, A., Codón, A. (2004). Características de levaduras y hongos filamentosos de interés en

agroalimentación. ¿Adaptación al ambiente? Actualidad SEM, 41, 17-27.

- Bernardino-Nicanor, A., Mora-Escobedo, R., Montañez-Soto, J., Filardo-Kerstupp, S., González-Cruz, L. (2012). Microstructural differences in *Agave atrovirens* Karw leaves and pines by age effect. African Journal of Agricultural Research, 7/24, 3550-3559.
- Caballero, M., Montes, J., Silva, M. (2013). Innovación de un molino de agave cocido para la producción de mezcal. Ciencias Técnicas Agropecuarias, 22, 45-49.
- Carrillo, L. (2007). Los destilados de agave en México y su denominación de origen. Ciencias, 87, 40-49.
- Casas, A., Aguilar, C., De la Garza, H., Morlett, J., Montet, D., Rodríguez, R. (2015). Importancia de las levaduras no-*Saccharomyces* durante la fermentación de bebidas alcohólicas. Investigación y Ciencia, 65, 73-79.
- Casiano, V. (2015). Importancia Económica de la producción del Mezcal en el Estado de Oaxaca. Monografía. Departamento de Economía Agrícola, División de Ciencias Socioeconómicas, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- Castro-Díaz, A., Guerrero-Beltrán, J. (2013). El agave y sus productos. Temas Selectos de Ingeniería en Alimentos, 7, 53-61.
- Christoph, N., Bauer-Christoph, C. (2007). Flavour of spirit drinks: raw materials, fermentation, distillation, and ageing. En: R. Berger ed. *Flavours and Fragrances. Chemistry, Bioprocessing and sustainability*, Berlin: Springer, 219-240.
- Ciani, M., Comitini, F., Mannazzu, I., Domizio, P. (2010). Controlled mixed culture fermentation: a new perspective on the use of non-*Saccharomyces* yeasts in winemaking. FEMS Yeast Research, 10, 123-133.

- Colunga-GarcíaMarín, P., Zizumbo-Villarreal, D. (2007). El tequila y otros mezcales del centro-occidente de México: domesticación, diversidad y conservación del germoplasma. En: P. Colunga-GarcíaMarín, A. Larqué, L. Eguiarte, D. Zizumbo-Villarreal, eds. *En lo ancestral hay futuro: del tequila, los mezcales y otros agaves*, Yucatán: CONABIO, 113-131.
- Colunga-GarcíaMarín, P., Zizumbo-Villarreal, D., Martínez, J. (2007). Tradiciones en el aprovechamiento de los agaves mexicanos: una aportación a la protección legal y conservación de su diversidad biológica y cultural. En: P. Colunga-GarcíaMarín, A. Larqué, L. Eguiarte, D. Zizumbo-Villarreal, eds. *En lo ancestral hay futuro: del tequila, los mezcales y otros agaves*, Yucatán: CONABIO, 229-248.
- De la Torre, F. (2010). Caracterización cinético-molecular de microorganismos en mostos de mezcal. Tesis de Maestría. Centro de Biotecnología Genómica, Unidad Tamaulipas, Instituto Politécnico Nacional.
- de León, C. (2015). Vino de coco y vino mezcal, una historia comercial conjunta en la época colonial. *Letras Históricas*, 12/2, 15-36.
- De León-Rodríguez, A., Escalante-Minakata, P., Jiménez-García, M., Ordoñez-Acevedo, L., Flores, J., Barba, A. (2008). Characterization of volatile compounds from ethnic *Agave* alcohol beverages by gas chromatography-mass spectrometry. *Food Technology and Biotechnology*, 46/4, 448-455.
- De León-Rodríguez, A., González-Hernández, L., Barra, A., Escalante-Minakata, P., López, M. (2006). Characterization of volatile compounds of mezcal, an ethnic alcoholic beverage obtained from *Agave salmiana*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54, 1337-1341.

