

CONCENTRACIÓN MINERAL EN ETAPAS DEL PROCESO DE ELABORACIÓN DEL MEZCAL EN TRES ESPECIES DE *Agave*¹

[MINERAL CONCENTRATION IN MESCAL PROCESS STAGES IN THREE *Agave* SPECIES]

Vicente Arturo Velasco Velasco[§], Karen del Carmen Guzmán Sebastián, Mario Jiménez Ruíz, Judith Ruiz Luna, José Raymundo Enríquez del Valle

Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca (ITVO), Ex hacienda de Nazareno, Xoxocotlán, Oaxaca. Tel. (951) 5170444/5170788. C.P. 71230. (guzk87@hotmail.com, marbiol_20@hotmail.com, judithruizl@hotmail.com, rayenriquez@mejico.com). [§]Autor para correspondencia: (vicvel5@hotmail.com).

RESUMEN

El proceso de elaboración de mezcal artesanal incluye las etapas de cosecha de tallo o piña, horneado o cocción de la piña, molienda, fermentación y destilación. En la presente investigación se cuantificó el K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn, Na, Pb y Cd en algunas etapas de obtención de mezcal artesanal, a partir de *Agave angustifolia*, *A. karwinskii* y *A. americana*, en Santa Catarina Minas, Oaxaca durante los meses enero a abril del 2009, para evaluar el comportamiento de los minerales durante el proceso de acuerdo a la NOM-142-SSA1-1995. Las muestras obtenidas en las etapas de cosecha, horneado, fermentación, destilación y suelos donde crecieron las especies se analizaron mediante la técnica de Espectrofotometría de Absorción Atómica y de flama para determinar el contenido mineral. Los resultados obtenidos fueron en general similares en las tres especies de *Agave*, el P, K, Ca, Mg, Mn, Zn y Cd presentaron una concentración decreciente durante el proceso, su contenido disminuyó hasta 90% en el destilado. El Cu y Zn en destilados se encuentran dentro del límite establecido para su consumo. El Cu, Na, Fe, Mn y Zn del agua utilizada están dentro del límite permisible, el Cd y Pb reportan valores superiores.

Palabras clave: *Agave americana*, *Agave angustifolia* Haw, *Agave karwinskii*, mezcal artesanal, Santa Catarina Minas.

ABSTRACT

The process of making craft mezcal includes the stages of harvesting of stem or “pineapple”, baking or cooking pineapple, grinding, fermentation and distillation. In the present investigation the K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn, Na, Pb and Cd were quantified in some stages of obtaining mescal from *Agave angustifolia*, *A. karwinskii* and *A. americana*, in Santa Catarina Minas, Oaxaca during the months January to April 2009, in order to evaluate the minerals behavior during the process according to NOM-142-SSA1-1995. Samples obtained in the harvesting, baking, fermentation, distillation and soils where the species were grown were analyzed using the Atomic Absorption and Flame Spectrophotometry technique to determine the mineral content. The results were generally similar in the three species of *Agave*, the P, K, Ca, Mg, Mn, Zn and

¹ Recibido: 11 de febrero de 2017.
Aceptado: 20 de junio de 2017.

Cd presented a decreasing concentration during the process, its content decreased to 90% in the distillate. The Cu and Zn in distillates are within the limit established for their consumption. The Cu, Na, Fe, Mn and Zn of the water used are within the allowable limit, however the Cd and Pb report higher values.

Index words: *Agave americana*, *Agave angustifolia* Haw, *Agave karwinskii*, craft mescal, Santa Catarina Minas.

INTRODUCCIÓN

En el estado de Oaxaca se han identificado 23 especies y variedades de agaves cultivados y silvestres, sus tallos son empleados como materia prima para la fabricación del mezcal. Las cinco especies más importantes, destaca el maguey “Espadín” (*Agave angustifolia* Haw) al acumular casi el 60% del inventario magueyero de la Región del Mezcal (ICAPET, 1999; Chagoya, 2004), el *Agave potatorum*, y otros de nombre común, coyote (*Agave americana* L.), barril (*Agave karwinskii*) y tepextate (*Agave marmorata* Roezl.), estas últimas especies son silvestres (León *et al.*, 2013). Crecen generalmente en suelos pedregosos (García-Mendoza *et al.*, 2004), adaptadas a condiciones de aridez (Granados, 1993). El maguey tiene diversos usos, esto es, en la elaboración alimentos, bebidas, papel, calzado, medicina, hamacas, redes y en la construcción (Blomberg, 2000).

En las plantas de *Agave*, el abastecimiento de nutrientes es esencial para la eficiencia de sus procesos metabólicos y productividad (Enríquez, 2008). Estas especies son monocarpicas, que producen flores y frutos solo una vez en su vida, después mueren. Cuando una planta de agave está cercana a iniciar el desarrollo reproductivo sexual, incrementa la acumulación de carbohidratos en forma de fructanos en su tallo, que es la materia prima utilizada para la obtención del mezcal (Molina-Guerrero *et al.*, 2007). El proceso de elaboración de mezcal artesanal incluye las etapas de cosecha de piña, horneado o cocción de la piña, molienda, fermentación y destilación (Vera *et al.*, 2009; León *et al.*, 2013). El destilado resultante del proceso se compone principalmente de acetales, ácidos orgánicos, alcoholes, cetonas, aldehídos, ésteres y ácidos, que le confieren sus características organolépticas. Pero el producto final puede contener otras sustancias que no definen al producto, pero si afectan su calidad. Los procesos que incluyen la aplicación de altas temperaturas en alimentos ya sea de origen agrícola o pecuario a nivel industrial o artesanal (Moncada y Gualdrón, 2006), provocan modificaciones en el contenido de los nutrientes (Suárez *et al.*, 2004). El presente trabajo tiene el objetivo de determinar el contenido de K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn, Na, Pb y Cd en algunas etapas del proceso de obtención del mezcal artesanal, a partir de materia prima de *Agave angustifolia* (maguey espadín), *A. karwinskii* (maguey largo) y *A. americana* (maguey canastudo), y de los suelos donde crecen estas especies en la comunidad de Santa Catarina Minas, Oaxaca. Lo anterior para evaluar su comportamiento durante el proceso de elaboración de acuerdo a lo establecido en la Norma Oficial Mexicana (NOM-142-SSA1-1995).

