



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

INSTITUTO DE CIENCIAS

POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES



“La Tierra no es de nosotros, nosotros somos de la Tierra”

PRESENCIA DE METALES EN MIEL DE ABEJA COMO INDICADOR AMBIENTAL EN EL ESTADO DE PUEBLA

TESIS

Que para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS AMBIENTALES

Presenta

ELMER CÓRDOVA LUIS

Director de tesis:

Dr. José Víctor Rosendo Tamariz Flores

Diciembre 2020



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
INSTITUTO DE CIENCIAS
POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES



“La Tierra no es de nosotros, nosotros somos de la Tierra”

PRESENCIA DE METALES EN MIEL DE ABEJA COMO INDICADOR AMBIENTAL EN EL ESTADO DE PUEBLA

TESIS

Que para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS AMBIENTALES

Presenta

ELMER CÓRDOVA LUIS

Comité tutorial:

Director	Dr. José Víctor Rosendo Tamariz Flores
Tutor	Dra. Rosalía del Carmen Castelan Vega
Integrante Comité Tutorial	Dr. Numa Pompilio Castro González
Integrante Comité Tutorial	Dr. Fernando Hernández Aldana
Integrante Comité Tutorial	Dra. María Elena Ramos Cassellis

Diciembre 2020



BUAP

C. Elmer Córdova Luis

Por este conducto me permito comunicarle que los miembros del jurado integrado por:

DR. NUMA POMPILIO CASTRO GONZÁLEZ PRESIDENTE
DRA. ROSALIA DEL CARMEN CASTELÁN VEGA SECRETARIO
DR. RICARDO DARÍO PEÑA MORENO PRIMER VOCAL
DRA. MARÍA ELENA RAMOS CASSELLIS SEGUNDO VOCAL
DRA. ANABELLA HANDAL SILVA PRIMER SUPLENTE

Designado para la defensa de su tesis “**Presencia de metales en miel de abeja como indicador ambiental en el estado de Puebla**” han manifestado mediante su voto que ésta cumple con los méritos suficientes para ser defendida como tesis de grado de Maestría en Ciencias Ambientales, por lo que este Posgrado le autoriza la impresión de la misma.

Sin otro asunto en lo particular, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

“Pensar bien, para vivir mejor”

H. Puebla de Z; a 03 de diciembre de 2020

Dr. Eduardo Torres Ramírez

Coordinador

Posgrado en Ciencias Ambientales

c.c.p minutarlo

Dr.ETR/melh

E-Mail: ciencias.ambientales@correo.buap.mx



Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo otorgado con la beca-tesis N° 889900 para la realización de la presente investigación.

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS.

Agradezco y dedico a mis padres; el fruto de la crianza y el amor de una familia, que ha permeado en cada letra escrita y ha visto la luz en los siguientes párrafos. Teresa Jarquín y Elmer Córdova, gracias por cada enseñanza, por hacer práctico el sentido de la responsabilidad, el compromiso, la dedicación y el amor a todo lo que hago.

A mi familia: Eduardo, Yeral y Tessa, por el tiempo que me han dedicado y la paciencia en cada sentimiento que expreso. A Jamilet y Janette, por auxiliarme durante los momentos de estrés y recordarme que no hay alegría que no desaparezca la tensión.

A Manuel, Isamar y Grecia, por hacer de mi estadía en Puebla una experiencia inolvidable, por el olor a café en las mañanas, el sabor dulce en las noches y el viento frío de cada viaje.

A Luvia, Paulina y Sandra, por tejer conmigo aquella idea universitaria inspirada por nuestros docentes. Los amigos pueden soñar tan alto quieran y avanzar a pequeños pasos juntos.

A los apicultores y sus colmenas, que son el pilar de esta investigación, gracias por la disposición y el interés de formar parte de esta investigación, en cada texto está plasmada la sabiduría de los arduos días de trabajo.

Y finalmente a cada integrante del posgrado en ciencias ambientales: mi director, mi tutores y jurados, mis docentes y administrativos, por guiarme a cada paso y enseñarme lo más valioso que poseen... la experiencia.

*“En la trama vegetal
llenándose de clorofila
se abre la flor y se enfila
como estrella natural
¡que destello espiritual
la Orquidea, Dalia y Clavel!
viene la abeja a tropel
el polen les recolecta
es la alquimista perfecta:
transforma el néctar en miel”.*

-Citlali Aguilera Lira.

ÍNDICE GENERAL

1.	Introducción.	12
2.	Planteamiento Del Problema.	14
3.	Justificación.	16
4.	Formulación Del Problema De Investigación.	18
5.	Objetivos.	18
5.1.	Objetivo General.	18
5.2.	Objetivos Especificos.	18
6.	Hipotesis.	18
7.	Marco Teórico.	19
7.1.	Abejas, Apicultura Y Miel.	19
7.1.1.	Miel.	19
7.1.2.	Origen De La Miel.	20
7.1.3.	Propiedades Físico-Químicas.	21
7.1.3.1.	Contenido Mineral	22
7.1.4.	Producción De Miel A Nivel Mundial.	24
7.1.5.	Importancia De La Apicultura En México.	26
7.1.5.1.	Económica.	26
7.1.5.2.	Social.	28
7.1.5.3.	Ambiental.	29
7.1.6.	La Apicultura Y Los Objetivos De La Agenda 2030.	31
7.2.	Contaminación Y Miel.	33
7.2.1.	Contaminación Ambiental.	33
7.2.2.	Contaminación Por Metales Pesados.	34
7.2.3.	Contaminación De La Miel.	39
7.2.3.1.	Contaminación Por El Manejo De Las Colmenas.	40
7.2.3.2.	Contaminación Por Fuentes Ambientales.	40
7.2.4.	Contaminación De La Miel Por Metales Pesados.	41
7.2.5.	Efectos De Los Metales Pesados En Las Abejas.	43
7.3.	Indicadores Ambientales.	44
7.3.1.	Abejas Como Indicadores Ambientales.	45
7.3.2.	Miel Como Indicador Ambiental.	46
7.4.	Marco Legislativo Sobre Inocuidad De La Miel.	46
7.4.1.	Marco Legislativo.	46
7.4.2.	Normas Para La Inocuidad De La Miel.	47
7.4.3.	Normas Que Establecen Limites Maximos De Metales En La Miel.	48
8.	Zona De Estudio.	49
8.1.	Región Angelópolis.	50
8.2.	Región Valle De Atlixco Y Matamoros.	52
8.3.	Región Serdán Y Valles Centrales.	53
8.4.	Región Sierra Nororiental.	53
8.5.	Región Sierra Norte.	54
9.	Metodología.	55
9.1.	Muestreo.	55
9.1.1.	Selección De Muestras.	56
9.1.2.	Colecta De Muestras.	56
9.2.	Directorio Estadístico Nacional De Unidades Económicas.	59

9.3.	Digestión De Muestras.	60
9.4.	Espectrometría De Absorción Atómica.	61
9.5.	Análisis Estadístico.....	63
9.6.	Modelo Lineal.	64
10.	Resultados Y Discusiones.	65
10.1.	Espectrometría De Absorción Atómica.	65
10.2.	Metales Presentes En La Miel.	67
10.3.	Análisis Estadísticos.	74
10.3.1.	Prueba De Normalidad.	74
10.4.	Evaluación Por Regiones.	77
10.4.1.	Aluminio.....	78
10.4.2.	Cadmio.	82
10.4.3.	Cobalto.	86
10.4.4.	Cobre.	89
10.4.5.	Cromo.....	92
10.4.6.	Hierro.	95
10.4.7.	Magnesio.	96
10.4.8.	Níquel.	100
10.4.9.	Plomo.	103
10.4.10.	Zinc.	105
10.5.	Distribución De Las Concentraciones.....	108
10.6.	Modelo Lineal.	110
10.6.1.	Aluminio.....	111
10.6.2.	Cadmio.	112
10.6.3.	Cobalto.	115
10.6.4.	Cromo.....	118
10.6.5.	Cobre.	119
10.6.6.	Hierro.	121
10.6.7.	Magnesio.	122
10.6.8.	Níquel.	124
10.6.9.	Plomo.	124
10.6.10.	Zinc.	125
11.	Conclusiones.	128
12.	Recomendaciones.	130
13.	Referencias.	131

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1.	Principales constituyentes de los azúcares en la miel.	21
Tabla 2.	Elementos determinados en el cuerpo humano y presentes en la miel.	24
Tabla 3.	Contenido mineral común en 100g de miel.	24
Tabla 4.	Principales estados productores de miel en México.	28
Tabla 5.	Metales de mayor interes presentes en el agua.	34
Tabla 6.	Elementos mayoritarios, trazas y metales pesados presentes en miel	43
Tabla 7.	Uso de la Apis mellifera como indicador ambiental: Métodos, ventajas y observaciones. .	45
Tabla 8.	Límites máximos de metales presentes en miel de abeja y otros alimentos.	49
Tabla 9.	Condiciones del equipo MARSXpress para la digestión de la matriz miel.	60

Tabla 10. Rango de concentración de las curvas por metal	62
Tabla 11. Concentraciones de metales en muestras de miel.	65
Tabla 12. Medidas de tendencia central y comparación con otras investigaciones.	68
Tabla 13. Valores de la prueba de normalidad Lilliefors para todos los metales.	75
Tabla 14. Medianas de todos los metales	78
Tabla 15. Comparaciones por pareja de Región para Al.....	79
Tabla 16. Comparaciones por pareja de Región para Cd.	83
Tabla 17. Comparaciones por pareja de Región para Co.....	87
Tabla 18. Comparaciones por pareja de Región para Cu.....	90
Tabla 19. Comparaciones por pareja de Región para Cr.....	93
Tabla 20. Comparaciones por pareja de Región para Mg.....	97
Tabla 21. Comparaciones por pareja de Región para Ni.....	101
Tabla 22. Comparaciones por pareja de Región para Pb.	104
Tabla 23. Comparaciones por pareja de Región para Zn.	106
Tabla 24. Prueba de Kruskal-Wallis para la identificación de diferencias en la distribución de las concentraciones a nivel apiario.	109
Tabla 25. Variables propuestas para el modelo lineal.	110

INDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Distribución global actual de la especie <i>Apis mellifera</i>	19
Figura 2. Producción mundial de miel para el año 2018.	25
Figura 3. Producción mundial de miel durante el periodo 1998-2018.....	25
Figura 4. Producción de miel natural: Los 10 productores principales periodo 1998-2018.....	26
Figura 5. Tendencia en la producción de miel natural en México entre 1998-2019.	26
Figura 6. Exportaciones mensuales de miel en México durante 01-01-1998 a 01-02-2020.....	27
Figura 7. Cantidad de alimentos para un desayuno.	30
Figura 8. Esquema de flujo del mecanismo simple de entrada de contaminantes en la miel.	41
Figura 9. Mecanismos y procesos influyentes en el ingreso de metales a la miel de abeja por interacción con diversos compartimentos.....	42
Figura 10. División regional del estado de Puebla	50
Figura 11. Zonas de estudio de la región Angelópolis.....	51
Figura 12. Zonas de estudio de la región Valle de Atlixco y Matamoros.	52
Figura 13. Zonas de estudio de la región Serdán y Valles Centrales.	53
Figura 14. Zonas de estudio de la región Sierra Nororiental.	54
Figura 15. Zonas de estudio de la región Sierra Norte.....	55
Figura 16. Selección de bastidores.	56
Figura 17. Ahumador utilizado para la extracción de bastidores.	57
Figura 18. Obtención de miel para muestras.	57
Figura 19. Colecta.	58
Figura 20. Muestras de miel envasadas.	58
Figura 21. Dispositivo utilizado para la obtención de coordenadas.	59
Figura 22. Digestión ácida de la matriz miel.	60
Figura 23. Comparación de muestra posterior a la digestión.	61
Figura 24. Determinación de metales pesados mediante Espectrometría de Absorción Atómica. ...	63
Figura 25. Gráficas de densidad para todos los metales.	77
Figura 26. Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes de Al.....	78
Figura 27. Cubierta de colmena con material en estado de oxidación.	81

Figura 28. Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes de Cd.....	82
Figura 29. Cuerpos de aguas cercanos al punto de producción apícola en la región Sierra Nororiental.	84
Figura 30. Influencia del relleno sanitario "Atlixco" sobre el apiario Tiradero en la región Valle de Atlixco.	86
Figura 31. Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes de Co.....	86
Figura 32. Presencia de actividades agrícolas en los principales radios de acción en la región Serdán.	88
Figura 33. Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes de Cu.....	89
Figura 34. Familia asteraceae de interés apícola en la región Valle de Atlixco.	91
Figura 35. Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes de Cr.....	92
Figura 36. Concesiones mineras en la región Sierra Nororiental cercanas a apiarios.	94
Figura 37. Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes de Fe.....	95
Figura 38. Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes de Mg.	96
Figura 39. Persea americana como especie secundaria de interés apícola en dos apiarios de la región valle de Atlixco.	98
Figura 40. Parche de floración de la familia asteraceae en el radio de acción en un apiario de la región Angelópolis.	99
Figura 41. Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes de Ni.....	100
Figura 42. Presencia de vías de comunicación terrestre en los principales radios de acción en apiarios de la región Angelópolis.	102
Figura 43. Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes de Pb.	103
Figura 44. Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes de Zn.	105
Figura 45. Presencia de actividades antrópicas no registradas ante el DENUe en los principales radios de acción de apiarios de la región Sierra Norte.	107
Figura 46. Variables relacionadas con la presencia de Al en las muestras de miel.	111
Figura 47. Gráficas básicas de diagnóstico para la validación del modelo para Al.	112
Figura 48. Variables relacionadas con la presencia de Cd en las muestras de miel.	114
Figura 49. Gráficas básicas de diagnóstico para la validación del modelo para Cd.....	115
Figura 50. Variables relacionadas con la presencia de Co en las muestras de miel.	116
Figura 51. Gráficas básicas de diagnóstico para la validación del modelo para Co.	117
Figura 52. Variable relacionada con la presencia de Cr en las muestras de miel.	118
Figura 53. Gráficas básicas de diagnóstico para la validación del modelo para Cr.	119
Figura 54. Variable relacionada con la presencia de Cu en las muestras de miel.	120
Figura 55. Gráficas básicas de diagnóstico para la validación del modelo para Cr.	121
Figura 56. Variable relacionada con la presencia de Fe en las muestras de miel.	122
Figura 57. Variable relacionada con la presencia de Mg en las muestras de miel.	123
Figura 58. Gráficas básicas de diagnóstico para la validación del modelo para Mg.....	123
Figura 59. Variable relacionad con la presencia de Pb en las muestras de miel.	124
Figura 60. Variables relacionadas con la presencia de Zn en las muestras de miel.	126
Figura 61. Gráficas básicas de diagnóstico para la validación del modelo para Zn.	127

RESUMEN

La miel de *Apis mellifera* L. tiene potencial de ser un indicador de contaminación ambiental por metales pesados a través de la determinación de su composición mineral. El origen botánico, geográfico y la presencia de actividades antropogénicas en los puntos de producción apícola son factores influyentes en el contenido de metales presentes en la miel. La miel como producto de la colmena es una herramienta eficaz y de bajo costo para el monitoreo de la perturbación de los ecosistemas por metales pesados que representan un riesgo para otros organismos, para la inocuidad alimenticia y para la apicultura como actividad social, económica y ecológica importante en el estado. En la presente investigación se determinaron Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Ni, Pb y Zn en 5 regiones del Estado de Puebla a través de la matriz miel, el objetivo del trabajo fue encontrar la relación entre el contenido de metales y las actividades antrópicas que se desarrollan en los puntos cercanos de los apiarios, considerando el principal radio de pecoreo de las abejas. Los resultados mostraron una diferencia en las concentraciones entre regiones, encontrando una mayor presencia de Cd, Cr, Cu y Mg en la región Sierra Nororiental, en cuanto al Fe, Ni, y Pb estuvieron presentes en concentraciones más altas en la región Valle de Atlixco, mientras que el Al, Co y Zn provenían de la región Serdán. Las concentraciones determinadas superan los límites máximos establecidos por normas internacionales. Se encontró una relación entre el contenido de metales y actividades antrópicas, sin embargo los modelos establecidos no fueron totalmente aceptados. Esta investigación demostró que la miel de abeja acumula metales como parte de los procesos de interacción entre las abejas y su ambiente, y puede ser utilizada como herramienta de monitoreo para la contaminación ambiental.

1. INTRODUCCIÓN.

El incremento en las concentraciones de metales en la biosfera es resultado de perturbaciones de origen antrópico en el medio ambiente o por fenómenos geológicos, es uno de los principales problemas ambientales actuales y de mayor interés científico. Las actividades antrópicas como la industria, la minería, el tráfico, o el crecimiento urbano, solo por mencionar algunos, contribuyen al aumento en las concentraciones de metales en el medio de manera constante. Este incremento afecta principalmente a los seres vivos y a quienes los consumen debido a la baja o nula reactividad de los metales en el ambiente y a su acumulación en la red trófica.

Para la mayoría de los organismos la exposición a metales, por encima de una concentración umbral, es decir concentraciones elevadas a las que actualmente se conocen que pudiesen ocasionar algún daño, resultan ser extremadamente tóxicas, el tiempo de exposición prolongado en concentraciones bajo el umbral pueden ocasionar daños en los seres vivos de igual manera.

Esta problemática ha generado una búsqueda intensa de métodos precisos, económicos, fáciles de implementar y que permitan la detección temprana de disturbios ambientales que pongan en peligro a la biodiversidad y a la salud de los seres humanos. Las especies bioindicadoras parecen ser una herramienta eficaz debido a que por sus características (sensibilidad a las perturbaciones ambientales, distribución, abundancia, dispersión, éxito reproductivo, entre otras) pueden ser usadas como estimadoras del estatus de otras especies o condiciones ambientales de interés que resultan difíciles, inconvenientes o costosas de medir directamente (González y Vallarino, 2014).

Las abejas han sido estudiadas como bioindicadores debido a que presentan movilidad extremadamente alta y se encuentra en constante interacción con todos los compartimentos ambientales: atmósfera, litosfera, hidrosfera, biosfera y antroposfera en colmenas cercanas a centros urbanos, esto permite que estén continuamente expuestas a la contaminación antrópica y natural presentes en el ambiente. Aunado a esto las abejas son especies claves en los ecosistemas y esenciales en el mantenimiento de las comunidades vegetales, ya que son los principales polinizadores de las angiospermas, e importantes por los servicios de polinización que realizan en diversos cultivos (Zamudio, 2017).

Una de las características más conocidas de las abejas es su capacidad de producción de miel, a pesar de ello solo un pequeño grupo de ellas lo hace. El género *Apis*, específicamente la especie *Apis mellifera* L. es ampliamente usada en la apicultura con la finalidad de producción de miel, polen, cera, propoleo y jalea real. Sin embargo la apicultura se encuentra actualmente amenazada por la contaminación ambiental, el cambio de uso de suelo y el cambio climático. Los metales pesados representan una fracción de la contaminación ambiental que amenaza la apicultura hoy en día; cuando los metales en el ambiente entran en contacto directo con las abejas adhiriéndose a ellas, pueden ser transportados, almacenados y concentrados en la colmena contaminando la miel y otros productos. La movilización de los metales del suelo al néctar por las plantas también es causa de la presencia de estos elementos en la miel. No obstante son las actividades antrópicas las que liberan la mayor concentración de metales al ambiente.

Ramírez *et al.*, (2014) mencionan que el uso de *A. mellifera* como bioindicador ambiental en México tiene muchas posibilidades de ser instrumentado, principalmente en regiones del país con intensa actividad agrícola, así como en regiones con gran desarrollo industrial que genera emisiones contaminantes de diversos tipos, minería y en áreas que combinen estas condiciones y requieren monitoreo permanentes.

En México se han reportado escasos estudios del uso de la miel como indicador de contaminación por metales (Modragón-Cortez *et al.*, 2013; Montiel *et al.*, 2020); en el estado de Puebla, de acuerdo al recurso de consulta disponible, no han sido reportadas investigaciones sobre la caracterización mineral de la mieles y el uso de este como indicador de contaminación ambiental.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

La contaminación ambiental es uno de los problemas más importantes que afrontan las sociedades del siglo XXI; La pérdida de calidad del aire, del recurso hídrico y de suelos disponibles para distintas actividades son ejemplos puntuales que derivan de la presencia de la contaminación en todos los compartimentos ambientales, esta problemática ha ido creciendo exponencialmente en las últimas décadas, lo que representa un grave riesgo para el funcionamiento de los ecosistemas y la salud humana (Reyes *et al.*, 2016).

La contaminación por metales pesados ha contribuido al deterioro ambiental, y aunque existen fuentes naturales de metales pesados provenientes de las rocas y los procesos geológicos, las fuentes antropogénicas liberan grandes cantidades al suelo, al agua y a la atmósfera en formas tóxicas para todos de los organismos.

Los metales pesados pueden liberarse al medio en forma gaseosa, particulada, acuosa o sólida y emanar de fuentes difusas o puntuales y son persistentes, es decir, no pueden ser creados o degradados, por lo tanto tienden a acumularse en el ambiente. Las principales fuentes antropogénicas de metales pesados en el ambiente proceden de: a) actividades agrícolas mediante la aplicación de ciertos agroquímicos (fertilizantes y pesticidas en su mayoría) y biosólidos, b) actividades metalúrgicas que incluyen la minería, la fundición y el refinado de metales, c) la producción y el transporte de energía, d) los componentes micro-electrónicos, y f) la generación y disposición de los residuos (Bradl, 2005).

En México existen reportes de la presencia de metales pesados en ríos, lagos, cultivos, suelos y aire de zonas urbanas (Covarrubias y Peña-Cabriales, 2017) que de acuerdo a sus concentraciones podrían traducirse en un potencial riesgo para la salud humana y de los ecosistemas. En el estado de Puebla diversos estudios han evidenciado la presencia de metales pesados en zonas agrícolas (Méndez-García *et al.*, 2000; Mancilla-Villa *et al.*, 2012; Castro-González *et al.*, 2018), manifiesto de la contaminación ambiental y exposición a la inocuidad alimentaria. Debido a esto es necesario evaluar la salud de los ecosistemas y la calidad ambiental, a través de métodos eficientes y que permitan la detección temprana de disturbios ambientales; la reciente aplicación de bioindicadores como herramienta para la detección de la contaminación ambiental indica ser un método además de fácil implementación (Ramírez *et al.*, 2014).

La apicultura es una actividad pecuaria importante practicada en su mayoría en zonas rurales o de periferia urbana, que mediante la crianza y el cuidado de abejas se obtienen distintos productos de interés comercial. Las abejas son organismos sensibles, de amplia distribución y de importancia ecológica viables para su uso como indicadores ambientales.

La actividad apícola en el país ha presentado retos importantes en años recientes a causa de factores como: la contaminación ambiental, el cambio de uso de suelo, el cambio climático y la caída en el precio de comercialización consecuencia de la importación de miel en los principales países compradores.

La presencia de metales pesados en miel de abeja ha sido reportada como consecuencia de la contaminación ambiental (Bogdanov, 2005). Metales como el Pb, Cd, o Cr, se han encontrado en cantidades no óptimas para el consumo humano. En México se han reportado escasas investigaciones en la detección de metales pesados en miel de abeja (Mondragón-Cortez *et al.*, 2013; Montiel *et al.*, 2020), aun siendo México uno de los principales productores y exportadores de miel en el mundo.

Actualmente en México no existen normas o parámetros que establezcan límites máximos de metales pesados en miel de abeja, y debido a que la miel es un producto de principal exportación, la apicultura en el país opta por regularse mediante estándares internacionales, donde es posible encontrar límites de referencia al menos en el caso del Pb y Cd. En cuanto a la miel que se distribuye en el país, principalmente de interés industrial y en menor medida de consumo directo no cuenta con parámetros sobre límites máximo de metales.

La investigación de metales pesados en miel como indicador no solo manifiestan en cierta medida la calidad del ambiente o el grado de perturbación en los ecosistemas por metales pesados, sino aseguran también la inocuidad de los alimentos producidos en las zonas cercanas a los apiarios, al mismo tiempo que se verifica la inocuidad de los productos de la colmena.

3. JUSTIFICACIÓN.

La contaminación ambiental por metales pesados ha ido en constante crecimiento a causa de los residuos generados por las actividades antrópicas, la acumulación, persistencia y toxicidad de estos elementos precisan de manera urgente métodos que los detecten de manera rápida y eficazmente y que además se adapten a las condiciones socio-económicas del entorno.

Dado que la miel es un recurso alimenticio dependiente de factores bióticos y abióticos, la presencia de metales pesados en ella está relacionada con su origen geográfico y botánico. Aunado a esto, la movilidad, distribución y sensibilidad de las abejas en conjunto con la importancia ecológica, social y económica de la apicultura hacen trascendente la investigación y determinación de metales en la miel.

México es uno de los principales países productores y exportadores de miel a nivel global; de acuerdo a un informe publicado por la SIAP (2019), de los colmenares mexicanos se obtienen tres de cada 100 kilogramos de miel de abeja en el mundo, siendo sus mayores importadores países de la Unión Europea. A la vez, la Unión Europea regula a través de la Comisión Europea la presencia de ciertas sustancias nocivas para el consumo humano, entre ellas los metales pesados; La legislación enfocada a la calidad físico-química de la miel contempla la limitación de la presencia de Pb (DOUE, 2015), un parámetro que la norma mexicana no contiene, y aunque por el momento solo sea considerado un metal, la tendencia apunta a la integración de otros elementos tóxicos como parte de la calidad e inocuidad de la miel que en otros asociaciones o países de forma independiente ya cuentan (MERCOSUR, 2011).

La contaminación por metales pesados en México junto con la ausencia de parámetros que regulen la presencia de ellos representa un potencial riesgo en las exportaciones de miel. Esto repercute principalmente en la calidad de vida de las zonas rurales y periferias, donde se concentra mayormente la actividad apícola.

La investigación del uso de la miel como indicador ambiental en México es escasa, no así en el resto del mundo. Si bien existen antecedentes sobre la caracterización físico-química de miel en distintas regiones del territorio mexicano, únicamente contemplan los parámetros

establecidos por la NOM-004-SAG/GAN-2018., omitiendo la presencia de metales como parte de la inocuidad alimentaria.

Ramírez *et al.*, (2014) mencionan que el uso de *A. mellifera* como bioindicador ambiental en México tiene muchas posibilidades de ser instrumentado, principalmente en regiones del país con intensa actividad agrícola, así como en regiones con gran desarrollo industrial que genera emisiones contaminantes de diversos tipos, minería y en áreas que combinen estas condiciones y requieren monitoreo permanentes.

Es importante generar en el país, conocimiento en el contexto de la aplicación de bio-indicadores así como en el uso potencial de la apicultura como indicador ambiental, específicamente en la aplicación de la miel como indicador de contaminación. Por tal motivo esta investigación proyecta determinar la concentración de metales en miel de *Apis mellifera*, relacionado con la presencia de actividades antropogénicas distintas por cada zona de estudio, con la finalidad de aportar argumentos sobre la aplicación de la abejas y sus productos como indicador de contaminación ambiental.

4. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.

¿La miel de *Apis mellifera* L. puede considerarse un indicador ambiental por la acumulación de metales en su composición, derivado de las actividades antrópicas que se desarrollan en los sitios de producción?

5. OBJETIVOS.

5.1. OBJETIVO GENERAL.

Relacionar la presencia de metales en muestras de miel de abeja (*Apis mellifera* L.) con la contaminación ambiental como resultado de las actividades antrópicas que se desarrollan en las zonas circundantes al punto de producción en distintos apiarios del estado de Puebla, para evaluar el potencial de la miel de *Apis mellifera* L. como indicador ambiental.

5.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.

- Determinar la concentración de metales totales (Al, Cd, Co, Cu, Cr, Ni, Pb, Fe, Mg y Zn) en miel de abeja en diferentes regiones del estado de Puebla a través de Espectrometría de Absorción Atómica.
- Establecer si existen diferencias significativas entre las concentraciones de los metales en miel de abeja por región.
- Efectuar un modelo para identificar las fuentes influyentes potenciales de contaminación por metales en la miel.

6. HIPÓTESIS.

La presencia de metales en miel de abeja se encuentra relacionada con la presencia de actividades antrópicas en los radios de acción de los apiarios, desempeñando el papel de indicador en los ecosistemas.

7. MARCO TEÓRICO.

7.1. ABEJAS, APICULTURA Y MIEL.

La *Apis mellifera* L. es una abeja de la tribu Apini, del género *Apis*, que se encuentra dentro de la subfamilia Apinae al igual que la Meliponini (subfamilia con especies nativas en México), ambas especies pertenecen a la familia Apidae, una de las 7 familias descritas por Michener (2007). La especie *Apis mellifera* se caracteriza principalmente por su alto grado de sociabilidad al vivir en colmenas y tener un orden jerárquico establecido, también por ser la especie con mayor distribución global (Figura 1), consecuencia de la apicultura, y esencialmente a su alta producción de recursos en la colmena, mayoritariamente miel, cera, propóleo y jalea real.

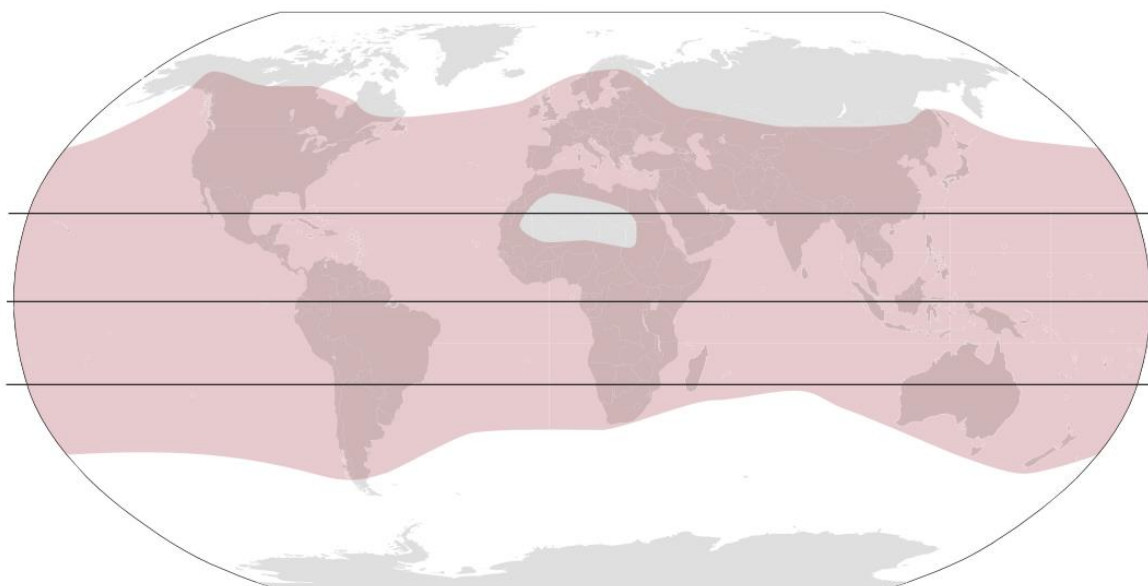


Figura 1. Distribución global actual de la especie *Apis mellifera*.
Fuente: Arnold *et al.*, 2018.

7.1.1. MIEL.

La miel es una sustancia natural dulce producida por algunas especies de abejas, principalmente el género *Apis*, y en mayor volumen de producción la especie *Apis mellifera* L., a partir del néctar de las flores y de otras secreciones extra florales. Su consistencia puede ser fluida, viscosa, total o parcialmente cristalizada, varía en un rango de color blanco a ámbar oscuro y con sabores y olores distintos de acuerdo al origen geográfico y botánico de procedencia.

Existen pequeñas variantes en la definición conceptual de miel, no obstante la definición más difundida es establecida por la Comisión CODEX ALIMENTARIUS o “Código Alimentario”, en su norma CODEX-STAN-012-1981. La cual menciona que se entiende por miel a la sustancia dulce natural producida por abejas obreras a partir del néctar de las flores o de secreciones de partes vivas de plantas o de excreciones de insectos succionadores de plantas que quedan sobre partes vivas de plantas, que las abejas recogen, transforman y combinan con sustancias específicas propias, y almacenan y dejan en el panal para que madure y añeje.

En México la NMX-F-036-NORMEX-2006. MIEL DE ABEJA. ESPECIFICACIONES. Define a la miel como la sustancia dulce producida por las abejas a partir del néctar de las flores o de exudaciones de otras partes vivas de las plantas o presentes en ellas, que dichas abejas recogen, transforman y almacenan después en sus panales; de los cuales se extrae el producto, sin ninguna adición.

7.1.2. ORIGEN DE LA MIEL.

La miel es dependiente de los factores bióticos y abióticos de su entorno; por ello las características que esta tenga estará influenciada por el origen geográfico y botánico, es decir por la zona de establecimiento de las colmenas y por las especies vegetales a las que las abejas recurran en busca de néctar y polen. Generalmente la miel es clasificada en base a su origen botánico, dividiéndola en miel floral (proveniente del néctar) y miel de mielada o mielato (proveniente de la ligamaza o de secreciones de insectos), aunque esta clasificación en México sea casi inexistente.

De acuerdo a Jean-Prost y Le-Conte. (2007) la producción de miel comienza cuando las abejas obreras inician a pecorear, esto significa que abandonan la colmena en busca de néctar y polen con el fin de obtener recursos para la colmena, otros recursos también son colectados durante el pecoreo de la abejas aunque en menor cantidad. Regularmente las abejas buscan las fuentes más cercanas de néctar y polen que se traducen en un mínimo gasto de energía, sin embargo cuando no existen organismos vegetales de interés (plantas melíferas) o la cantidad de flora nectarífera es insuficiente incrementan su rango de vuelo, en condiciones aptas se registran distancias de aproximadamente 3 kilómetros, el incremento de rango de vuelo en situaciones de escasas puede llegar a ser hasta 10 km.

Al libar el néctar las abejas almacenan este líquido en un compartimento especial llamado buchemelario, para posteriormente retornar a la colmena y regurgitar la sustancia un par de veces descomponiendo la mayor cantidad de azúcares en azúcares simples: fructosa y glucosa, mediante enzimas propias de su sistema digestivo y ser depositadas en celdillas, donde pasaran algunos días en deshidratación hasta encontrar un punto óptimo y ser operculada.

El volumen de miel producido en una colmena dependerá del tamaño de su población y en gran medida de la disponibilidad de los organismos vegetales melíferos, así como de la cantidad de néctar libada por las obreras.

7.1.3. PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS.

La miel es esencialmente una solución de agua altamente concentrada de dos carbohidratos: fructosa y glucosa, con pequeñas cantidades de entre al menos otros 22 a 25 azúcares más complejos (tabla 1). Muchas otras sustancias también se encuentran en la miel, pero los azúcares son, por mucho, los componentes principales, por encima del 65% de su composición total. Algunos de estos componentes minoritarios son: proteínas, enzimas, aminoácidos, ácidos orgánicos, vitaminas, polen, compuestos fenólicos y minerales. (White y Doner, 1980; Ulloa *et al.*, 2010).

Tabla 1. Principales constituyentes de los azúcares en la miel.

Monosacáridos	Disacáridos	Trisacáridos	Sacáridos complejos
Fructosa	Gentibiosa	Centosa	Isomaltopentosa
Glucosa	Isomaltosa	Eriosa	Isomaltotetraosa
	Maltosa	Isomaltotriosa	
	Maltulosa	Isopanosa	
	Nigerosa	Laminaritriosa	
	Palatinosa	Maltotriosa	
	Sacarosa	Melezitosa	
	Turalosa	Panosa	

Fuente: Ulloa *et al.*, 2010.

El contenido aparente de azúcares reductores es una de las principales propiedades físico-químicas de la miel y por lo tanto un parámetro de calidad. Ulloa *et al.* (2010), considera a

los componentes minoritarios de suma importancia en la caracterización de la miel, por lo tanto también son valoradas las siguientes propiedades:

Contenido de humedad. Está mayormente influenciado por los factores climático-ambientales del entorno y por el contenido de humedad en el néctar. Cuando la miel se encuentra madura el contenido de humedad deberá estar por debajo del 18.5%, cantidades elevadas de humedad pueden ocasionar fermentación en la miel en presencia de levaduras osmofílicas. El contenido de humedad en la miel influye en su viscosidad, peso específico y color.

Proteínas y aminoácidos. La cantidad de proteínas y aminoácidos en la miel es de aproximadamente 0.5% un porcentaje pequeño pero influyente en el color. Los principales aminoácidos libres en la miel son la prolina, el ácido glutámico, la alanina, la fenilalanina, la tirosina, la leucina y la isoleucina. El mayor porcentaje de proteína es ocasionado por el contenido de nitrógeno.

Los ácidos orgánicos y el pH. La presencia de ácidos orgánicos en la miel proporcionan en este un nivel bajo en el pH (3.5 a 5.5), el principal ácido orgánico presente en la miel es el ácido glucónico, otros ácidos que pueden encontrarse en cantidades menores son el fórmico, acético, butírico, láctico, oxálico, succínico, tartárico, maléico, pirúvico, piroglutámico, α -cetoglutámico, glicólico, cítrico, málico. La presencia de los ácidos en la miel le proporcionan cierta acidez que combinada con el peróxido de hidrogeno liberada por acción enzimática, provocan una gran estabilidad, conservándola así por mucho tiempo.

Conductividad eléctrica. Este parámetro está relacionado con la cantidad de sales minerales, ácidos orgánicos y proteínas presentes en la miel. Es regularmente usado como un factor para establecer el origen geográfico. El rango establecido para la conductividad eléctrica en la miel es de 0.60 a 2.17 mS/cm.