- De los Rios-Deras, G., Rutiaga-Quiñones, O., López-Miranda, J., Páez-Lerma, J., López, M., Soto-Cruz, N. (2015). Improving *Agave duranguensis* must for enhanced fermentation. C/N ratio effects on mezcal composition and sensory properties. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 14/2, 363-371.
- Díaz, L. (2009). Interacciones moleculares entre plantas y microorganismos: saponinas como defensas químicas de las plantas y su tolerancia a los microorganismos. Una revisión. *Revista de Estudios Transdisciplinarios*, 1/2, 32-55.
- Duina, A., Miller, M., Keeney, J. (2014). Budding yeast for budding geneticists; a primer on the *Saccharomyces cerevisiae* model system. *Genetics*, 197, 33-48.
- Durán, H., Pulido, J. (2007). Análisis de la molienda en el proceso de elaboración de mezcal. *Información Tecnológica*, 18/1, 47-52.
- Enríquez, J. (2016). Guía de Exportación de Mezcal a Estados Unidos. Trabajo Monográfico de Actualización. Departamento de Alimentos y Biotecnología, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Escalante-Minakata, P., Blaschek, H., Barba, A., Santos, L., De León-Rodríguez, A. (2008). Identification of yeast and bacteria involved in the mezcal fermentation of *Agave salmiana*. *Letters in Applied Microbiology*, 46, 626-630.
- Escalante-Minakata, P., Barba, A., Santos, L., De León-Rodríguez, A. (2012). Aspectos químicos y moleculares del proceso de producción del mezcal. *BioTecnología*, 16/1, 57-70.
- Fernández, C., Beaufort, S., Brandam, C., Taillandier, P. (2014). Interactions between *Kluyveromyces marxianus* and *Saccharomyces cerevisiae* in tequila must type medium fermentation. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 30, 2223-2229.

- Flores, E., Alba, J., Arrizon, J., Romano, P., Capece, A., Gschaedler, A. (2005). The uses of AFLP for detecting DNA polymorphism, genotype identification and genetic diversity between yeasts isolated from Mexican agave-distilled beverages and from grape fruit musts. *Letters in Applied Microbiology*, 41, 147-152.
- Fournier, P., Mondragón, L. (2012). Las bebidas mexicanas. Pulque, mezcal y tesgüino. *Arqueología Mexicana*, 114, 52-59.
- García, A. (2007). Los agaves de México. *Ciencias*, 87, 14-23.
- García-Herrera, E., Méndez-Gallegos, S., Talavera-Magaña, D. (2010). El género *Agave* spp. en México: principales usos de importancia socioeconómica y agroecológica. *Revista Salud Pública y Nutrición*, 5, 109-129.
- Gasmi, N., Jacques, P., Klimova, N., Guo, X., Ricciardi, A., Robert, F., Turcotte, B. (2014). The switch from fermentation to respiration in *Saccharomyces cerevisiae* is regulated by the Ert1 transcriptional activator/repressor. *Genetics*, 198, 547-560.
- Gerritsen, P., Rosales, J., Moreno, A., Martínez, L. (2011). Agave azul y el desarrollo sustentable en la cuenca baja del río Ayuquila, Costa Sur de Jalisco (1994-2004). *Región y Sociedad*, 23/51, 161-192.
- Gómez-Aíza, L., Zuria, I. (2010). Aves visitantes a las flores del maguey (*Agave salmiana*) en una zona urbana del Centro de México. *Ornitología Neotropical*, 21, 17-30.
- González-Hernández, J., Pérez, E., Damián, R., Chávez-Parga, M. (2012). Isolation, molecular and fermentative characterization of a yeast used in ethanol production during mezcal elaboration. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 11/3, 389-400.
- Goyas, R. (2011). Notas sobre la vida de Pedro Sánchez de Tagle. *Estudios de Historia Novohispana*, 45, 47-80.