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del área de estudio

La investigación se realizó en una destilería (palenque) en la que se produce mezcal artesanal, en la localidad de Santa Catarina Minas, Ocotlán, Oaxaca. Se localiza en la parte central del estado

de Oaxaca, en las coordenadas 16° 47' de longitud oeste y 96° 38' de latitud norte, a una altitud de 1560 m. Su distancia aproximada a la capital del estado de Oaxaca es de 40 km (INEGI, 2005).

Obtención de muestras

El proceso de elaboración de mezcal artesanal incluye la etapa de cosecha de piña, horneado o cocción de la piña, molienda, fermentación y destilación. La recolección de muestras se realizó en las etapas de cosecha, horneado, fermentación y destilación (Figura 1).

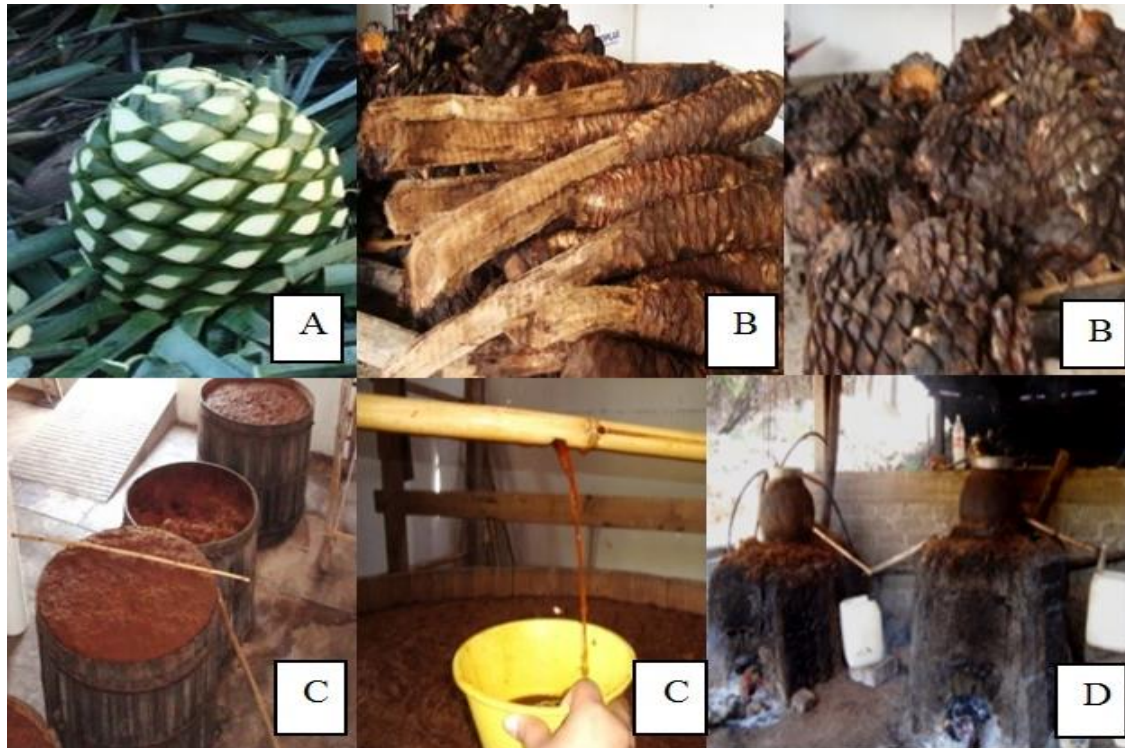


Figura 1. Obtención de muestras en las diferentes etapas del proceso de elaboración de mezcal artesanal en un palenque de Santa Catarina Minas, Ocotlán. A) Piña cruda, B) piña cocida, C) barricas de fermentación, D) destilación.

En la etapa de la cosecha se tomó una muestra compuesta de suelo de los sitios donde fueron extraídas las plantas de las tres especies de *Agave*, también en esta etapa se obtuvo la muestra de piña cruda, al extraer 100 g de la parte media. Posterior a la etapa de cocción de la piña, se tomaron las muestras de piña cocida. Las muestras de fermento se recolectaron al final de esta etapa en los cuatro puntos cardinales dentro de las tinas. La muestra de mezcal se obtuvo durante la destilación, así como el mezcal de punta, que consiste en la primera fracción de la destilación, característico por contener el mayor grado de alcohol; y la fracción de la destilación denominada mezcal de cola, que es el destilado final con menor grado de alcohol. También se obtuvo una muestra de mezcal, ajustado empíricamente (rebajado) a 45° de alcohol por el productor, al mezclar diferentes proporciones de fracciones de destilado, de tal manera que quede listo para envasar. Finalmente del pozo que abastece de agua para las actividades del proceso de elaboración de mezcal se obtuvo una muestra.

Determinación de minerales

Las determinaciones de los minerales fueron realizadas en el Laboratorio de Diagnóstico Ambiental del Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. La cuantificación de los minerales en el suelo (P, K, Na, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, Zn, Pb y Cd) se realizó siguiendo lo establecido por la "NOM-021-RECNAT-2000 (2002). El análisis de los minerales P, K, Na, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, Zn, Pb y Cd se realizaron de acuerdo al manual de procedimientos analíticos para análisis de suelos y plantas (Etchevers, 2001).