7.1.3.1. CONTENIDO MINERAL

El contenido mineral en la miel es dependiente de su origen botánico y geográfico, es decir, se encuentra influenciado por la composición química del néctar que varía según las diferentes fuentes botánicas involucradas en la formación de miel, el cual depende de la

absorción de sales minerales presentes en el suelo a través de las raíces que se mueven hasta la savia y luego se bombea al néctar y al polen, así como de las condiciones climáticas, de los minerales en el medio ambiente y del material recolectado por las abejas durante el pecoreo. El contenido es altamente variable y relativamente bajo de acuerdo a la composición total de la miel, el rango de minerales presentes oscila entre 0.02 y 1% en mieles florales, aunque es mayormente usual encontrar un rango de 0.02 y 0.03%, mientras que la miel de mielato se acerca o supera el 1% (White y Doner, 1980; Ulloa *et al.*, 2010; De-Melo *et al.*, 2017).

Es un factor importante de calidad determinada por el porcentaje de cenizas mediante un proceso de calcinación con valor límite máximo permisible de 0.60%, está relacionada con otros parámetros físico-químicos como: pH, conductividad eléctrica y color, en cuanto al último de estos el porcentaje será mayor en relación a un color más oscuro. En ella se determina la cantidad en porcentaje de “sales minerales” o “sustancias minerales” presentes en la miel respecto su peso, no obstante Huidobro y Simal, (1984) discuten textualmente:

“Por lo que respecta al concepto de sustancias minerales que en todos ellos se hacen equivalentes a los componentes inorgánicos tras la incineración, no parece acertada la coincidencia de estos términos por cuanto pueden aparecer sustancias minerales procedentes de la calcinación de la materia orgánica o transformación de las sustancias minerales existentes”.

Por lo tanto hay que dejar claro que al referirse al contenido mineral se incluyen únicamente los elementos inorgánicos presentes en la miel. Desde el punto de vista nutricional la definición del concepto mineral se adapta a lo establecido ahora; Los minerales son sustancias sólidas inorgánicas naturales en la biosfera, están formados por procesos geológicos y son esenciales para la regulación de las rutas metabólicas en el cuerpo vivo, se dividen en 3 grupos en función de los requisitos corporales y se encuentran presentes en la miel en contenidos mayoritarios y minoritarios (tabla 2), tanto sus concentraciones difieren en los tipos y cantidades dependiendo del origen botánico y geográfico (Solayman *et al.*, 2016):

Tabla 2. Elementos determinados en el cuerpo humano y presentes en la miel.

		<i>Determinados según su concentración</i>		
		Principales	Oligoelementos*	Ultra-trazas*
contenidos en miel	Mayoritarios	Na, K, Ca, Mg, P, S, Cl	-	-
	Minoritarios	-	Fe, I, Zn, Se, Cu, Mn, Cr, Mo, Co, Ni*	Al*, As*, Ba, Bi, B, Cd*, Hg*, Pb*, Rb, Sb, Sm, Sn, Sr, Tl

Nota: *Algunos elementos dentro de las categorías *Oligoelementos* y *Ultra-traza* son considerados “posiblemente esenciales o indispensables”. Fuente: Elaboración propia a partir de datos recuperado de Solayman *et al.* (2016).

Por lo discutido anteriormente y conforme a datos publicados por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2019), el rango en los contenidos de los minerales comúnmente presentes en miel de abeja son:

Tabla 3. Contenido mineral común en 100g de miel.

Elemento	Rango (mg)
Sodio	1.6-17
Calcio	3-31
Potasio	4-3500
Magnesio	0.7-13
Fosforo	2-15
Zinc	0.05-2
Cobre	0.02-0.06
Hierro	0.03-4
Manganeso	0.02-2
Cromo	0.01-0.3
Selenio	0.002-0.01

Fuente: FAO, 2019.

7.1.4. PRODUCCIÓN DE MIEL A NIVEL MUNDIAL.

De acuerdo a los datos publicados por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, la producción total mundial de miel para el año 2018, fue de 1,850, 868 toneladas, siendo el continente asiático el mayor productor, seguido de Europa, y

en tercer lugar América con una generación de 355,835 toneladas de miel natural, el cual representa el 19.2% de la producción total (FAOSTAT, 2020).

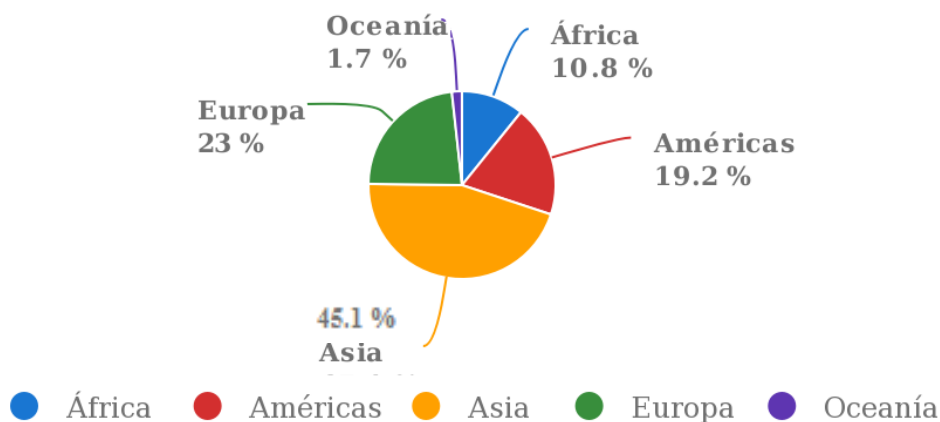


Figura 2. Producción mundial de miel para el año 2018.
Fuente: FAOSTAT, 2019.

La región asiática ha liderado la producción de miel desde hace más de 20 años, en cuanto al continente americano este no ha superado el 25% y en la última década su producción ha caído bajo el 20%.

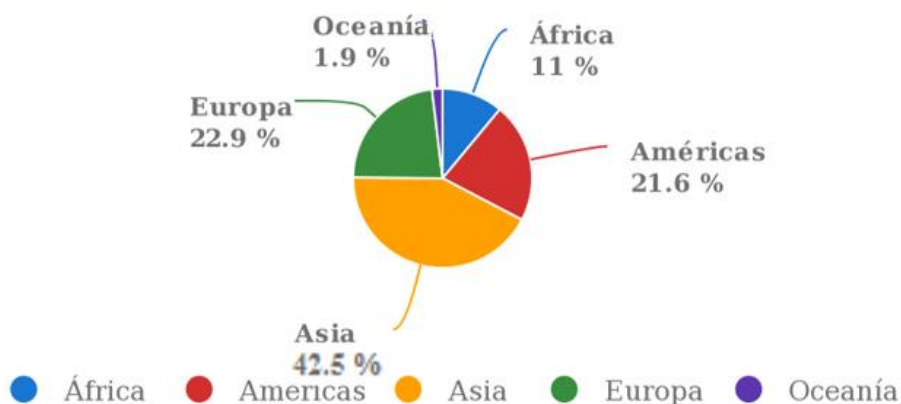


Figura 3. Producción mundial de miel durante el periodo 1998-2018.
Fuente: FAOSTAT, 2020.

China es el principal país productor a nivel mundial, y otras cuatro naciones más pertenecientes a Asia se encuentran dentro de los 10 principales países productores, por su parte América se encuentra representada por 3 países, entre ellos México.

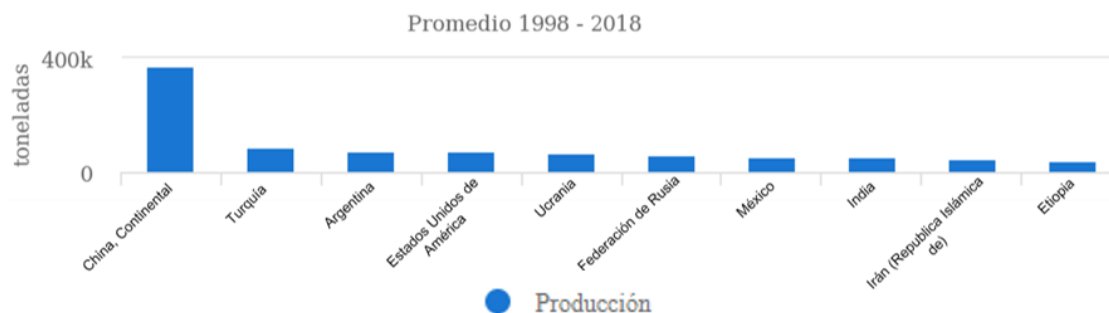


Figura 4. Producción de miel natural: Los 10 productores principales periodo 1998-2018.
Fuente: FAOSTAT, 2020.

7.1.5. IMPORTANCIA DE LA APICULTURA EN MÉXICO.

La apicultura es una actividad global, practicada en casi todo el mundo gracias a la diversidad de especies y a la amplia distribución del género *Apis*, en México tiene una enorme importancia socioeconómica y ecológica, y es considerada una de las principales actividades pecuarias generadoras de divisas según el organismo de Fidecomiso de Fondo Compartido (2016), perteneciente a la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (AGRICULTURA).

7.1.5.1. ECONÓMICA.

En las últimas dos décadas, México ha sido en promedio el 7° productor de miel a nivel mundial con una generación media de 57,428 toneladas por año (figura 5). Para el año 2019 la producción nacional alcanzó las 61,985 T, 6.1% más que el promedio de los últimos 10 años según AGRICULTURA (2020), lo cual lo convertiría en el 4° exportador ese mismo año.

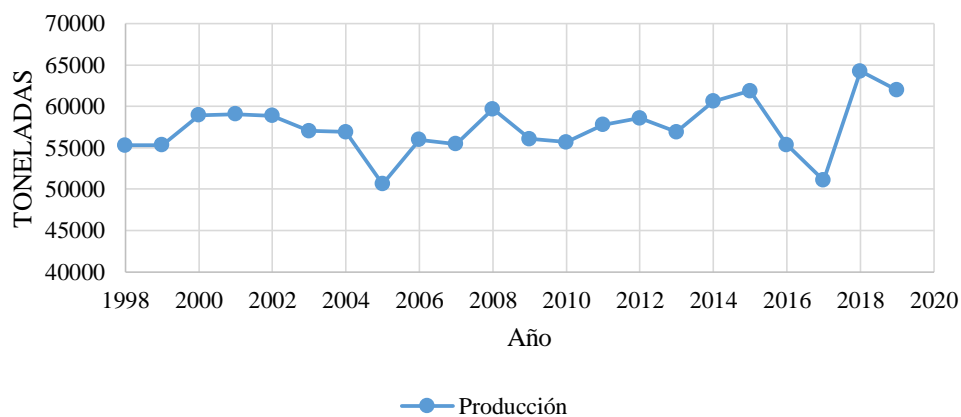


Figura 5. Tendencia en la producción de miel natural en México entre los años 1998-2019.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos recuperados de FAOSTAT, (2020) y SIAP, (2020).

La alta producción de miel en el territorio nacional se ve reflejada en su demanda exterior, puesto que en promedio es el 3° país exportador con una media de 29, 043 ton/año (1998 a 2017) solo por detrás de China y Argentina (FAOSTAT, 2020), siendo sus principales importadores Alemania, Estados Unidos, Reino Unido, Arabia Saudita, Suiza y Bélgica, además de Japón, Países Bajos, Francia, España y Dinamarca en menores cantidades (SIAP, 2019). La exportación de miel mexicana genera grandes ingresos al sector agropecuario, solo para el mes de Mayo de 2015, las ventas alcanzaron un valor de 28,730.0 miles de dólares. Es importante destacar el comportamiento de las exportaciones de este producto que fluctúan de acuerdo a las temporadas de producción y cosecha, mostrando picos entre los meses de abril-julio de cada año, y marcados descensos en las exportaciones en los meses de agosto-noviembre, que refleja las épocas de mayor floración en las principales entidades productoras y el periodo inmediato a la mayor producción y extracción de miel respectivamente (SIE API, 2020).

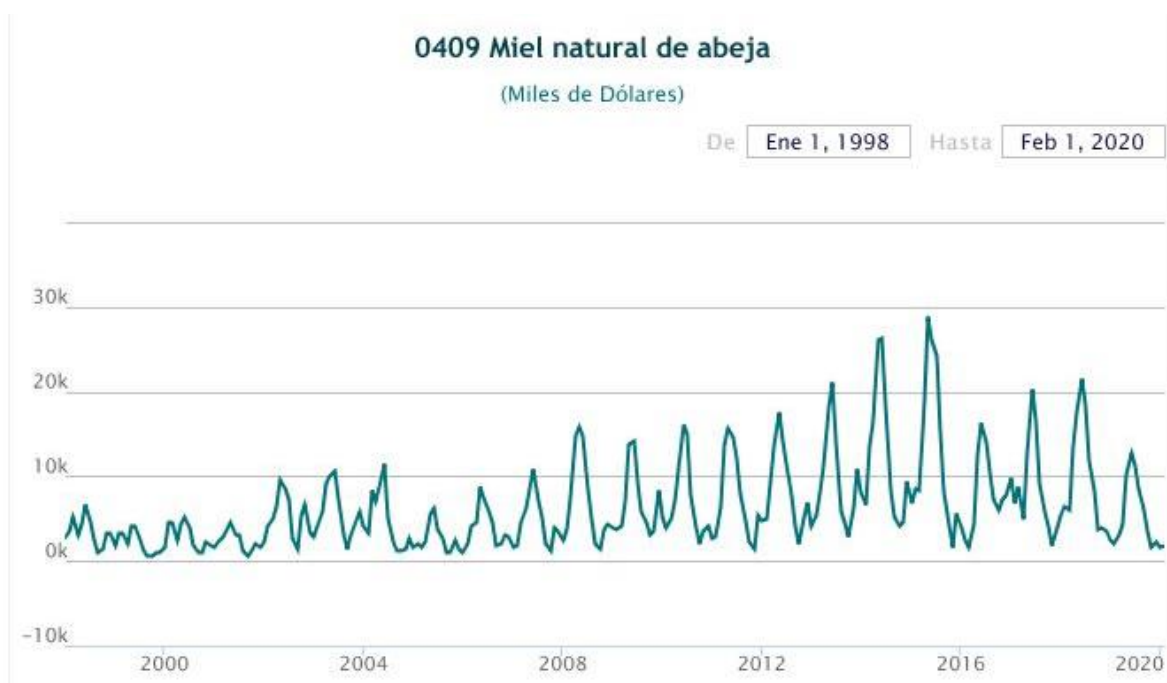


Figura 6. Exportaciones mensuales de miel en México durante el periodo 01-01-1998 a 01-02-2020.
Fuente: SIE API, 2020

En lo que respecta a la producción nacional, durante el periodo 2003-2019, la producción total de miel se concentró principalmente en 10 estados, con un 77% de las 976,343.77

toneladas generadas en los 17 años. Las 3 entidades con mayor generación de miel fueron: Yucatán, Campeche y Jalisco. El estado de Puebla ocupa el 8° lugar produciendo en promedio 2, 807 toneladas al año, aportando aproximadamente el 5% de acumulado total (SIAP, 2020).

Tabla 4. Principales estados productores de miel en México.

ESTADO	TOTAL (Ton)	PROMEDIO (Ton)	POSICIÓN
Yucatán	15,1287.31	8,899.25	1
Campeche	11,4820.63	6,754.15	2
Jalisco	98,733.35	5,807.84	3
Veracruz	79,116.70	4,653.92	4
Chiapas	76,085.21	4,475.60	5
Oaxaca	59,876.46	3,522.14	6
Guerrero	51,462.21	3,027.18	7
Puebla	47,719.12	2,807	8
Quintana Roo	45,866.55	2,698.03	9
Michoacán	30,985.91	1,822.70	10
TOTAL	755953.48	-	-

Fuente: Elaboración propia a partir de datos recuperados de SIAP, 2020.

Se estima que aproximadamente el 50% del producto se distribuye dentro del territorio en dos principales canales de comercialización; La venta directa al consumidor, no significativa y principalmente informal. Y el segundo canal corresponde al consumo de la industria alimenticia y de proceso, mayoritariamente como ingrediente en cereales, yogurts, dulces y panes; o bien, como materia prima para la industria tabacalera y cosmetológica (ASERCA, 2010).

7.1.5.2. SOCIAL.

La apicultura es una actividad pecuaria que a lo largo de la historia ha aportado múltiples beneficios a la humanidad a partir del aprovechamiento de los productos que las abejas elaboran (SIAP, 2019). Aunque la apicultura tiene sus raíces en los primeros asentamientos humanos, existen evidencias arqueológicas que la miel pudo utilizarse como alimento desde el periodo Mesolítico. (Ulloa *et al.*, 2010).

Aparentemente el uso más común de la miel es el consumo directo, sin embargo este panorama no resulta global puesto que existen regiones de mayor y menor consumo. Se estima que para el año 2017 en México el consumo anual directo de miel de abeja fue de tan solo 0.17 kg per cápita, menor al año anterior el cual había promediado casi 200 gramos por persona. Considerando el volumen de producción de miel mexicana resulta importante destacar que la cultura de consumo de productos apícolas es muy bajo comparado a otros países, por ejemplo, Alemania para los mismos años registró un consumo anual per cápita de 1.03 kg (FAOSTAT, 2020). Castañón (2009) menciona que el consumo promedio anual en los países desarrollados es de 650 gramos por habitante, mientras que en los países en desarrollo se alcanza únicamente los 133 gramos per cápita, aunado a esto, declara que el consumo en el país es escaso debido a que la miel como producto se encuentra fuera de la canasta básica y que uno de los factores claves para el consumo radica en la distancia de las urbes y las zonas productivas, la cual aumenta el costo restringiendo el producto a las personas con medio-alto poder adquisitivo. Lejos del limitado consumo de miel, en México la apicultura es de importancia porque genera empleos y mejora los ingresos de las familias a través de la transformación y comercialización de sus productos (SIAP, 2019) principalmente en el medio rural, según AGRICULTURA (2015) esta actividad crea cerca de 100 mil empleos directos.

La miel ha destacado también en el ámbito médico desde hace cientos de años, Ulloa *et al.* (2010) menciona la importancia que ha tenido en la medicina tradicional y que actualmente continua vigente en algunas regiones del mundo. Otero-Salinas *et al.* (2018), presentan algunas de las propiedades medicinales más importantes de la miel sustentadas en diversos estudios de investigación y que tienen un potencial empleo en el área médica, sus usos como antioxidante, anti-inflamatorio, anti-bacteriano, anti-viral, anti-ulcerosa, anti-hiperlipidémica, anti-diabética y anti-carcinogénica son ejemplos de ello.

7.1.5.3. AMBIENTAL.

Como se ha mencionado anteriormente, existen aproximadamente 20, 000 especies de abejas en el mundo, y si bien las diversas especies varían en características morfológicas de tamaño y forma o estilo de vida, la representatividad común a todas ellas es su dependencia a las flores para el abastecimiento de recursos y energía. Todas las abejas presentan características

anatómicas, fisiológicas y conductuales que las impulsan dependientes a los organismos productores (particularmente a las plantas con flores), haciendo necesarios el polen y el néctar como fuente de alimentos (Verde, 2014) o simplemente su estructura como sitio de anidación.

La dependencia que establece entonces la abeja con las plantas, la convierte en una relación mutua donde es llevada a cabo el proceso de polinización. Ramírez *et al.* (2014) mencionan que las abejas son especies claves en los ecosistemas y son esenciales en el mantenimiento de las comunidades vegetales, ya que son los principales polinizadores de las angiospermas, e importantes por los servicios de polinización que realizan en diversos cultivos. De hecho según Verde (2014) las abejas aseguran el 65% de la reproducción de las plantas, además de polinizar 71 de las 100 especies vegetales que proveen el 90% de los abastecimientos de alimento en 146 países, por lo que la polinización por abejas es importante para la producción de alimentos y una dieta saludable (figura 7).



Figura 7. Cantidad de alimentos para un desayuno; a) Con polinización, b) Sin polinización.
Fuente: Arnold *et al.*, 2018.

AGRICULTURA (2019) argumenta la importancia de las abejas y la polinización para la producción de alimentos, asegurando que gracias al papel de los antofilos en México, se tiene mayor disponibilidad de productos agrícolas como aguacate, jitomate, mango, fresa, limón y forrajes para la alimentación del ganado. Además, menciona que las abejas son una de las mejores opciones para el control biológico de plagas; mediante el hongo denominado BVT-CR7, un agente inofensivo para plantas, humanos y abejas, que es capaz de controlar

numerosas enfermedades el cual se adhiere a las patas y a través del proceso de pecoreo lo distribuyen en todo el cultivo, neutralizando parásitos y bacterias.

Como se ha mencionado, las abejas melíferas son insectos polinizadores altamente eficaces, tienen el cuerpo cubierto de pelos con los cuales recogen fácilmente miles de gránulos de polen, y al cual también se adhiere material particulado; además las abejas se encuentran en constante interacción con distintos compartimentos ambientales y son caracterizadas por su alta movilidad. Estas capacidades las hacen susceptibles a la acumulación de contaminantes presentes en el ambiente, por lo que también son consideradas especies bioindicadoras de contaminación ambiental. Desde el año 1970 diversos estudios se han enfocado a analizar el potencial de las abejas y sus productos (principalmente la miel) como indicadores de contaminación por radio-nucleídos, agroquímicos y metales pesados (Celli y Maccagnani, 2003). Su aplicación ha sido valorada con mayor frecuencia en investigación para evaluar el efecto de la fragmentación, del cambio del uso del suelo, y para registrar los efectos del cambio climático (Quigley *et al.*, 2019).

7.1.6. LA APICULTURA Y LOS OBJETIVOS DE LA AGENDA 2030.

Podría pensarse que los polinizadores y en particular las abejas y su aprovechamiento poco influyen en los objetivos del desarrollo sostenible. Sin embargo, estos insectos están directamente relacionados con algunas de las 169 metas propuestas en la agenda 2030 (ONU, 2018) y podrían contribuir a alcanzar los siguientes objetivos:

Objetivo 1. Fin de la Pobreza.

La apicultura en México es predominantemente rural e indígena, estos mismos sectores se encuentran sometidos en muchas ocasiones a condiciones de pobreza o pobreza extrema generada por los nulos desarrollos eficientes en el campo y por la sobreexplotación del ambiente. Garantizar la conservación de los ecosistemas, reimpulsar el campo mediante el conocimiento y uso de polinizadores, a la vez promover la apicultura como medio de subsistencia se traduciría en mejores condiciones de vida para dichos sectores, evitando fenómenos complejos como la migración, preservando la vida en el campo y la cultura.

Objetivo 2. Hambre 0

Verde (2014) menciona que el acceso físico, social y económico de todas las personas a suficientes alimentos inocuos y nutritivos para satisfacer sus necesidades alimentarias y sus preferencias en cuanto a los alimentos, son los rasgos que definen la seguridad alimentaria. Esto se encuentra directamente relacionado con la presencia de las abejas y el servicio de polinización que brindan en los ecosistemas y sistemas productivos, pues según la FAO (2018), los antofilos aportan los siguientes beneficios: 1) Mejoran las dietas al proporcionar alimentos ricos en micronutrientes, 2) Aumentan la producción de alimentos, 3) Mejoran el sabor de ellos, y 4) Mantienen la biodiversidad.

Objetivo 11. Ciudades y comunidades sostenibles.

Una de las metas propuestas en el objetivo 11 es “*reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo*”. En este sentido, las abejas han sido propuestas como indicadores de contaminación ambiental por metales pesados asociados a la contaminación atmosférica en áreas urbanas y circunvecinas, (Ramírez *et al.*, 2014). Por lo que el uso potencial de colmenas para monitorear la calidad del aire, puede representar la aplicación de tecnologías sostenible en las urbes.

Objetivo 8 y 12. Trabajo decente y crecimiento económico; Producción y consumo responsable.

La apicultura es una actividad dependiente de los factores bióticos y abióticos de su entorno, y muchas de las especies vegetales son dependientes de los polinizadores. Esta relación puede verse afectada mediante la introducción de tecnologías que degraden rápidamente el ambiente y generalmente estén vinculadas a la obtención de un mayor rendimiento, ejemplo el uso indiscriminado de agroquímicos. Por ello, se buscan alternativas sostenibles que favorezcan la producción pero que no sean agresivos y no pongan en riesgo la biodiversidad. El impulso de la polinización como parte del sistema de producción agrícola puede favorecer un crecimiento económico inclusivo, donde coexista el desarrollo sin que este signifique un riesgo para el otro, incursionando en prácticas sostenibles que desvincule el crecimiento económico de la degradación del ambiente.

Objetivo 15. Vida de ecosistemas terrestres.

Como ya se había mencionado las abejas son especies claves en los ecosistemas y son esenciales en el mantenimiento de las comunidades vegetales. Por consiguiente, la polinización es un elemento fundamental para recuperar y mantener la buena salud de algunos ecosistemas como los bosques, incidiendo directamente en la meta 15.1 planteada en este objetivo: *“velar por la conservación, el restablecimiento y el uso sostenible de los ecosistemas terrestres y los ecosistemas interiores de agua dulce y los servicios que proporcionan, en particular los bosques, los humedales, las montañas y las zonas áridas, en consonancia con las obligaciones contraídas en virtud de acuerdos internacionales”*.

7.2. CONTAMINACIÓN Y MIEL.

7.2.1. CONTAMINACIÓN AMBIENTAL.

La contaminación ambiental se posiciona como uno de los más importantes problemas que afectan a la sociedad del siglo XXI. Según la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), en su artículo III fracción VI define contaminación como: *“La presencia en el ambiente de uno o más contaminantes o de cualquier combinación de ellos que cause desequilibrio ecológico”*, en tanto contaminante en su fracción VII se define: *“Toda materia o energía en cualesquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural, altere o modifique su composición y condición natural”*.

Ejemplos como: la pérdida de calidad del aire, del recurso hídrico, de suelos disponibles para actividades agrícolas, así como el incremento significativo de metales pesados en la biosfera, han aumentado exponencialmente en las últimas décadas (Reyes *et al.*, 2016).

De principal interés para la biodiversidad y la salud humana es la acumulación de metales pesados en el ambiente. El incremento en las concentraciones de metales pesados en la biosfera, es resultado de perturbaciones de origen antropogénico o por fenómenos geológicos.

7.2.2. CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS.

De acuerdo a Jiménez-Cisneros (2001) se entiende por metal pesado aquel cuya densidad es mayor de 5 g cm^{-3} , y aunque es necesario para el metabolismo humano en concentraciones traza, posee un umbral de toxicidad muy bajo. Precisamente la connotación de metal pesado se adhiere a su potencial tóxico, y a su alta capacidad de persistencia abarcando elementos de los grupos de transición, pos-transición y metaloides.

En México, existen reportes de la presencia de metales pesados en ríos, lagos, cultivos, suelos y aire de zonas urbanas, así como en ambientes costeros y marinos. Esta contaminación deriva principalmente de actividades antrópicas como: la minería, la metalurgia, la agricultura, el tránsito vehicular y la generación e incineración de residuos (Covarrubias y Peña-Cabriales, 2017).

Al menos en la calidad del agua, se consideran dos clasificaciones de metales en base a su prioridad, sin embargo todos son de interés debido a su potencial tóxico, algunos de ellos son (Jiménez-Cisneros, 2001):

Tabla 5. Metales de mayor interes presentes en el agua.

METALES NO PRIORITARIOS PERO DE INTERÉS	METALES PRIORITARIOS
Aluminio	Cadmio
Hierro	Cromo
Magnesio	Cobre
	Níquel
	Plomo
	Zinc

Fuente: Jiménez-Cisneros, 2001.

Aluminio. El Aluminio es el tercer elemento más abundante en la corteza terrestre. Forma parte de minerales, rocas y arcillas. Tiene una densidad menor a 5 g cm^{-3} pero puede existir en altas concentraciones en los alrededores de los sitios donde se desechan residuos de ciertas industrias, refinерías, fundiciones, canteras y minas. El polvo desprendido de los minerales y materiales rocosos es la fuente más grande de partículas portadoras de Al en la atmósfera. La lluvia ácida de igual manera constituye un aporte significativo de Al al medio ambiente. Se

ha calculado que un 70% de las tierras cultivables tienen suficiente acidez como para ocasionar problemas de toxicidad originada por la solubilización de Al (Nesse *et al.*, 2003).

Muchos vegetales incorporan Aluminio del suelo en el que son cultivados, cuando el pH del suelo se encuentra debajo de 5, este metal es solubilizado en el agua y absorbido por las raíces de las plantas (Nesse *et al.*, 2003), de esta manera ingresa a la cadena trófica.

En México el Límite Máximo Permisible de Al presente en agua purificada envasada es de 0.20 mg L^{-1} (NOM-041-SSA1-1993), por lo que valores sobre la concentración establecida en dicha norma pudiesen representar un riesgo para la salud. De hecho, Solayman *et al.* (2006) mencionan que regularmente el contenido de Al en la materia seca no sobrepasa los 50 ng g^{-1} , en tanto que la necesidad de Al para el organismo se encuentra dentro del grupo de elementos ultra-traza el cual no debe rebasar el consumo de $1 \mu \text{ g}^{-1}$.

Hierro. El Hierro al igual que el aluminio es uno de los elementos más abundantes de la corteza terrestre, prácticamente no existe suelo que no contenga aunque en pequeñas concentraciones. La presencia de este elemento en el ambiente puede clasificarse de acuerdo a sus principales estados: Fe II (ferroso) y Fe III (férrico), el último de ellos se encuentra con mayor abundancia en los suelos, sin embargo posee una menor solubilidad por lo que es considerado un micronutriente o un componente minoritario en la mayoría de los alimentos. Los organismos productores por ende tienden a preferir el Fe II, reduciendo en algunas ocasiones el estado predominante del Fe metálico (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2004; Juárez *et al.*, 2007).

En muchos suelos ácidos, los óxidos, hidróxidos y oxihidróxidos de Fe constituyen un grupo de coloides que son capaces de adsorber amplias cantidades de metales traza. La sorción de estos elementos en varios suelos está influenciada por la presencia de diferentes formas de hierro en cantidades variables, así como el pH, la materia orgánica y otras propiedades. Es probable por tanto que existan asociaciones por procesos de adsorción de oligoelementos como: Cu, Pb, Zn, Co y Ni, a consecuencia de las características que presentan principalmente los Óxidos de Hierro (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2007)

El cuerpo humano requiere Fe en distintas concentraciones con base a algunas características definibles como la edad y el sexo. Solayman *et al.*, (2016) mencionan que el límite máximo

de ingesta diaria para los oligoelementos no debe sobrepasar los 50 mg, en cuanto a la NOM-086-SSA1-1994, establece que la Ingesta Diaria Recomendada de Fe en alimentos con alguna modificación será menor a 15 mg. En lo que corresponde a la NOM-041-SSA1-1993, esta dispone un LMP de 0.30 mg L^{-1} de Fe presente en el agua. Referente a la miel de abeja, el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 2019) fija que por 100g de miel podrá estar presente una concentración de Fe aproximada a 0.42 mg.

Magnesio. El Magnesio es un elemento importante para la realización de funciones bioquímicas y fisiológicas en los seres vivos, incluyendo procesos primitivos como la fotosíntesis y la adhesión celular. Se encuentra dentro del grupo de los macro-minerales que el ser humano requiere, y se calcula que la concentración de magnesio en el cuerpo es de aproximadamente 250 mg kg^{-1} . La Ingesta Diaria Recomendada varía de acuerdo a la edad y el sexo, siendo aceptable para adultos una concentración entre 300 y 400 mg por día. Sin embargo se estima que en la actualidad las personas consumen una menor cantidad de Mg de la requerida, lo cual regularmente ocasiona problemas de salud. En tanto que el exceso también puede representar problemas como la hipermagnesemia (Aranda *et al.*, 2000; Belitz, *et al.*, 2009; National Institutes of Health, 2020).

El Mg también es un constituyente común en muchos minerales y se encuentra presente en forma divalente (Mg^{2+}) en la naturaleza. No obstante su disponibilidad y solubilidad no es la misma en todos los suelos, aunado a esto, los compuestos de Mg presentan grandes tasas de remoción, en ocasiones por encima de las tasas de liberación de las fuentes minerales. Es muy común en las prácticas agrícolas la adición en cantidades considerables de fertilizantes mediante fuentes solubles y semi-solubles de Mg para contrarrestar las deficiencias presentes en los suelos, sin embargo las prácticas de fertilización siguen intensificándose a medida que se demandan rendimientos más altos, por lo que es necesario el uso de herramientas que identifiquen deficiencias para evitar su aplicación cuando este no se requiere (Mikkelsen, 2010; Grzebisz, 2011).

Cobalto. El Cobalto es un elemento que se encuentra presente en pequeñas cantidades en las rocas, el suelo, el agua, las plantas y los animales, y es esencial para las reacciones bioquímicas de los seres vivos en cantidades mínimas. Es ampliamente usado en la industria, principalmente para formar aleaciones con otros metales, así como colorantes en vidrio,

cerámica y pintura. También es regularmente usado en la agricultura, como aditivo para suelos donde la presencia de Co es pobre debido principalmente a la erosión; el uso indiscriminado de fertilización por Co puede contaminar los cuerpos de agua mediante la escorrentía. Otras fuentes importantes de contaminación por Co provienen del tráfico y de plantas incinerados que usan carbón como combustible. (ATSDR, 2004; IPNI, 2020)

Cadmio. El Cd es un elemento que en la naturaleza podemos encontrarlo asociados a otros metales como el Zn, el Cu y el Pb, y no en su estado puro, generalmente presente en forma de Óxidos complejos, Sulfuros y Carbonatos. Los contenidos de Cd en los compartimentos ambientales provienen de fuentes naturales como rocas y actividad volcánica, y de fuentes antropogénicas, esta última aporta las mayores concentraciones del metal en el ambiente. Debido a su amplio uso industrial y agrícola; los fertilizantes fosfatados, la combustión fósil, la actividad minera, la producción del galvanizado, la fundición de metales, así como la generación de lodos residuales y estiércol, representan las principales fuentes de contaminación por Cd. Este metal es conocido por su toxicidad aún en concentraciones bajas, por su movilidad en los suelos y por su fácil absorción en las plantas. En los seres humanos altas concentraciones de Cd pueden generar riesgos en la salud, afectando principalmente los riñones, los huesos y los pulmones; de hecho una ingesta mayor a 15 ppm presenta manifestaciones clínicas como náuseas, emesis, dolores abdominales y cefalea (Rodríguez-Serrano *et al.*, 2008; Pérez y Azcona, 2012).

Cromo. El Cr (III) y Cr (VI) son los estados del Cr más abundantes en el ambiente. El Cr trivalente es importante para las funciones metabólicas del cuerpo humano, considerado un elemento traza esencial. El Cr hexavalente por otro lado es altamente tóxico, teratógeno y mutagénico, presenta movilidad e incrementa su toxicidad en condiciones oxidantes. El Cr ingresa al ambiente mediante dos vías: natural y antropogénica y es posible encontrarla en todos los compartimentos ambientales. La fuente principal de Cr (VI) son las actividades antrópicas, principalmente las fuentes industriales: los residuos de las plantas de generación de energía, la galvanoplastia, el curtido de cuero, el tratamiento de la madera y la fabricación de barnices. Otras fuentes antropogénicas importantes son la generación de residuos electrónicos, la generación de lodos activados, la combustión de combustibles fósiles y el uso indiscriminado de fertilizantes fosfatados en la agricultura (Choppala *et al.*, 2013).

Cobre. El Cu es uno de los metales con mayor aplicación e importantes para la vida del ser humano, también es micronutriente esencial para el crecimiento de los organismos, requerido en concentraciones traza debido a su potencial tóxico (Gaete *et al.*, 2010). Naturalmente es posible encontrar el Cu en forma de sulfuros, sulfatos, carbonatos, etc., agrupados en minerales rocosos presentes en suelo, no obstante las actividades antrópicas también aportan contenidos importantes de Cu al medio ambiente. Los principales usos del Cu en la industria son: la producción de alambre y sus aleaciones con Zn y Sn para generar latón y bronce, así como de cables y aparatos eléctricos. Es común encontrar Cu en contenedores como calderas, tuberías de vapor, radiadores de automóviles y utensilios de cocina. Este elemento también es ampliamente utilizado en la agricultura y en actividades pecuarias, principalmente en forma de fertilizantes, bactericidas, y fungicidas, su uso también ha sido reportado como alguicidas para la purificación del agua. El uso indiscriminado de agroquímicos en conjunto con la minería, la generación de residuos provenientes de la ganadería, la generación de lodos residuales y las emisiones industriales representan las fuentes principales de contaminación por Cu (Adriano, 2001).

Níquel. El Ni es un metal ubicuo, comúnmente encontrado en su estado de oxidación +2, presente en rocas ígneas en la corteza terrestre. El Ni es liberado al ambiente a través de fuentes naturales y antropogénicas, y sus formas inorgánicas representan un grave riesgo para la salud de los seres vivos a consecuencia de su toxicidad. Las principales fuentes antrópicas de contaminación por Ni provienen de la industria, tales como: la combustión del carbón, petróleo y otros combustibles fósiles, la minería, la fabricación de aleaciones con Ni, los procesos de galvanoplastia, la incineración de residuos y la liberación de aguas residuales. Los seres vivos requieren cantidades traza de este elemento, y su presencia ha sido reportada en diversos organismos. La fuente más común de exposición de Ni para los humanos es la ingesta, presente en alimentos como: pescados, mariscos, productos vegetales, carnes y derivados y alimentos que han sido procesados y almacenados en recipientes metálicos; puesto que este último representa una fuente importante de contaminación de los alimentos por migración (Adriano, 2001; Olivares *et al.*, 2015).