- Gueguen, Y., Chemardin, P., Arnaud, A., Galzy, P. (1995). **Comparative study of extracellular and intracellular β -glucosidases** of a new strain of *Zygosaccharomyces bailii* isolated from fermenting agave juice. *Journal of Applied Bacteriology*, 78, 270-280.
- Gutiérrez, C., Serwatowski, R., Martínez, O., Cabrera, J., Saldaña, N., Flores, A. (2013). Determinación de las características de las cuchillas de corte para mecanizar la cosecha de agave. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4/1, 159-166.
- Háhuad-Marroquín, L., Pérez-Liñán, A., Resendez-Pérez, D., Moreno, C., Lara, S., Lázaro, L., Luna, C. (2010). Determinación química y estudio terapéutico de *Agave tequilana* Weber. *Revista Salud Pública y Nutrición*, 5, 254-265.
- Hernández, E. (2009). Análisis metagenómico y fisicoquímico de mostos de mezcal Tamaulipeco. Tesis de Maestría. Centro de Biotecnología Genómica, Instituto Politécnico Nacional.
- Hernández, J., Hernández, L. (2011). La vida social del agave tequilero. *Carta Económica Regional*, 108/110, 13-36.
- Hidalgo, M., Cruz, P., Pérez, L. (2010). Tecnificación del proceso de producción de mezcal, en el estado de Oaxaca, México. XIV International Congress on Project Engineering, 2137-2149.
- Jacques-Hernández, C., Herrera, O., Ramírez, J. (2007). El maguey mezcalero y la agroindustria del mezcal en Tamaulipas. En: P. Colunga-GarcíaMarín, A. Larqué, L. Eguiarte, D. Zizumbo-Villarreal, eds. *En lo ancestral hay futuro: del tequila, los mezcales y otros agaves*, Yucatán: CONABIO, 287-317.
- Lappe-Oliveras, P., Moreno-Terrazas, R., Arrizón-Gaviño, J., Herrera-Suárez, T., García-Mendoza, A., Gschaedler-Mathis, A. (2008). Yeasts associated with the production of Mexican alcoholic nondistilled and distilled *Agave* beverages. *FEMS*, 8, 1037-1052.

- Ledl, F., Schleicher, E. (1990). New aspects of Maillard reaction in foods and in the human body. *Angewandte Chemie International Edition*, 29/6, 565-706.
- López-Álvarez, A., Díaz-Pérez, A., Sosa-Aguirre, C., Macías-Rodríguez, L., Campos-García, J. (2012). Ethanol yield and volatile compound content in fermentation of agave must by *Kluyveromyces marxianus* UMPe-1 comparing with *Saccharomyces cerevisiae* baker's yeast used in tequila production. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 113/5, 614-618.
- Lorenzo, A. (2007). Las haciendas pulqueras de México. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México, Coordinación de Estudios de Posgrado.
- Martell, M., Córdova, E., López, J., Soto, N., López, M., Rutiaga, O. (2011). Effect of fermentation temperature on chemical composition of mescals made from *Agave duranguensis* juice with different native yeast genera. *African Journal of Microbiology Research*, 4/22, 3669-3676.
- Martínez, P (2014). Evaluación de la tolerancia a diversas condiciones de estrés y determinación de las diferencias a nivel molecular de cepas de *Saccharomyces cerevisiae* aisladas de palenques de mezcal en el estado de Oaxaca. Tesis de Licenciatura. Departamento de Biotecnología y Alimentos, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Martínez, A., López, A., López, P., Valdés, E., García, C., Solano, L. (2014). El hábito de beber. En: A. López, C. Magaña, eds. *Hábitos alimenticios. Psicobiología y socioantropología de la alimentación*. Ciudad de México: McGraw Hill, 111-122.
- Martínez-Aguilar, J., Peña-Álvarez, A. (2009). Characterization of five typical agave plants used to produce mezcal through their

simple lipid composition analysis by gas chromatography. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 57, 1933-1939.

- Martínez-Hernández, A., Mena-Espino, M., Herrera-Estrella, A., Martínez-Hernández, P. (2010). Construcción de bibliotecas de ADNc y análisis de expresión génica por RT-PCR en agaves. *Revista Latinoamericana de Química*, 38/1, 21-44.
- Martínez-Ramírez, S., Bautista-Sánchez, G., Pedro-Santos, E., Guerrer-Cruz, P. (2014). Crecimiento y contenido de clorofila del maguey mezcalero (*Agave potatorum* Zucc.) en policultivo con maíz y frijol. *Fitotecnia Mexicana*, 37/3, 297-304.
- Martínez-Rodríguez, J., De la Mora-Amutio, M., Plascencia-Correa, L., Audelo-Regalado, E., Guardado, F., Hernández-Sánchez, E., Peña-Ramírez, Y., Escalante, A., Beltrán-García, M., Ogura, T. (2014). Cultivable endophytic bacteria from leaf bases of *Agave tequilana* and their role as plant growth promoters. *Brazilian Journal of Microbiology*, 45/4, 1333-1339.
- Medina, G., Juárez, R., Peña, A. (2011). Identification and quantification of aldehydes in mezcal by solid phase microextraction with on-fiber derivatization-gas chromatography. *Journal of Mexican Chemical Society*, 55/2, 84-88.
- Mellado-Mojica, E., López-Pérez, M. (2013). Análisis comparativo entre jarabes de agave azul (*Agave tequilana* Wever var. azul) y otros jarabes naturales. *Agrociencia*, 47/3, 233-244.
- Molina-Guerrero, J., Botello-Álvarez, J., Estrada-Baltazar, A., Navarrete-Bolaños, J., Jiménez-Islas, H., Cárdenas-Manríquez, M., Rico-Martínez, R. (2007). Compuestos volátiles en el mezcal. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 6/1, 41-50.
- Montañez, J., Victoria, J., Flores, R., Vivar, M. (2011). Fermentación de los fructanos del *Agave tequilana* Weber Azul por *Zymomonas*