RESULTADOS

Contenido mineral de los suelos donde crecen las plantas de *Agave*

En general los suelos donde crecen el *Agave karwinskii*, *A. angustifolia* Haw y *A. americana* según la NOM- 021-RECNAT-2000, son de nivel bajo de P (Bray y Kurtz). El K y Ca se encuentran en un nivel medio para el *Agave karwinskii* y *A. americana*, y alto en *A. angustifolia* Haw. El Mg se encuentra en niveles altos para las tres especies de *Agave* analizados, están dentro del intervalo normal para los suelos (Ortega, 1987). En cuanto a los microelementos, el Cu se encuentra en un nivel adecuado para las tres especies de *Agave* al igual que el Fe, Mn, Zn y Cd (Cuadro 1).

Cuadro 1. Concentración de minerales en suelos donde crecieron las diferentes especies de *Agave*.

Especies de <i>Agave</i> en el suelo	P	Na	K	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn	Cd	Pb
	----- mg kg ⁻¹ -----										
<i>angustifolia</i>	12.30	55.20	602.17	5272.52	387.78	0.16	3.29	6.36	0.54	0.93	0.03
<i>angustifolia</i>	16.30	50.60	304.99	1589.17	764.61	0.69	20.03	14.55	1.88	1.87	0.04
<i>angustifolia</i>	16.30	89.70	160.32	1390.77	768.26	0.60	16.53	14.84	1.63	1.80	0.05
<i>karwinskii</i>	8.60	50.60	238.52	1468.93	1007.73	0.68	20.85	14.78	0.94	0.51	0.02
<i>karwinskii</i>	21.90	52.90	226.79	1452.90	689.25	0.79	18.38	14.89	1.63	0.51	0.02
<i>americana</i>	7.30	48.30	132.95	1739.47	1098.90	0.49	16.05	14.54	0.93	0.43	0.02
$\bar{x}$	13.78	57.88	277.62	2152.29	786.09	0.57	15.86	13.33	1.26	1.10	0.30
S	4.20	17.41	188.27	1671.26	275.92	0.22	7.06	3.72	0.55	0.69	0.01
C.V.	30.48	30.08	67.82	77.65	35.10	38.60	44.51	27.91	43.65	62.73	3.33

$\bar{x}$ = media; S= desviación estándar, C.V. (%)= coeficiente de variación.

Concentración de minerales en piña cruda de *Agave* (cosecha)

Al tallo y base de las hojas de las plantas de agave se le denomina piña, y ésta es la materia prima que se utiliza para la elaboración del mezcal. En las piñas seleccionadas se identificó que el elemento con mayor concentración fue el Ca (28594.0 mg kg⁻¹) en piñas de *A. karwinskii*. Estos resultados coinciden con Cruz *et al.* (2013) en investigaciones realizados con piñas de *A. karwinskii* y *A. angustifolia*. De los microelementos, en el *A. americana* se identificó la concentración más alta de Cu (16.4 mg kg⁻¹), Fe (122.4 mg kg⁻¹), Mn (47.7 mg kg⁻¹), Zn (71.5 mg kg⁻¹) y Pb (1.6 mg kg⁻¹). El *A. karwinskii* mostró los mayores valores de K, Ca y Mg; el *A. angustifolia* obtuvo la mayor concentración de Na, Cd y Pb; y el *A. americana* obtuvo el mayor contenido de P, Cu, Fe, Mn y Zn (Cuadro 2).

Cuadro 2. Contenido de minerales en muestras de piña cruda.

Agave		Piña cruda (mg kg ⁻¹)										
		P	Na	K	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn	Cd	Pb
<i>karwinskii</i>	$\bar{x}$	692.7	228.2	11046.9	28594.0	9572.5	2.9	8.1	18.4	44.4	0.70	0.42
	S	419.1	11.9	9201.1	10215.8	4663.7	0.6	14.7	14.6	12.7	0.43	0.37
<i>angustifolia</i>	$\bar{x}$	723.4	228.5	7517.3	13245.3	2414.4	3.6	29.2	15.0	53.5	1.00	1.90
	S	1124.9	36.8	6788.7	10362.8	2950.9	2.2	43.0	20.8	45.6	0.36	1.20
<i>americana</i>	$\bar{x}$	2142.5	187.8	8102.3	20721.6	4760.1	16.4	122.4	47.7	71.5	0.40	1.60

$\bar{x}$ = media de las muestras, S= desviación estándar.

Concentración mineral en piñas cocidas de Agave (cocción)

La cocción de las piñas de agave se realiza en hornos rústicos, que son excavaciones en el terreno en forma de cono truncado, de aproximadamente 6 m de diámetro superior, 5 m de diámetro inferior y 1.5 m de profundidad. Los materiales que están en contacto con la materia prima de agave durante el procedimiento de cocción podría ser un factor que aporta elementos minerales que se incorporan al agave cocido. El objetivo de someter las piñas de agave a cocción húmeda, es para hidrolizar los polisacáridos fructanos y producir azúcares reductores (Bautista *et al.*, 2001; Zamora *et al.*, 2010), principalmente fructosa, y una pequeña proporción de glucosa.

Los minerales en las piña cocidas presentaron variación en sus concentraciones. Dentro de los macroelementos, el Ca se encontró en cantidades altas en *Agave karwinskii*, *Agave angustifolia* Haw y *Agave americana* (2,026.9, 1446.5 y 1882.1 mg L⁻¹ respectivamente) y el Na en cantidades bajas para las tres especies (129.7, 206.3 y 141.9 mg L⁻¹). En las piñas cocidas se observó que de los microelementos el Cd reportó los valores más bajos en las tres especies (0.12, 0.24 y 0.07 mg L⁻¹ en *A. karwinskii*, *A. angustifolia* y *A. americana* respectivamente). El Cd mostró las variaciones más altas en *A. angustifolia* (C.V.= 182.9) y el Pb la variación más alta en *A. karwinskii* (C.V.= 104.9) y *A. americana* (C.V.= 87.9) (Cuadro 3).