Plomo. El plomo es uno de los elementos de mayor preocupación por su potencial tóxico en la salud humana, las principales fuentes de Pb en el ambiente provienen de actividades

antropogénicas, las cuales no solo ponen en riesgo la salud, sino también la “salud” de los ecosistemas.

La contaminación del Pb ha aumentado proporcionalmente con el crecimiento industrial y urbano, siendo el tráfico una de las fuentes más importantes de contaminación por Pb en zonas urbanizadas y sus alrededores. Es posible encontrar Pb en diversos compartimentos ambientales; los alimentos son una de las vías de ingreso al ser humano. Las fuentes industriales de minería, fundición, refinado, fabricación, reciclaje y eliminación de productos que contienen Pb, pueden llegar a contaminar el agua, aire y suelo, en algunas ocasiones a niveles considerablemente altos. Los alimentos pueden contaminarse por la cercanía a estas fuentes e ingresar a la cadena alimenticia. Fenómenos como la escorrentía y la deposición atmosférica pueden mover contenidos importantes de Pb de un punto a otro (Adriano, 2001; Belitz *et al.*, 2009).

Zinc. El Zinc es un micro-elemento esencial para los seres vivos, la deficiencia de este provoca trastornos graves en algunos animales, mientras que el consumo elevado es tóxico para los seres humanos (Belitz *et al.*, 2009). Es común encontrar en el ambiente compuestos solubles de Zn en forma de cloratos, cloruros, sulfatos y nitratos, mientras que los óxidos, carbonatos, fosfatos, silicatos y sulfuros son relativamente insolubles, aunque este último representa la mayor fuente de Zn a nivel global (Adriano, 2001).

El Zn en el suelo también proviene de fuentes antropogénicas, generalmente de las mismas fuentes que emiten Pb y Cd, como los lodos residuales y la fundición de metales. Otra fuente importante de Zn proviene del uso de agroquímicos, principalmente de los fertilizantes. La aplicación de lodos residuales para el mismo fin también aporta cantidades importantes de Zn al suelo, no obstante esta práctica conlleva al incremento en las concentraciones de otros metales para la contaminación ambiental. Se ha reportado que las fuentes difusas pueden impactar significativamente en las concentraciones de Zn en el ambiente (Adriano, 2001).

7.2.3. CONTAMINACIÓN DE LA MIEL.

La miel es un producto que siempre se ha considerado natural y saludable, es decir inocuo; sin embargo, en la actualidad la mayoría de los productos apícolas se generan en ambientes contaminados por diversas fuentes, lo que representa un potencial riesgo para las colonias de abejas y la inocuidad de la miel y subproductos.

De acuerdo a Bogdanov (2006) las principales fuentes de contaminación, así como los contaminantes en la producción apícola pueden dividirse en: manejos apícolas y ambientales.

7.2.3.1. CONTAMINACIÓN POR EL MANEJO DE LAS COLMENAS.

Es importante reconocer que las malas prácticas apícolas para el control de plagas y enfermedades, en diversas ocasiones incrementan el riesgo de contaminación en las colmenas. El uso irreflexivo e indiscriminado de sustancias químicas para mejorar la calidad y producción en los apiarios resulta contraproducente, algunas de las sustancias con mayor riesgo y aplicación son:

- Acaricidas. Divididos en dos principales grupos:
 - o Sustancias sintéticas persistentes.
 - o Sustancias naturales no tóxicas.
- Antibióticos usados contra la Loque Americana y Europea.
- Pesticidas para el control de la Polilla de la Cera.
- Pesticidas contra el Escarabajo de la Colmena.
- Repelentes de abejas para la cosecha.

Cabe destacar que de igual manera el uso del material no adecuado, así como la aplicación de pintura en las colmenas a menudo incrementan el riesgo de contaminación previamente a la cosecha, posterior a ello, la extracción y el almacenamiento en recipientes corrosivos son las causas más comunes de contaminación.

7.2.3.2. CONTAMINACIÓN POR FUENTES AMBIENTALES.

El pecoreo es una actividad esencial de las abejas obreras, necesaria para la sobrevivencia de la colmena. A pesar de ello también puede representar un medio de contaminación; El néctar, el polen, los exudados de plantas y el agua, son materias primas indispensables obtenidas durante esta actividad. En ambientes perturbados, contaminados y con influencia antrópica, las materias primas se encuentran constantemente expuestas a contaminantes presentes en el aire, el agua y el suelo. Las abejas al coleccionar la materia prima expuesta y al encontrarse en continua interacción con estos compartimentos transportan todo tipo de sustancias a la colmena (figura 8).

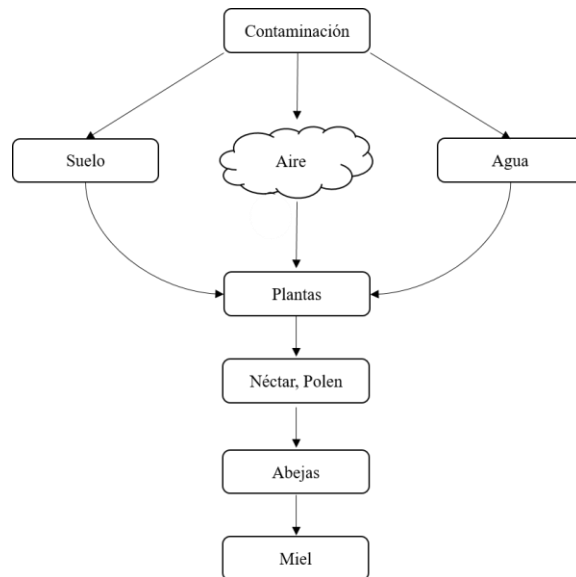


Figura 8. Esquema de flujo del mecanismo simple de entrada de contaminantes en la miel.
Fuente: Solayman *et al.*, 2016.

Los residuos y contaminantes generalmente encontrados en abejas, miel, cera y otros subproductos consecuentes de actividades antropogénicas pueden clasificarse en:

- Agroquímicos: Pesticidas (plaguicidas, herbicidas, bactericidas), Insecticidas.
- Contaminantes orgánicos: PCB's, PAH's.
- Radionúclidos.
- Agentes patógenos: *clostridium botulinum*, *salmonella* spp, *shigella* spp.
- Organismos Genéticamente Modificados.
- Metales pesados.

7.2.4. CONTAMINACIÓN DE LA MIEL POR METALES PESADOS.

Los metales pueden encontrarse en miel de abeja en concentraciones muy bajas dependiendo del origen geográfico y botánico. Esto significa que la presencia de uno o más de ellos dependerá completamente de las características naturales del suelo, agua y de la flora apícola al cual las abejas recurran. Sin embargo, las fuentes de contaminación antrópica pueden incrementar considerablemente las concentraciones de metales en la miel, así como la adición de elementos que naturalmente no deberían estar presentes. Los metales pesados representan

los de mayor interés y preocupación por su alto grado de toxicidad aún en concentraciones muy bajas, considerándolos un potencial riesgo para las abejas y la inocuidad alimentaria.

En realidad todas las actividades antrópicas cercanas a los puntos de producción apícola pueden representar una potencial fuente de contaminación, no obstante las más comunes y con mayor impacto son: Agricultura, tráfico, industria, mancha urbana, generación de residuos sólidos y la minería. Los procesos que naturalmente se dan en el ambiente contribuyen a la movilización de los metales pesados, facilitando su dispersión y disponibilidad.

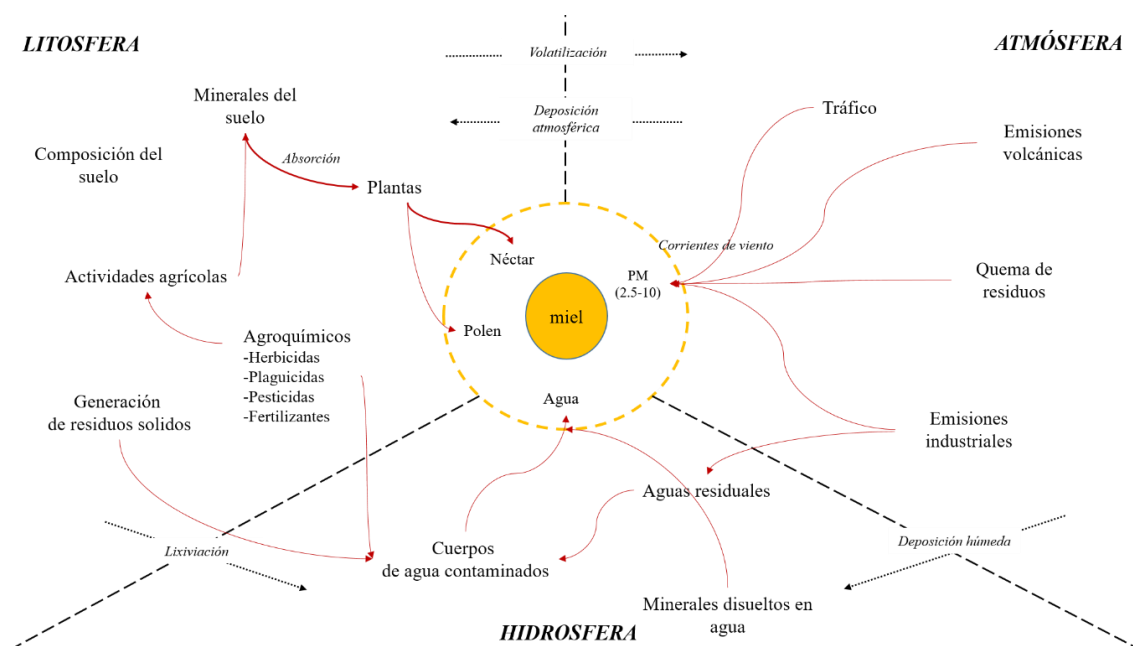


Figura 9. Mecanismos y procesos influyentes en el ingreso de metales a la miel de abeja por interacción con diversos compartimentos.

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Solayman *et al.* (2016), colectaron de diversos estudios una serie de datos que demuestran la presencia de metales pesados en distintas concentraciones en miel, los de mayor importancia: Cu, Zn, Ni, Mn, Cd, Pb, Hg, Cr y Ag. De igual manera, reportó concentraciones encontradas de elementos mayoritarios, así como elementos traza. En la tabla 6 se muestran los elementos de principal interés en la investigación.

Tabla 6. Elementos mayoritarios, trazas y metales pesados presentes en miel

Elemento	Unidad	Media	Desviación Estándar	Rango
Mg^a	mg/kg	74.31	163.05	2.18 - 536.72
Fe^b	mg/kg	30.34	64.99	0.41 - 224.00
Cu^{b,c}	mg/kg	1.99	4.31	0.05 - 17.30
Zn^{b,c}	mg/kg	9.33	19.55	0.23 - 73.60
Ni^{b,c}	mg/kg	1.24	2.62	ND - 9.00
Al^b	mg/kg	5.12	3.61	1.39 - 11.36
Cd^{b,c}	µg/kg	89.69	129.75	0.17 - 373.00
Pb^{b,c}	µg/kg	424.57	839.65	0.63 - 3232.00
Co^b	µg/kg	171.78	291.72	0.01 - 800.00
Cr^{b,c}	µg/kg	152.84	139.74	ND - 370.00

Fuente: Adaptado de Solayman *et al.*, 2016.

Nota: a) Elementos mayoritarios, b) Elementos traza, c) Metales pesados.

7.2.5. EFECTOS DE LOS METALES PESADOS EN LAS ABEJAS.

El principal objetivo de la producción de miel en la colmena es la alimentación de las larvas y abejas obreras, pasado los primeros días de ovoposición, las larvas comienzan a ser alimentadas por una mezcla de polen, néctar y miel; las abejas obreras en completo desarrollo se alimentan de miel y néctar cuando realizan funciones en el exterior. La miel es el principal alimento de reserva para la colmena en temporadas invernales o cuando las condiciones climáticas no permiten el pecoreo.

Nisbet *et al.* (2019) consideran que las condiciones ambientales en los que se desarrolla la colmena y con ello la producción de miel, tienen un impacto significativo en los procesos metabólicos y fisiológicos de las abejas, y que los metales pesados influyen negativamente en los procesos de ovoposición y crianza. A la vez la presencia de metales pesados en la miel en altas concentraciones derivado de las contaminación ambiental por actividades antrópicas diversas, son un factor de reducción del número de individuos en las colonias (Di *et al.*, 2016; Heard *et al.*, 2016; Sgolastra *et al.*, 2017).

Metales como el Cr son potencialmente tóxicos para las abejas, Sgolastra *et al.* (2017) reportaron que la LD₅₀ en individuos adultos de *Apis mellifera* es de 2 049 mg L⁻¹. Por otro lado Di *et al.* (2016) reportaron una LD₅₀ en *Apis mellifera* expuesta a Cd de 78 mg L⁻¹ en

abejas forrajeras y tan solo 0.275 mg L⁻¹ en estado larvario, mientras que Heard *et al.* (2016) reportaron una LC₅₀ de 18.36 mg L⁻¹ en organismos adultos a una exposición constante en un lapso de 48 horas, 3.70 mg L⁻¹ en 96 horas y 0.57 mg L⁻¹ en 240 horas.

Para el Cu Di *et al.* (2016) reportaron en condiciones controladas una LD₅₀ de 72 mg L⁻¹ en abejas forrajeras y 6.97 mg L⁻¹ en larvas, en cuanto para el Pb reportaron una LD₅₀ de 345 mg L⁻¹ en abejas forrajeras y 1.12 mg L⁻¹ en estado larvario.

7.3. INDICADORES AMBIENTALES.

El impacto de la contaminación ambiental derivado de las actividades antrópicas ha ocasionado cambios drásticos sobre los ecosistemas en periodos cortos, lo que frecuentemente repercute en la salud humana, y aún más en los organismos al interrumpir sus procesos de adaptación provocando en muchas ocasiones su pronta extinción. Esta problemática ha generado una búsqueda intensa de métodos precisos, económicos y de práctica implementación que permitan la detección temprana de disturbios ambientales que pongan en peligro a la biodiversidad, la salud y contribuyan a evitar largos periodos de tiempo y altos costos económicos que implican las restauraciones ecológicas (González y Vallarino, 2014).

El uso de bioindicadores como herramienta para conocer el grado de contaminación de los ecosistemas puede ser la clave para impedir estrategias que requieran de invertir mayores recursos. De acuerdo a González y Vallarino (2014) las especies bioindicadoras se definen como aquellas que por sus características (sensibilidad a las perturbaciones ambientales, distribución, abundancia, dispersión, éxito reproductivo, etc.) pueden ser usadas como estimadoras del estatus de otras especies o condiciones ambientales de interés que resulten difíciles, inconvenientes o costosas de medir directamente.

Es importante mencionar que los bioindicadores pueden clasificarse de acuerdo al tipo de disturbios que son capaces de detectar. Las tres categorías son:

- **Indicadores de biodiversidad.** Reflejan el número de especies de los taxones que viven en simpatría.
- **Indicadores ecológicos.** Taxones sensibles a la presencia de estresores ambientales, que permiten mediante su presencia o ausencia y sus

fluctuaciones en el tiempo, conocer el impacto de dichos estresores sobre los demás taxones que habitan en la misma localidad

- **Indicadores ambientales.** Organismos que responden de manera predecible a los disturbios ambientales. Usados para detectar perturbaciones ambientales mediante una respuesta específica a dichas perturbaciones.

7.3.1. ABEJAS COMO INDICADORES AMBIENTALES.

Las abejas melíferas son buenos indicadores ambientales debido a sus destacables características etológicas y morfológicas; las vellosidades que cubren gran parte de su cuerpo principalmente al tórax y a las corbículas atrapan pequeñas partículas contaminantes o aquellas que se han asociado al polen. Aunado a esto su alta movilidad permite que una colonia monitoree áreas extensas medidas generalmente en hectáreas mientras se encuentran en busca de materia prima, colectando consigo pequeñas muestras del estado de contaminación de una zona específica.

Otros factores en consideración son la alta tasa de reproducción y ciclo de vida, la vida útil promedio de una abeja repercute en una regeneración continua y rápida en la colonia (Porrini *et al.*, 2003). Asimismo la sensibilidad representa una característica para la determinación de un organismo como indicador ambiental, el descenso en la población de una colmena puede indicar la presencia de perturbaciones reconocibles. Por ello González y Vallarino (2014) señalan que las abejas como bioindicadores ambientales, responden predictivamente de manera observable y cuantificable a perturbaciones o a cambios en el estado del ambiente.

Tabla 7. Uso de la *Apis mellifera* como indicador ambiental: Métodos, ventajas y observaciones.

Especie	Método de Monitoreo	Ventaja	Observaciones
<i>Apis mellifera</i>	Observaciones en las colmenas, se toman muestras de éstas y se realizan análisis químicos de laboratorio.	Monitoreo fácil de la tasa de mortalidad de las abejas, de muestras de abejas y de material de la colmena.	Es recomendable complementar con análisis de laboratorio para detectar las sustancias contaminantes.

Fuente: González y Vallarino, 2014.

Diversas han sido las investigaciones sobre el uso de abejas melíferas para la detección de contaminantes, enfocados desde la presencia de agroquímicos en sistemas agrícolas hasta la determinación de la concentración de metales pesados en el ambiente. Las abejas y sus productos (Néctar, Miel, Polen, Jalea, Propóleo, Cera) han demostrado ser eficaces ante la detección de metales pesados en áreas urbanas y ecosistemas perturbados (Gutiérrez, 2015), principalmente la miel, por ser el producto de mayor generación en la colmena y de principal interés en la apicultura.

7.3.2. MIEL COMO INDICADOR AMBIENTAL.

De acuerdo a la FAO (2019), una abeja debería volar aproximadamente 50, 000 veces para producir únicamente un kilogramo de miel, por lo que visitaría miles de flores en busca de néctar a lo largo de su vida. Esta característica proporciona a la miel una ventaja sobre las abejas en el monitoreo de la contaminación. En una colmena se generan aproximadamente 2 kilogramos de miel, en este sentido, la matriz obtenida representa el monitoreo de cientos de abejas obreras en un área mayor, eliminando el factor que confiere el uso de las abejas al estar sujetas a la selección de la casta y al error que podría causar si la abeja obrera se encontraba asignada a un área específica.

La investigación en el uso de la miel de abeja como indicador ambiental comenzó después de los años '70. La aplicación de la miel como indicador de la presencia de metales pesados en ambientes contaminados inició algunos años después; a partir de 1980 diversos han sido los estudios enfocados principalmente a la determinación de Cd, Cr, Pb y Zn (Bargańska *et al.*, 2015; Herrero-Latorre *et al.*, 2017).

7.4. MARCO LEGISLATIVO SOBRE INOCUIDAD DE LA MIEL.

7.4.1. MARCO LEGISLATIVO.

Alrededor del mundo se han impulsado leyes y normas para la protección de la apicultura como actividad socio-económica y ambientalmente importante. Los estados han adaptado la legislación en base a las necesidades y riesgos dentro de sus territorios, sin embargo es necesario reformar y crear metodologías específicas ante el hallazgo de contaminantes en concentraciones que constituyan un peligro para la actividad apícola.

Existen organizaciones que a fin de garantizar la seguridad e inocuidad alimentaria mundial reúnen a diversos países para firmar acuerdos que en conjunto logren dicho objetivo. La FAO junto con la OMS crearon la comisión CODEX ALIMENTARIUS; integrada por 188 Estados, el cual México forma parte, y una Organización Miembro (Unión Europea), tiene como objetivo establecer normas internacionales que garanticen alimentos inocuos y de calidad para las personas, entre ellos la miel.

Cada Estado es autónomo e independiente de establecer normas que aseguren la inocuidad alimentaria y establezcan los parámetros de calidad de la miel para su uso, consumo e importación.

7.4.2. NORMAS PARA LA INOCUIDAD DE LA MIEL.

La norma CODEX-STAN-012-1981, es la herramienta internacional que regula la calidad de la miel producida por la especie *Apis mellifera* L., destinadas al consumo directo y a su aplicación industrial y alimentaria. Establece parámetros físico-químicos relacionados con la autenticidad de la miel, no obstante no decreta los Límites Máximos o de Residuos en el contenido de metales pesados, mencionando única y textualmente lo siguiente: “*La miel estará exenta de metales pesados en cantidades que puedan constituir un peligro para la salud humana*” (CODEX, 1981).

A pesar de ello el referente utilizado generalmente para la determinación inocua de la miel se encuentra establecida en la Norma General CXS 193-1995. Para contaminantes y toxinas presentes en los alimentos y piensos. Disponiendo solamente los Límites Máximos para: As, Cd, Pb, Hg, CH₃Hg y Sn.

En México existen leyes y normas que protegen la actividad apícola a nivel federal y estatal, y aunque la legislación no es específica para la apicultura, se dedican brevemente algunos de los títulos para establecer reglamentos básicos asignados al buen manejo y producción.

En cuanto a la normatividad, la calidad de la miel en el país se rige bajo la NMX-F-036-NORMEX-2006. Esta norma mexicana establece las especificaciones que debe cumplir la miel de abeja destinada para consumo humano directo en envases menores a 10 kg., reúne los parámetros esenciales de calidad en la miel: % de azúcares, humedad, Cenizas, Contenido de hidroximetilfurfural, entre otros. Sin embargo esta norma no contempla parámetros sobre

inocuidad, reservándose únicamente a decretar que el producto no deberá contener ningún contaminante químico en cantidades que puedan presentar un riesgo para la salud.

La NOM-004-SAG/GAN-2018, *Producción de miel y especificaciones*. Por su parte establece las características generales para la producción de miel que propicien el cuidado de las abejas melíferas y su correcto desarrollo, la norma es de observancia obligatoria a personas físicas o morales que se dediquen a la producción de miel en territorio nacional, y a quienes se dediquen al acopio, envasado y/o comercialización de miel nacional o de importación. No obstante en ella tampoco se hacen específicos parámetros de la presencia de metales en la miel.

Si bien en el territorio nacional no existen suficientes investigaciones para conocer el rango de contenidos en metales presentes en la miel, el Manual de Buenas Prácticas Pecuarias en la Producción Primaria de Miel (SENASICA, 2018) para la certificación orgánica del producto, establece textualmente que “*no se permite la presencia de metales pesados que superen los límites máximos permitidos para los alimentos en general*”, similar a lo ya establecido en la NMX-F-036.

Por otro lado el SENASICA (2020), ciertamente considera los Límites Máximos de Residuos en algunas matrices, entre ellas las abejas y su principal producto, preceptuando los límites que para algunos elementos químicos deben cumplirse: As, Hg, Cd y Pb., y pese a que son considerados importantes, para las matrices en abejas no son contempladas debido a su nula aplicación, en otros términos a la falta de monitoreo en la especie.

7.4.3. NORMAS QUE ESTABLECEN LIMITES MAXIMOS DE METALES EN LA MIEL.

Existen normas internacionales que establecen los límites máximos de ciertos metales en la miel, la tabla 8 compila algunas normas, valores de referencia y acuerdos de países y entre partes para el establecimiento de parámetros que regulen o indiquen la presencia de metales pesados en la miel de *Apis mellifera* L., así como normas de observancia obligatoria dentro del territorio mexicano para otros productos de consumo directo.

Tabla 8. Límites máximos de metales presentes en miel de abeja y otros alimentos (mg kg⁻¹).

Legislación	Metales								
	Al	Cd	Cu	Cr	Fe	Mg	Ni	Pb	Zn
<i>Miel de Apis mellifera</i>									
Polonia ^a	-	0.03	-	-	-	-	-	0.30	20
China ^b	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00
India ^c (ppm)	-	1.5	30	-	-	-	-	2.5	50
Colombia ^d	-	-	0.05	-	-	-	-	0.1	-
Brasil ^e	-	-	0.10 ^d	0.10	-	-	5.00	-	5.00
UE 2015/1005 ^f	-	-	-	-	-	-	-	0.10	-
MERCOSUR ^g	-	0.10	-	-	-	-	-	0.30	-
USDA ^h	-	-	0.36	-	4.2	20	-	-	2.2
<i>Otros productos y alimentos</i>									
CODEX ^e (mg g ⁻¹)	-	-	-	-	15	-	-	-	-
Australia ⁱ	-	0.005	0.01	-	-	-	-	0.01	0.01
NOM-130-SSA1-1995. Jugos y néctares	-	0.1	5.00	-	15	-	-	0.3	5.00
NOM-041-SSA1-1993. Agua (mg L ⁻¹)	0.20	0.005	1	0.05	0.30	-	-	0.02	3.00

Fuente: CX/S 00/3 (1999)^a, NHFPC (2018)^b, FSSAI (2010)^c, Zamudio (2017)^d, Silva *et al.* (2013)^e, Unión Europea (2015)^f, MERCOSUR (2011)^g, USDA (2019)^h, FSANZ (2002)ⁱ.

8. ZONA DE ESTUDIO.

Considerando a la apicultura una actividad económica importante sujeta a toda ley dentro del estado se consideró la división regional de las zonas de estudios basada en la Ley de Desarrollo Económico Sustentable del Estado de Puebla (Gobierno del Estado de Puebla, 2015), que divide al estado en siete regiones económicas: I. Angelópolis, II. Valle de Atlixco y Matamoros, III. Serdán y Valles Centrales, IV. Sierra Nororiental, V. Sierra Norte, VI. Mixteca, y VII. Tehuacán y Sierra Negra; y tienen por objeto producir bienes o servicios, tangibles o intangibles, susceptibles de ser comercializados.

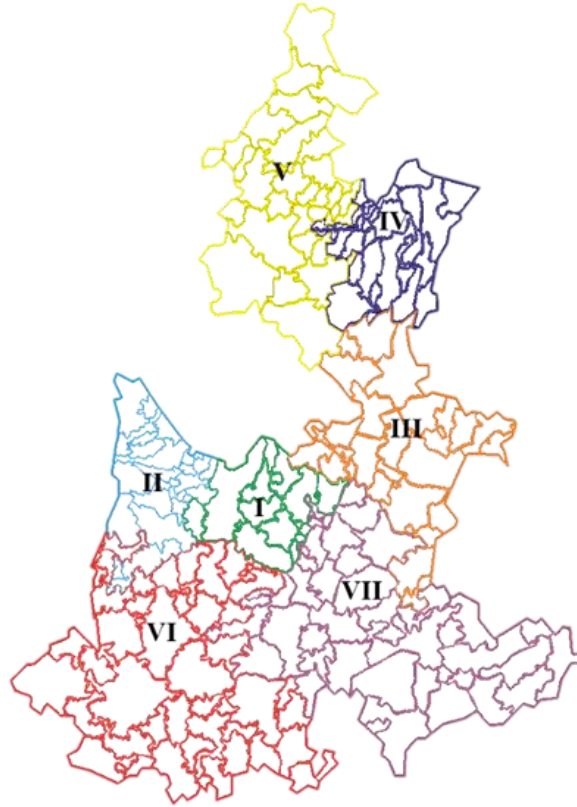


Figura 10. División regional del estado de Puebla
Fuente: Gobierno del Estado de Puebla (2015).

Las zonas estudiadas en esta investigación se distribuyeron en 5 regiones del estado.

8.1. REGIÓN ANGELÓPOLIS.

Compuesta por 33 municipios, considerada una región predominantemente urbana, sus principales actividades económicas son industriales y agropecuarias; en el sector industrial destacan cerca 13 mil unidades económicas en el giro automotriz y la metalurgia, en lo que respecta al comercio y los servicios suman cerca de 70 mil unidades.

La apicultura en la región Angelópolis es semi-urbana, ubicadas en zonas con predominancia agrícola, destacan los municipios de Nopalucan, Tecali de Herrera, Huejotzingo, San Pedro Cholula, entre otros. La actividad apícola en la región es trashumante y temporal, presente en otoño e invierno, y movidas a otras regiones o estados en primavera y verano.

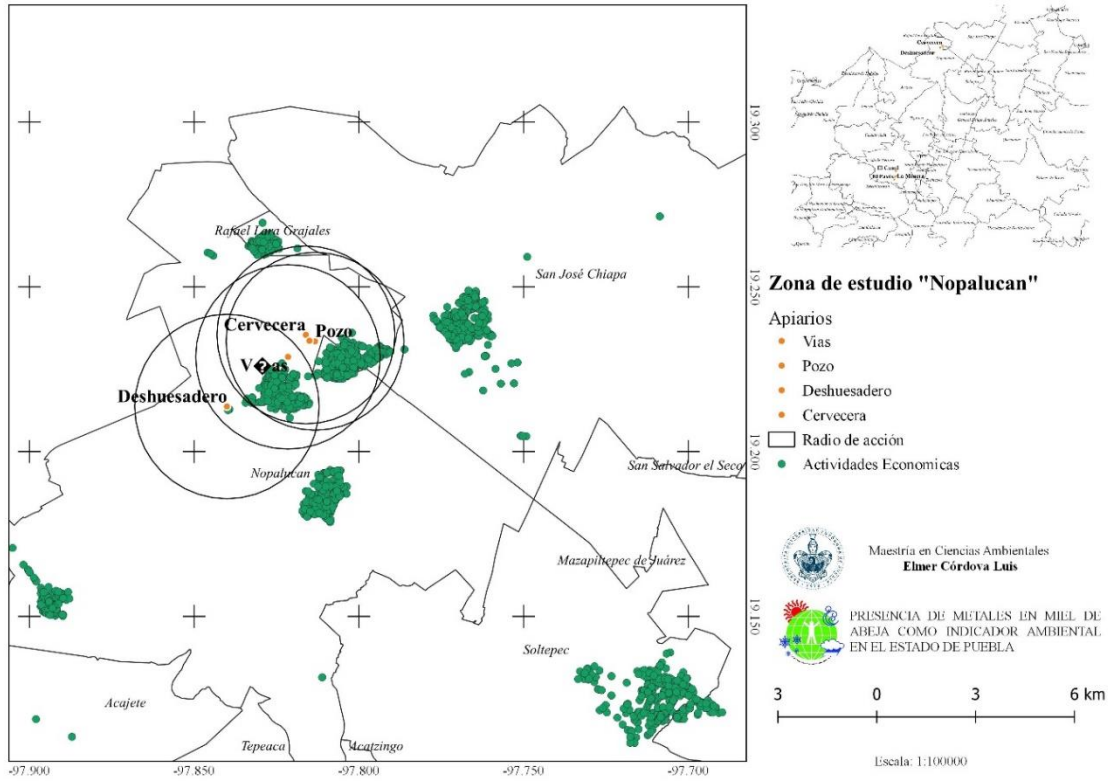
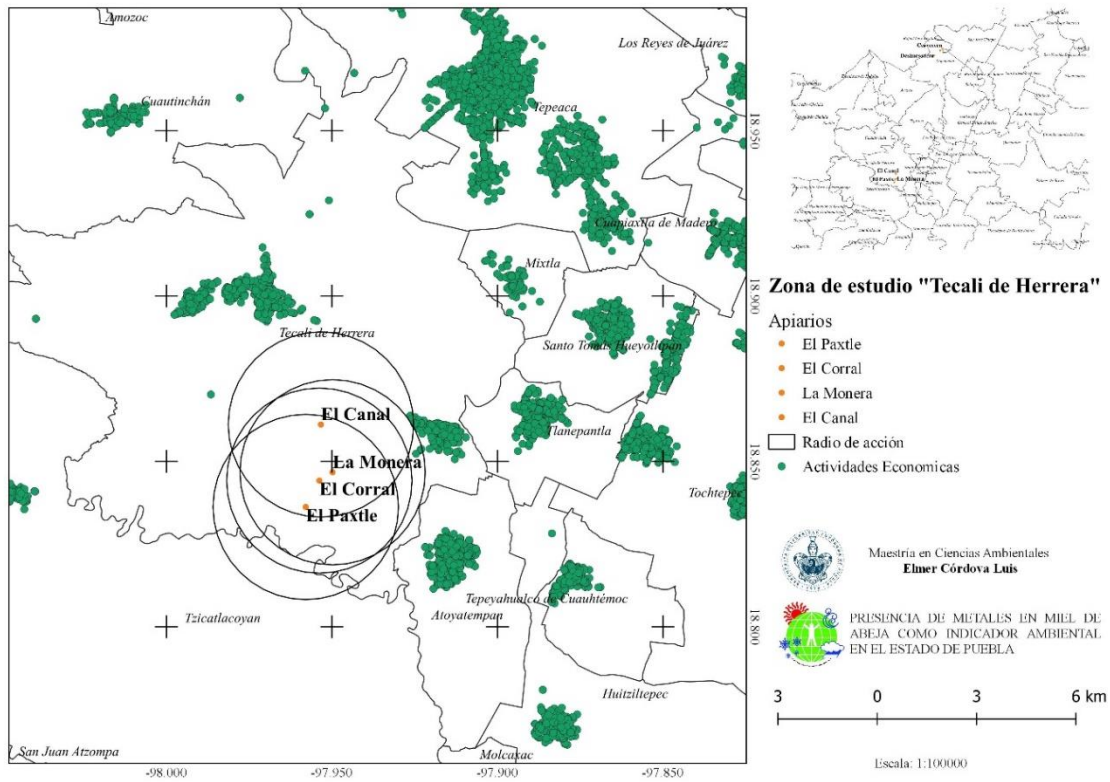


Figura 11. Zonas de estudio de la región Angelópolis.
Fuente: Elaboración propia, 2020.

8.2. REGIÓN VALLE DE ATLIXCO Y MATAMOROS.

Está conformada por 24 municipios, considerada predominantemente urbana, la región dependen primordialmente de la actividad agropecuaria principalmente el cultivo de temporal y de ornamento, la región cuenta con algunos segmentos industriales.

La actividad apícola llevada a cabo en esta región se concentra en el municipio de Atlixco y colindantes, las principales zonas de aprovechamiento apícola se localizan en las periferias de los municipios en zonas con predominancia agrícola, encontrando algunos apiarios dentro de la zona urbana. La apicultura en esta región es mayoritariamente trashumante, no obstante algunos apiarios permanecen en los mismos sitios todo el año.

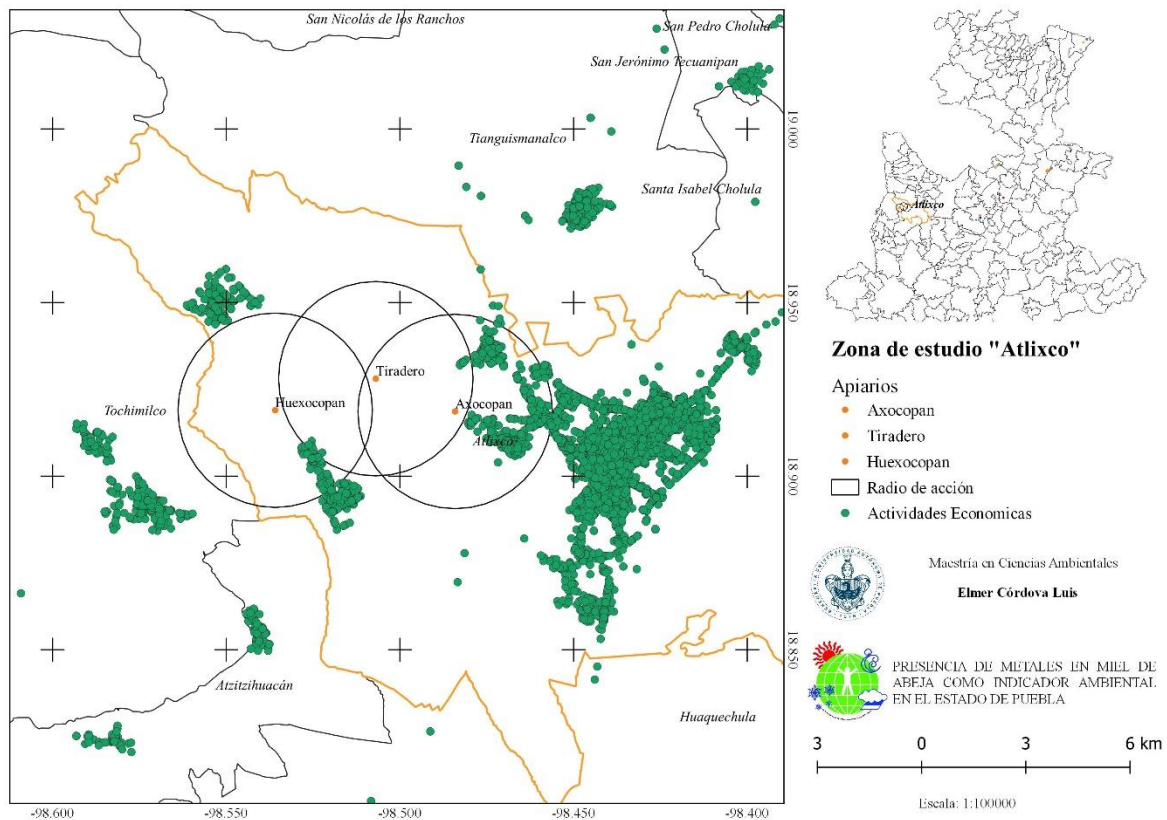


Figura 12. Zonas de estudio de la región Valle de Atlixco y Matamoros.

Fuente: Elaboración propia, 2020.

principalmente el rubro manufacturero y de procesamiento de alimentos. El resto de los municipios basan su economía en la producción agropecuaria como la agricultura y la ganadería, los cultivos agrícolas de esta región difieren de las regiones Angelópolis, Valle de Atlixco y Serdán.

La actividad apícola en la región se comparte con el estado de Veracruz en la temporada de otoño e invierno, los cultivos de cítricos son de gran importancia para la producción de miel en la región, los apiarios también son ubicados en zonas con vegetación secundaria herbácea.