mobilis y *Saccharomyces cerevisiae* en la producción de bioetanol. Información Tecnológica, 22, 3-14.

- Montañez-Soto, J., Venegas-González, J., Vivar-Vera, M., Ramos-Ramírez, E. (2011). Extracción, caracterización y cuantificación de los fructanos contenidos en la cabeza y en las hojas del Agave tequilana Weber Azul. BIOAGRO, 22/3, 199-206.
- Morales, N., Escobar, D., Paredes, E. (2007). Estudio sobre el impacto que las modificaciones a la NOM-070 traerán a la industria del mezcal. Centro Regional Universitario Centro Norte, Universidad Autónoma de Chapingo.
- Morales, R. (2008). Ingeniería básica de una planta para la industria del mezcal en Mitla, Tlacolula, Oaxaca. Tesis de Maestría, CIDIIR, Unidad Oaxaca, Instituto Politécnico Nacional.
- Muñoz-Muñoz, A., Pichardo-Molina, J., Ramos-Ortiz, G., Barbosa-García, O., Maldonado, J., Meneses-Nava, M., Ornelas-Soto, N., Escobedo, A., López- de Alba, P. (2010). Identification and quantification of furanic compounds of tequila and mezcal using spectroscopy and chemometric methods. Journal of the Brazilian Chemical Society, 21/6, 1077-1087.
- Narváez-Zapata, J., Rojas-Herrera, R., Rodríguez-Luna, I., Larralde-Corona, C. (2010). Culture-independent analysis of lactic acid bacteria diversity associated with mezcal fermentation. Current Microbiology, 61/5, 444-450.
- Nissen, P., Nielsen, D., Arneborg, N. (2003). Viable *Saccharomyces cerevisiae* cells at high concentrations cause early growth arrest of non-*Saccharomyces* yeasts in mixed cultures by a cell-cell contact-mediated mechanism. Yeast, 20, 331-341.
- Ortega, M. (2009). Variabilidad de fenoles foliares de *Agave duranguensis*. Tesis de Licenciatura, Centro Interdisciplinario de

Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Durango, Instituto Politécnico Nacional.

- Ortiz, R. (2006). Influencia de glicina o sulfato de amonio en la fermentación de *Agave potatorum* Zucc (Tobalá). Tesis de Licenciatura, Oaxaca, Universidad Tecnológica de la Mixteca.
- Páez-Lerma, J., Arias-García, A., Rutiaga-Quiñones, O., Barrio, E., Soto-Cruz, N. (2013). Yeasts isolated from the alcoholic fermentation of *Agave duranguensis* during mezcal production. *Food Biotechnology*, 27, 342-356.
- Parra, R. (2010). Review. Bacterias ácido lácticas: papel funcional en los alimentos. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agropecuarias, 8/1, 93-105.
- Peña-Álvarez, A., Díaz, L., Medina, A., Labastida, C., Capella, S., Vera, L. (2004). Characterization of three *Agave* species by gas chromatography and solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1027, 131-136.
- Pérez, E., González-Hernández, J., Chávez-Parga, M., Cortés-Penagos, C. (2013). Caracterización fermentativa de levaduras productoras de etanol a partir de jugo de *Agave cupreata* en la elaboración de mezcal. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 12/3, 451-461.
- Pérez, E., Chávez, M., González, J. (2016). Revisión del agave y el mezcal. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 28, 148-164.
- Ramírez, J. (1995). Los magueyes, plantas de infinitos usos. CONABIO, *Biodiversitas*, 3, 1-7.
- Salvatierra-García, A. (2003). El mezcal y su importancia para el desarrollo económico del estado de Oaxaca. El sector exportador: retos y oportunidades en el mercado de la Unión Europea. Tesis de Licenciatura, Departamento de Relaciones Internacionales e

Historia, Escuela de Ciencias Sociales, Universidad de las Américas, Puebla.