Concentración en fermento de Agave (fermentación)

El maguey cocido se coloca en una superficie de concreto a nivel del piso, para someterla a molienda. La molienda es para exponer los azúcares a microorganismos que producen la fermentación del mosto de agave. El material cocido y molido es colocado en tinajas de fermentación de aproximadamente 1,200 l en volumen, fabricadas de madera. En las muestras de los fermentos obtenidos de cada especie, se observó que dentro de los macroelementos, el Mg es el elemento que presentó mayor concentración (774.2 mg L⁻¹), y el P la menor (55.3 mg L⁻¹) en el *A. karwinskii*. En el *A. angustifolia* el Ca presentó el valor más alto (684.9 mg L⁻¹), y el P presentó el mínimo (95.3 mg L⁻¹). En fermentos de *A. americana*, el Mg presentó el valor más alto (875.4 mg L⁻¹), mientras que el Na fue el valor más bajo (123.9 mg L⁻¹).

Cuadro 3. Contenido de minerales en muestras de piña cocida.

Minerales en piña cocida (mg L ⁻¹)											
----- <i>Agave karwinskii</i> -----											
	P	Na	K	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn	Cd	Pb
Min	54.9	76.9	467.9	1222.3	896.1	0.12	5.1	1.6	2.5	0.06	0.02
Max	296.4	245.9	2272.5	3523.0	2112.9	0.51	25.7	8.6	23.9	0.2	0.62
$\bar{x}$	138.7	129.7	1000.5	2026.9	1514.6	0.23	16.9	4.8	21.6	0.12	0.19
S	93.7	55.8	622.4	791.6	433.7	0.13	6.4	2.9	8.3	0.06	0.20
C.V.	67.6	43.0	62.2	39.1	28.6	55.40	38.1	60.3	38.3	48.5	104.90
----- <i>Agave angustifolia</i> Haw -----											
Min	715.6	186.5	567.0	1360.5	616.7	0.68	17.9	6.2	15.2	0.16	1.02
Max	2692.6	455.8	1355.9	3047.8	1186.9	0.68	17.9	8.9	19.1	1.82	1.68
$\bar{x}$	474.9	206.3	661.5	1446.5	684.6	0.35	9.7	3.7	7.16	0.24	0.48
S	653.0	110.3	326.4	588.5	284.7	0.19	3.9	2.2	5.2	0.44	0.45
C.V.	137.5	53.5	49.3	40.7	41.6	55.5	40.9	61.9	73.2	182.90	93.00
----- <i>Agave americana</i> -----											
Min	338.8	106.2	397.5	1610.8	1144.7	0.32	2.7	2.7	2.9	0.06	0.12
Max	833.3	173.2	704.1	2410.1	1613.8	0.7	15.8	6.6	4.6	0.08	0.74
$\bar{x}$	521.2	141.9	502.5	1882.1	1326.1	0.49	9.8	4.1	3.9	0.07	0.37
S	271.5	33.7	174.6	457.4	251.9	0.19	6.6	2.2	0.90	0.01	0.32
C.V.	52.1	23.8	34.8	24.3	19.0	39.6	67.5	54.2	23.30	16.50	87.90

$\bar{x}$ = Media de las muestras; S= Desviación estándar; C.V. (%)= Coeficiente de variación. Número de observaciones en maguey largo n= 7. Número de observaciones en maguey espadín n= 15. Número de observaciones en maguey canastudo n= 3.

Respecto a los microelementos, se observó que el Fe presentó la concentración más alta en las tres especies, esto es, 14.7 mg L⁻¹, 21.6 mg L⁻¹ y 23.6 mg L⁻¹ en *A. karwinskii*, *A. angustifolia* y *A. americana* respectivamente (Cuadro 4). Mientras que el Cu reportó las concentración más bajas con 0.15 mg L⁻¹ y 0.065 mg L⁻¹ en *A. karwinskii* y *A. americana*, respectivamente. Los elementos con mayor variabilidad fueron el Cd (C.V.= 128.6) en *A. karwinskii* y Cu en *A. karwinskii* y *A. americana* (C.V.= 182.6 y C.V.= 141.4 respectivamente).

Cuadro 4. Contenido de minerales en muestras de fermentos.

<i>Agave</i>		Minerales en Fermentos (mg L ⁻¹)										
		P	Na	K	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn	Cd	Pb
Ak	$\bar{x}$	55.3	159.9	643.2	657.9	774.2	0.15	14.7	2.3	10.9	0.57	0.16
	S	21.8	0.65	79.1	157.5	36.4	0.11	7.4	1.5	3.1	0.73	0.03
	CV	39.4	0.41	12.3	23.9	4.7	70.6	50.11	65.7	27.9	128.6	21.7
Aa	$\bar{x}$	95.3	463.8	428.6	684.9	669.9	0.19	21.6	3.2	6.3	0.165	0.22
	S	65.7	653.8	87.9	193.4	198.1	0.39	20.5	1.5	2.9	0.08	0.19
	CV	68.9	140.9	20.5	28.2	29.6	182.6	94.9	48.3	47.2	48.9	88.1
Aam	$\bar{x}$	411.9	123.9	431.9	794.9	875.4	0.06	23.6	8.9	6.7	0.17	0.24
	S	400.8	26.8	8.4	2.9	22.3	0.09	15.5	7.7	2.7	0.01	0.05
	CV	97.3	21.6	1.9	0.37	2.6	141.40	65.6	86.6	41.2	8.3	23.6

$\bar{x}$ = Media de las muestras; S= Desviación estándar; C.V. (%)= Coeficiente de variación; Ak= *Agave karwinskii* ; Aa= *Agave angustifolia* Haw ; Aam= *Agave americana*.