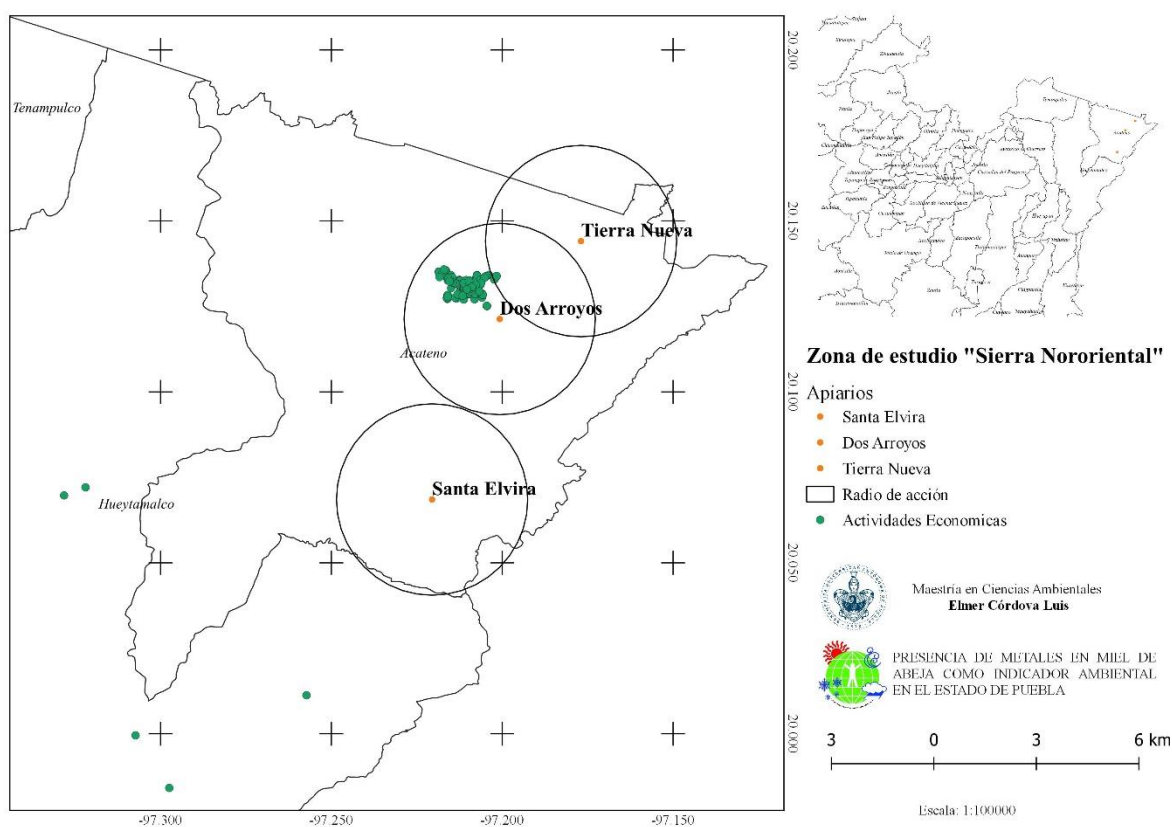


Figura 14. Zonas de estudio de la región Sierra Nororiental.
Fuente: Elaboración propia, 2020.

8.5. REGIÓN SIERRA NORTE.

Está conformada por 35 municipios y al igual que la región Sierra Nororiental es predominantemente rural, no obstante existen puntos importantes industriales como la

extracción de hidrocarburos, la industria manufacturera, la producción de alimentos, y la industria de la madera.

La actividad apícola en esta región es similar a la región Sierra Nororiental, ubicadas en zonas con predominancia agrícola y de vegetación primaria y secundaria.

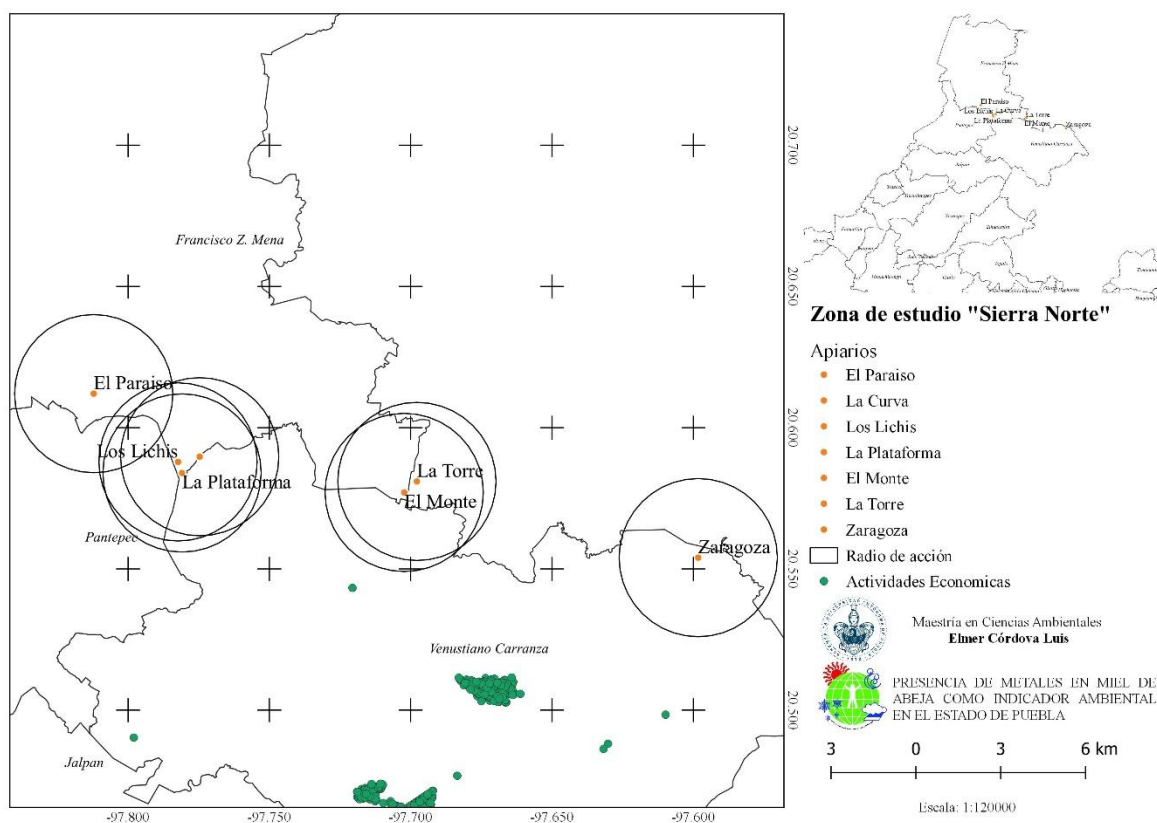


Figura 15. Zonas de estudio de la región Sierra Norte.
Fuente: Elaboración propia, 2020.

9. METODOLOGÍA.

9.1. MUESTREO.

La producción y cosecha de miel en el estado de Puebla se divide en dos temporadas identificables, la primera del año durante los meses de Febrero a Marzo, cuando las colmenas se ubican en las regiones del norte del estado, conformadas por Sierra Norte y Sierra Nororiental. La segunda cosecha sucede durante los meses de Septiembre a Noviembre en

las regiones del altiplano, principalmente en Serdán y Valles Centrales, Angelópolis y Valle de Atlixco y Matamoros.

9.1.1. SELECCIÓN DE MUESTRAS.

Se colectaron 95 muestras de miel de abeja durante el periodo 2018-2019, considerando las principales cosechas del estado, y los municipios productores. Mediante un muestreo no probabilístico; muestreo por conveniencia, se seleccionaron 33 apiarios de 8 municipios distribuidas en 6 regiones. De cada apiario con capacidad máxima de 30 colmenas fueron elegidas al azar entre cajones con bastidores o marcos operculados de 2 a 5 muestras. Por tanto el factor de discriminación para la recolección de muestras fue el porcentaje de humedad adecuado, aceptando únicamente aquellas donde la miel se encontraba madura (figura 16).

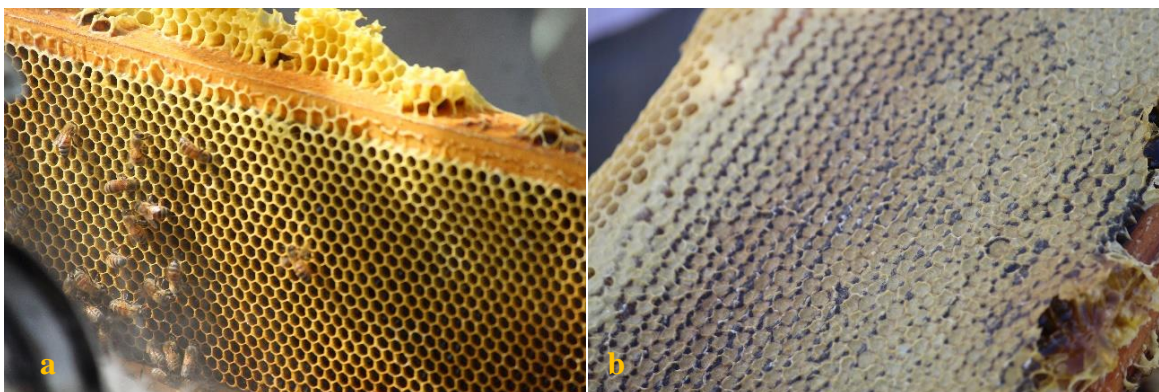


Figura 16. a) Miel inmadura en celdas sin operculación, b) Miel madura operculada.
Fuente: Elaboración propia.

9.1.2. COLECTA DE MUESTRAS.

Dentro del apiario, con el equipo de seguridad correcto (velo, chamarra, pantalones, botas y guantes) y aplicando constantemente el humo utilizando el ahumador (figura 17), se revisaron todas las colmenas con ayuda de unas cuñas de acero inoxidable para verificar y seleccionar las cajas que tuviesen bastidores operculados. Una vez elegidas, se retiraron los bastidores y se realizó un corte diagonal en el panal sin atravesar la lámina de cera utilizando una espátula (figura 18), inmediatamente la muestra de miel fue depositada en contenedores de vidrio o material de grado alimenticio con capacidad de 10 mg y boca ancha con la finalidad de

mejorar la manipulación de este. Para cada muestra colectada se procedió a limpiar la espátula con agua destilada contenida en una piseta para ejercer presión y retirar los restos de miel, evitando el contacto con el instrumento de colecta.



Figura 17. Ahumador utilizado para la extracción de bastidores.
Fuente: Elaboración propia, 2020.



Figura 18. Obtención de miel para muestras.
Fuente: Elaboración propia, 2020.



Figura 19. Colecta.
Fuente: Elaboración propia, 2020.

Posterior las muestras fueron rotuladas con un código de muestreo y almacenadas en un lugar sin demasiada humedad y exposición directa al sol. Es importante que los materiales utilizados para la colecta y manipulación de la miel sean de acero inoxidable o materiales no corrosivos, esto a causa de la acidez de la muestra.

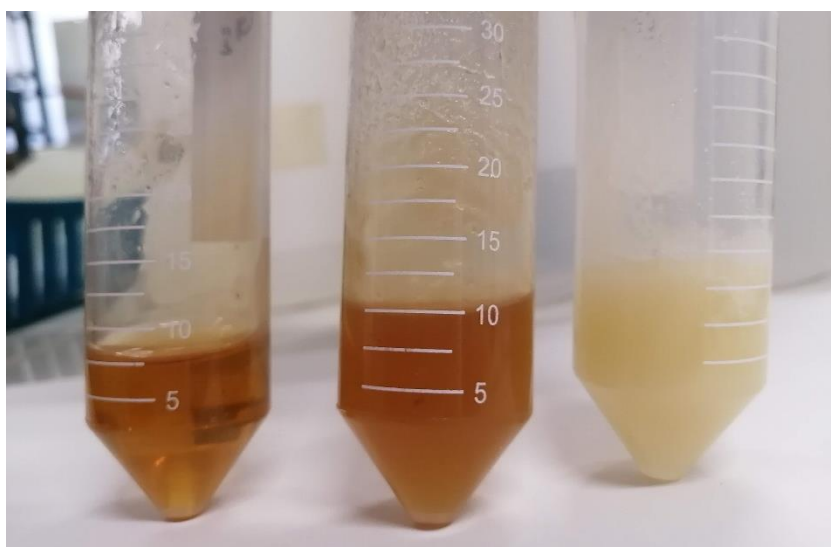


Figura 20. Muestras de miel envasadas.
Fuente: Elaboración propia.

A la par se registraron las coordenadas geográficas de cada apiario visitado empleando el dispositivo GPS Garmin eTrex 10.

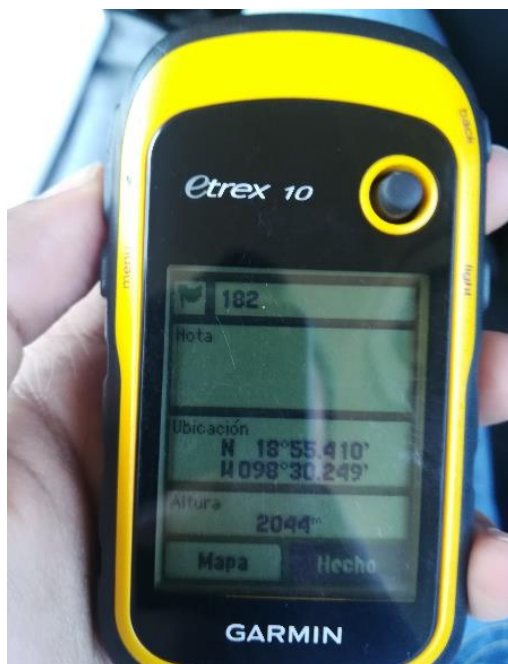


Figura 21. Dispositivo utilizado para la obtención de coordenadas.
Fuente: Elaboración propia, 2020.

9.2. DIRECTORIO ESTADÍSTICO NACIONAL DE UNIDADES ECONÓMICAS.

Mediante el Sistema de Información Geográfica QGIS vers. 3.6.2, se ubicaron los apiarios muestreados, así como los radios de acción correspondientes a cada apiario, considerando un radio de 3 km como zona de pecoreo primaria según lo mencionado en la literatura (Jean-Prost y Le-Conte, 2007).

Siguiente a la ubicación de las zonas de estudio, se obtuvo a través del INEGI, el Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas 04/2020, con el propósito de incluir en los mapas las actividades económicas cercanas a las zonas de producción como riesgo potencial de fuentes de contaminación. Es importante mencionar que se seleccionaron únicamente las

actividades económicas registradas en los principales radios de acción de las zonas de estudios, no obstante se presentan todas las actividades registradas en los municipios.

9.3. DIGESTIÓN DE MUESTRAS.

La digestión ácida es un método de pretratamiento de muestras ambientales ampliamente descrito. Su principio se basa en la descomposición de la matriz con ácidos concentrados y con la adición de peróxido de hidrógeno como oxidante, seguido por el calentamiento de la muestra en sistemas abiertos o cerrados, con esto se logra alterar las sustancias orgánicas y liberar los metales en solución de la compleja matriz (Zamudio, 2017).

Para lograr la descomposición de la matriz compleja miel, se pesaron 0.3 gramos de miel por muestra y se depositaron en tubos de teflón correspondientemente, se adicionaron 5 mL de Ácido Nítrico (HNO_3) al 65% concentrado, y 5 mL de Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2) al 30%. Los tubos fueron sellados e introducidos al equipo MARSXpress 230/60 de manera uniforme y balanceada, subsiguiente se programó el método de tratamiento “Hojas y Material vegetal” y las muestras fueron digeridas bajo las siguientes condiciones.

Tabla 9. Condiciones del equipo MARSXpress para la digestión de la matriz miel.

Stage	Power		Ramp time mm:ss	Preasure (psi-limit)	Temp °C	Stir	Hold Time mm:ss
	Level	%					
1	400W	100	15:00	800	200	Off	10:00

Fuente: Elaboración propia.



Figura 22. Digestión ácida de la matriz miel.
Fuente: Elaboración propia, 2020.

Transcurrido el tiempo de digestión y enfriamiento, los contenidos resultantes en los tubos, se trasvasaron a matraces donde fueron aforados a 50 mL con agua desionizada. En recipientes etiquetados se almacenaron las muestras tratadas para su análisis mediante Espectrometría de Absorción Atómica.



Figura 23. Comparación de muestra posterior a la digestión.
Fuente: Elaboración propia, 2020.

9.4. ESPECTROMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA.

La espectrometría de absorción atómica, tiene como fundamento la absorción de radiación de una longitud de onda determinada. Esta radiación es absorbida selectivamente por átomos que tengan niveles energéticos cuya diferencia en energía corresponda en valor a la energía de los fotones incidentes (Rocha, 2000). La relación de la pérdida de poder radiante, con la concentración de la especie absorbente y el espesor de la celda o recipiente que contiene los átomos absorbentes tiene como resultado la determinación generalmente en ppm del metal en cuestión.

Para determinar los contenidos de metales en las 95 muestras de miel mediante Espectrometría de Absorción Atómica por llama, se elaboraron soluciones patrón por cada elemento que se deseó determinar (Al, Cd, Co, Cu, Cr, Ni, Pb, Fe, Mg y Zn) a distintas concentraciones de acuerdo a lo recomendado en el manual del equipo EspectrAA 55B, partiendo de soluciones con concentraciones a 1000 ppm (tabla 10).

Tabla 10. Rango de concentración de las curvas por metal

Metal	Soluciones Estándar (ppm)	
Al	100	200
Cd	1	3
Co	10	20
Cu	4	10
Cr	5	20
Fe	5	20
Mg	0.6	0.2
Ni	10	20
Pb	10	20
Zn	0.5	1.5

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Una vez preparadas las soluciones patrón de todos los metales, así como las muestras digeridas, se colocó la lámpara del elemento a detectar en el equipo, y se programó y editó el método del metal elegido, ajustando siempre la intensidad de la flama, proveniente de los gases Aire/Acetileno/Óxido Nitroso.



Figura 24. Determinación de metales pesados mediante Espectrometría de Absorción Atómica.
Fuente: Elaboración propia, 2020.

9.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.

Los datos obtenidos de la determinación por espectrometría fueron analizados mediante el Software R versión 3.5.2 utilizando el paquete RCommander. En primera instancia los datos fueron sometidos a la prueba de normalidad Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov), por ser el número de muestras superior a 50, $n=95$, estableciendo un valor de $\alpha=0.05$ y las siguientes hipótesis.

H_0 : La distribución es normal

H_1 : La distribución no es normal

Una vez obtenidos los valores de P, se procedió a aceptar alguna de las dos hipótesis mediante la premisa: $P < \alpha$ se rechaza la hipótesis nula.

Posteriormente se realizó un Análisis de Varianza no paramétrico: “prueba de Kruskal-wallis” para todos los metales; agrupando las muestras por región se obtuvieron los valores

de P y se determinaron las diferencias significativas entre regiones a través de la prueba post-hoc de Kruskal-Wallis por cada metal.

9.6. MODELO LINEAL.

Se realizó un modelo lineal para cada metal considerando variables cuantitativas y cualitativas (nominales y ordinales) para encontrar correlaciones con las concentraciones determinadas, los datos de las variables fueron dadas por el reconocimiento en campo e imágenes satelitales obtenidas del Software Google Earth Pro versión 7.3.3.7786.

Las variables que se consideraron fueron: 1) La presencia de actividades antrópicas registradas ante el Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) (INEGI, 2020), 2) Presencia de actividades agrícolas, 3) Intensidad del tráfico y 4) Presencia de actividades antrópicas no registradas ante el DENUE.

10. RESULTADOS Y DISCUSIONES.

10.1. ESPECTROMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA.

Los resultados de la determinación mediante Espectrometría de Absorción Atómica por Flama se presentan en la Tabla 11. Los rangos de concentración en cada metal varían ampliamente, y en algunas muestras el contenido no fue detectado por dos principales razones: a) No existen contenidos del metal en cuestión en las muestras de miel, o b) Las concentraciones subyacen en los límites detectables del equipo.

Tabla 11. Concentraciones de metales en muestras de miel expresadas en mg kg⁻¹.

Apiarios	Clave	Metales									
		Al	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mg	Ni	Pb	Zn
La Plataforma	A1	5.01	0.01	0.05	1.20	0.42	10.97	22.15	0.57	ND	1.85
	A2	7.58	0.08	0.05	1.24	2.87	10.52	23.06	0.15	ND	2.01
El Paraíso	C1	5.97	0.04	0.09	1.11	0.45	7.14	20.51	0.34	0.30	1.96
	C2	4.70	0.03	ND	0.95	0.32	7.60	19.68	0.34	3.04	2.67
Los Lichis	I1	61.45	3.33	2.31	17.56	1.28	10.77	31.28	ND	ND	3.85
	AI1	75.35	2.94	2.79	17.35	1.91	13.09	30.96	ND	ND	4.57
	I2	72.02	3.29	2.57	9.00	1.86	12.71	33.44	ND	ND	4.64
La Torre	J1	89.31	5.00	3.23	22.10	1.45	11.94	30.71	ND	ND	63.87
	AJ1	82.64	3.79	3.94	17.88	1.52	10.30	28.26	ND	ND	4.36
El Monte	J2	67.89	3.93	3.33	7.50	0.95	7.02	26.83	ND	ND	38.93
	K1	94.64	5.81	3.71	22.10	1.94	606.13	73.97	ND	ND	7.87
	AK1	128.77	4.30	1.51	6.16	1.74	11.74	50.58	ND	ND	50.99
La Curva	K2	55.37	3.30	2.40	13.30	1.40	9.70	53.15	ND	ND	8.37
	B1	4.52	0.02	0.01	1.06	0.23	8.13	20.00	0.50	ND	1.93
	B2	7.31	0.08	ND	1.14	0.47	17.44	29.60	0.04	0.64	2.00
Zaragoza	G1	11.62	2.34	0.47	39.22	2.66	23.75	34.75	ND	ND	10.83
	AG1	9.64	3.33	0.50	30.50	2.50	15.67	33.18	ND	ND	4.90
	G2	2.30	2.36	0.97	24.17	2.08	13.89	30.67	ND	ND	4.47
Tierra Nueva	TN1	75.94	5.54	2.97	24.86	2.43	14.59	318.00	ND	ND	5.86
	TN2	95.17	5.76	0.76	24.55	2.27	13.18	128.42	ND	ND	5.73
	TN3	95.17	5.91	2.73	33.94	2.27	174.55	302.48	ND	ND	6.00
Dos Arroyos	DA1	94.12	8.33	4.17	41.11	1.94	16.53	621.44	ND	ND	5.28
	DA2	77.48	4.75	1.50	49.00	1.50	14.25	142.95	ND	ND	5.10
	DA3	99.43	6.72	2.81	74.06	2.34	13.59	80.55	ND	ND	5.69
Santa Elvira	SE1	92.66	6.52	2.58	98.03	2.12	12.42	75.94	ND	ND	6.05
	SE2	129.48	7.17	1.83	157.17	3.00	544.17	80.65	2.50	ND	10.52
	SE3	127.41	6.67	2.36	212.78	2.64	15.14	74.06	ND	ND	4.99

La Soledad	Sol1	138.10	5.92	1.84	38.29	1.45	14.61	38.16	ND	ND	5.68
	Sol2	147.15	5.00	2.56	ND	1.83	9.63	36.17	ND	ND	4.45
	Sol3	106.06	6.67	2.17	ND	32.33	10.83	41.67	ND	ND	6.77
La Palma	Pal1	72.31	4.66	0.91	ND	1.14	9.66	25.17	ND	ND	5.95
	Pal2	65.92	4.52	3.21	ND	1.55	9.88	30.92	ND	ND	5.35
	Pal3	75.23	4.87	2.18	ND	1.67	8.85	30.46	ND	ND	13.32
Yolotzin	Yol1	91.19	7.59	2.59	ND	3.62	18.10	33.79	ND	ND	18.86
	Yol2	133.61	7.67	0.83	ND	2.50	33.67	47.00	ND	ND	32.05
	Yol3	74.00	5.47	1.63	ND	29.30	16.28	39.97	ND	ND	17.63
Deshuesadero	Des1	45.45	8.67	0.67	ND	0.67	11.67	28.63	ND	ND	5.13
	Des2	61.98	6.94	1.67	ND	0.97	17.78	18.17	ND	ND	5.79
	Des3	57.12	7.50	0.88	ND	1.03	15.29	32.50	ND	ND	6.97
Vías	Via1	79.98	7.90	1.13	ND	1.29	16.29	30.44	ND	ND	8.48
	Vía2	101.43	7.88	0.30	ND	1.06	12.88	20.85	ND	ND	8.23
	Vía3	123.97	8.75	1.96	ND	1.43	14.29	30.27	ND	ND	10.05
Cervecera	Cer1	105.44	8.28	1.55	ND	1.03	17.59	49.38	ND	ND	6.22
	Cer2	89.94	7.21	3.24	ND	3.68	20.00	29.66	ND	ND	11.91
	Cer3	107.18	7.66	1.88	ND	0.94	25.16	27.42	ND	ND	6.31
CERVE	Cerve1	95.47	8.10	3.79	ND	0.86	15.00	55.45	ND	ND	7.53
	Cerve2	78.51	6.50	1.50	ND	0.88	11.50	19.61	ND	ND	6.03
	Cerve3	126.63	8.23	2.42	ND	1.94	2.42	84.74	20.65	ND	7.11
Pozo	Pozol	67.15	ND	5.63	ND	0.73	11.88	21.33	ND	ND	2.72
	Pozo2	90.39	ND	8.28	ND	0.94	14.53	55.19	3.28	ND	3.13
	Pozo3	66.75	ND	6.67	ND	0.26	9.23	17.88	ND	ND	9.62
Tlali	Tlali1	12.14	ND	ND	1.60	1.06	26.66	20.82	0.33	ND	1.87
	Tlali2	9.75	0.02	0.01	1.05	0.99	12.79	36.75	0.25	0.41	3.53
	Tlali3	6.08	0.04	ND	1.37	0.50	13.51	18.13	ND	36.15	3.14
	Tlali4	9.89	0.07	ND	1.49	0.83	23.52	21.54	0.68	ND	4.19
	Tlali5	7.96	0.08	ND	1.09	0.98	12.50	30.80	0.24	ND	2.05
Cuellar	Cue1	12.28	0.08	ND	1.18	0.36	16.25	30.36	0.47	1.01	1.45
	Cue2	9.27	0.06	ND	1.36	1.61	13.15	18.10	0.41	0.47	2.41
	Cue3	11.39	0.12	ND	1.08	0.63	13.54	42.01	0.48	0.35	1.48
	Cue4	14.23	ND	ND	1.10	0.65	17.39	18.65	0.31	ND	1.12
	Cue5	15.03	0.05	ND	1.34	1.84	22.36	30.09	0.24	ND	1.51
La Mónera	D1	8.97	0.07	0.04	1.24	0.50	12.82	30.17	0.46	0.17	3.61
	D2	7.47	ND	ND	1.42	0.58	12.85	32.02	0.43	ND	2.57
El Paxtle	E1	11.33	0.03	0.12	1.31	0.33	14.28	33.57	0.46	0.32	3.33
	E2	9.03	0.00	0.01	1.23	1.46	14.86	32.52	0.84	0.45	2.27
El Corral	F1	8.49	0.04	0.11	2.05	0.47	16.27	26.03	1.16	ND	2.07
	F2	8.26	0.04	0.06	1.11	0.94	14.44	22.11	0.72	ND	2.50
El Canal	H1	26.66	3.39	2.74	13.06	2.58	20.32	30.24	ND	ND	12.40
	AH1	63.07	3.16	3.03	12.24	1.45	9.08	24.80	ND	ND	5.82
	H2	71.63	3.50	4.33	17.67	1.50	13.83	31.48	ND	ND	9.43

	Ti1	15.57	0.21	ND	1.59	0.72	87.93	30.30	0.91	2.47	8.25
	Ti2	9.35	0.03	ND	1.06	0.44	16.27	17.21	0.35	0.72	2.15
Tiradero	Ti3	75.35	7.65	1.47	ND	1.47	9.41	31.54	ND	ND	4.32
	Ti4	71.63	7.33	0.50	ND	1.33	12.00	25.43	ND	ND	9.65
	Ti5	83.94	7.81	0.63	ND	0.63	7.19	22.52	ND	ND	5.53
	Axo1	10.92	ND	ND	1.69	2.62	25.71	52.14	1.11	0.44	3.71
	Axo2	9.88	0.09	ND	0.95	1.24	25.00	50.17	0.21	0.94	2.06
Axocopan	Axo3	13.18	0.10	ND	1.33	2.66	21.25	62.23	0.24	0.80	5.60
	Axo4	13.30	0.01	ND	6.86	2.29	22.97	121.47	0.43	0.41	3.96
	Axo5	65.32	7.42	2.42	ND	1.77	15.81	27.90	ND	ND	6.21
	Axo6	55.66	4.29	0.92	ND	1.33	8.98	18.88	ND	ND	3.97
Huexocopan	Hue1	17.60	0.10	ND	1.77	5.44	27.41	301.62	0.92	0.30	8.17
	Hue2	25.96	0.09	0.19	1.56	1.42	25.00	95.98	0.34	0.42	2.68
	Acat1	26.12	0.06	ND	1.28	1.59	60.25	119.53	1.00	0.87	2.20
Acatzingo	Acat2	30.72	0.03	ND	1.24	1.46	20.93	48.93	0.53	0.50	2.65
	Ce1	87.51	ND	7.79	ND	ND	8.97	16.97	6.18	ND	24.68
El Cerro	Ce2	89.10	ND	7.03	ND	ND	11.72	20.72	ND	ND	13.97
	Vir1	90.68	ND	6.25	ND	0.83	10.00	16.01	ND	ND	13.94
La Virgen	Vir2	108.82	ND	9.83	ND	0.50	12.33	44.68	0.17	ND	11.65
	Bar1	118.23	ND	5.97	ND	0.83	57.50	37.19	0.14	ND	3.32
La Barranca	Bar2	147.76	ND	7.12	ND	1.21	26.06	40.52	ND	0.15	13.33
	En1	117.51	ND	8.13	ND	0.47	33.44	29.42	ND	4.06	149.97
Los Encinos	En2	133.01	ND	7.34	ND	0.63	21.09	26.25	ND	8.44	124.94
	M1	127.15	ND	5.90	ND	0.77	23.08	20.29	0.64	10.90	0.77
El Capulín	M2	77.31	ND	8.39	ND	0.81	10.81	21.92	ND	16.45	5.44

Fuente: Elaboración propia, 2020. ND: No detectado.

10.2. METALES PRESENTES EN LA MIEL.

En la tabla 12, se anexan los estadígrafos obtenidos en esta investigación, así como los compilados durante el periodo 1999-2014 en distintos estudios con reportes del contenido mineral en la miel (compuestos mayoritarios y metales pesados) realizados en distintos países (Solayman *et al.*, 2016) con la finalidad de comparar ambos valores buscando similitudes o diferencias.

Tabla 12. Medidas de tendencia central y comparación con otras investigaciones.

Elemento	Unidad	Media	Media Solayman <i>et al.</i> (2016)	Mediana	Desviación Estándar	Desviación Estándar Solayman <i>et al.</i> (2016)	Rango	Rango Solayman <i>et al.</i> 2016
Mg	mg/kg	53.60	74.31	30.80	79.49	163.05	16.01 – 621.44	2.18 - 536.72
Fe	mg/kg	30.26	30.34	14.28	82.83	64.99	2.41 – 606.12	0.41 - 224.00
Cu	mg/kg	2.01	1.99	1.33	4.34	4.31	ND – 32.33	0.05 - 17.30
Zn	mg/kg	10.42	9.33	5.44	21.07	19.55	0.76 – 149.96	0.23 - 73.60
Ni	mg/kg	0.51	1.24	0.00	2.22	2.62	ND – 20.64	ND - 9.00
Al	mg/kg	73.29	5.12	67.89	54.06	3.61	2.77 – 178.78	1.39 - 11.36
Cd	mg/kg	3.08	0.08	2.94	3.21	0.12	ND – 8.75	0.00017 - 0.373
Pb	mg/kg	0.96	0.42	0.00	4.27	0.83	ND – 36.15	0.00063 - 3.232
Co	mg/kg	2.09	0.17	1.50	2.43	0.29	ND – 9.83	1e-5 - 0.8
Cr	mg/kg	11.26	0.15	1.11	30.41	0.13	ND – 212.77	ND - 0.37

Fuente: Elaboración propia a partir de datos recuperados de Solayman *et al.*, 2016. ND: No detectado.

El Mg es uno de los elementos mayoritarios en la miel, el rango de concentración presente de acuerdo a la FAO (2019) varía entre 0.7 y 13 mg por cada 100 g de miel, en tanto que el la USDA (2019) establece que por cada 100 g, no deben estar presentes contenidos mayores a 2 mg. Algunos de los valores reportados en este estudio superan las concentraciones establecidas por ambas organizaciones, siendo el rango encontrado por cada 100 gramos: 1.6 a 62.14 mg. No obstante se considera que la floración de algunos cultivos con necesidades altas de magnesio como el aguacate, representan una fuente de alimentación importante para la *Apis mellifera* L. en México; en un estudio similar en la región Occidente del territorio nacional, en el estado de Nayarit, fueron reportados contenidos de Mg en muestras de miel en un rango de 13.1 mg kg⁻¹ a 61.3 mg kg⁻¹ (Mondragón-Cortez *et al.*, 2013). En otras investigaciones el Mg ha sido reportado en concentraciones de 1 078.95 mg kg⁻¹ en miel de castaña proveniente de España (Alda-Garcilope *et al.*, 2008) y 73.8 mg kg⁻¹ en miel de sauce originaria de Paquistán (Farooque y Ahmed, 2019), ambas determinadas por Espectrometría de Absorción Atómica por Flama, mientras que Spirić *et al.* (2019) y Tuntun *et al.* (2019) reportaron concentraciones de 108 mg kg⁻¹ y 117.16 mg kg⁻¹ respectivamente, en miel de mielato a través de ICP.

De acuerdo a Spirić *et al.* (2019) existe una correlación positiva entre la conductividad eléctrica y el contenido de macro-elementos en la miel; respecto a esto la norma general CXS 12-1981, establece un Límite Máximo de 0.80 mS cm⁻¹ en mieles no indicadas y mezcla de ellas, y superior a 0.80 mS cm⁻¹ en mieles de mielato o en casos específicos como la miel de castaña. En cuanto a la Norma Mexicana NOM-004-SAG-GAN-2018. *Producción de miel y especificaciones.*, fija un Límite Máximo de 0.80 mS cm⁻¹ sin distinción del origen botánico. Por lo tanto se infiere que altos contenidos de macro-elementos como el Mg pueden influir en el aumento de la conductividad eléctrica, ocasionando que la miel no cumpla con el parámetro de calidad establecido por estas normas. Por ello es importante señalar los puntos atípicos en la concentración de Mg que en esta investigación se reportan; si bien el contenido de Mg en miel no está regulado por ninguna norma mexicana, este puede influir directamente en su calidad.

La media y mediana del Mg varían, y la desviación estándar es superior a la primera. Ordenándolas de la siguiente manera: Desviación estándar > Media > Mediana, es posible intuir que la distribución en los datos es asimétrica y con una dispersión amplia.

Las concentraciones de Fe determinadas en esta investigación en ciertos casos sobrepasan los valores de referencia establecidos por la FAO (2019), los cuales se encuentran en un rango de 0.3 a 40 mg kg⁻¹, sin embargo de acuerdo a la media y la mediana de Fe la mayoría de los valores se encuentran bajo los 40 mg kg⁻¹, aquellos valores por arriba de este límite son la causa de la significativa desviación estándar. Mondragón-Cortez *et al.* (2012), reportaron concentraciones no superiores a 5 mg kg⁻¹ para miel multifloral determinada por Espectrometría de Absorción Atómica por Flama, mediante el mismo método Moniruzzaman *et al.* (2014) reportaron una concentración máxima de 233 mg kg⁻¹ en miel de caucho producida en Malasia. En cuanto a otras investigaciones bajo el método ICP han publicado concentraciones de 54.78 mg kg⁻¹ y 1 278.77 µg g⁻¹ en Rumania y Turquía respectivamente (Oroian *et al.*, 2016; Altunatmazz *et al.*, 2018). Cabe señalar que el Fe es uno de los elementos más abundantes de la corteza, empero, la disponibilidad depende de las características del suelo (pH, contenido de materia orgánica, estado del Fe, etc.). Las concentraciones de Fe en la miel también pueden variar de acuerdo al origen botánico; Moniruzzaman *et al.* (2014) señalan que la capacidad de absorción y movilización de Fe en las plantas de las raíces al néctar representan un factor influyente en las concentraciones presentes en la miel.

Respecto al Cu, se encuentran similitudes entre la media y la mediana en esta investigación y la media reportada por Solayman *et al.* (2016), al igual que la desviación estándar ligeramente superior a la media en ambos casos. El contenido de Cu en miel ha sido reportado anteriormente en países como Etiopia utilizando métodos de Espectrometría de Absorción Atómica por Flama y por Grafito en concentraciones de 13.99 mg kg⁻¹ y 1.15 µg g⁻¹ respectivamente para mieles multiflorales (Nigussie *et al.*, 2012; Adugna *et al.*, 2020), así como en Turquía usando ICP-OES en concentraciones de 198.36 µg g⁻¹ y 1.52 mg kg⁻¹ (Altunatmazz *et al.*, 2018; Tuntun *et al.*, 2019).