- Serra, M., Lazcano, J. (2006). Mezcal yesterday and today. *Voices of Mexico*, 75, 43-47.
- Serra, M., Lazcano, J. (2009). Producción, circulación y consumo de la bebida del mezcal arqueológico y actual. En: J. Long, A. Attolini, eds. *Caminos y mercados de México*, Ciudad de México: UNAM, 169-183.
- Soto-García, E., Rutiana-Quiñones, M., López-Miranda, J., Montoya-Ayón, L., Soto-Cruz, O. (2009). Effect of fermentation temperature and must processing on process productivity and product quality in mescal fermentation. *Food Control*, 20, 207-309.
- Soto-Simental, S., Caro, I., Quinto, E., Mateo, J. (2016). Effect of cooking lamb using maguey leaves (*Agave salmiana*) on meat volatile composition. *International Food Research Journal*, 23/3, 1212-1216.
- Valenzuela, A. (2006). Agave azul. Historia por venir. *Patrimonio Cultural y Turismo-Cuadernos*, 15, 145-157.
- Valenzuela, A. (2007). Signos distintivos en los alimentos y bebidas mexicanas: una propuesta a partir de la Denominación de Origen Mezcal. *Salud Pública y Nutrición*, 8/2, 30-45.
- Valenzuela, A., Regalado, A., Mizoguchi, M. (2008). Influencia asiática en la producción de mezcal en la costa de Jalisco. El caso de la raicilla. *Análisis, México y la Cuenca del Pacífico*, 11/33, 91-116.
- Vera, A., López, M., Chávez-Servia, J. (2012). Chemical composition and volatile compounds in the artisanal fermentation of mezcal in Oaxaca, México. *African Journey of Biotechnology*, 11/78, 14344-14353.

- Vera-Guzmán, A., Guzmán-Gerónimo, R., López, M. (2010). Major and minor compounds in a mexican spirit, young mezcal coming from two *Agave* species. *Czech Journal of Food Science*, 28/2, 127-132.
- Vera-Guzmán, A., López, M., Chávez-Servia, J. (2012). Efecto del sulfato de amonio en el perfil químico del mezcal de *Agave angustifolia* Haw. *Memorias in Extenso del XXV Congreso Nacional de Química Analítica*, 489-494.
- Verdugo, A., Segura, L., Kirchmayr, M., Ramírez, P., González, A., Coria, R., Gschaedler, A. (2011). Yeast communities associated with artisanal mezcal fermentations from *Agave salmiana*. *Antonie van Leeuwenhoek*, 100, 497-506.
- Walton, M. (1977). The evolution and localization of mezcal and tequila in Mexico. *Revista Geográfica*, 85, 113-132.
- Zarco, F., Bribiesca, G. (2016). Medición y control de las variables del proceso de producción de mezcal artesanal de un modelo de negocio con dispositivos móviles. *XXI Congreso Internacional de Contaduría, Administración e Informática*, Ciudad de México.
- Zizumbo-Villarreal, D., Colunga-GarcíaMarín, P. (2008). Early coconut distillation and the origins of mezcal and tequila spirits in west-central Mexico. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 55, 493-510.
- Zizumbo-Villarreal, D., Colunga-GarcíaMarín, P., Vargas-Ponce, O., Rosales-Adame, J., Nieto-Olivares, R. (2009). Tecnología agrícola tradicional en la producción de vino mezcal (mezcal y tequila) en el sur de Jalisco, México. *Revista de Geografía Agrícola*, 42, 65-82.