Concentración mineral en destilados de *Agave*

Agave karwinskii. Los mostos fermentados son colocados hasta dos terceras partes del volumen de una olla-depósito de destilación fabricada de barro cocido. El vapor que se condensa y precipita es captado por un aditamento que lo conduce al exterior hacia a un depósito para el destilado. Los destilados del *A. karwinskii* presentaron variaciones en el contenido mineral, estas incluyen los destilados de punta (inicio del destilado), mezcal (parte media del destilado) y cola (parte final de la destilación). La fracción de punta del destilado tuvo mayor concentración de P (5.03 mg L⁻¹), Na (0.57 mg L⁻¹) y Mn (0.028 mg L⁻¹) en comparación al “destilado de cola”, que presentó concentraciones menores de P (0.49 mg L⁻¹), Na (0.12 mg L⁻¹) y Mn (0.003 mg L⁻¹). La concentración de K (0.01 mg L⁻¹), Ca (0.86), Cd (0.015 mg L⁻¹) y Pb (0.14 mg L⁻¹) en el destilado de punta fue menor, en comparación al destilado de cola (K 0.09 mg L⁻¹, Ca 0.94 mg L⁻¹, Cd 0.016 mg L⁻¹ y Pb 0.76 mg L⁻¹) que presentaron concentraciones mayores. El Cu presentó concentraciones variadas que van de 0.974 mg L⁻¹ en punta, hasta 0.88 mg L⁻¹ en cola (Cuadro 5).

Cuadro 5. Contenido de minerales en destilados muestreados.

Destilados	Minerales (mg L ⁻¹)										
	<i>Agave karwinskii</i>										
	P	Na	K	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn	Cd	Pb
P [¶]	5.03	0.57	0.01	0.86	ND	0.74	ND	0.02	ND	0.01	0.14
M	3.20	0.03	0.03	0.62	ND	0.74	ND	0.00	ND	0.01	1.82
M	4.70	0.13	0.10	0.71	ND	0.74	ND	0.00	ND	0.01	1.08
C ^{¶¶}	0.49	0.12	0.09	0.94	ND	0.88	ND	0.00	ND	0.01	0.76
$\bar{x}$	3.35	0.21	0.05	0.78	-	0.775	-	0.01	-	0.01	0.95
S	2.1	0.26	0.04	0.14	-	0.07	-	0.01	-	0.00	0.69
C.V.	61.70	114.4	77.6	18.50	-	9.0	-	113.0	-	12.60	73.60
<i>Agave angustifolia</i> Haw											
P [¶]	9.63	0.00	0.042	0.55	ND	0.39	ND	0.01	ND	0.01	0.98
M	5.05	0.28	0.52	0.77	ND	0.50	ND	0.00	ND	0.01	0.62
C ^{¶¶}	0.51	0.12	0.17	1.71	ND	0.280	0.12	0.00	0.02	0.01	0.67
$\bar{x}$	5.13	0.10	0.060	0.933	-	0.41	0.01	0.00	0.00	0.01	0.67
S	4.50	0.21	0.73	0.61	-	0.15	0.03	0.00	0.00	0.00	0.40
C.V.	88.00	196.30	1214.0	65.0	-	36.40	355.8	124.30	231.0	10.50	53.10
<i>Agave americana</i>											
P [¶]	5.34	0.16	0.16	0.49	ND	0.55	ND	0.00	ND	0.01	1.01
M	0.97	0.38	0.42	1.98	ND	1.88	ND	0.17	ND	0.01	0.63
C ^{¶¶}	0.41	0.04	0.39	0.70	ND	0.84	ND	0.003	ND	0.01	6.48
$\bar{x}$	2.60	0.14	0.30	0.79	-	0.84	-	0.03	-	0.01	1.95
S	3.9	0.18	0.24	0.69	-	0.69	-	0.07	-	0.00	2.60
C.V.	149.0	117.90	76.70	87.80	-	81.50	-	214.80	-	20.30	133.50

$\bar{x}$ = Media de las muestras; S= Desviación estándar; C.V. (%)= Coeficiente de variación; ND: Nivel no detectado con el método y equipo utilizado. [¶] Se refiere al primer destilado (alto grado de alcohol). ^{¶¶} Se refiere al destilado final (grado de alcohol bajo). P= punta; M=mezcal; C=cola.

Agave angustifolia Haw. La concentración de P (9.63 mg L⁻¹) en destilado de punta fue mayor. Se reportó una concentración de Na, K, y Ca promedio de 0.10, 0.06 y 0.93 mg L⁻¹, respectivamente. Mientras que de los microelementos, el Cu, Mn, Cd y Pb se encontraron en 0.41, 0.006, 0.01 y 0.67 mg L⁻¹, respectivamente (Cuadro 5).

Agave americana. El destilado de punta presentó mayor concentración de P (5.34 mg L⁻¹) y Na (0.16 mg L⁻¹) en comparación al destilado de cola (P 0.41 mg L⁻¹, Na 0.04 mg L⁻¹). La concentración de K (0.16 mg L⁻¹), Ca (0.49 mg L⁻¹), Cu (.55 mg L⁻¹), Mn (0.00 mg L⁻¹) y Pb (1.01 mg L⁻¹) en destilado de punta fue menor en comparación al destilado de cola (0.39, 0.70, 0.84, 0.003 y 6.48 mg L⁻¹, respectivamente). El Cd presentó concentraciones de 0.014 mg L⁻¹ en punta y 0.013 mg L⁻¹ en cola (Cuadro 5).