La FAO (2019) estima que el rango presente de Cu en la miel no debe superar los 0.6 mg kg⁻¹, en tanto la USDA (2019) tiene un valor de referencia de 0.36 mg kg⁻¹. En ambos casos algunas de las muestras aquí reportadas superan los valores de referencia. Es probable que

las altas concentraciones de cobre en ambas muestras sean consecuencia de la contaminación ambiental. De acuerdo a Oroian *et al.* (2016), el ingreso del Cu a los alimentos es causado por el uso desmedido de agroquímicos así como la presencia de actividades antropogénicas (combustión de carbón, fundición de metales, incineración de residuos y generación de aguas residuales) ambos causantes de contaminación.

En otros estudios se han reportado concentraciones de Zn de $173.77 \text{ mg kg}^{-1}$ (Moniruzzaman *et al.*, 2014) y 4.1 mg kg^{-1} (Farooque y Ahmed, 2019) para miel monofloral; en cuanto se han detectado concentraciones de 22.3 mg kg^{-1} (Przybyłowski y Wilczyńska, 2001) y 6.8 mg kg^{-1} para miel multifloral (Mondragón-Cortez *et al.*, 2012) utilizando AAS por flama, mientras que mediante ICP-MS y OES para mieles multiflorales se han indicado concentraciones de 19.17 mg kg^{-1} y 4.19 mg kg^{-1} en Serbia (Spirić, 2019) y Arabia Saudita (Bazeyad *et al.*, 2018) respectivamente. Las concentraciones aquí determinadas se asemejan a los valores reportados anteriormente, la media y la mediana son ligeramente distintas entre ellas, siendo la mediana más pequeña lo que indica que al menos la mitad de los valores se encuentran bajo los 5 mg kg^{-1} , la media por su parte se encuentra dentro de los valores de referencia publicado por la FAO (2019), que varía en concentraciones de 0.5 a 20 mg kg^{-1} , la USDA (2019) por otro lado fija un valor de referencia de $0.22 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$. Cabe señalar que el valor máximo en esta investigación no supera la concentración máxima encontrada por Moniruzzaman *et al.* (2014).

Referente al Ni se detectaron concentraciones máximas de 20 mg kg^{-1} en este estudio, sin embargo según la mediana en la mitad de las muestras no fue detectado Ni. La media obtenida fue de 0.51 mg kg^{-1} menor que la media reportada por Solayman *et al.* (2016) de 1.24 mg kg^{-1} . Conforme a otras investigaciones el Ni ha sido reportado en concentraciones de 2.61 mg kg^{-1} y 3.92 mg kg^{-1} en diferentes mieles bajo el método AAS por flama en Kosovo y Etiopia respectivamente (Nigussie *et al.*, 2012; Salihaj y Bani, 2017), en tanto que por ICP-OES se ha reportado un valor de 0.59 mg kg^{-1} para miel de Brezo Turca (Yücel y Sultanoglu, 2013). El Ni no es considerado por la FAO (2019) un elemento esencial en la miel por lo que no establece un rango de presencia en ella, no obstante Solayman *et al.* (2016) reportan como un compuesto minoritario además de esencial para el ser humano. La OMS por su parte opta por fijar como valor de referencia de Ni para la calidad del agua potable, una concentración

no superior a 0.07 mg/ L (OMS, 2006). Adugna *et al.* (2020) por otro lado declara que en India el valor de referencia para la presencia de Ni en alimentos es de 0.50 0.50 $\mu\text{g g}^{-1}$.

Rashed *et al.* (2009) y Salihaj y Bani (2017) mencionan que es probable que las cantidades de Ni en la miel dependan del origen botánico y de la hiper-acumulatividad que poseen algunas plantas, así como del tipo de suelo algunos de ellos ricos en Ni como los suelos serpentinos.

En esta investigación el Al fue detectado en un rango de 2.77 mg kg^{-1} a 178.78 mg kg^{-1} con una media de 73.29 mg kg^{-1} y una mediana similar, superior al rango y la media reportada por Solayman *et al.* (2016). Otros estudios han reportado concentraciones de 91.33 mg kg^{-1} (Dzugan *et al.*, 2018), 25.8 mg kg^{-1} (Tuntun *et al.*, 2019), 22.06 mg kg^{-1} (Fredes y Montenegro, 2006) y 155.58 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Altunatmazz *et al.*, 2018) en mieles multiflorales provenientes de Polonia, Turquía y Chile, aunque los valores mencionados son más bajos de los determinados en este estudio, es importante señalar que el método mayormente utilizado es ICP-OES.

Pese a que el Al es el elemento metálico más abundante en la corteza terrestre solo pequeñas cantidades se encuentran presentes en alimentos no procesados como frutas y hortalizas; según la ATSDR (2008) la ingesta diaria es de aproximadamente 7 a 9 mg en personas adultas. Es importante mencionar que el Al se encuentra presente en la mayoría de los compartimentos ambientales, por lo que la contaminación por Al pudiese provenir de distintas fuentes.

En lo que respecta al Cd, se encontraron concentraciones en un máximo de 8.75 mg kg^{-1} , en otros estudios el Cd ha sido reportado en contenidos menores; 3.81 mg kg^{-1} en Rumania para miel multifloral (Bartha *et al.*, 2020) similar a la media obtenida en esta investigación, 0.38 mg kg^{-1} en Paquistán para miel monofloral (Farooque y Ahmed, 2019) ambas determinadas por Espectrometría de Absorción Atómica por Grafito y Flama respectivamente, 0.05 mg kg^{-1} en Chile (Fredes y Montenegro, 2006) y Polonia (Dzugan *et al.*, 2018) para mieles no indicadas utilizando ICP, 1 585 $\mu\text{g kg}^{-1}$ en EE.UU (Birge y Price, 2001) y 0.76 ppm en India para miel multifloral mediante un método distinto de descomposición de la matriz “miel” (Oxidación Vía Seca) (Singh *et al.*, 2014).

De acuerdo a la OMS (2006) la principal fuente de exposición diaria al Cd son los alimentos, con una ingesta oral de aproximadamente 10 a 35 μg por día. Existe una norma internacional que establece el contenido máximo de Cd en miel; MERCOSUR (2011) fija en la Resolución N° 12/11 una concentración máxima de 0.10 mg kg^{-1} . Conforme a la norma la media determinada en este estudio supera el límite máximo.

Es necesario señalar que el Cd, al igual que el Pb, son elementos no esenciales en la miel y potencialmente tóxicos para los seres vivos, por lo que forman parte de los compuestos ultra-traza, en tanto que su presencia en la miel de abeja ha sido reportada como compuesto minoritario y en la mayoría de las ocasiones un referente de contaminación ambiental.

El Pb fue determinado en esta investigación en una concentración máxima de 36.15 mg kg^{-1} , con una media de 0.96 mg kg^{-1} y una mediana que señala que en la mitad de las muestras no fue detectado. Solayman *et al.* (2016) reportaron una media de 0.42 mg kg^{-1} , mientras que en estudios más recientes el Pb fue detectado en concentraciones de 3.03 $\mu\text{g g}^{-1}$ y 1.24 mg kg^{-1} para mieles no indicadas en distintas regiones de Turquía a través del método ICP-OES (Altunatmazz *et al.*, 2018; Tuntun *et al.*, 2019), por otro lado mediante AAS por Grafito Salama *et al.* (2019) reportaron concentraciones de 10.98 mg kg^{-1} . Otras investigaciones han reportado contenidos de 8.22 ppm en miel de aguacate producida en Israel determinada por Fotometría de Emisión de llama (Dag *et al.*, 2005) y 4.3 mg kg^{-1} para miel de *Acacia* s.p. originaria de Eslovenia mediante TXRF (Golob *et al.*, 2005).

Es importante mencionar que existen normas internacionales que regulan el contenido de Pb en la miel; la Comisión Europea fija en el REGLAMENTO UE 2015/1005 un contenido máximo de Plomo en miel de 0.10 mg kg^{-1} (DOUE, 2015). Por otro parte MERCOSUR (2011) establece un Límite Máximo de 0.30 mg/kg mediante la Resolución N°12/11. Algunas de las muestras aquí reportadas superan los valores máximos de referencia.

Respecto al Co, la media determinada en este estudio es de 2.09 mg kg^{-1} con una mediana de 1.50 mg kg^{-1} similar a lo reportado por Farooq y Maqbool (2008) (1.12 mg kg^{-1}) usando Fotometría de Emisión de llama en Paquistán. Otros estudios han reportado concentraciones menores: 0.62 mg kg^{-1} para miel producida en Chile (Fredes y Montenegro, 2006) y 27.5 $\mu\text{g kg}^{-1}$ para miel multifloral de Arabia Saudita (Bazeyad *et al.*, 2018) bajo ICP-OES. Otros autores como Alqarni *et al.* (2010), Nigussie *et al.* (2012) y Farooque y Ahmed (2019) han

reportado concentraciones de 1.32 ppm en Arabia Saudita, 0.249 mg kg⁻¹ en Etiopia y 0.23 mg kg⁻¹ en Paquistán respectivamente, utilizando AAS por flama en miel monofloral.

El Co es un oligoelemento esencial para el ser humano, presente en el suelo, la atmósfera y en los alimentos en concentraciones bajas, sin embargo según la ATSDR (2004) exposiciones e ingestas prolongadas de contenidos mayores a 0.5 mg kg⁻¹ pueden provocar efectos sobre la salud humana.

Por ultimo para el Cr en esta investigación se determinó una media de 11.26 mg kg⁻¹ con una mediana de 1.11 mg kg⁻¹, esta diferencia es consecuencia del valor máximo detectado con una concentración de 212.77 mg kg⁻¹. Otros investigadores han reportado concentraciones máximas de 3.55 mg kg⁻¹ para miel monofloral en Eslovenia utilizando TXRF (Golob *et al.*, 2005), 1.98 mg kg en Chile mediante OVS-ICP (Fredes y Montenegro, 2006), 0.79 mg kg⁻¹ en miel no indicada producida en Etiopia bajo AAS por flama (Nigussie *et al.*, 2012), 7.96 µg g⁻¹ en Turquía por ICP-OES (Altunatmazz *et al.*, 2018), y 6.66 µg g⁻¹ para miel multifloral utilizando el método AAS por flama y grafito (Adunga *et al.*, 2020).

Orioian *et al.* (2016) mencionan que los altos contenido de Cr en la miel son consecuencia de actividades relacionadas con la combustión de carbón y petróleo cercanos a los puntos de producción. Por su parte Rashed *et al.* (2019) apunta que un factor importante es el origen botánico, debido a que el Co y el Cr son absorbidas selectivamente por algunas especies de plantas.

No existe norma nacional o internacional que establezca el Límite Máximo para el contenido de Cr en miel. En México la NOM-041-SSA1-1993 fija un Límite Permisible de 0.05 mg kg⁻¹ de cromo total para agua purificada envasada de consumo directo, sin embargo es importante recordar que el consumo directo de miel en el país es de aproximadamente 200 g per cápita anual.

10.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS.

10.3.1. PRUEBA DE NORMALIDAD.

El Test de normalidad Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov) para cada agrupación de datos por metal demostró que los datos no provienen de una distribución normal en los diez metales sujetos a la prueba, esto bajo las hipótesis:

Ho: Los datos proceden de una distribución normal.

H1: Los datos no proceden de una distribución normal.

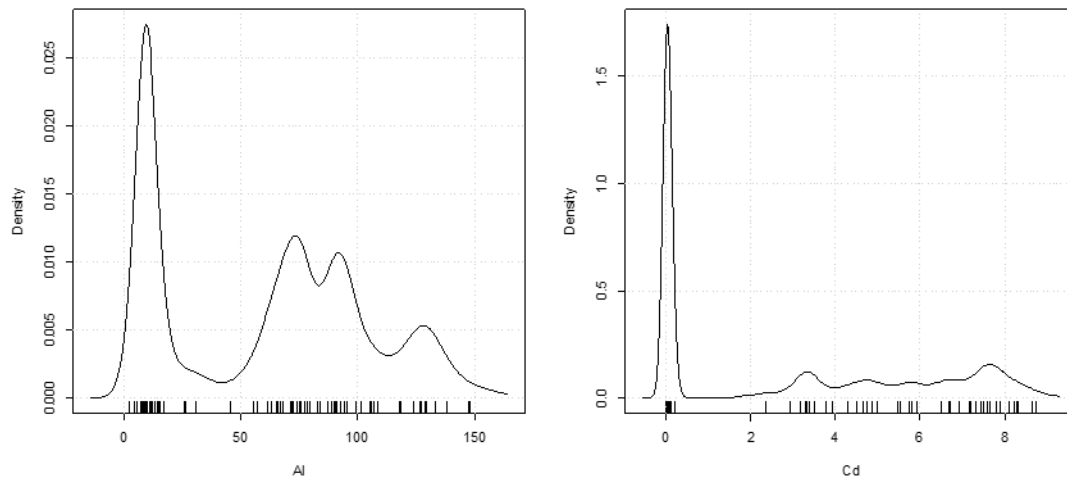
Dando como resultado los siguientes valores de P (Tabla 13), significativamente menores que el valor de α propuesto (0.05).

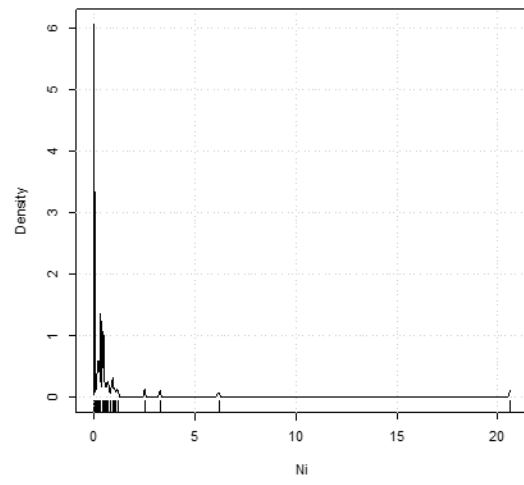
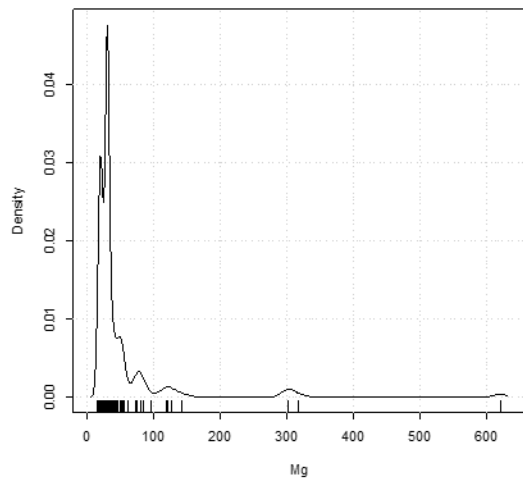
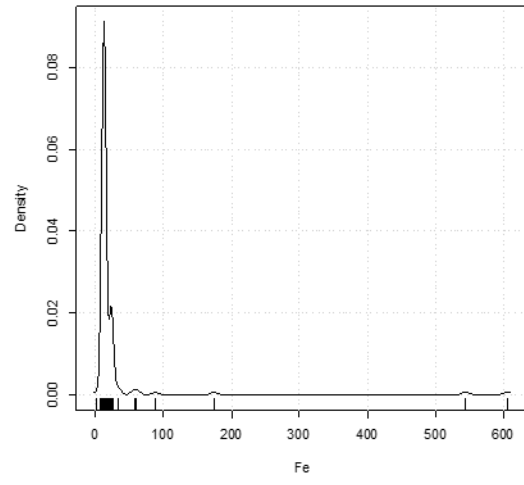
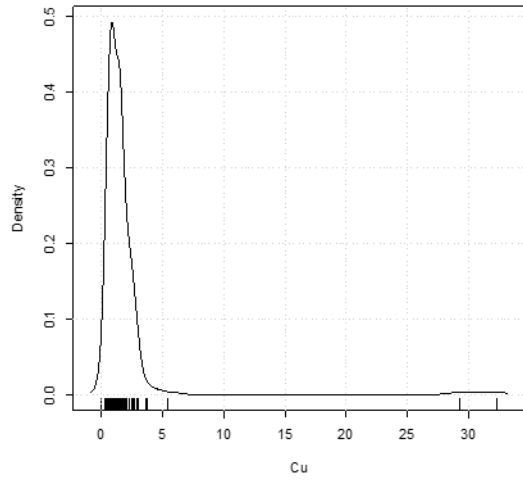
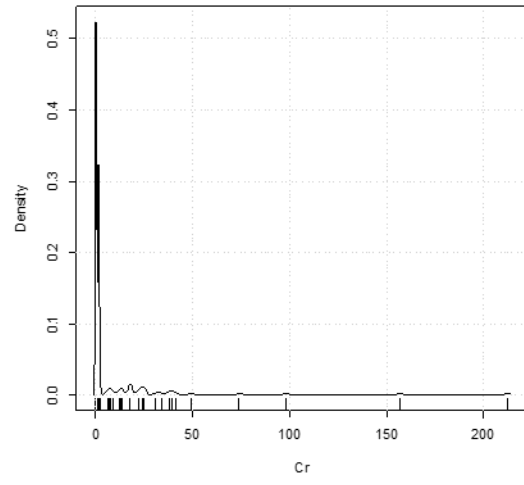
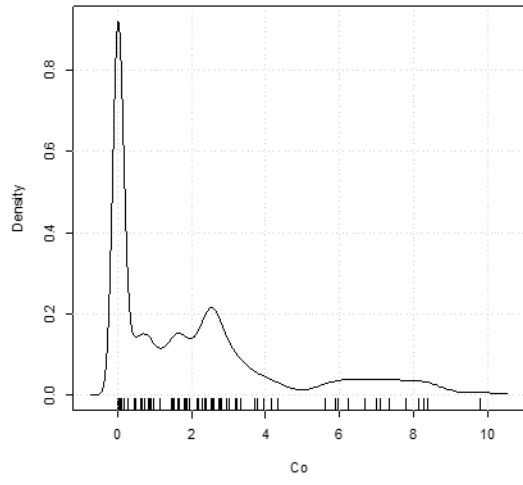
Tabla 13. Valores de la prueba de normalidad Lilliefors para todos los metales.

Metal	Al	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mg	Ni	Pb	Zn
Valor de P	1.00e-8	2.2e-16	1.00e-9	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16

Fuente: Elaboración propia, 2020.

En las siguientes gráficas (figura 25) se demuestra la distribución de las muestras para Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg Ni, Pb y Zn utilizando diagramas densidad.





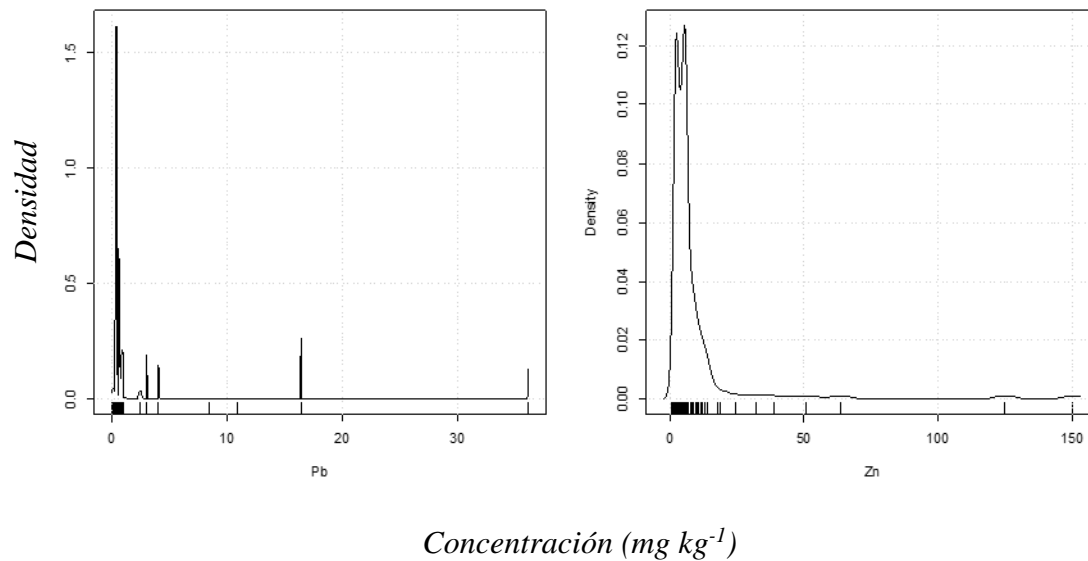


Figura 25. Gráficas de densidad para todos los metales.
Fuente: Elaboración propia.

Los diagramas de densidad demuestran que en la mayoría de los metales la agrupación de las muestras presentan una distribución asimétrica sesgada a la derecha como lo predecían las diferencias entre la media y la mediana discutidas anteriormente.

Al demostrar que todos los agrupamientos por metal arrojaron valores muy por debajo del propuesto nivel de significación, por lo que en todos los casos se rechaza la hipótesis nula demostrando que las muestras presentan una distribución asimétrica, se encuentra viable continuar el análisis estadístico con un test no paramétrico.

10.4. EVALUACIÓN POR REGIONES.

La prueba no paramétrica Kruskal-Wallis para la comparación de las muestras a diferentes niveles de agrupación dio los siguientes resultados.

Tabla 14. Medianas de todos los metales expresadas en mg kg⁻¹

Región	Al	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mg	Ni	Pb	Zn
Sierra Norte	33.49	3.11	1.24	11.15	1.48	11.35	30.69	0	0	5.9
Sierra Nororiental	94.64	5.91	2.27	24.7	2.27	14.42	60.53	0	0	4.52
Angelópolis	36.05	0.08	0.48	1.08	0.95	14.36	30.13	0.12	0	3.9
Valle de Atlixco y Matamoros	17.6	0.1	0	1.06	1.42	21.25	31.54	0.24	0.41	4.32
Serdán y Valles Centrales	99.75	0	7.07	0	0.79	21.01	27.83	0.07	0.32	12.49
Valor de P	1.4E ⁻⁰⁶	9.5E ⁻⁰⁷	2.2E ⁻⁰⁵	6.3E ⁻⁰⁵	3.5E ⁻⁰⁶	0.07	3.7E ⁻⁰⁴	0.01	1.7E ⁻⁰⁴	0.04

Fuente: Elaboración propia, 2020.

10.4.1. ALUMINIO.

Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes

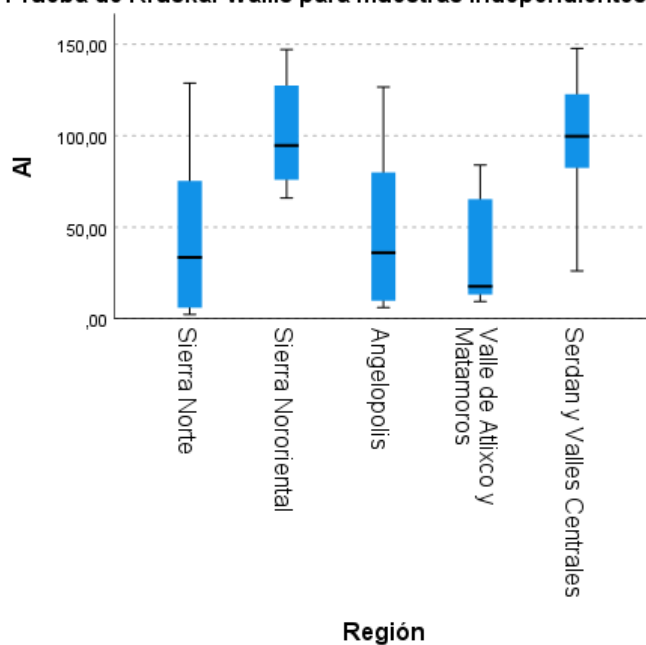


Figura 26. Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes de Al.

Fuente: Elaboración propia.

Las medianas obtenidas de Al por región se ordenan de forma descendente de la siguiente manera: Serdán, Sierra Nororiental, Angelópolis, Sierra Norte y Valle de Atlixco. Las regiones Serdán, Angelópolis y Sierra Norte presentaron una amplia distribución en las concentraciones determinadas que varían en un rango aproximado de 25 mg kg⁻¹ a 125 mg kg⁻¹.

De acuerdo a la prueba de Kruskal-Wallis para la distribución de las concentraciones de Al se rechaza la hipótesis nula (P= .000) aceptando que existen diferencias entre la distribución de los concentraciones de Al entre regiones.

La prueba posteriori señaló las regiones con diferencia estadística significativa encontrando una mayor diferencia entre las regiones: Sierra Norte - Sierra Nororiental. Así mismo es

posible encontrar diferencias entre la distribución de las regiones: Angelópolis – Sierra Nororiental, Valle de Atlixco – Sierra Nororiental, Sierra Norte - Serdán, Valle de Atlixco - Serdán. La región con mayor discrepancia es la Sierra Nororiental siendo estadísticamente distinta con al menos tres regiones.

Tabla 15. Comparaciones por pareja de Región para Al.

Sample 1-Sample 2	Estadístico de prueba	Desv. Error	Desv. Estadístico de prueba	Sig.	Sig. ajustada^a
Sierra Norte – Serdán	-37.58	10.27	-3.65	.000	.003
Sierra Norte - Sierra Nororiental	-38.91	9.18	-4.23	.000	.000
Valle de Atlixco – Serdán	-35.43	11.03	-3.21	.001	.013
Valle de Atlixco - Sierra Nororiental	36.76	10.03	3.66	.000	.002
Angelópolis – Serdán	-30.59	9.25	-3.30	.001	.009
Angelópolis - Sierra Nororiental	31.92	8.03	3.97	.000	.001

Fuente: Elaboración propia, 2020. Nota: Se visualizan las significaciones asintóticas (pruebas bilaterales). El nivel de significación es de .050., **a**. Los valores de significación se han ajustado mediante la corrección Bonferroni para varias pruebas.

Müller *et al.* (1998) mencionan que la presencia del Al en el medio ambiente es ubicua y que todos los alimentos contienen Al, con concentraciones, en general más altas en alimentos de origen vegetal que de origen animal.

Los apiarios muestreados establecidos en la región Serdán se encuentran en suelos predominantemente Andosoles y Regosoles (Arriaga *et al.*, 2000; INEGI, 2009) caracterizados por tener altos contenidos de Al y Fe en la fracción de tierra fina, que puede ser movilizada por acción del viento y llegar directamente a la colmena, o adherirse a las abejas. Aunado a esto presenta una alta actividad agrícola principalmente del monocultivo de maíz, el cual es fertilizado por compuestos nitrogenados y fosfatados (Contreras-Ramos y Díaz-Ruíz, 2012). El uso indiscriminado de fertilizantes principalmente amoniacales contribuye al descenso del pH en el suelo, provocando acidez y solubilización del Al, cuando se alcanzan valores debajo de 5, en forma intercambiable y tóxica (Al^{3+}); no obstante el pH

del suelo agrícola en la región Serdán se encuentra en un rango de 6 a 6.9 (Contreras-Ramos y Díaz-Ruíz, 2012). De acuerdo a Rivera *et al.* (2016) en suelos con altos contenidos de Al y un pH entre 4.7 y 6.5, similar al pH reportado en la región Serdán, predomina su forma polimerizada como $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$. La actividad agrícola además demanda cantidades importantes de agua por lo que el transporte y uso para riego pudiese contribuir a los contenidos de Al en el ambiente que influyen directamente en las concentraciones presentes en la miel.

Al igual que en la región Serdán la mayoría de los apiarios en todas las regiones se encuentran establecidos en suelos agrícolas predominadas por el monocultivo de maíz, con excepción del Valle de Atlixco donde algunas apiarios se ubican en zonas productoras de aguacate. Para el caso de la región Angelópolis las muestras obtenidas provienen de apiarios ubicados en zonas sin agricultura; La miel producida en esta región es nombrada localmente como miel de mezquite (*Prosopis* spp.), Ramírez *et al.* (2019) señalan que algunas especies de este género pueden acumular elementos como Al, Fe y Zn, consecuencia de la tolerancia de la presencia natural de estos elementos en el suelo o generadas por la contaminación ambiental. Esto pudiese explicar los contenidos de Al en zonas de dicha región sin presencia agrícola.

Todas las regiones contienen Al en cantidades mayores a las establecidas en la NOM-041-SSA1-1993. *Bienes y Servicios. Agua Purificada Envasada. Especificaciones Sanitarias.*, el cual fija un límite máximo de 0.20 mg L^{-1} . Los medianas aquí reportadas sobrepasan el límite máximo en consideración de la densidad de la miel que varía en un rango de 1.410 a 1.435 kg L^{-1} (Jean-Prost y Le-Conte, 2007). Cabe resaltar que el consumo de miel es mucho menor y que es necesario comparar la presencia de Al en la miel con productos similares como azúcares, de igual consumo en volumen o desde reportes de efectos nocivos en abejas.

Los contenidos de Al en todas las regiones podría indicar, bien, una contaminación secundaria, consecuencia de la corrosión por los materiales utilizados en la producción de miel (cuñas, tapas, extractores y almacenamiento) tal como lo indican Chua *et al.* (2012), Dzugan *et al.* (2018) y Tuntun *et al.* (2019), por lo que el contenido de Al presente en la miel dependerá también de las condiciones climáticas de las zona de producción que favorezcan la corrosión en un menor tiempo de los materiales y equipos utilizados en los apiarios.



Figura 27. Cubierta de colmena con material en estado de oxidación.
Fuente: Elaboración propia, 2020.

Las altas concentraciones de Al determinadas en esta investigación representan un potencial riesgo para la salud de las colmenas, Chicas-Mosier *et al.* (2007) demostraron que dosis únicas de Al entre 2 mg L^{-1} y 20 mg L^{-1} provocan efectos negativos sobre el aprendizaje, la orientación y el comportamiento de búsqueda de alimento de las abejas melíferas. Por otro lado Gauthier *et al.* (2016) reportó que la ingesta de Al a concentraciones de 20 mg L^{-1} , provoca un aumento en las muertes de abejas en un periodo de 6 días. Todas las regiones con excepción del Valle de Atlixco, sobrepasan este valor de referencia, por lo que estos contenidos son potencialmente riesgosos para los comportamientos ecológicamente relevantes en las abejas.

10.4.2. CADMIO.

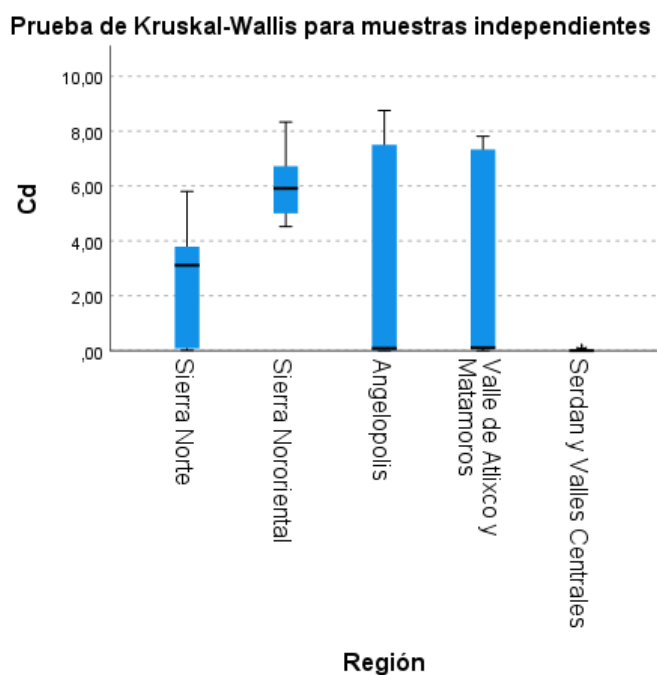


Figura 28. Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes de Cd.

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Cd detectados en ambas regiones.

La prueba posteriori de Kruskal- Wallis determinó que la región Serdán es distinta a todas las regiones debido a que en la mayoría de las muestras de esta región el Cd no fue detectado. Así mismo existen diferencias estadísticamente significativas entre la región Sierra Nororiental y las otras regiones con excepción del Valle de Atlixco. La comparación Valle de Atlixco – Sierra Nororiental no presenta diferencias de acuerdo al valor de la significancia ajustada por la prueba de Bonferroni.

El Cd mostró diferencias significativas para la igualdad de distribución entre las regiones ($P = .000$), siendo la región Sierra Nororiental la que obtuvo la mediana más grande, seguido de Sierra Norte, Valle de Atlixco, Angelópolis y Serdán.

Las concentraciones en las regiones Angelópolis y Valle de Atlixco y Matamoros presentan una amplia distribución, lo cual indica variación de los contenidos de

Tabla 16. Comparaciones por pareja de Región para Cd.

Sample 1-Sample 2	Estadístico de prueba	Desv. Error	Desv. Estadístico de prueba	Sig.	Sig. ajustada ^a
Serdán - Sierra Norte	33.80	10.24	3.29	.001	.010
Serdán – Angelópolis	36.52	9.23	3.95	.000	.001
Serdán - Valle de Atlixco	39.09	11.01	3.55	.000	.004
Serdán - Sierra Nororiental	59.86	10.24	5.84	.000	.000
Sierra Norte - Sierra Nororiental	-26.05	9.16	-2.84	.004	.045
Angelópolis - Sierra Nororiental	23.34	8.01	2.91	.004	.036
Valle de Atlixco -Sierra Nororiental	20.77	10.01	2.07	.038	.380

Fuente: Elaboración propia, 2020. Nota: se visualizan las significaciones asintóticas (pruebas bilaterales). El nivel de significación es de .050. a. Los valores de significación se han ajustado mediante la corrección Bonferroni para varias pruebas.

La mediana obtenida de la Sierra Nororiental (5.91 mg kg^{-1}) supera los límites máximos de Cd en miel establecidas en algunos países como India (1.5 ppm) y Polonia (0.03 mg kg^{-1}), así como los establecidos por MERCOSUR (0.10 mg kg^{-1}).

En una investigación anterior *Matin et al.* (2016) justificaron los contenidos de Cd determinadas en abejas establecidas en un distrito industrial a causa de la influencia de fuentes antropogénicas como plantas de fundición de Hierro y otros metales. Los apiarios ubicados en la Sierra Nororiental se encuentran influenciadas por fuentes antropogénicas, sin embargo no aquellas del giro metalúrgico. El municipio de Acateno es de importancia comercial en el estado de Puebla según ProAire (Secretaría de Sustentabilidad Ambiental y Ordenamiento Territorial, 2012), la concentración de actividades antrópicas llevadas a cabo en el municipio pudiesen influir en la concentración de Cd presentes en la miel, no obstante se desconocen las fuentes de contaminación.

La presencia del río María de la Torre en el municipio de San José Acateno pudiese representar una fuente influyente en la concentración de metales encontrados en la muestras procedentes de este municipio, el río atraviesa en primera instancia el municipio de Teziutlán

el cual de acuerdo a ProAire (Secretaría de Sustentabilidad Ambiental y Ordenamiento Territorial, 2012) es de importancia industrial, con presencia actividades metalúrgicas y de maquilado textil. Los apiarios ubicados en San José Acateno se encuentran de igual manera cercanos a otros cuerpos de agua que pudiesen ser contaminados con descargas de aguas residuales procedentes de diversas fuentes. Es importante destacar que de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996., la presencia de Cd en ríos derivada de la descarga de aguas residuales utilizada para riego agrícola no debe sobrepasar un promedio mensual de 0.2 mg L^{-1} , por lo que valores por encima de la norma justifican la influencia directa de las concentraciones de Cd en la miel generada en dichos apiarios.

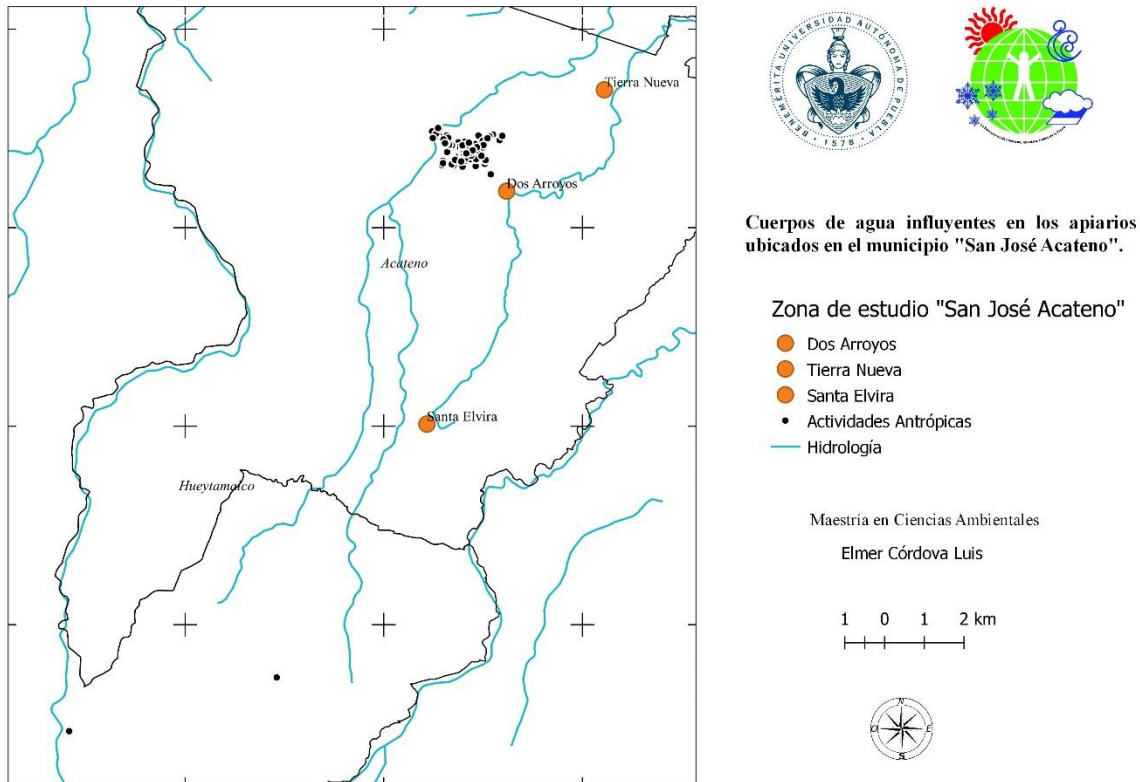


Figura 29. Cuerpos de aguas cercanos al punto de producción apícola en la región Sierra Nororiental.
Fuente: Elaboración propia, 2020.