Fuentes electrónicas

- **The American Oil Chemists' Society (AOCS) Lipid Library**, 2017. *Plant Fatty Acids Synthesis*. (Actualizado en 2017)
Disponible en:
<http://lipidlibrary.aocs.org/Biochemistry/content.cfm?ItemNumber=40304> [Último acceso el 09 de agosto de 2017].
- CONABIO, 2014. *El Maguey, más mexicano que el pulque*. (Actualizado el 26 de septiembre de 2016).
Disponible en:
<http://www.gob.mx/conabio/galerias/el-maguey-mas-mexicano-que-el-pulque> [Último acceso el 30 de enero de 2017].
- CONABIO, 2016. Lo hecho en México. ¿Y los mexicanos por naturaleza? (Actualizado el 20 de enero de 2017).
Disponible en:
<https://www.gob.mx/conabio/articulos/lo-hecho-en-mexico?idiom=es> [Último acceso el 30 de enero de 2017]
- Consejo Regulador del Mezcal, 2015. Mapa de las zonas con denominación de origen del mezcal (Actualizado en 2015).
Disponible en:
<http://www.crm.org.mx/> [Último acceso el 20 de marzo de 2017]
- Consejo Regulador del Mezcal, 2017. Informe 2016 (Actualizado el 2017).
Disponible en:
http://www.crm.org.mx/PDF/INF_ACTIVIDADES/INFORME2016.pdf [Último acceso el 29 de marzo de 2017].
- Delgadillo, O. (2014). Caramelización. Seminario de Química de Alimentos I, Semestre 14-II. Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México (Actualizado el 26 de marzo de 2014).

Disponible en:

http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Seminario-Caramelizacion_27353.pdf [Último acceso el 27 de marzo de 2017].

- Diario Oficial de la Federación, 1997. *NOM-070-SCFI-1994*.

Disponible en:

http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4883475&fecha=12/06/1997 [Último acceso el 30 de enero de 2017].

- El Portal de México, 2000. *Tequilas*. (Actualización sin especificar).

Disponible en:

<http://www.elportaldemexico.com/cultura/bebidas/mezcaltequila.htm> [Último acceso el 28 de marzo de 2017].

- El Siglo de Durango, 2017. *Crece 35% exportación de mezcal*. (Actualizado el 26 de marzo de 2017).

Disponible en:

<http://www.elsiglodedurango.com.mx/noticia/727358.crece-35-exportacion-de-mezcal.html> [Último acceso el 29 de marzo de 2017].

- Erlwein, S., Mira, J., Velasco, A. (2004). Proceso de elaboración del pulque, su importancia económica y concepción en Apan, Hidalgo. Instituto Nacional de Antropología e Historia. (Actualizado en 2012).

Disponible en:

<http://www.enah.edu.mx/publicaciones/documentos/32.pdf> [Último acceso el 28 de marzo de 2017].

- García-Mendoza, A. (2012). México, país de magueyes. *La Jornada del Campo*, 53. (Actualizado el 18 de enero del 2012).

Disponible en:

<http://www.jornada.unam.mx/2012/02/18/cam-pais.html> [Último acceso el 07 de marzo de 2017].

- Fundación de Investigaciones Sociales A.C., 2010. *Historia del vino mezcal*. (Actualizado el 07 de diciembre de 2010).

Disponible en:

<http://www.alcoholinformate.org.mx/saberdelmundo.cfm?id=361&catID=4> [Último acceso el 29 de marzo de 2017]

- González, A., Valenzuela, L (2002). *Saccharomyces cerevisiae*. En: E. Martínez, J. Martínez, eds. *Microbios en línea*, Cuernavaca: UNAM. (Actualizado el 05 de febrero de 2017).

Disponible en:

<http://ciber-genetica.blogspot.mx/2011/05/microbios-en-linea.html> [Último acceso el 06 de marzo de 2017].

- Hernández, M. (2015). Ingresa Puebla a la Denominación de Origen del mezcal. *El Economista*. (Actualizado el 28 de diciembre de 2015).

Disponible en:

<http://eleconomista.com.mx/estados/2015/12/28/ingresa-puebla-denominacion-origen-mezcal> [Último acceso el 20 de marzo de 2017].

- Los Amantes Mezcal, 2015. Elaboration of mezcal. Distillation (Actualizado en 2015).

Disponible en:

http://www.losamantes.com/english/elaboration_distillation.cfm [Último acceso el 22 de marzo de 2017].

- Ramales, M. (2010). El proceso de elaboración del mezcal y la importancia económica de la industria. *Eumed.net*. (Actualizado en 2010).

Disponible en:

<http://www.eumed.net/cursecon/ecolat/mx/2006/mcro-mezcal2.htm> [Último acceso el 22 de marzo de 2017].

- TodoMezcal, 2013. Tipos de agave y su distribución geográfica en México. (Actualizado en diciembre de 2013).

Disponible en:

<http://www.todomezcal.com/AgavesTec/TPM1.htm> [Último acceso el 07 de marzo de 2017].