Análisis del agua utilizada en la elaboración del mezcal

El contenido mineral del agua utilizada durante el proceso de elaboración del mezcal, presentó en promedio concentraciones de 1.61 mg L⁻¹ de P, 6.9 mg L⁻¹ de Na, 0.33 mg L⁻¹ de K, 9.31 mg L⁻¹ de Ca, 9.57 mg L⁻¹ de Mg (Cuadro 6). El contenido de Cu, Mn, Zn, Cd y Pb se identificó en concentraciones mínimas 0.008, 0.011, 0.005, 0.011 y 0.19 mg L⁻¹, respectivamente; mientras que el Fe no se detectó. Dentro de los elementos que se encuentran en la norma para agua de consumo humano NOM-127-SSA-1994 (2000), el Cu, Na, Fe, Mn, Zn, se encuentran dentro de los límites permisibles, mientras que en el Cd y Pb se encontraron valores superiores a los límites permisibles según la norma.

Cuadro 6. Contenido de minerales en muestras de agua.

Muestra	Minerales en agua (mg L ⁻¹)										
	P	Na	K	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn	Cd	Pb
1	1.61	6.84	0.35	9.81	9.80	0.007	ND	0.011	0.005	0.01	0.18
2	1.61	6.96	0.32	8.80	9.34	0.009	ND	0.012	0.005	0.013	0.20
Límites permisibles [¶]	-	200.00	-	-	-	2.00	0.30	0.15	5.00	0.005	0.01
$\bar{x}$	1.61	6.90	0.33	9.31	9.57	0.008	0	0.011	0.005	0.011	0.19

$\bar{x}$ = media de las muestras; S= desviación estándar; C.V. (%)= coeficiente de variación; ND = nivel no detectado con el método y equipo utilizado. [¶]Cantidad máxima permisible para consumo humano según la NOM-127-SSA-1994.

Cuadro 7. Comparación con los límites permisibles según la NOM-142-SSA1-1995.

Mineral	<i>A. karwinskii</i>	<i>A. angustifolia</i>	<i>A. americana</i>	Parámetros permisibles (mg L ⁻¹) (NOM-142-SSA1- 1995)
	----- mg L ⁻¹ -----			
Pb	0.95	0.676	1.95	0.5
Zn	ND	0.004	ND	1.5
Cu	0.775	0.41	0.844	2.0

ND: Nivel no detectado con el método y equipo utilizado

Comparación mineral del mezcal con la NOM-142-SSA1-1995

De los mezcales obtenidos como producto de los destilados de *A. karwinskii*, *A. angustifolia* y *A. americana*, se comparó el contenido de Pb, Zn y Cd, con los valores establecidos por la NOM-

142-SSA1-1995 (1996). El Pb rebasa los límites permisibles (0.5 mg L^{-1}) en el mezcal de las tres especies. El Cu y Zn se encuentran dentro del límite establecido para el consumo humano (Cuadro 7).

DISCUSIÓN

En el proceso de elaboración de mezcal al usar *A. karwinskii*, *A. angustifolia* y *A. americana* como materia prima, las concentraciones minerales fueron variadas en las diferentes etapas del proceso de elaboración de mezcal artesanal.

La concentración de los elementos P, K, Ca, Mg, Mn, Zn, Cd disminuyó cuando fueron sometidas a cocción (piñas cocidas) después de la cosecha (piñas crudas), disminuyó en general 51.3 hasta 92% con respecto a la piña cruda en *A. karwinskii*. Posiblemente esto se debió a altas temperaturas en la cocción, lo que hizo que los minerales se arrastraran por el vapor de agua. En esta etapa se requieren altas temperaturas (Antonio *et al.*, 2015) de aproximadamente 400°C en la zona cercana a los materiales en combustión, y de 119°C en la zona de materia prima de agave (Zamora *et al.*, 2010) durante 72 h de cocción húmeda. Algunos elementos o compuestos poseen características termosensible, experimentan pérdidas al aplicar calor y oxidación durante la cocción, y otros se pierden por procesos de lixiviación (Suarez *et al.*, 2004).

Así mismo, las concentraciones de P, K, Ca, Mg, Mn, Zn, Cd disminuyeron en el fermento con respecto a la piña cocida, esto posiblemente se debió, sin demostrarlo en este trabajo, que durante el proceso de la fermentación se agrega agua, lo cual diluye la concentración de los minerales, además, un porcentaje de estos elementos se quedan en el bagazo. Los jugos obtenidos de la molienda, son diluidos y puestos en reposo para inducir la fermentación, a través de la cual, los azúcares son transformados en alcohol (Medina *et al.*, 2011; Castro y Guerrero, 2013) por la ruta bioquímica de la glucólisis que consta en tres etapas, en la primera se forma el gliceraldehído 3-fosfato, en la segunda ocurre la reacción de óxido-reducción, y en la tercera etapa se forman los productos de la fermentación: el etanol y CO_2 (Bautista *et al.*, 2001). Durante este proceso ocurre una gran actividad enzimática, los elementos y compuestos se sintetizan (Téllez, 1988), lo cual influye en la concentración de los minerales estudiados. Al final del proceso en los destilados (mezcal), las concentraciones disminuyeron aproximadamente 90% respecto al inicio en la piña cruda.

El P, K, Ca, Mg, Mn, Zn, Cd presentaron el mismo comportamiento (disminución en todo el proceso) en el *A. angustifolia* y en el *A. americana*. Sus concentraciones disminuyeron en las piñas cocidas de 34.3 hasta 91.2% en *A. angustifolia* y de 24.4 hasta 94.5% en *A. americana* respecto a la piña cruda. De la misma manera su contenido disminuyó en el fermento respecto a la piña cocida. Al final, en la etapa de destilado la concentración de cada elemento disminuyó 99% aproximadamente en *A. angustifolia* y de 99.3 hasta 100% en *A. americana* con respecto al inicio del proceso (en piñas crudas en la cosecha).