La Sierra Norte presentó una mediana de 3.11 mg kg^{-1} , las concentraciones de Cd en esta región sobrepasan de igual manera los límites máximos establecidos en India, Polonia y por MERCOSUR. La presencia de la industria petroquímica en uno de los apiarios de esta región pudiese influir en el contenido de Cd a consecuencia de la contaminación atmosférica.

Las concentraciones de Cd encontradas en las regiones Sierra Nororiental y Sierra Norte representan un potencial riesgo para la pérdida de individuos en las colmenas, principalmente aquellos que se encuentran en estado larvario, puesto que se ha reportado que la DL_{50} al Cd durante esta etapa es de 0.27 mg L^{-1} (Di *et al.*, 2016). A la vez Hladun *et al.* (2016) reportó que la exposición al Cd genera una mayor operculación en áreas de crías pero con individuos muertos. De igual manera las concentraciones reportadas en esta investigación son potencialmente tóxicas para individuos adultos (principalmente forrajeras), dado que supera la CL_{50} en un lapso de 240 horas (0.57 mg L^{-1}) e incluso en 96 horas (3.70 mg L^{-1}) reportada por Heard *et al.*, (2016). Por otra parte Polykretis *et al.* (2016) han encontrado que la exposición a Cd impacta significativamente en la reducción de la inmunocompetencia a ciertas bacterias, por lo que la exposición constante a Cd en los apiarios de ambas regiones podría impactar negativamente en la salud de las colonias.

Las concentraciones determinadas en la región Angelópolis y Valle de Atlixco de acuerdo a sus medianas se encuentran dentro del límite máximo establecido por MERCOSUR, pero por encima del límite fijado por la legislación polaca, al ser 0.08 mg kg^{-1} y 0.1 mg kg^{-1} respectivamente mayor a 0.03 mg kg^{-1} .

La amplia distribución de Cd en ambas regiones podría ser consecuencia de la contaminación generada por la combustión fósil derivada de la intensidad del tráfico y su relación con el establecimiento de los apiarios próximos a vías de comunicación terrestre o de fuentes puntuales de liberación de Cd. La distribución de Cd en la región Valle de Atlixco por su parte podría ser también consecuencia de la movilización de los metales pesados generados en un relleno sanitario presente dentro del radio de acción del apiario “Tiradero” y localizados finalmente en la miel por fenómenos de absorción y deposición en el suelo, plantas, néctar y abejas.



Figura 30. Influencia del relleno sanitario "Atlixco" sobre el apiario Tiradero en la región Valle de Atlixco.
Fuente: Elaboración propia, 2020.

10.4.3. COBALTO.

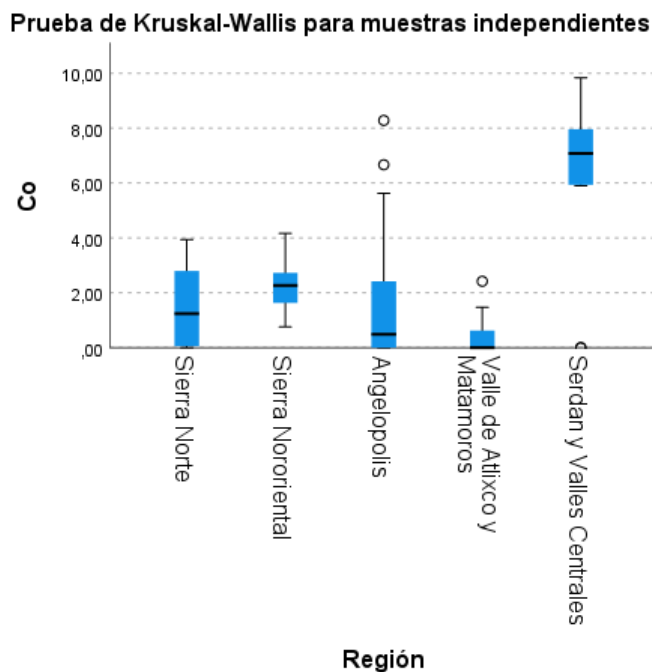


Figura 31. Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes de Co.

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Para el caso del Co la región Serdán presentó una mediana de 7 mg kg^{-1} , en un rango que varía de los 6 mg kg^{-1} a 10 mg kg^{-1} . Seguido de la región Sierra Nororiental, Sierra Norte, Angelópolis y Valle de Atlixco.

La distribución en la región Angelópolis presentó dos puntos atípicos que indican contenidos de aproximadamente 8 mg kg^{-1} .

De igual manera la región Valle de Atlixco presentó un punto atípico que alcanzó una concentración de aproximadamente 3 mg kg⁻¹ mientras que en la mayoría de las muestras en esta región el Co no fue detectado.

De acuerdo a la prueba de Kruskal-Wallis se encontraron diferencias significativas en la distribución de las regiones (P= 0.000). La comparación por parejas de la prueba posteriori indicó que las regiones con mayor diferencia son Serdán – Valle de Atlixco (P= 0.00^a). La región Serdán también es distinta de las regiones Angelópolis y Sierra Norte al 95% del nivel de confianza. De igual manera es posible encontrar una diferencia estadísticamente significativa (P= 0.008^a) entre las regiones Valle de Atlixco – Sierra Nororiental.

Tabla 17. Comparaciones por pareja de Región para Co.

Sample 1-Sample 2	Estadístico de prueba	Desv. Error	Desv. Estadístico de prueba	Sig.	Sig. ajustada ^a
Valle de Atlixco - Sierra Norte	21.85	9.98	2.19	.029	.285
Valle de Atlixco - Sierra Nororiental	33.52	9.98	3.35	.001	.008
Valle de Atlixco – Serdán	-50.71	10.97	-4.62	.000	.000
Angelópolis - Sierra Nororiental	18.19	7.99	2.27	.023	.228
Angelópolis – Serdán	-35.39	9.20	-3.84	.000	.001
Sierra Norte – Serdán	-28.86	10.21	-2.82	.005	.047

Fuente: Elaboración propia, 2020. Nota: Se visualizan las significaciones asintóticas (pruebas bilaterales). El nivel de significación es de ,050. a. Los valores de significación se han ajustado mediante la corrección Bonferroni para varias pruebas.

De acuerdo a Rashed *et al.* (2009) las principales fuentes de contaminación por Co en la miel provienen de las actividades antrópicas y la intensidad del tráfico. En esta investigación los contenidos de Co más altos fueron detectados en la región Serdán; como se ha mencionado con anterioridad esta región está caracterizada por una fuerte actividad agrícola y la presencia de vías de comunicación terrestre donde el tráfico es constante.



Figura 32. Presencia de actividades agrícolas en los principales radios de acción en la región Serdán.
Fuente: Elaboración propia, 2020.

Rashed *et al.* (2009) mencionan que los contenidos de Co en la miel también pueden variar a causa del origen botánico, esto por la absorción selectiva de Co y Cr del suelo por algunas especies de plantas.

Los puntos atípicos en la región Angelópolis provienen del apiario “El pozo”, es probable que la fuente de agua directa de la cual se abastecen las colmenas del apiario influya en los contenidos de Co presentes en la miel, consecuencia de la presencia de Co en el agua, no obstante no se confirma esta hipótesis debido a la falta de análisis de la calidad del agua.

Por otro lado el uso de medicamentos para reforzar la “salud” de los apiarios es una práctica habitual, algunos de estos productos contienen sales de Co, principalmente CoSO_4 que en dosis mínimas influye directamente en la actividad de diastasa de la miel (Balkanska y Salkova, 2018). Por lo que es necesario conocer el uso de estas prácticas en los apiarios del estado de Puebla.

10.4.4. COBRE.

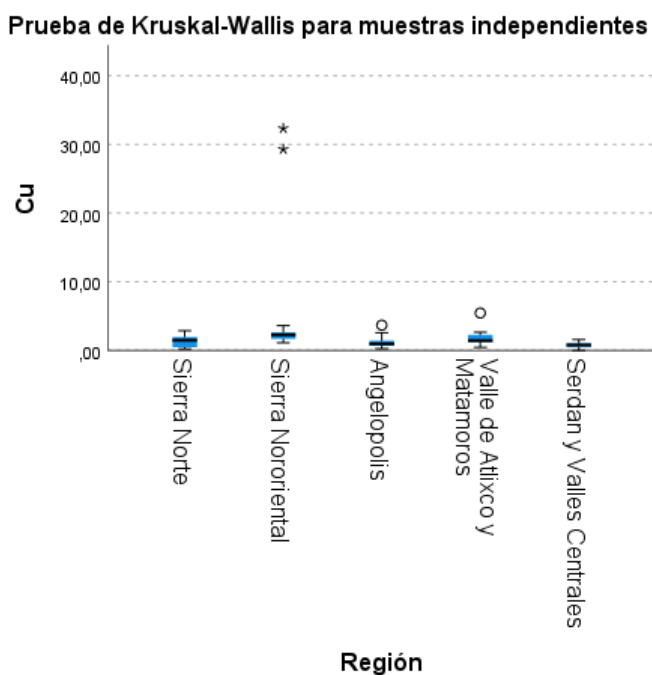


Figura 33. Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes de Cu.

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Sierra Nororiental presentó diferencias significativas con las regiones Serdán ($P= .000$) y Angelópolis ($P= .000$). La comparación por pares en otras regiones no presentó diferencias de acuerdo al valor de la significancia ajustada por la prueba de Bonferroni, por lo que se aceptó la hipótesis nula declarando que la distribución de las muestras en estas regiones es igual.

Roman (2010) menciona que existe correlación entre los contenidos de Cu y Cd determinadas en abejas que provienen de apiarios ubicados en zonas urbanas o con influencia de actividades antropogénicas. En esta investigación se encontró una correlación positiva significativa ($R= 0.47$) entre el Cd y el Cu, por lo que es probable que la presencia de ambos metales provengan de las mismas fuentes. Aunado a esto Di *et al.* (2020) mencionan que los efectos adversos conjuntos del Cu y Cd impactan significativamente en la tasa de mortalidad de las larvas y en consecuencia a ello, del número de individuos en la colmena.

Referente al Cu de manera descendente las medianas determinadas se ordenan de la siguiente manera: Sierra Nororiental con dos puntos atípicos importantes que alcanzan una concentración de aproximadamente 30 mg kg^{-1} , Sierra Norte, Valle de Atlixco, Angelópolis y por ultimo Serdán.

De acuerdo al valor de $P= .000$ existen diferencias entre la distribución de Cu detectadas en las regiones. La región

Tabla 18. Comparaciones por pareja de Región para Cu

Sample 1-Sample 2	Estadístico de prueba	Desv. Error	Desv. Estadístico de prueba	Sig.	Sig. ajustada ^a
Serdán - Sierra Norte	23.20	10.27	2.25	.024	.239
Serdán - Valle de Atlixco.	28.26	11.03	2.56	.010	.104
Serdán. - Sierra Nororiental	48.68	10.27	4.73	.000	.000
Angelópolis - Valle de Atlixco	-17.39	8.98	-1.93	.053	.529
Angelópolis - Sierra Nororiental	37.82	8.03	4.70	.000	.000
Sierra Norte - Sierra Nororiental	-25.47	9.18	-2.77	.006	.056
Valle de Atlixco - Sierra Nororiental	20.42	10.03	2.03	.042	.418

Fuente: Elaboración propia, 2020. Nota: se visualizan las significaciones asintóticas (pruebas bilaterales). El nivel de significación es de ,050. a. Los valores de significación se han ajustado mediante la corrección Bonferroni para varias pruebas.

Moniruzzaman *et al.* (2014) y Oroian *et al.* (2016) mencionan que la generación de aguas residuales puede contribuir a la contaminación por Cu, por lo que es probable que el efluente María de la Torre influya en los contenidos de Cu presentes en la miel determinadas en la región Sierra Nororiental. Aunado a esto, la presencia de actividades de producción de Mn el cual incluye metales como Ni, Co y Cu, pueden generar aguas residuales que contengan estos elementos y desagüen en los cuerpos de aguas cercanos, principalmente el río María de la torre, que sigue su curso hasta llegar al municipio de San José Acateno.

De acuerdo a Bilandžić *et al.* (2012) el contenido de Cu en la miel puede aumentar a causa de la mineralización del cultivo y debido a la aplicación de fungicidas, bactericidas y herbicidas en zonas agrícolas, también menciona que el Cu en la miel es dependiente del origen botánico; esto pudiese explicar las diferencias significativas entre las regiones, puesto que en la región Sierra Nororiental se produce miel multifloral, mientras que en la región Angelopolis y Serdán predomina en la miel la familia *asterácea* (figura 34), Covarrubias y Peña-Cabriales (2017) mencionan que algunas especies de esta familia (*Simsia amplexicaulis*) tienen potencial para acumular metales como el Cu. No obstante en la región Valle de Atlixco también predomina la familia *asteraceae* y de acuerdo al valor de la

significación ajustada no se presentan diferencias significativas entre la región Sierra Nororiental y Valle de Atlixco. Por lo tanto los contenidos de Cu podrían estar influenciados por la contaminación en las zonas de producción y no por el origen botánico.



Figura 34. Familia *asteraceae* de interés apícola en la región Valle de Atlixco.
Fuente: Elaboración propia, 2020.

De acuerdo a las medianas obtenidas de todas las regiones: Sierra Nororiental 2.27 mg kg^{-1} ; Sierra Norte 1.48 mg kg^{-1} ; Valle de Atlixco 1.12 mg kg^{-1} ; Angelópolis 0.95 mg kg^{-1} ; y Serdán 0.79 mg kg^{-1} , las concentraciones determinadas en esta investigación sobrepasan los límites máximos de Cu en miel establecidos por países como Colombia (0.05 mg kg^{-1}), Brasil (0.10 mg kg^{-1}) y E.U.A (0.36 mg kg^{-1}). Las concentraciones según las medianas no representan un

potencial riesgo de acuerdo a la Dosis Letal media reportada por Di *et al.* (2016). Pero si en los puntos atípicos detectados con concentraciones cercanas a los 30 mg kg⁻¹, puesto de que la DL50 en larvas es de 7 mg L⁻¹. No obstante es necesario realizar un monitoreo constante en las colmenas ya que la exposición al Cu al igual que con el Cd provoca una mayor operculación en áreas de cría y una mayor mortandad en larvas (Hladun *et al.*, 2016).

10.4.5. CROMO.

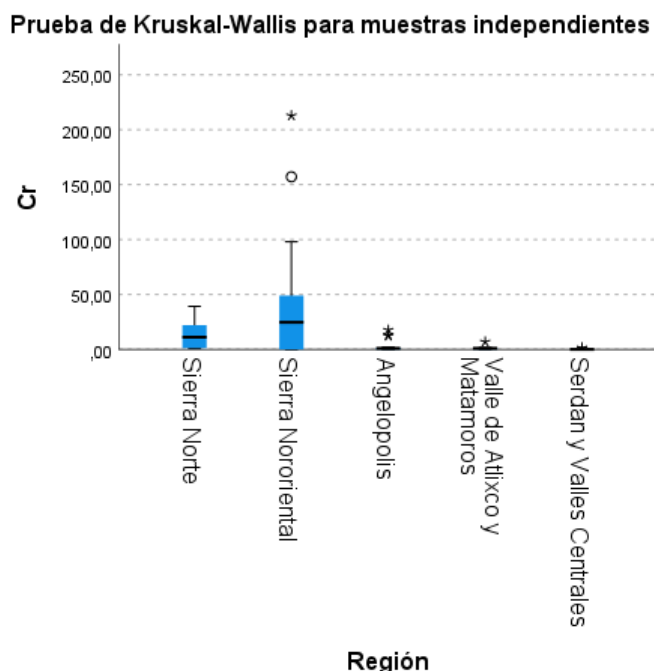


Figura 35. Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes de Cr.

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Respecto al Cr, se encontraron puntos atípicos en al menos tres regiones. La región Sierra Nororiental presentó dos puntos atípicos con concentraciones superiores a los 150 mg kg⁻¹, seguido por la Sierra Norte, Angelópolis, Valle de Atlixco y por último la región Serdán, en donde no se detectaron contenidos de Cr.

El valor de P= .000 de la prueba de Kruskal- Wallis para Cr, rechazó la hipótesis nula, aceptando que existen

diferencias entre la distribución de las regiones. Estas diferencias se encontraron entre las parejas: Serdán – Sierra Norte, Angelópolis – Sierra Norte y Serdán - Sierra Nororiental. De acuerdo al valor de la significancia ajustada por la prueba de Bonferroni, el resto de las comparaciones entre parejas no presentaron diferencias.

Chua *et al.* (2012) manifiestan que la contaminación por Cr está relacionada con la contaminación por Al puesto que generalmente provienen de las mismas fuentes. No obstante en esta investigación el coeficiente de correlación de Spearman indicó un valor de P= 0.03, por lo que es probable que las fuentes de contaminación por ambos metales sea distinta. Adugna *et al.* (2020) mencionan que el contacto de la miel con recipientes de acero

inoxidable puede generar altos contenidos de Cr ocasionada por el efecto corrosivo del pH de la miel, en este sentido el uso de materiales inoxidables como cuñas y tapas en los apiarios muestreados pudiesen aportar contenidos de Cr a la miel.

Tabla 19. Comparaciones por pareja de Región para Cr.

Sample 1-Sample 2	Estadístico de prueba	Desv. Error	Desv. Estadístico de prueba	Sig.	Sig. ajustada ^a
Serdán y Valles C. - Sierra Nororiental	33.27	9.94	3.34	.001	.008
Serdán y Valles C. - Sierra Norte	43.00	9.94	4.32	.000	.000
Angelópolis - Sierra Nororiental	17.47	7.77	2.24	.025	.246
Angelópolis - Sierra Norte	27.20	7.77	3.49	.000	.005
Valle de Atlixco y M. - Sierra Norte	24.29	9.70	2.50	.012	.123

Fuente: Elaboración propia, 2020. Nota: se visualizan las significaciones asintóticas (pruebas bilaterales). El nivel de significación es de ,050. a. Los valores de significación se han ajustado mediante la corrección Bonferroni para varias pruebas.

La región Sierra Nororiental presentó la mediana más grande: 24.7 mg kg⁻¹, esta concentración supera el límite máximo establecido en la legislación brasileña, el cual permite un contenido máximo de Cr en miel de 0.10 mg kg⁻¹. Los puntos atípicos en esta región provienen del apiario “Santa Elvira”, cabe señalar que este es el apiario más cercano al río María de la Torre. La presencia de actividades mineras en la región, así como de producción y comercialización de Mn y Ferroaleaciones como FeMn, FeSi y principalmente FeCr en alto y bajo carbono pueden incrementar las concentraciones de Cr en los cuerpos de aguas que llegan hasta los apiarios.

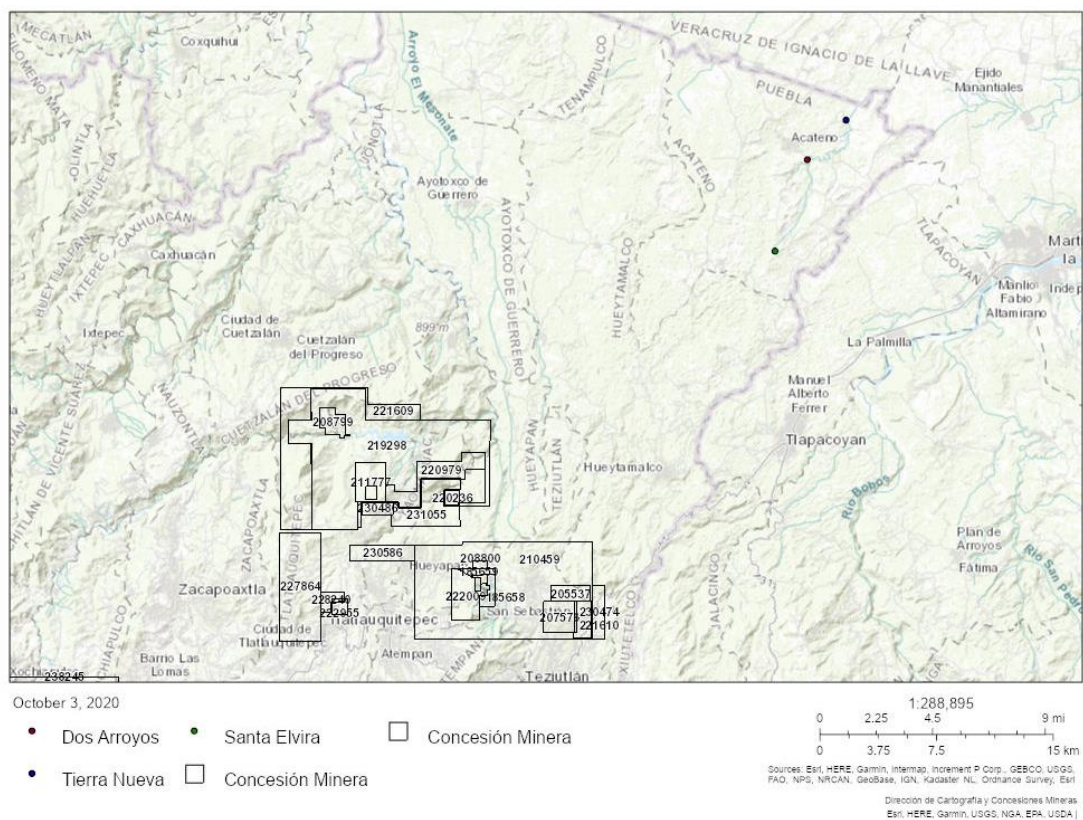


Figura 36. Concesiones mineras en la región Sierra Nororiental cercanas a apiarios.
Fuente: CartoMinMex, 2020.

Las medianas obtenidas en las regiones Sierra Norte (11.15 mg kg^{-1}), Angelópolis (1.08 mg kg^{-1}) y Valle de Atlixco (1.06 mg kg^{-1}) sobrepasan de igual manera el límite máximo establecido en Brasil.

En ninguna región se encontraron contenidos superiores que representen un potencial riesgo para las abejas de acuerdo a la DL_{50} reportada por Sgolastra *et al.* (2016), no obstante los puntos atípicos del apiario “Santa Elvira” se acercan ligeramente a la dosis de referencia el cual ha sido reportada con un valor de 379 mg L^{-1} por los mismo autores.

Porrini *et al.* (2003) señala que la dispersión de los contaminantes en la atmósfera pueden influir en la concentración de Cr detectadas en abejas, es posible que las fuentes antropogénicas que influyen en los contenidos determinados en la miel no se encuentren cercanos a los puntos de producción.

10.4.6. HIERRO.

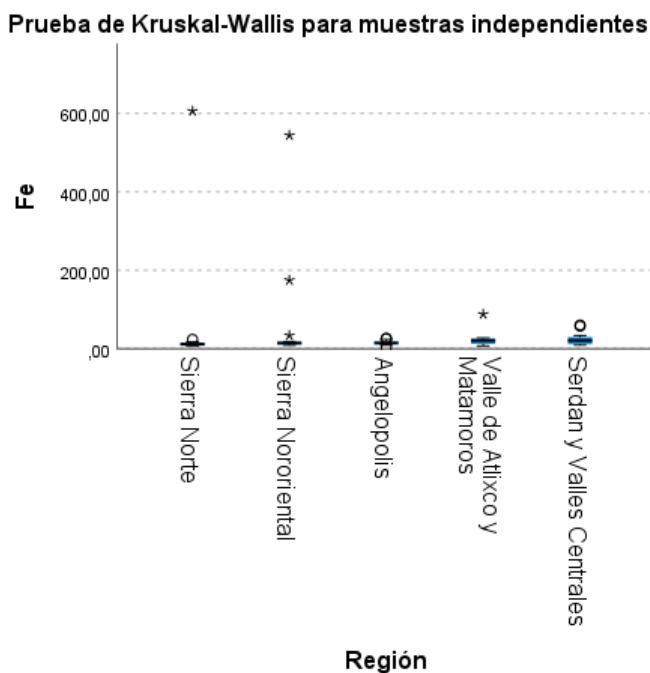


Figura 37. Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes de Fe.

Fuente: Elaboración propia, 2020.

región Sierra Norte alcanzó una concentración aproximada a 600 mg kg⁻¹ cuando la mediana de la región es de 11.35 mg kg⁻¹, mientras que la Sierra Nororiental presentó dos puntos con concentraciones cercanas a los 200 mg kg⁻¹ y 600 mg kg⁻¹ cuando la mediana es de 14.42 mg kg⁻¹, los puntos atípicos en la región Sierra Nororiental pudiesen ser consecuencia al igual que el Cr, de la presencia de actividades de extracción y producción de Ferroaleaciones.

El Fe es un elemento secundario en la miel, presente en cantidades inferiores al Mg, cantidades elevadas de Fe suelen ser consecuencia de la corrosión de los materiales donde se almacenan o el uso constante de herramientas y equipos sensibles al pH ácido de la miel (Nigussie *et al.*, 2012). Las altas concentraciones de Fe según Moniruzzaman *et al.* (2014) tienen relación con el origen botánico y la capacidad de las plantas de absorber y movilizar algunos metales como el Fe, por lo tanto los puntos atípicos pudiesen ser consecuencia de las concentraciones de Fe en el suelo derivadas de fuentes naturales y antropogénicas que son absorbidas por las plantas, localizadas en el néctar y libadas por las abejas durante el proceso de pecoreo. Sin embargo se desconocen las concentraciones de Fe en los suelos presentes en las zonas de estudio donde se obtuvieron dichas muestras.

El Fe es el único metal en el cual no se encontraron diferencias significativas de acuerdo al valor de la significancia, $P < 0.05$.

De acuerdo a las medianas las concentraciones en las regiones se orden de mayor a menor de la siguiente manera: Valle de Atlixco, Serdán, Sierra Nororiental, Angelópolis y Sierra Norte.

Sin embargo todas las regiones presentaron puntos atípicos. La

De acuerdo a la medianas de Fe obtenidas en este estudio, todas las regiones superan el límite máximo de Fe establecido por la USDA (4.2 mg kg^{-1}). Si bien el Fe es un elemento necesario en la dieta de las abejas, Jumarie *et al.* (2017) mencionan que cuando el Fe se encuentra en una mezcla con otros metales y herbicidas como glifosato y atrazina, este, tiene efectos potencialmente tóxicos, generando una acumulación del Fe en las abejas y provocando efectos negativos en los procesos metabólicos. Por otro lado Farooqui (2008) declara que la ingesta de altas concentraciones de Fe provoca estrés oxidativo que a la vez ocasiona disfunción olfativa en abejas, afectando el cerebro y su capacidad de memoria.

10.4.7. MAGNESIO.

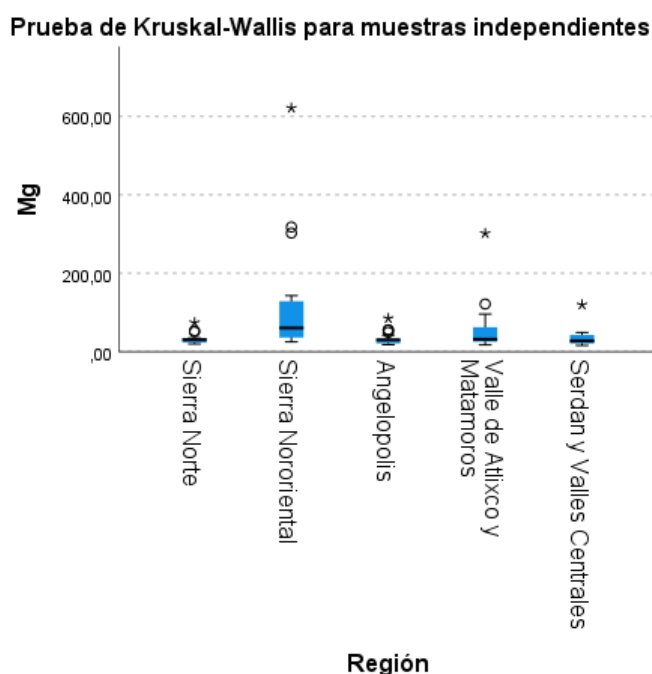


Figura 38. Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes de Mg.

Fuente: Elaboración propia, 2020.

El Mg estuvo presente en las cinco regiones, la región con la mediana más alta es la Sierra Nororiental, seguido del Valle de Atlixco, Sierra Norte, Angelópolis y Serdán. Todas las regiones presentaron puntos atípicos, siendo más frecuente en la región Sierra Nororiental con tres puntos atípicos que alcanzaron concentraciones de 600 y 300 mg kg^{-1} .

La comparación entre regiones indicó una diferencia significativa ($P = .000$),

principalmente entre la región Sierra Nororiental y todas las regiones a excepción del Valle de Atlixco, que de acuerdo al valor de la significancia ajustada por la prueba de Bonferroni presentan la misma distribución.

Tabla 20. Comparaciones por pareja de Región para Mg.

Sample 1-Sample 2	Estadístico de prueba	Desv. Error	Desv. Estadístico de prueba	Sig.	Sig. ajustada ^a
Angelópolis - Sierra Nororiental	34.39	8.03	4.28	.000	.000
Serdán - Sierra Nororiental	33.05	10.27	3.21	.001	.013
Sierra Norte - Sierra Nororiental	-29.11	9.18	-3.16	.002	.015
Valle de Atlixco - Sierra Nororiental	19.87	10.03	1.98	.048	.476

Fuente: Elaboración propia, 2020. Nota: se visualizan las significaciones asintóticas (pruebas bilaterales). El nivel de significación es de ,050. a. Los valores de significación se han ajustado mediante la corrección Bonferroni para varias pruebas.

Si bien el Mg es un elemento mayoritario en la miel (Solayman *et al.*, 2016) los contenidos de Mg varían de acuerdo al origen botánico. En esta investigación las muestras con los contenidos más altos corresponden a las procedentes del municipio San José Acateno ubicado en la Sierra Nororiental, donde las concentraciones son similares a lo reportado por Alda-Garcilope *et al.* (2012) para miel multifloral producida en España (267.13 mg kg⁻¹). No obstante con base a la información proporcionada por los apicultores sobre las principales fuentes botánicas, la región Sierra Norte produce de igual manera miel multifloral. Sin embargo las concentraciones determinadas en la región Sierra Norte son diferentes a las determinadas en la región Sierra Nororiental (P = .015).

La mediana determinada en la región Sierra Norte es menor a la concentración reportada por Pisani *et al.* (2008) (52.3 mg kg⁻¹) y mayor a la reportada por Wieczorek *et al.* (2014) (11.6 mg kg⁻¹) para el mismo tipo de miel (multifloral). No obstante los apicultores reconocen una tendencia en el pecoreo de las abejas a floraciones de cultivos de cítricos, por lo que resulta de importancia la caracterización palinológica de la miel para su comparación con otras mieles del mismo tipo y determinar si existe alguna fuente no natural influyendo sobre los contenidos de Mg. Cabe recalcar que por lo discutido ahora el Mg en la miel también es dependiente del origen geográfico.

Los puntos atípicos presentes en la región Valle de Atlixco corresponden a apiarios ubicados en zonas productoras de Aguacate, cabe mencionar que con base a las visitas a los apiarios se observó en las abejas un pecoreo distribuido entre *Persea* spp (figura 38) y algunas especies de la familia *asteraceae*; el contenido de Mg en estas mieles coincide a lo reportado por Terrab *et al.* (2004) en mieles de *Persea americana* M. (103 mg kg⁻¹ a 209 mg kg⁻¹).



Figura 39. *Persea americana* como especie secundaria de interés apícola en dos apiarios de la región valle de Atlixco. Fuente: Elaboración propia, 2020.

La miel producida en la región Angelópolis es caracterizada por una predominancia en la familia *asteraceae* (Pérez-Sato *et al.*, 2018) (figura 39), los contenidos de Mg encontrados en esta región son similares a los reportados por Insuasty-Santacruz *et al.*, (2016) donde también predomina esta familia como recurso apícola (néctar y polen) con concentraciones de Mg no superiores a los 40 mg kg⁻¹.



Figura 40. Parche de floración de la familia *asteraceae* en el radio de acción en un apiario de la región Angelópolis. Fuente: Elaboración propia, 2020.

Es posible que el uso de fertilizantes en prácticas agrícolas incremente el valor del contenido de Mg en la miel; Spiric *et al.* (2019) mencionan que existe una correlación positiva entre el contenido de macro-elementos en la miel y la conductividad eléctrica, esta última regulada por la norma NOM-004-SAG-GAN-2018. Es importante considerar la aplicación de fertilización indiscriminadamente debido a la repercusión en el contenido mineral en la miel y su relación con algunos parámetros considerados en la norma.

Por último, de acuerdo a las medianas obtenidas de Mg en esta investigación, todas las regiones superan el límite máximo establecido por la USDA el cual fija una concentración máxima de 20 mg kg^{-1} .

10.4.8. NÍQUEL.

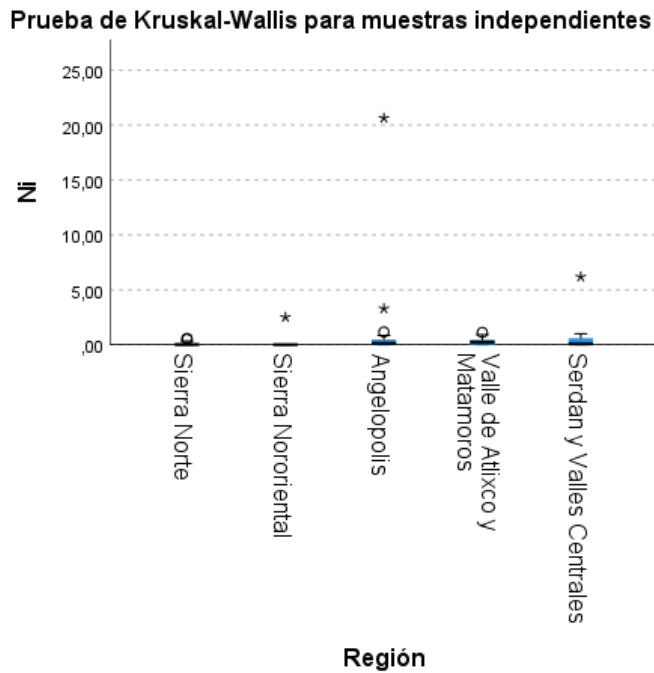


Figura 41. Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes de Ni.

Fuente: Elaboración propia, 2020.

El Ni fue detectado de manera puntual en algunas regiones, la región con la muestra más alta es Angelópolis con una concentración de aproximadamente 20 mg kg⁻¹. De acuerdo a las medianas obtenidas por región se orden de manera descendente: Valle de Atlixco, Angelópolis y Serdán. Las regiones Sierra Norte y Sierra Nororiental presentaron una mediana igual a 0, con puntos atípicos.

Con base en la prueba posteriori de Kruskal- Wallis, la región Sierra Nororiental presentó una diferencia significativa con las regiones Angelópolis (P= .034) y Valle de Atlixco (P= .042). El ajuste de la significancia a través de la prueba de Bonferroni indicó que no existe diferencia en la distribución entre las regiones Sierra Nororiental - Serdán (P= .215). La región Sierra Nororiental es distinta porque el Ni no fue detectado en la mayoría de las muestras a comparación de las regiones Angelópolis y Valle de Atlixco.

Tabla 21. Comparaciones por pareja de Región para Ni.

Sample 1-Sample 2	Estadístico de prueba	Desv. Error	Desv. Estadístico de prueba	Sig.	Sig. ajustada ^a
Sierra Nororiental – Angelópolis	-20.85	7.11	-2.93	.003	.034
Sierra Nororiental - Serdán.	-20.91	9.09	-2.29	.021	.215
Sierra Nororiental - Valle de Atlixco.	-25.42	8.88	-2.86	.004	.042

Fuente: Elaboración propia, 2020. Nota: se visualizan las significaciones asintóticas (pruebas bilaterales). El nivel de significación es de ,050. a. Los valores de significación se han ajustado mediante la corrección Bonferroni para varias pruebas

Ávila (2017) reportó una concentración media de 1718 mg kg⁻¹ de Ni en suelos de una localidad del municipio de Atlixco, a la par determinaron la capacidad de una especie de la familia asterácea para acumular Ni a nivel de flor con una concentración aproximada de 8 mg kg⁻¹, otros miembros de la misma familia mostraron acumulación de Ni en tallos y hojas en concentraciones superiores. Por otro lado Valdivia y Rodríguez (2015) reportaron una media de 0.64 mg kg⁻¹ de Ni en suelos agrícolas del municipio de Tochimilco. Es probable que las concentraciones determinadas en miel de abeja de la región Valle de Atlixco estén relacionadas con la capacidad de acumulación de Ni por parte de la principal familia apícola de interés.

Valdivia y Rodríguez (2015) determinaron una media de 0.35 mg kg⁻¹ de Ni en suelos agrícolas del municipio de Acatzingo perteneciente a la región Serdán; la mediana determinada en esta investigación fue de 0.07 mg kg⁻¹, por lo que los contenidos de Ni en miel responden en su mayoría al origen geográfico.

La región Angelópolis presentó el punto atípico con la concentración más grande de todas las regiones proveniente del apiario “Cerve”, no obstante el Ni no fue detectado en otros apiarios cercanos. Porrini *et al.* (2003) mencionan que los contaminantes como el Ni se encuentran dispersos en la atmósfera y Machado *et al.* (2008) declaran que una de las principales fuentes de contaminación atmosférica por Ni es el tráfico vehicular. Por lo que el valor atípico en esta región pudiese estar influenciado por la proximidad a vías de comunicación terrestre.