Al inicio del proceso el Cu presentó en la piña cruda de los *Agaves* 2.9 mg kg^{-1} , 3.6 mg kg^{-1} y 16.4 mg kg^{-1} (*A. karwinskii*, *A. angustifolia* y *A. americana*, respectivamente) su concentración disminuyó en la piña cocida (0.23 , 0.35 y 0.49 mg L^{-1} respectivamente) y en el fermento (0.15 , 0.19 y 0.065 mg L^{-1} respectivamente) y al finalizar en el destilado, aumentó a 0.77 , 0.57 y 0.84 mg L^{-1} (en *A. karwinskii*, *A. angustifolia* y *A. americana*, respectivamente). El aumento de cobre

en el destilado posiblemente se debió, a que el cazo del alambique utilizado en esta etapa es de cobre, y aunado a las altas temperaturas (250 °C) hay desprendimiento de este elemento. Además, en este proceso se generan cambios fisicoquímicos en el contenido de la olla (Antonio *et al.*, 2015), el mosto es sometido a un calentamiento, evaporación y condensación (Castro y Guerrero, 2013). Tradicionalmente, estos instrumentos son utilizados en la fabricación de mezcal artesanal (Bautista, *et al.*, 2015) y cuando utilizan otros materiales, los productores argumentan que se demerita la calidad del producto final.

La concentración de Fe en piña cruda de *A. karwinskii*, *A. angustifolia* y *A. americana* inició con 8.1, 29.2, y 122.4 mg kg⁻¹, respectivamente. En la piña cocida de *A. karwinskii* aumentó a 16.9 mg L⁻¹, el aumento posiblemente se debió a la presencia de piedras en el horno que contienen Fe, ya que en el destilado no se detectó la presencia de este elemento. Este argumento coincide con lo mencionado por Camacho *et al.* (2005) en el que las formas de Fe desempeñan un papel importante en el comportamiento y en la manifestación de algunas de las propiedades del suelo, como: color, procesos óxido-reducción y estabilidad de la estructura. En este caso, el proceso de horneado implica aplicación de calor dentro de un hoyo de tierra cubierto de piedras de río. Con respecto al *A. angustifolia* y *A. americana*, el Fe disminuyó en piña cocida (9.7 y 9.8 mg L⁻¹, respectivamente), sin embargo en el fermento aumentó (21.6 mg L⁻¹ y 23.6 mg L⁻¹), quizás esto se debió a que antes de iniciar la etapa de fermentado, se trituró la piña en un molino de fierro. Al final, en el destilado el su contenido disminuyó de 0.009 mg L⁻¹ hasta un nivel no detectado.

La concentración de Pb en piña cruda fue de 0.66, 1.96 y 1.6 mg kg⁻¹ en *A. karwinskii*, *A. angustifolia* y *A. americana* respectivamente. En la etapa de destilado aumentó su concentración a 0.95 mg L⁻¹ en *A. karwinskii* y 1.95 mg L⁻¹ en *A. americana*. Este aumento de Pb se debió posiblemente al material en la que se destila el mezcal, se utiliza cazos y ollas de barro (Bautista, *et al.*, 2015). Torres *et al.* (1999) en sus estudios sobre eliminación de Plomo, argumentan que las vasijas de barro vidriadas son una fuente importante de exposición de Pb.

CONCLUSIONES

El contenido mineral de los suelos en que crecieron las plantas de agave fue variado. Los valores más bajos de P, Na, K los presentaron los suelos en que creció el *Agave americana* y los más altos fue en los suelos en que creció el *A. angustifolia* Haw. De acuerdo a la NOM- 021-RECNAT-2000, los suelos donde crecieron las tres especies de *Agave* se encuentran en un nivel medio de K y Ca; en niveles altos de Mg; en un nivel adecuado de Cu, Fe, Mn y Zn; en un nivel normal de Cd; y en un nivel bajo de P. El elemento de mayor concentración en las tres especies de *Agave* estudiadas durante todo el proceso fue el Ca. El Mg, Mn, Fe, Zn y Cd son los elementos que presentaron las concentraciones más bajas en el mezcal (destilados) hasta niveles no detectados por el método y equipo utilizado. El comportamiento de los elementos P, Na, K, Ca, Mg, Mn, Cd y Zn fue decreciente durante el proceso. Las piñas crudas cuando son sometidas a cocción a altas temperaturas (400 °C), su contenido mineral disminuye desde 50 a 92%. Y cuando sus jugos son sometidos a un proceso de fermentación y destilación para obtener una bebida alcohólica como el mezcal sus concentraciones disminuyen más del 90%. El Cu y Pb fueron los elementos que disminuyeron y posteriormente en la destilación aumentaron su concentración en *A. karwinskii* y *A. americana*. El agua utilizada durante el proceso de elaboración del mezcal cumple parcialmente los estándares establecidos, ya que el Cd y Pb se encuentran por encima de los límites permisibles.