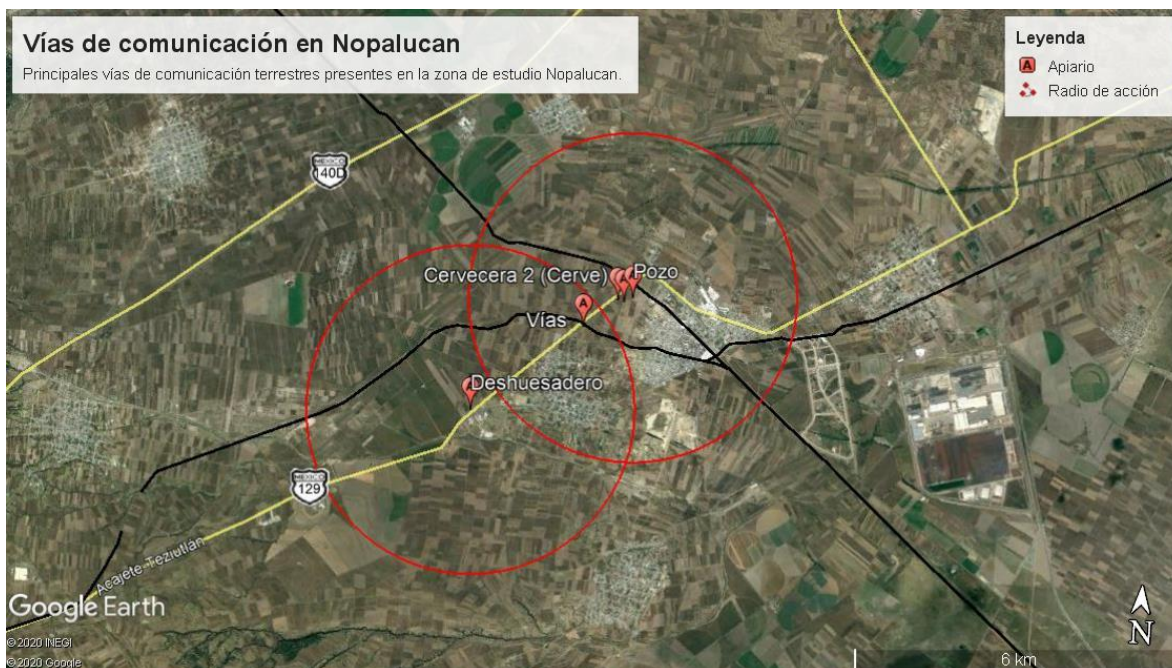


Figura 42. Presencia de vías de comunicación terrestre en los principales radios de acción en apiarios de la región Angelópolis.
Fuente: Elaboración propia, 2020.

Con base en la medianas obtenidas, ninguna región supera el límite máximo de Ni en miel establecida por Brasil (5 mg kg^{-1}), sin embargo los puntos atípicos encontrados en las regiones Serdán y Angelópolis superan el límite máximo con concentraciones aproximadas a los 6 mg kg^{-1} y 20 mg kg^{-1} .

Las bajas concentraciones de Ni en todas las regiones, sin considerar los puntos atípicos pudiesen ser una respuesta similar a lo mencionado por Meindl y Ashman (2003) en abejorros (*Bombus impatiens*), donde se observó un rechazo al recurso florar contaminado con Ni después de los primeros forrajeos. No obstante se requieren muestras de suelo y plantas de principal interés apícola para evaluar la presencia de Ni, puesto que la reducción del área de pecoreo de las abejas tienen un efecto significativo en la producción de miel.

10.4.9. PLOMO.

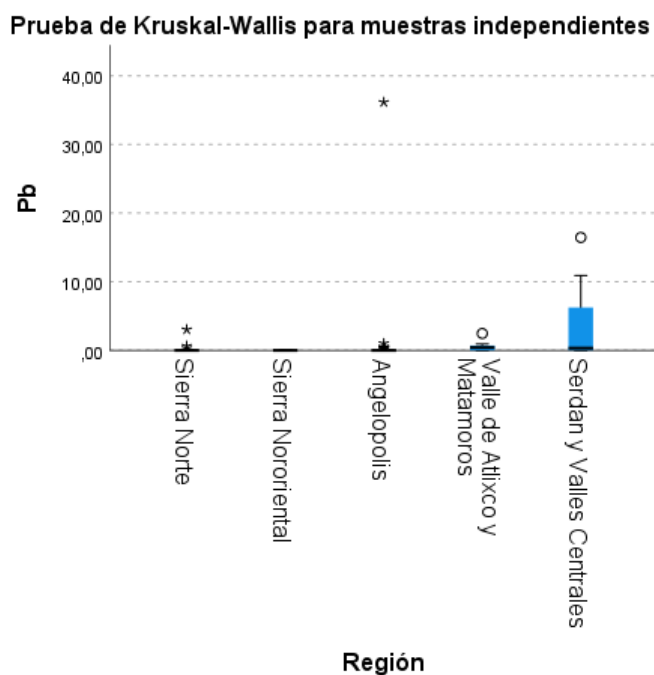


Figura 43. Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes de Pb.

Fuente: Elaboración propia, 2020.

De acuerdo a los resultados obtenidos, las dos regiones con medianas diferentes a 0.00 mg kg⁻¹ son: el Valle de Atlixco y Serdán. Esta última presenta una amplia distribución comparada con las otras regiones. La región Angelópolis registró un punto atípico con una concentración aproximada de 35 mg kg⁻¹ cuando en la mayoría de las muestras perteneciente a dicha región no fue detectado.

En la región Sierra Norte el Pb fue detectado únicamente en dos apiarios, mientras que en la región Sierra Nororiental no fue detectado.

De acuerdo a la prueba de Kruskal-wallis la región Sierra Nororiental difiere significativamente con las regiones Serdán y Valle de Atlixco, el resto de comparaciones no mostró una diferencia estadística después de ajustar el valor por la prueba de Bonferroni.

En esta investigación se encontró la mediana más alta de Pb en la región del Valle de Atlixco (0.41 mg kg⁻¹) seguido de la región Serdán (0.32 mg kg⁻¹). Estas concentraciones son menores a lo reportado por Montiel *et al.* (2020) quienes determinaron concentraciones más altas en miel de zonas urbanas (2.38 mg kg⁻¹), no obstante son similares a lo reportado en zonas agrícolas (0.86 mg kg⁻¹) en el estado de Hidalgo. Legarreta *et al.* (2012) mencionan que existe una asociación de metales pesados como el Pb y la concentración de material particulado (PM10 y PM2.5) presente en la atmósfera en algunas ciudades de México, entre ellas Puebla. Conforme a lo publicado en ProAire (Secretaría de Sustentabilidad Ambiental y Ordenamiento Territorial, 2012) Atlixco es uno de los principales municipios con mayor

contribución de PM en el estado de Puebla, consecuencia de las emisiones por fuentes móviles (Parque vehicular), fijas y de áreas (industrias y otras actividades antrópicas).

Tabla 22. Comparaciones por pareja de Región para Pb.

Sample 1-Sample 2	Estadístico de prueba	Desv. Error	Desv. Estadístico de prueba	Sig.	Sig. ajustada ^a
Sierra Nororiental - Valle de Atlixco.	-28.53	7.88	-3.62	.000	.003
Sierra Nororiental - Serdán.	-30.25	8.06	-3.74	.000	.002
Sierra Norte - Valle de Atlixco.	-20.70	7.88	-2.62	.009	.086
Sierra Norte - Serdán.	-22.41	8.06	-2.77	.005	.055
Angelópolis - Valle de Atlixco	-17.95	7.06	-2.54	.011	.110
Angelópolis – Serdán	-19.66	7.27	-2.70	.007	.068

Fuente: Elaboración propia, 2020. Nota: se visualizan las significaciones asintóticas (pruebas bilaterales). El nivel de significación es de ,050. a. Los valores de significación se han ajustado mediante la corrección Bonferroni para varias pruebas

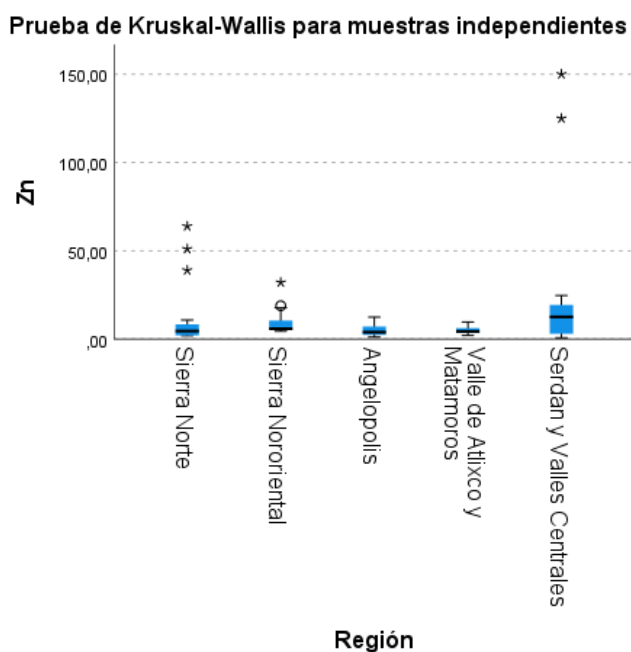
Ambas regiones superan los límites máximos de Pb en miel establecidas por Polonia (0.30 mg kg^{-1}) y Colombia (0.10 mg kg^{-1}), así como las decretadas por MERCOSUR (0.30 mg kg^{-1}) y la Unión Europea (0.10 mg kg^{-1}). Pese a ello de acuerdo a Di *et al.* (2016) las concentraciones determinadas en esta investigación no representan un riesgo de toxicidad para las abejas adultas, puesto que la DL_{50} reportada por estos autores es de 345 mg L^{-1} . Sin embargo las concentraciones reportados sobre la mediana, así como los puntos atípicos en ambas regiones representan un riesgo para las larvas considerando de Di *et al.* (2016) reportaron una DL_{50} de 1.12 mg L^{-1} .

Respecto a los puntos atípicos determinados en las regiones Angelópolis y Sierra Norte es probable que la presencia de Pb en la miel sea consecuencia de la deposición atmosférica de este contaminante en suelos y plantas, generados por el tráfico vehicular y transportados por las corrientes del viento, tal y como menciona Bilandžić *et al.* (2012). Estas concentraciones son potencialmente tóxicas para los individuos en estado larvario.

Es posible que las concentraciones determinadas de Pb en miel en esta investigación estén relacionadas con el tráfico vehicular y la presencia de actividades antrópicas, al igual que se ha concluido en otras investigaciones (Moniruzzaman *et al.*, 2018; Aduña *et al.*, 2020).

Burden *et al.* (2019) mencionan que la ingesta de bajas concentraciones de Pb puede provocar cambios en la percepción sensorial de las abejas, permitiendo una exposición constante al Pb y su acumulación en la colmena, lo cual podría repercutir significativamente en la reducción de la supervivencia de las crías, la salud individual y el comportamiento natural. Por otra parte Gauthier *et al.* (2016) afirman que el Pb se acumula de manera constante en abejas e interfiere en los niveles de α -tocoferol.

10.4.10. ZINC.



Referente al Zn, de acuerdo a los valores obtenidos de las medianas las regiones se ordenan descendientemente de la siguiente manera: Serdán, Sierra Norte, Sierra Nororiental, Valle de Atlixco y Angelópolis. Se determinaron puntos atípicos en las regiones Sierra Nororiental, Sierra Norte y Serdán, esta última con concentraciones cercanas a 150 mg kg⁻¹.

Figura 44. Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes de Zn.

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Conforme al valor de P (0.04) obtenido por la prueba Kruskal-

Wallis existen diferencias entre la distribución de Zn en las regiones. Sin embargo los valores de la significancia ajustada por la prueba de Bonferroni mostraron igualdad en la comparación por parejas.

Tabla 23. Comparaciones por pareja de Región para Zn.

Sample 1-Sample 2	Estadístico de prueba	Desv. Error	Desv. Estadístico de prueba	Sig.	Sig. ajustada ^a
Angelópolis – Serdán.	-19.73	9.25	-2.13	.033	.330
Angelópolis - Sierra Nororiental	20.06	8.03	2.49	.013	.125

Fuente: Elaboración propia, 2020. Nota: Se visualizan las significaciones asintóticas (pruebas bilaterales). El nivel de significación es de .050. a. Los valores de significación se han ajustado mediante la corrección Bonferroni para varias pruebas

Adugna *et al.* (2020) menciona que los contenidos de Zn en la miel varían de acuerdo al origen floral y geográfico, sin embargo también derivan del uso de recipientes de acero galvanizado durante los procesos de producción, extracción y almacenamiento. Esto contrasta con los resultados reportados en esta investigación, debido a que no se encontraron diferencias significativas en los contenidos de Zn, excepto por aquellos puntos atípicos.

La región Serdán presentó una mediana de 12.4 mg kg⁻¹ con dos puntos atípicos superiores a 100 mg kg⁻¹, estas concentraciones atípicas son similares a los reportados por Moniruzzaman *et al.* (2014) para miel producida en ecosistemas de selva, no obstante los apiarios ubicados en la región Serdán se establecen en zonas predominantemente agrícolas. Los contenidos reportados en esta región superan los límites máximos de Zn para miel establecidos por China (1 mg kg⁻¹), Brasil (5 mg kg⁻¹) y E.U.A (2.2 mg kg⁻¹).

La región Sierra Norte presentó una mediana de 5.9 mg kg⁻¹ con tres puntos atípicos cercanos a los 50 mg kg⁻¹, estas muestras atípicas provienen de los apiarios “La Torre” y “El Monte”, ubicados en una zona con presencia de actividades sobre extracción de hidrocarburos además de un alto tráfico vehicular. Las concentraciones reportadas en esta región sobrepasan los límites máximos establecidos por China, Brasil y E.U.A.

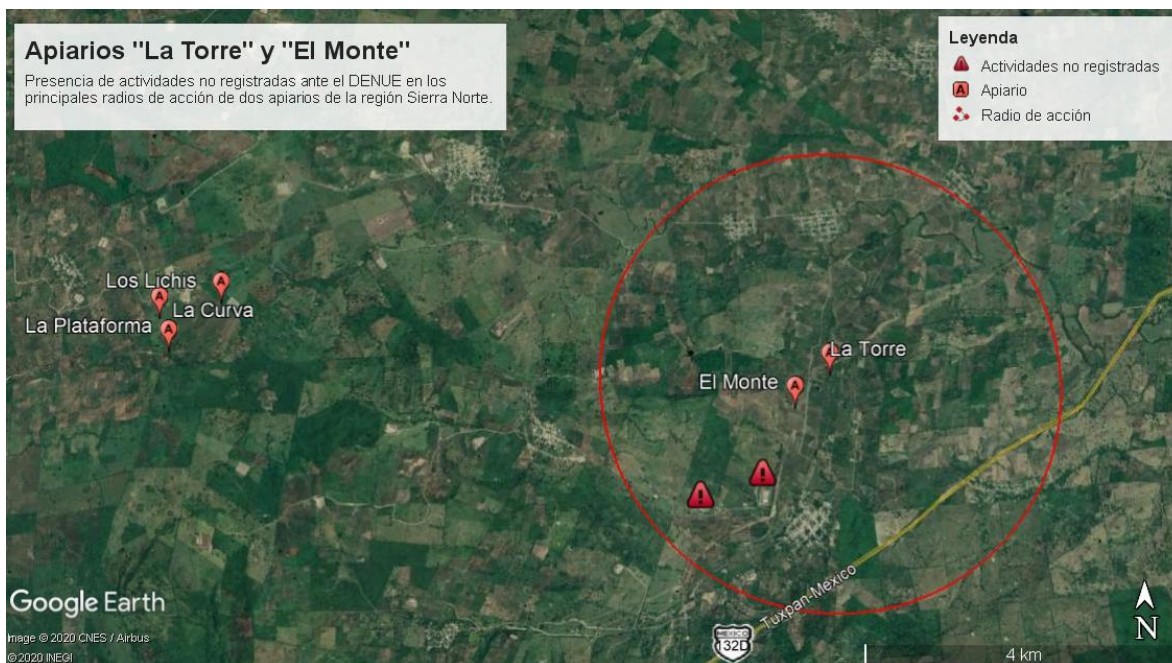


Figura 45. Presencia de actividades antrópicas no registradas ante el DENUE en los principales radios de acción de apiarios de la región Sierra Norte.
Fuente: Elaboración propia, 2020.

Las regiones Sierra Nororiental, Valle de Atlixco y Angelópolis con medianas de 4.52 mg kg^{-1} , 4.32 mg kg^{-1} y 3.9 mg kg^{-1} , respectivamente, no superan el límite máximo de Zn presente en miel decretada en Brasil, sin embargo si sobrepasan los límites establecidos por China y E.U.A.

Glavan *et al.* (2017) mencionan que la ingesta de alimentos con cantidades crecientes de nanopartículas de ZnO provoca un cambio en la alimentación de las abejas, y que estas son selectivas con alimentos que presentan bajas concentraciones de ZnO, sin embargo esta preferencia teóricamente podría elevar la toxicidad de las nanopartículas de ZnO para las abejas en ambientes naturales.

Machado *et al.* (2008) mencionan que la contaminación por Zn proviene del tráfico vehicular y que además estas mismas fuentes emiten Cr, Ni y Pb. En esta investigación existe una correlación significativa positiva entre Zn y Cr con un valor de $R= 0.61$. Por otra parte Formicki *et al.* (2013) reportaron una correlación positiva entre el Zn y el Cd presente en la miel, consecuencia de la contaminación ambiental; para este estudio se obtuvo una correlación significativa positiva entre Zn y Cd con un valor de $R= 0.81$, aún mayor que la

correlación entre Zn y Cr. Es probable por tanto que las concentraciones de Zn estén influenciadas por la presencia de importantes accesos de comunicación en la zona así como actividades relacionadas con la extracción de hidrocarburos. Cabe señalar que existen antecedentes sobre accidentes de derrame de hidrocarburos en la región Sierra Norte (Licón, 2013), por lo que es probable que la contaminación remanente influya directamente en los contenidos de Zn, Cd y Cr reportados en esta región.

10.5. DISTRIBUCIÓN DE LAS CONCENTRACIONES.

La distribución de las concentraciones de Al, Cd, Co, Cr, Mg, Ni, Pb y Zn son consecuencia de las diferencias significativas en los contenidos de estos metales en la miel a nivel apiario, la tabla 24, agrupa los apiarios por municipio, encontrando diferencias en todos los metales con excepción del Cu y el Fe. La región Angelópolis presentó el mayor número de contrastes entre las concentraciones Al, Cd, Co, Cr y Zn, seguido por la región Sierra Norte donde se encontraron diferencias entre las concentraciones de Cd Mg, Ni y Pb. La región Sierra Nororiental por su parte presentó diferencias únicamente en los contenidos del Cr y la región Valle de Atlixco presentó diferencias en las concentraciones de Mg. Esto sugiere que en algunas regiones las concentraciones de ciertos metales pueden diferir tanto que existe variedad en el contenido mineral aún en la misma zona. Por lo que sería viable analizar la concentración de metales producidas en una región y encontrar las causas específicas de esta variación.

Tabla 24. Prueba de Kruskal-Wallis para la identificación de diferencias en la distribución de las concentraciones a nivel apiario.

Región	Municipio	Apiario	Al	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mg	Ni	Pb	Zn
Sierra Norte	Francisco Z. Mena	La Plataforma	0.080	0.044	0.053	0.084	0.313	0.235	0.021	0.021	0.018	0.052
		El Paraíso										
		Los Lichis										
		La Torre										
		El Monte										
Venustiano Carranza	La Curva	0.564	0.083	0.083	0.083	0.083	0.564	0.083	0.053	0.221	0.083	
	Zaragoza											
Sierra Nororiental	Acateno	Tierra Nueva	0.427	0.288	0.670	0.027	0.249	0.957	0.113	0.368	NA	0.301
		Dos Arroyos										
		Santa Elvira										
	Tlatlauquitepec	La Soledad	0.058	0.051	0.733	0.368	0.148	0.051	0.066	NA	NA	0.061
		La Palma										
Angelópolis	Nopalucan	Yolotzin	0.002	0.003	0.001	0.001	0.343	0.153	0.861	0.066	0.159	0.005
		Deshuesadero										
		Vías										
		Cervecera										
		Cerve										
	Pozo											
	Tlali											
Cuellar												
Tecali de Herrera	La Mónica	0.072	0.102	0.096	0.137	0.230	0.385	0.116	0.068	0.080	0.086	
	El Paxtle											
	El Corral											
Valle de Atlixco y Matamoros	Atlixco	El Canal	0.413	2712.000	0.796	0.236	0.069	0.258	0.048	0.415	0.891	0.553
		Tiradero										
	Acatzingo	Axocopan	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Serdán y Valles Centrales	Tlachichuca	Huexocopan	0.264	NA	0.802	NA	0.113	0.169	0.401	0.785	0.081	0.093
		El cerro										
		La virgen										
		La barranca										
		Los encinos										
		El Capulín										

10.6. MODELO LINEAL.

Algunos apiarios muestreados no fueron considerados en la ejecución del modelo debido a la falta de coordenadas y la obtención de datos. Los datos obtenidos mediante imágenes satelitales de las variables establecidas en los apiarios con coordenadas definidas se presentan en la tabla 25:

Tabla 25. Variables propuestas para el modelo lineal.

Región	Municipio	Apiario	Número de Actividades antrópicas*	Presencia de agricultura	Intensidad de tráfico	Presencia de actividades no registradas ante el DENUE
Sierra Norte	Francisco Z. Mena	La plataforma	0	NO	BAJA	SI
		El Paraíso	0	NO	BAJA	SI
		Los Lichis	0	SI	BAJA	SI
		La Torre	0	SI	ALTA	NO
		El Monte	0	SI	ALTA	SI
	Venustiano Carranza	La curva	0	NO	BAJA	SI
		Zaragoza	0	SI	BAJA	NO
Sierra Nororiental	Acateno	Tierra Nueva	10	SI	BAJA	NO
		Dos Arroyos	307	SI	MEDIA	NO
		Santa Elvira	0	SI	BAJA	NO
Angelópolis	Nopalucan	Deshuesadero	505	SI	ALTA	SI
		Vías	1686	SI	ALTA	NO
		Cervecera	1739	SI	ALTA	NO
		CERVE	1726	SI	ALTA	NO
		Pozo	1726	SI	ALTA	NO
	Tecalí de Herrera	La Mónica	4	NO	BAJA	SI
		El Paxtle	0	SI	BAJA	SI
		El Corral	0	NO	BAJA	SI
Valle de Atlixco y Matamoros	Atlixco	El canal	2	NO	MEDIA	NO
		Tiradero	23	SI	MEDIA	SI
		Axocopan	720	SI	ALTA	NO
		Huexocopan	130	SI	ALTA	NO
	Acatzingo	Acatzingo	2737	NO	ALTA	NO
Serdán y Valles Centrales	Tlachichuca	El cerro	0	SI	BAJA	SI
		La virgen	0	SI	MEDIA	SI
		La barranca	0	SI	MEDIA	SI
		Los encinos	0	SI	MEDIA	SI

Fuente: Elaboración propia, 2020.

10.6.1. ALUMINIO.

El modelo lineal para el Al se ajustó en un 65%, encontrando una alta correlación entre las concentraciones de Al y la región ($P= .000$), principalmente cuando la miel se produce en las regiones Valle de Atlixco, Sierra Nororiental y Serdán con un 99, 95 y 90% de nivel de confianza respectivamente. De igual manera se encontró una relación positiva con la variable agricultura ($P=.000$), que incrementa los contenidos de Al cuando esta actividad está presente. La intensidad del tráfico por otro lado presentó una relación negativa significativa ($P= .000$) en zonas donde el tránsito vehicular es bajo; no sean reportado antecedentes de contaminación de la miel por estas fuentes, por lo que la concentración de Al en la miel no se encuentra en función de esta variable, al igual que del número de actividades antrópicas registradas ante el DENUE y la presencia de actividades antropogénicas que no se encuentran registradas pero han sido detectadas como posibles fuentes de contaminación.

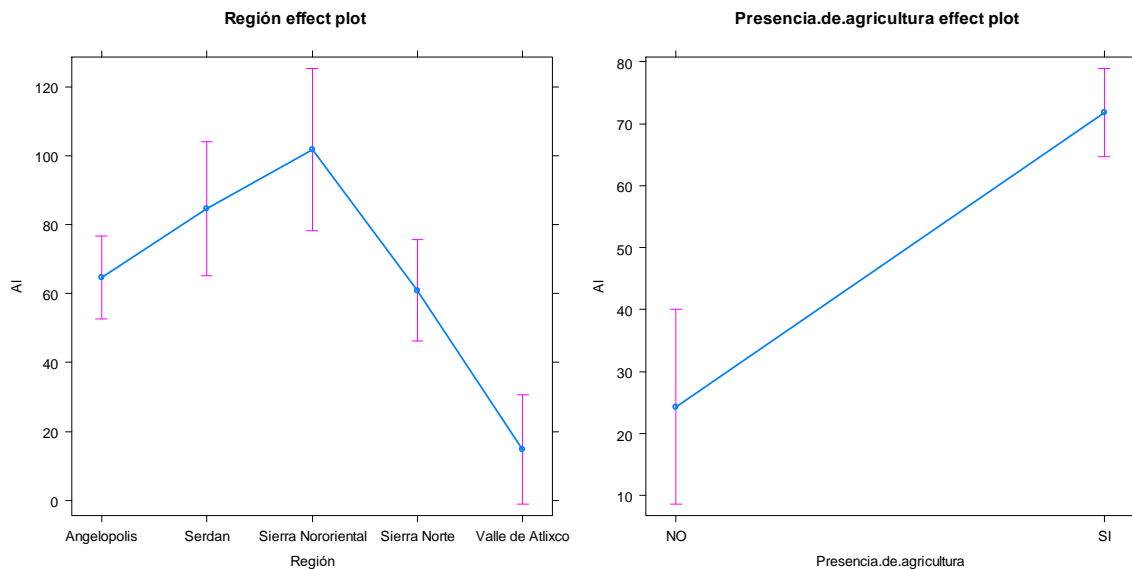


Figura 46. Variables relacionadas significativamente con la presencia de Al en las muestras de miel.
Fuente: Elaboración propia, 2020.

Los gráficos residuales muestran homocedasticidad de las varianzas en el modelo, comprobado por la prueba Breusch-Pagan con un valor de $P= 0.14$. Los residuos no se ajustan a una distribución normal con base al gráfico Q-Q que muestra una desviación ligera de la diagonal en los valores de los extremos, no obstante las distancias de Cook no muestran datos

influyentes. Se comprobó la normalidad de los datos mediante la prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov el cual rechazó la hipótesis nula aceptando que no existe normalidad en ellos. El modelo no cumple con todos los supuestos sin embargo se acepta globalmente bajo la prueba F ($P = .000$), por lo que se acepta que la concentración de Al en la miel está en función de la región y de la presencia de actividades agrícolas.

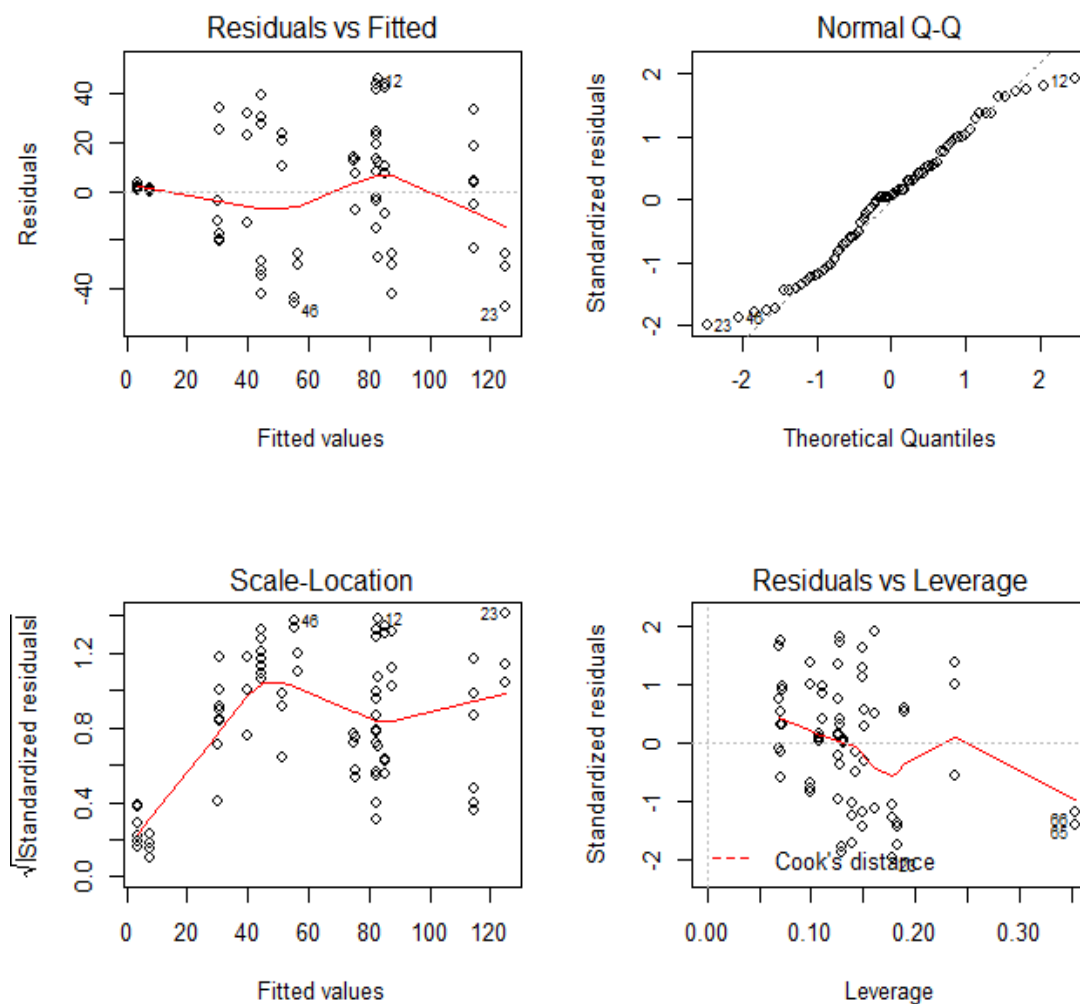


Figura 47. Graficas básicas de diagnóstico para la validación del modelo para Al.
Fuente: Elaboración propia

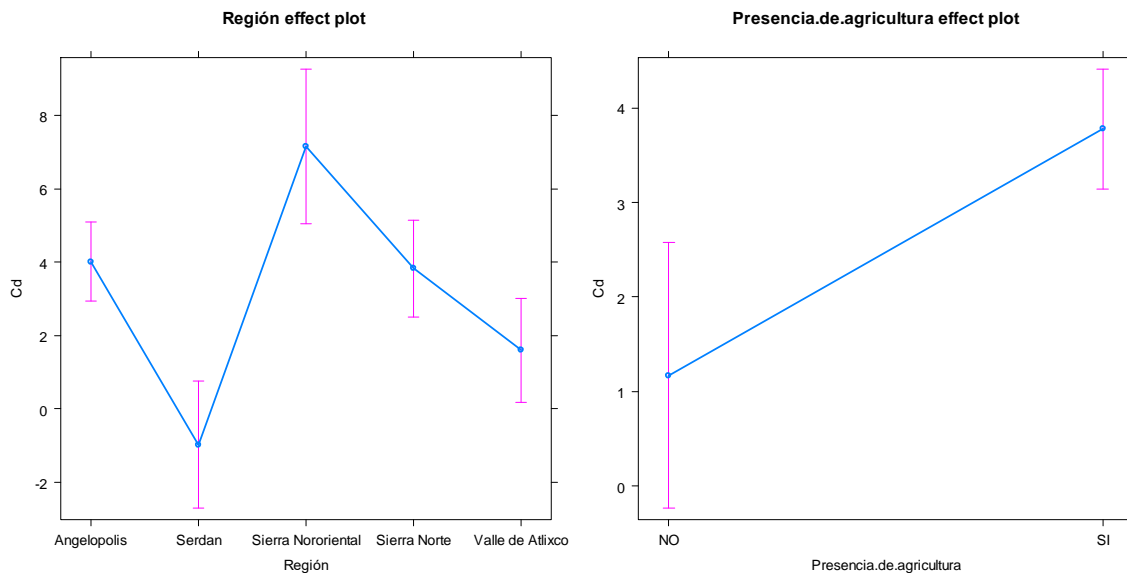
10.6.2. CADMIO.

El modelo lineal para el Cd se ajustó, explicando el 54% de la variabilidad total, aceptando globalmente el modelo por el valor significativo de la prueba F ($P = .000$). El Análisis de

Varianza (Tipo III) determinó relaciones entre los contenidos de Cd en la miel y la región con un 99% de nivel de confianza; las regiones Serdán y Valle de Atlixco presentaron una relación negativa a un 99 y 90% de nivel de confianza respectivamente, mientras que la región Sierra Nororiental presentó una relación positiva con un valor de $P= 0.01$ únicamente al 90% de nivel de confianza, por lo que la variable Región es representativa únicamente para la región Serdán, donde se encontraron los contenidos más bajos de Cd.

El modelo también determinó una relación positiva significativa entre las concentraciones de Cd en la miel y la presencia de actividades agrícolas en las zonas de producción ($P= .002$), y negativa a un 90% de nivel de confianza con la intensidad del tráfico, principalmente cuando existe poco tráfico vehicular, lo cual indica que es posible encontrar altas concentraciones de Cd en zonas escasamente transitadas, por lo que el modelo señala que las fuentes primarias de contaminación por Cd no provienen del tránsito vehicular.

La presencia de actividades antrópicas registradas ante el DENUE no presentó relación con la concentración de Cd, al igual que aquellas actividades no registradas establecidas en los radios de acción de los apiarios.



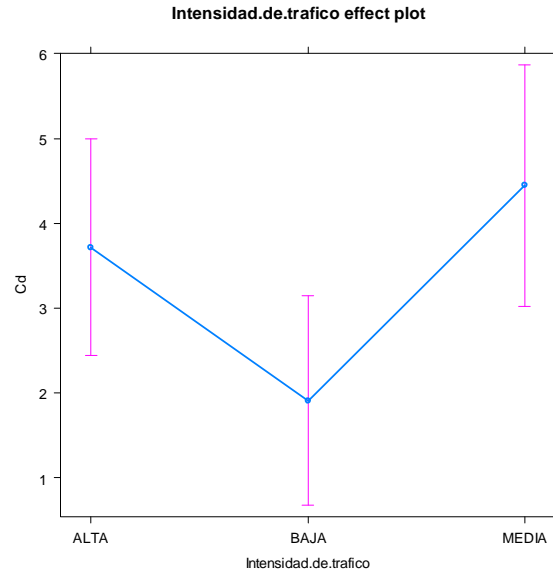


Figura 48. Variables relacionadas significativamente con la presencia de Cd en las muestras de miel.
Fuente: Elaboración propia, 2020.

No se cumplen los supuestos del modelo. La prueba Breusch-Pagan confirmó heterocedasticidad en los residuos ($P = .002$), no existe normalidad en los datos y la prueba de valores atípicos de Bonferroni demostró un dato influyente señalado por la gráfica de las distancias de Cook. El modelo lineal no es apto para describir las relaciones de las variables que afectan las concentraciones de Cd.

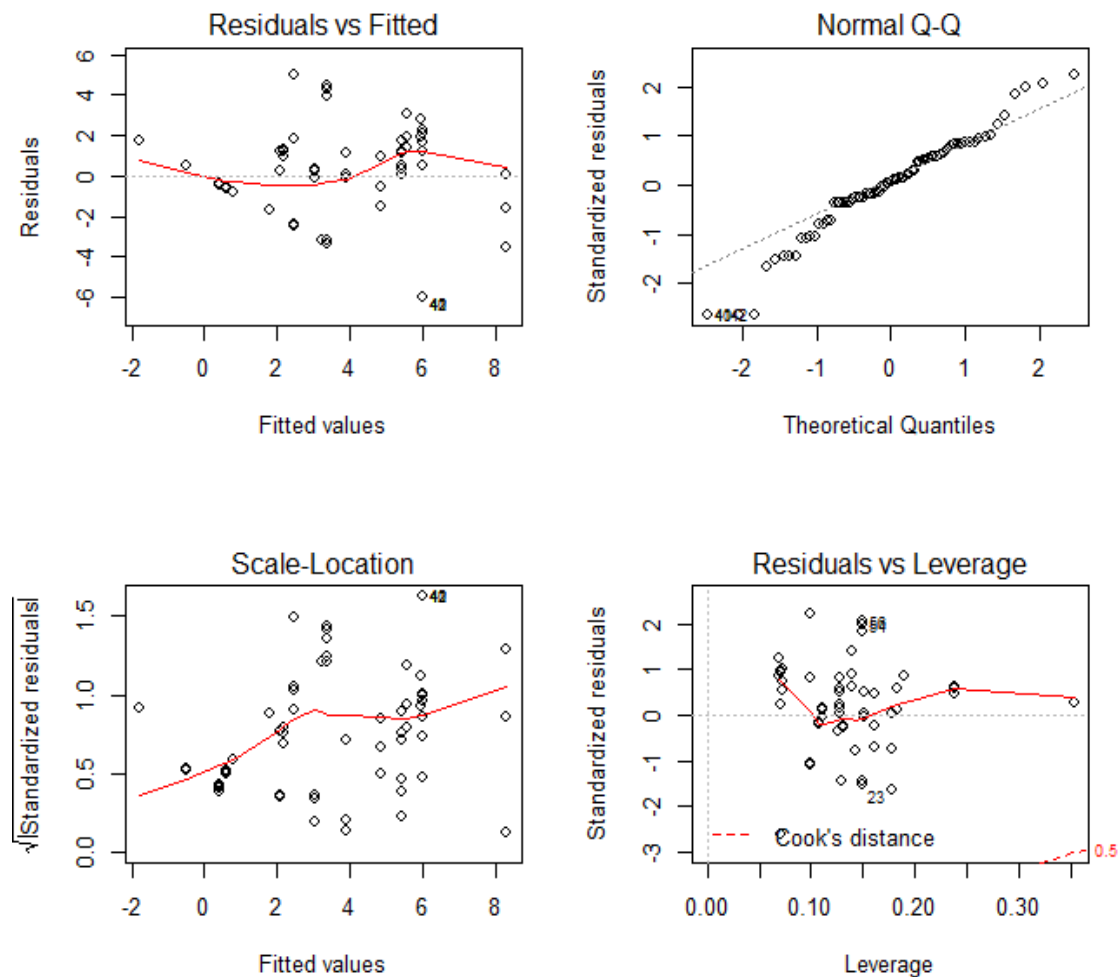


Figura 49. Graficas básicas de diagnóstico para la validación del modelo para Cd.
Fuente: Elaboración propia, 2020.