LITERATURA CITADA

- Antonio-Bautista, J., S. Orozco-Cirilo y E. Terán-Melchor. 2015. La disminución de la producción artesanal de mezcal en la Región del mezcal de Oaxaca, México *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 6(6): 1291-1305.
- Bautista-Justo M., L. García-Oropeza, J. E. Barboza-Corona y L. A. Parra-Negrete. 2001. El *Agave tequilana* Weber y la producción de tequila. *Acta universitaria* 11(2): 26-34.
- Blomberg, L. 2000. Tequila de mezcal y pulque, lo auténtico Mexicano. Ed. Diana, S.A. de C.V., México D.F. 314 p.
- Camacho-Díaz, E., J. Ruiz-Careaga, M. Deyta-Sánchez, Y. Deyta-Sánchez y M. García-Gamboa. 2005. Contenido y distribución de las formas de hierro en algunos suelos de la Sierra Norte de Puebla. *Terra Latinoamericana* 23(2): 175-181.
- Castro-Díaz A. S. y J.A. Guerrero-Beltrán. 2013. El *Agave* y sus productos. *Temas selectos de Ingeniería de alimentos* 7(2): 53-61.
- Chagoya-Méndez, V. M. 2004. Diagnóstico de la cadena productiva del sistema producto Maguey-Mezcal. COMMAC, SAGARPA-Delegación Oaxaca, SEDAF-Gobierno del estado de Oaxaca. <http://www.oiedrus-oaxaca.gob.mx/Estudios/diagnostico/SPMM%20VERSION%FINAL.swf> (consultado: 26/02/2016).
- Chapman-Homer, D. y P. Parket F. 2000. Métodos de análisis para suelos, plantas y agua. Editorial Trillas. México. pp. 138-148.
- Cruz-García, H., J. R. Enríquez-del Valle, V. A. Velasco-Velasco, J. Ruiz-Luna, G. V. Campos-Ángeles y D. E. Aquino-García. 2013. Nutrientes y carbohidratos en plantas de *Agave angustifolia* Haw. y *Agave karwinskii* Zucc. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 6: 1161-1173.
- Enríquez-del Valle, J. R. 2008. La propagación y crecimiento de *Agaves*. Carteles Editores P.G.O. S.A De C.V. México. 46 P.
- Etchevers B, J.D. 2001. Manual de procedimientos analíticos para análisis de suelos y plantas del laboratorio de fertilidad de suelos. IRENAT. Colegio de Posgraduados. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C. México. https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=+Manual+de+procedimientos+anal%C3%ADticos+para+an%C3%A1lisis+de+suelos+y+plantas+del+laboratorio+de+fertilidad+de+suelos&author=Etchevers+B.+J.&publication_year=2001 (consultado: 26/02/2016).
- García-Mendoza, A. J., M. J. Ordóñez, M. Briones-Salas. 2004. Biodiversidad de Oaxaca. Instituto de biología, Universidad Nacional Autónoma de México-Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza-World-Wildlife Fund. México D. F. pp. 99-159.
- Granados-Sánchez, D. 1993. Los agaves en México. Universidad Autónoma Chapingo. México. pp. 31-61.
- ICAPET. 1999. Gobierno del estado de Oaxaca. Primer Censo de la Industria del Mezcal en Oaxaca. Instituto de Capacitación y Productividad para el Trabajo del Estado de Oaxaca. 40 p.
- INEGI. 2005. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Santa Catarina Minas, Oaxaca. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Información. Clave geoestadística 20368. México. http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/20/20368.pdf (consultado: 25/02/2016).
- León-Vásquez, N., G. V. Campos-Ángeles, J. Enríquez-del Valle, V. A. Velasco-Velasco, F. Marini-Zúñiga y G. Rodríguez-Ortiz. 2013. Diversidad de especies de agave en San Miguel Tilquiapam, Ocotlán, Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 6: 1185-1195.

- Medina-Valtierra, G., R. Juárez-Ciprés and A. Peña-Álvarez. 2011. Identification and quantification of aldehydes in mescal by solid phase microextraction with on-fiber derivatization–gas chromatography. *Journal of the Mexican Chemical Society* 55(2): 84-88.
- Molina-Guerrero J. A., J.E. Botello-Álvarez, A. Estrada-Baltazar, J.L. Navarrete-Bolaños, H. Jiménez-Islas, M. Cárdenas-Manríquez y R. Rico-Martínez. 2007. Compuestos volátiles en el mezcal. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 6(1): 41- 50.
- Moncada, R. L. M. y L. Gualdrón. 2006. Retención de nutrientes en la cocción, freído y horneado de tres alimentos energéticos. *Revista de Investigación* 6(2): 197-187.
- NOM-021-RECNAT-2000. 2002. Norma Oficial Mexicana. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial. Secretaría del Medio Ambiente Recursos Naturales. 73 p.
- NOM-127-SSA1-1994. 2000. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos que debe someterse el agua para su potabilización. Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud Ambiental. Secretaria de Salud. México. <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/m127ssa14.html> (consultado: 25/02/2016).
- NOM-142-SSA1-1995. 1997. Bienes y servicios. Bebidas alcohólicas. Especificaciones sanitarias. Etiquetado sanitario y comercial. Diario Oficial de la Federación. <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/142ssa15.html> (consultado: 25/02/2016).
- Suárez-Hernández, P., E. M. Rodríguez-Rodríguez y C. Díaz-Romero. 2004. Cambios en el valor nutritivo de patatas durante distintos tratamientos culinarios. *Ciencia y Tecnología Alimentaria* 4(4): 257-261.
- Téllez, M. P. 1988. El cocimiento, una etapa importante en la producción del tequila. *Bebidas Mexicanas* 7(1):19-20.
- Torres-Sánchez, L., L. López-Carrillo y C. Ríos. 1999. Eliminación del plomo por curado casero. *Salud Pública de México* 41(2): 105-108.
- Vera-Guzmán, A. M., P. A. Santiago-García y M.G. López. 2009. Compuestos volátiles aromáticos generados durante la elaboración de mezcal de *Agave angustifolia* y *Agave potatorum*. *Revista Fitotecnia Mexicana* 32(4): 273-279.
- Zamora, P., F. Juárez, R. Aguirre, P. Ortiz y H. Godínez, F. Álvarez. 2010. Variación de la concentración de azúcares y saponinas durante la cocción del maguey mezcalero potosino. *e-Gnosis* 8: 1-11.