10.6.3. COBALTO.

El modelo lineal para el Co se ajustó explicando un 65% de la variabilidad total, el valor significativo de la prueba F aceptó el modelo globalmente ($P = .000$). Las concentraciones de Co en miel están relacionadas con todas las variables a diferentes niveles de significación. La relación entre el contenido de Co y la región ($P = .000$) es relevante en las regiones Serdán y Valle de Atlixco con un 99% de nivel de confianza, siendo esta última negativa, por lo que las concentraciones de Co en miel serán mayores cuando los apiarios se establezcan en la región Serdán y menores cuando lo hagan en el Valle de Atlixco. Por otra parte la presencia de agricultura influye significativamente en los contenidos de Co ($P = .000$), mientras que la presencia de actividades antrópicas dentro del radio de acción de los apiarios registradas ante

el DENUe lo hace de manera negativa ($P= 0.03$), por lo que los contenidos de Co no provienen de estas fuentes. La intensidad del tráfico mostró una relación con un 95% de nivel de confianza, no obstante los niveles de esta variable no señalaron una correlación significativa, por lo que se descarta que el tráfico vehicular influya directamente, así mismo la presencia de actividades antrópicas no registradas no se consideró un factor relevante al estar relacionadas a un 90% de nivel de confianza ($P= .07$).

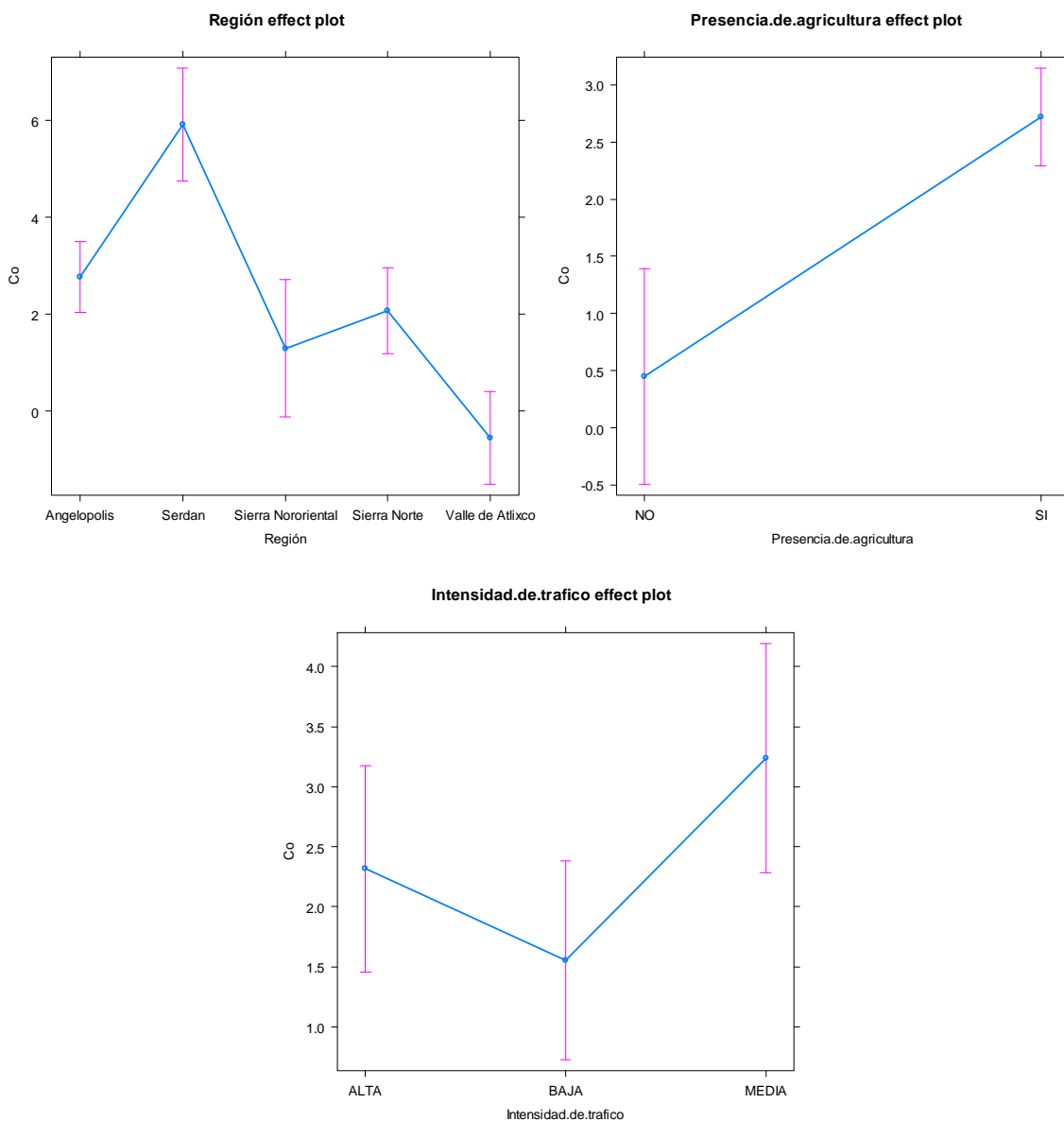


Figura 50. Variables relacionadas significativamente con la presencia de Co en las muestras de miel.
Fuente: Elaboración propia, 2020.

Existe homocedasticidad en los residuos del modelo ($P= 0.09$) de acuerdo a la prueba de Beusch-Pragan. Sin embargo no existe normalidad en los datos, la gráfica Q-Q muestra puntos atípicos que se comprobaron con la gráfica de distancias de Cook y fueron corroborados por la prueba de puntos atípicos de Bonferroni, el cual señaló finalmente un punto atípico influyente. Los supuestos del modelo se cumplen parcialmente y no se valida completamente; transformar los datos para eliminar puntos atípicos podría aumentar la confiabilidad del modelo.

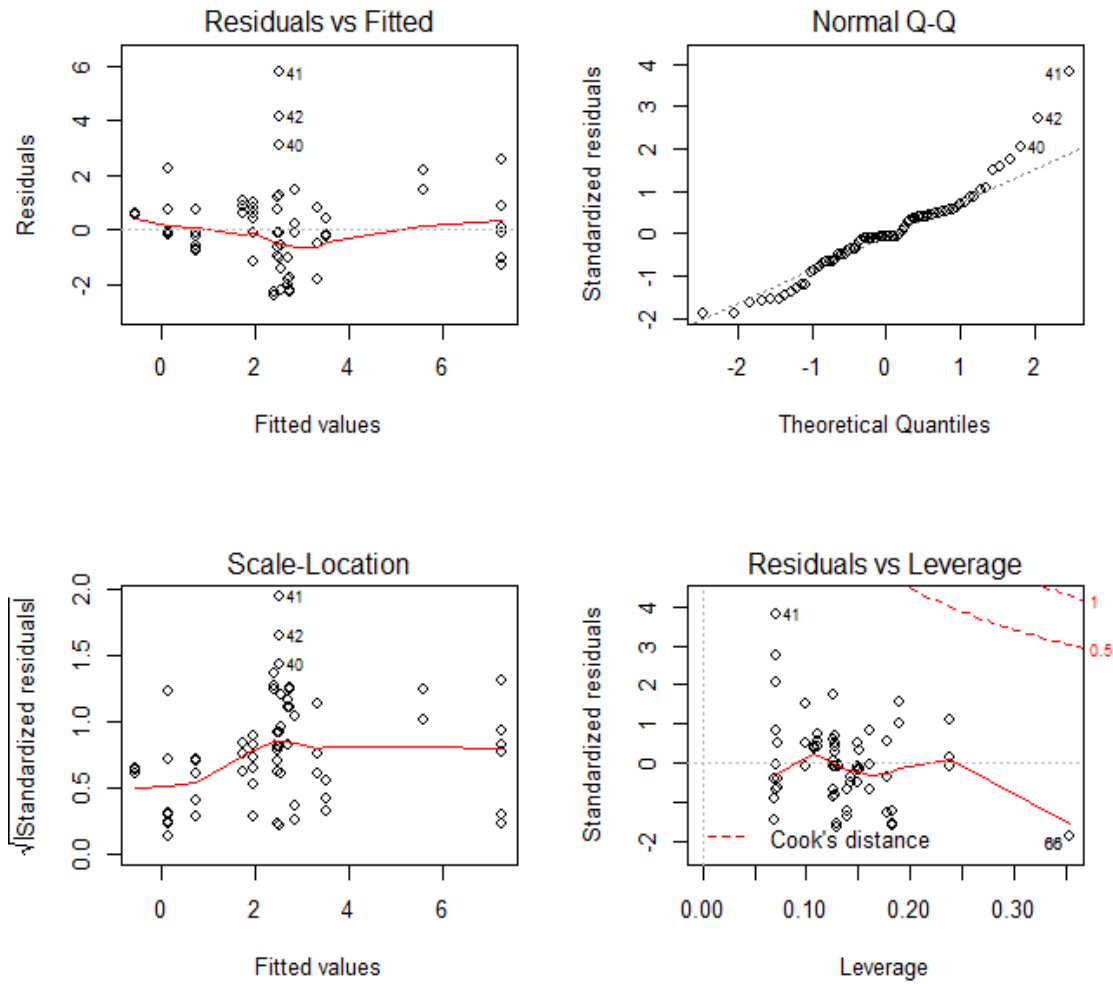


Figura 51. Graficas básicas de diagnóstico para la validación del modelo para Co.
Fuente: Elaboración propia, 2020.

10.6.4. CROMO.

El modelo para el Cr se ajustó explicando un 58% de la variabilidad total, el valor de la prueba F es significativa ($P=.000$), por lo que se aceptó el modelo globalmente. De acuerdo al modelo, los contenidos de Cr en miel están única y significativamente relacionados con la región de producción ($P= .000$), especialmente con la región Sierra Nororiental a un 99% de nivel de confianza, esta relación positiva señala el incremento de las concentraciones de Cr cuando los apiarios sean establecidos en dicha región.

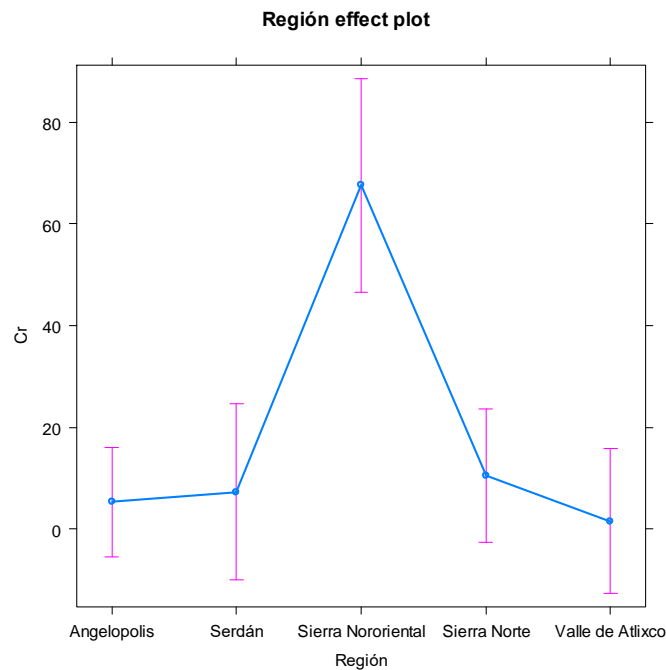


Figura 52. Variable relacionada significativamente con la presencia de Cr en las muestras de miel.
Fuente: Elaboración propia, 2020.

Sin embargo no se valida el modelo con base a los valores residuales. La prueba Beusch-Pagan señaló heterocedasticidad con un valor de $P= .000$, mientras que el gráfico normal Q-Q mostró una tendencia en los valores extremos alejados de la diagonal, la prueba de valores atípicos de Bonferroni determinó estos valores influyentes señalados por la gráfica de distancias de Cook; por lo que existen valores atípicos (principalmente los puntos 26 y 27) que sugieren la aplicación de un modelo no paramétrico.

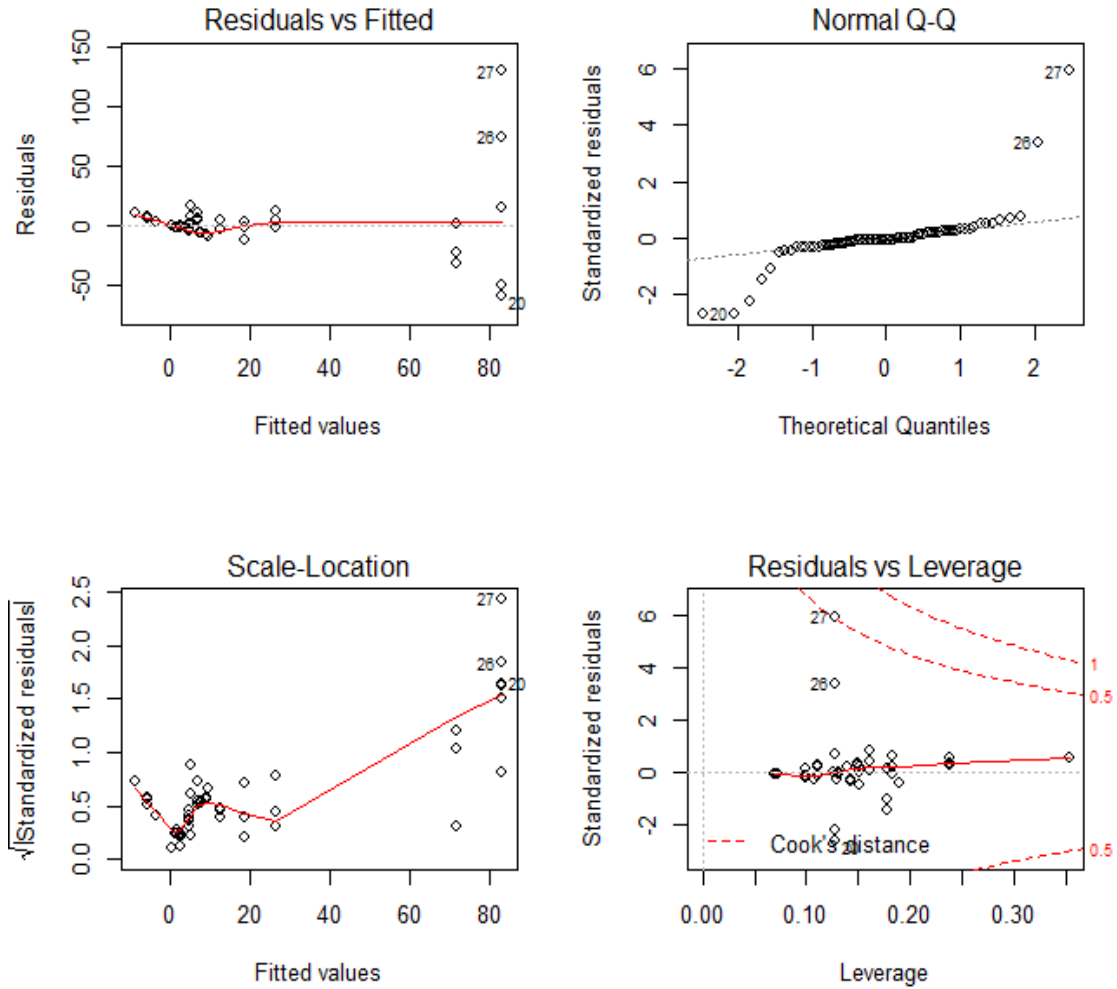


Figura 53. Graficas básicas de diagnóstico para la validación del modelo para Cr.
Fuente: Elaboración propia, 2020.

10.6.5. COBRE.

Para el caso del Cu, el modelo se ajustó, y aunque la prueba F es significativa ($P = .000$) el modelo explica únicamente el 40% de la variabilidad total. La única variable relacionada al contenido de Cu es la presencia de actividades no registradas ante el DENUE ubicado dentro del radio de acción de los apiarios, esta relación negativa con un valor de $P = .000$, indica que las actividades no registradas las cuales son principalmente del giro industrial, no influyen en las concentraciones de Cu presentes en la miel.

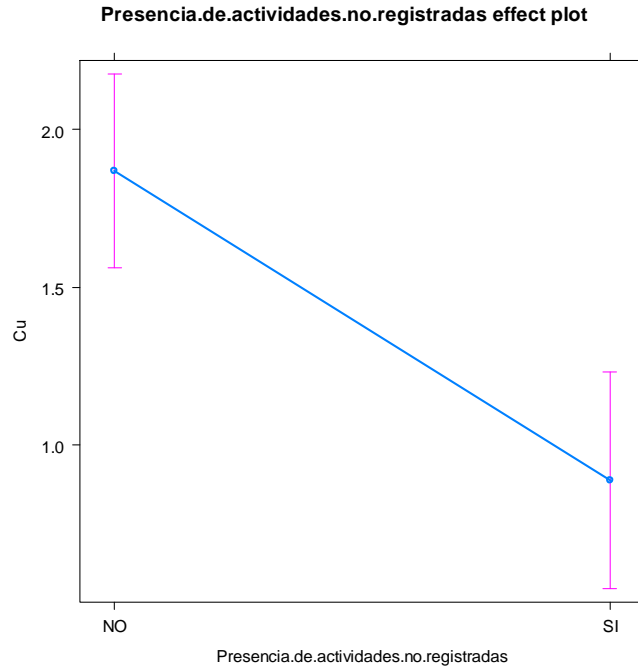


Figura 54. Variable relacionada significativamente con la presencia de Cu en las muestras de miel.
Fuente: Elaboración propia, 2020.

Los gráficos residuales mostraron que se cumplen aproximadamente algunos supuestos del modelo. La prueba Beusch-Pagan descartó homocedasticidad en el modelo con un 95% de nivel de confianza, no obstante este supuesto se cumple si el nivel de confianza es del 90%, puesto que el valor arrojado de $P= 0.01$. Por otro lado no se cumple la normalidad de los datos según la gráfica normal Q-Q y existen valores atípicos señalados por la gráfica de las distancias de Cook, comprobado como valores influyentes por la prueba de Bonferroni (valor N° 63). La existencia de datos atípicos sugiere la implementación de otro modelo.

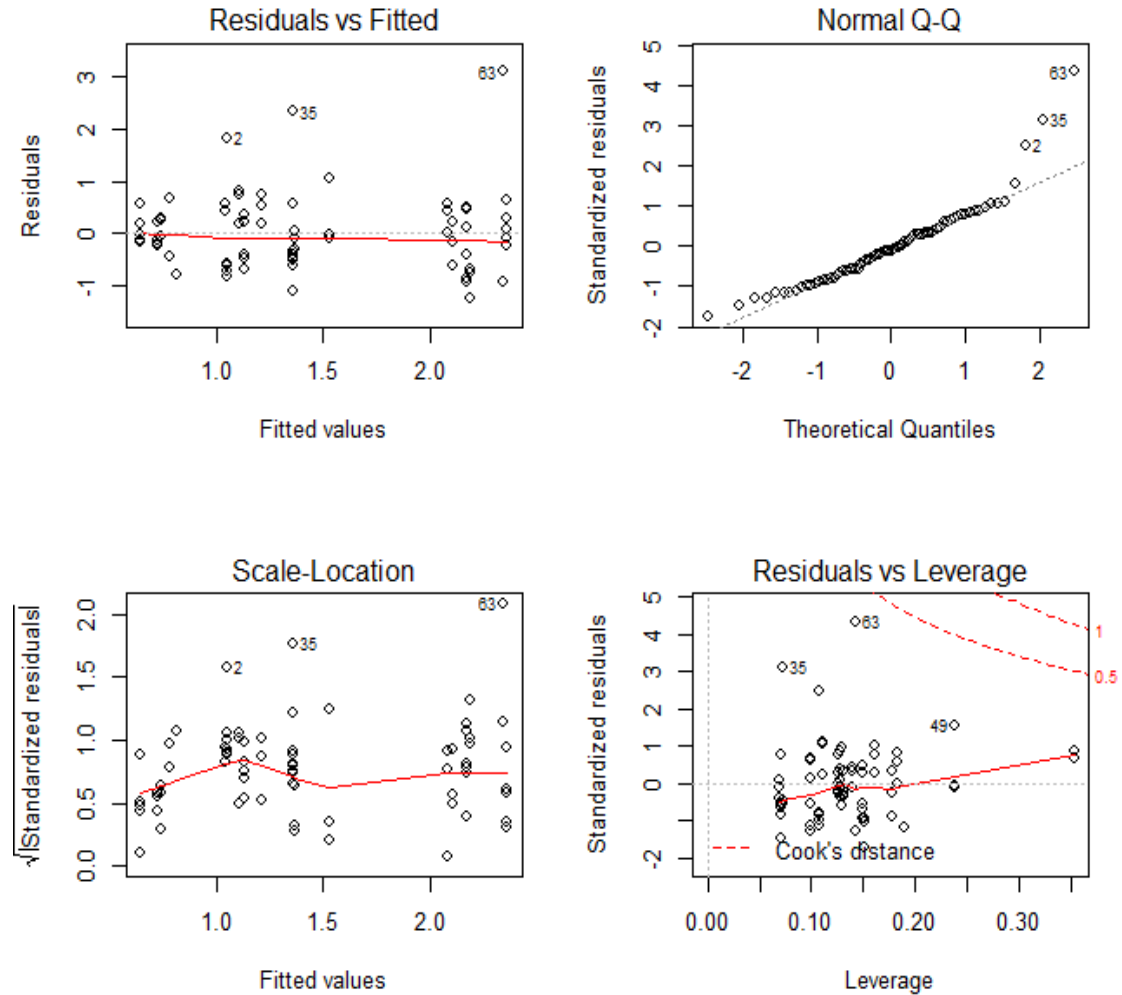


Figura 55. Gráficas básicas de diagnóstico para la validación del modelo para Cr.
Fuente: Elaboración propia, 2020.

10.6.6. HIERRO.

El modelo no se ajustó para el caso de Fe, explicando únicamente el 11% de la variabilidad total. La prueba F no es significativa según el valor de $P=0.48$. Pese a esto el modelo plantea una relación positiva entre el contenido de Fe y la región Sierra Nororiental ($P=0.02$) a causa de una mayor presencia de Fe en esta región donde se desconocen sus fuentes.

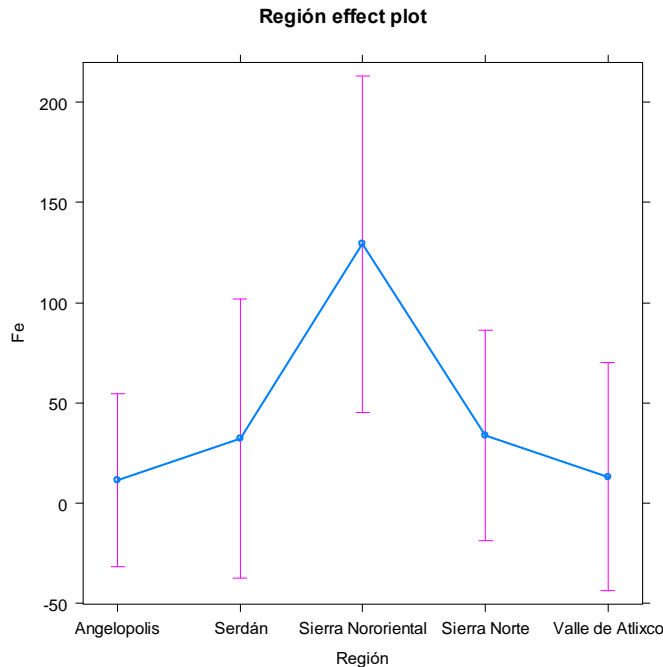


Figura 56. Variable relacionada significativamente con la presencia de Fe en las muestras de miel.
Fuente: Elaboración propia, 2020.

Es recomendable profundizar en la obtención de otros modelos que expliquen las concentraciones de Fe en la miel.

10.6.7. MAGNESIO.

El modelo lineal para el Mg se ajustó explicando únicamente el 41% de la variabilidad total, la prueba F es significativa ($P = .000$). De acuerdo al Análisis de Varianza las concentraciones de Fe están relacionadas únicamente con la variable región ($P = .000$), especialmente con el factor Sierra Nororiental a un 99% de nivel de confianza, esta relación positiva señala un mayor contenido de Mg cuando los apiarios se establezcan en dicha región.

No se cumplen los supuestos del modelo, no existe homocedasticidad en los datos, y no se presenta normalidad de acuerdo a la gráfica Q-Q, por lo que no se valida el modelo lineal. La gráfica de distancias de Cook señaló valores influyentes determinada por la prueba de Bonferroni, estos datos atípicos ubicados en los valores 22 y 63, sugieren la aplicación de un modelo no paramétrico.

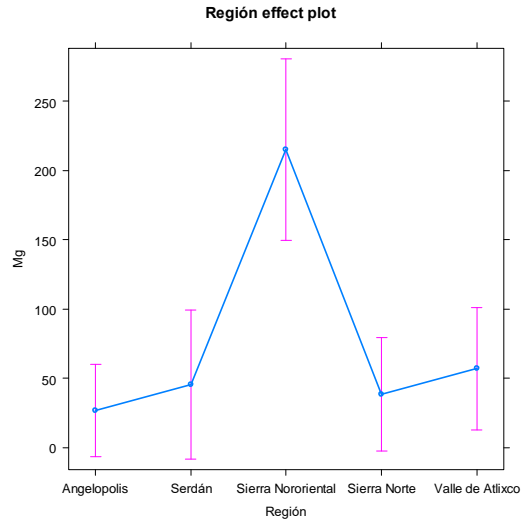


Figura 57. Variable relacionada significativamente con la presencia de Mg en las muestras de miel.
Fuente: Elaboración propia, 2020.

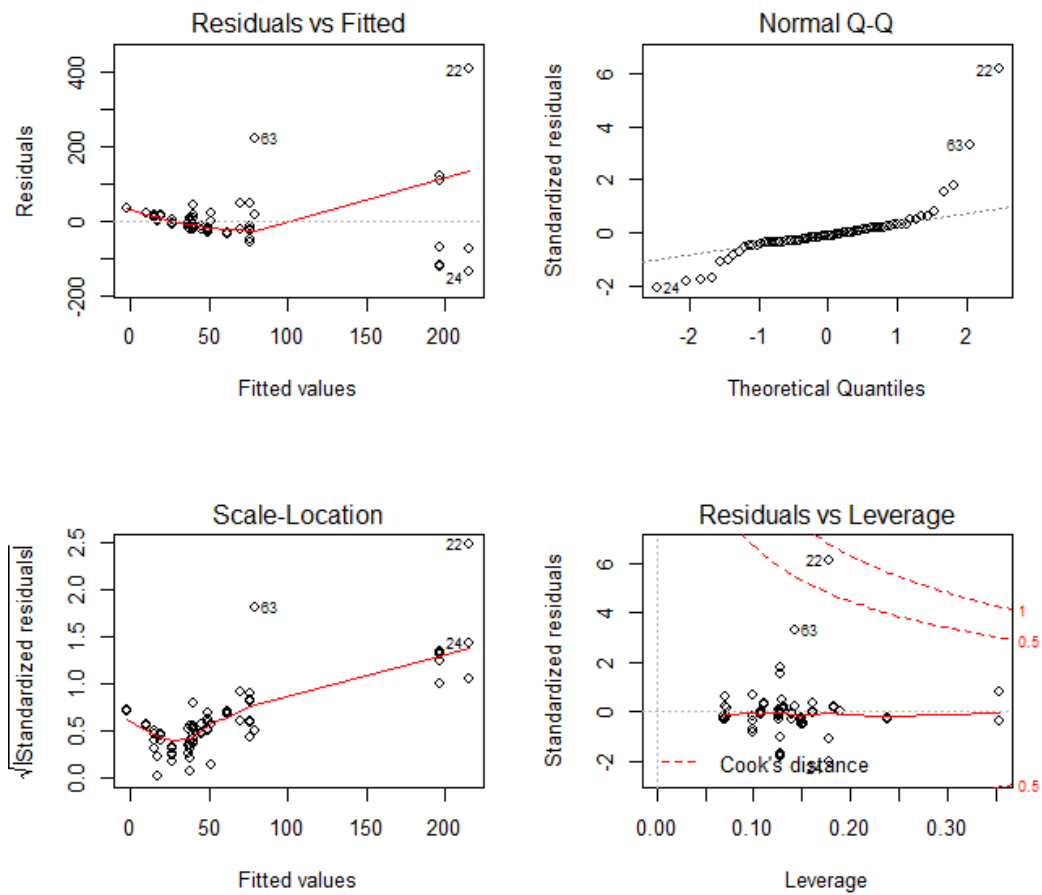


Figura 58. Gráficas básicas de diagnóstico para la validación del modelo para Mg.
Fuente: Elaboración propia, 2020.

10.6.8. NÍQUEL.

El modelo lineal para Ni no se ajustó a los datos, la prueba F no es significativa ($P= .88$) y el modelo explica menos del 1% de la variabilidad total. Las concentraciones de Ni en la miel deben ser analizadas a través de otras técnica estadísticas no paramétricas considerando las variables propuestas.

10.6.9. PLOMO.

El modelo lineal para Pb no se ajustó, explicando únicamente el 18% de la variabilidad total, la prueba F no es significativa ($P= 0.14$). Pese a ello parece encontrarse una relación positiva entre la concentración de Pb y la región Serdán a un 95% de nivel de confianza ($P=0.02$), el modelo plantea por tanto una mayor concentración de Pb cuando los apiarios se establezcan en la región Serdán. Sin embargo el modelo no es válido por lo que sugiere analizar los resultados desde modelos no paramétricos. Los gráficos residuales no se presentan debido a que el valor de la prueba F es mayor a 0.05.

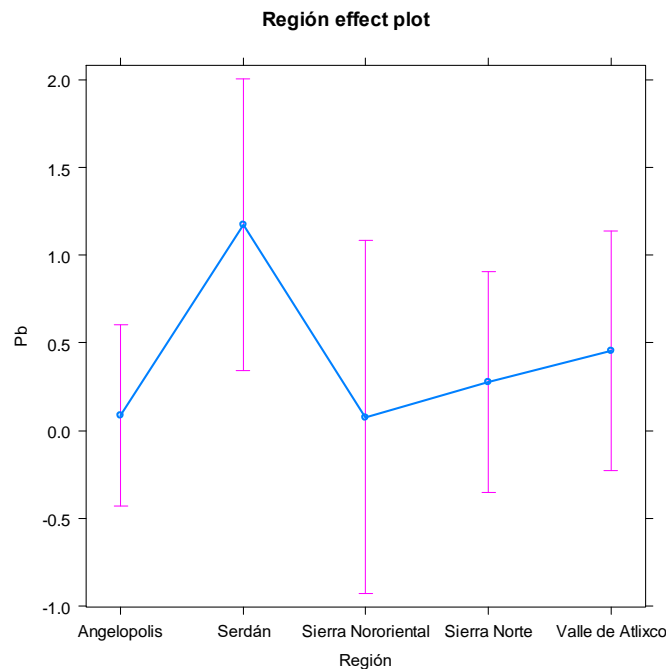


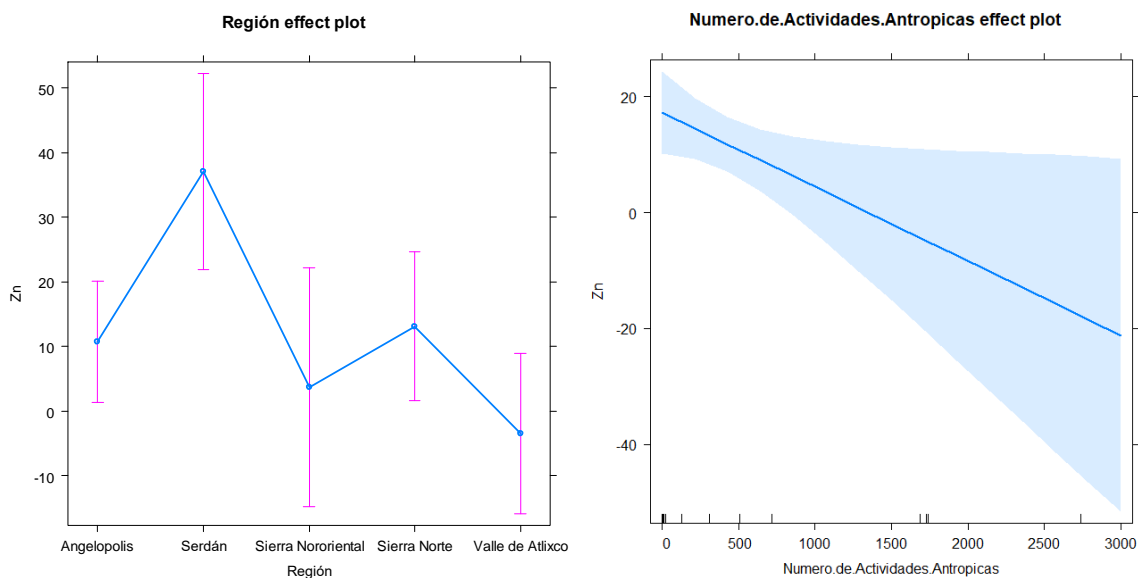
Figura 59. Variable relacionada significativamente con la presencia de Pb en las muestras de miel.
Fuente: Elaboración propia, 2020.

Es necesario buscar otros modelos que se ajusten a los datos.

10.6.10. ZINC.

Por último, pese a que el modelo lineal para el Zn explica únicamente el 32% de la variabilidad total, los datos se ajustaron debido a que la prueba F es significativa ($P = .001$). Se encontró relación significativa entre la concentración de Zn y la variable región a un 99% de nivel de confianza, principalmente con la región Serdán con un valor de $P = 0.003$, que indica un mayor contenido de Zn en las mieles procedentes de esta región. De igual manera se determinó una relación negativa entre la concentración de Zn con la presencia de actividades antrópicas registradas ante el DENU ($P = 0.03$), esto señala que la suma de las actividades llevadas a cabo en el radio de acción de los apiarios no impacta directamente en el contenido de Zn en la miel y este más bien podía responder a fuentes específicas de contaminación. Por otra parte se encontró una relación baja a un 90% de nivel de confianza ($P = 0.9$) entre el Zn y la intensidad del tráfico, no obstante la relación negativa encontrada a nivel “bajo” en la escala de la intensidad indican que es posible encontrar de moderadas a altas concentraciones de Zn en zonas con menor parque vehicular.

Los resultados señalan que es necesario realizar un mejor reconocimiento de las zonas de estudio así como de las actividades específicas que tiene potencial de ser fuentes influyentes en los contenidos de Zn en la miel.



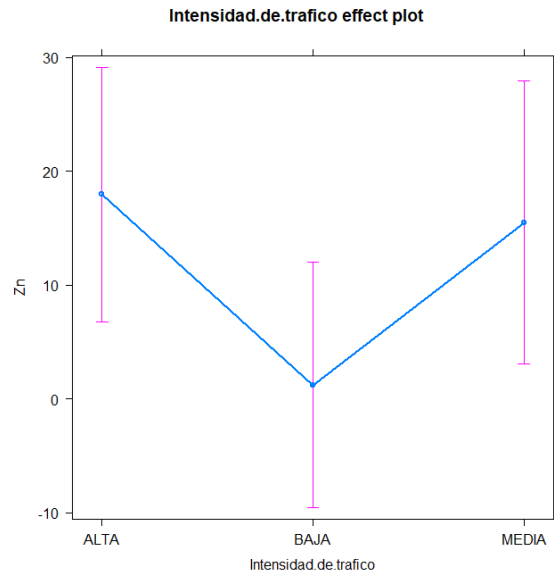


Figura 60. Variables relacionadas significativamente con la presencia de Zn en las muestras de miel.
Fuente: Elaboración propia, 2020.

No obstante, finalmente el modelo no se valida debido a que los supuestos del modelo no se cumplen, no existe homocedasticidad en los datos, comprobado por la prueba Beusch-Pagan con un valor de $P = .000$. Aunado a esto de acuerdo al gráfico Q-Q, no se presenta normalidad en los datos residuales por lo que la gráfica de distancias de Cook señaló valores influyentes determinados por la prueba de valores atípicos de Bonferroni (73 y 74). Estos datos atípicos sugieren la aplicación de un modelo no paramétrico para el caso del Zn.

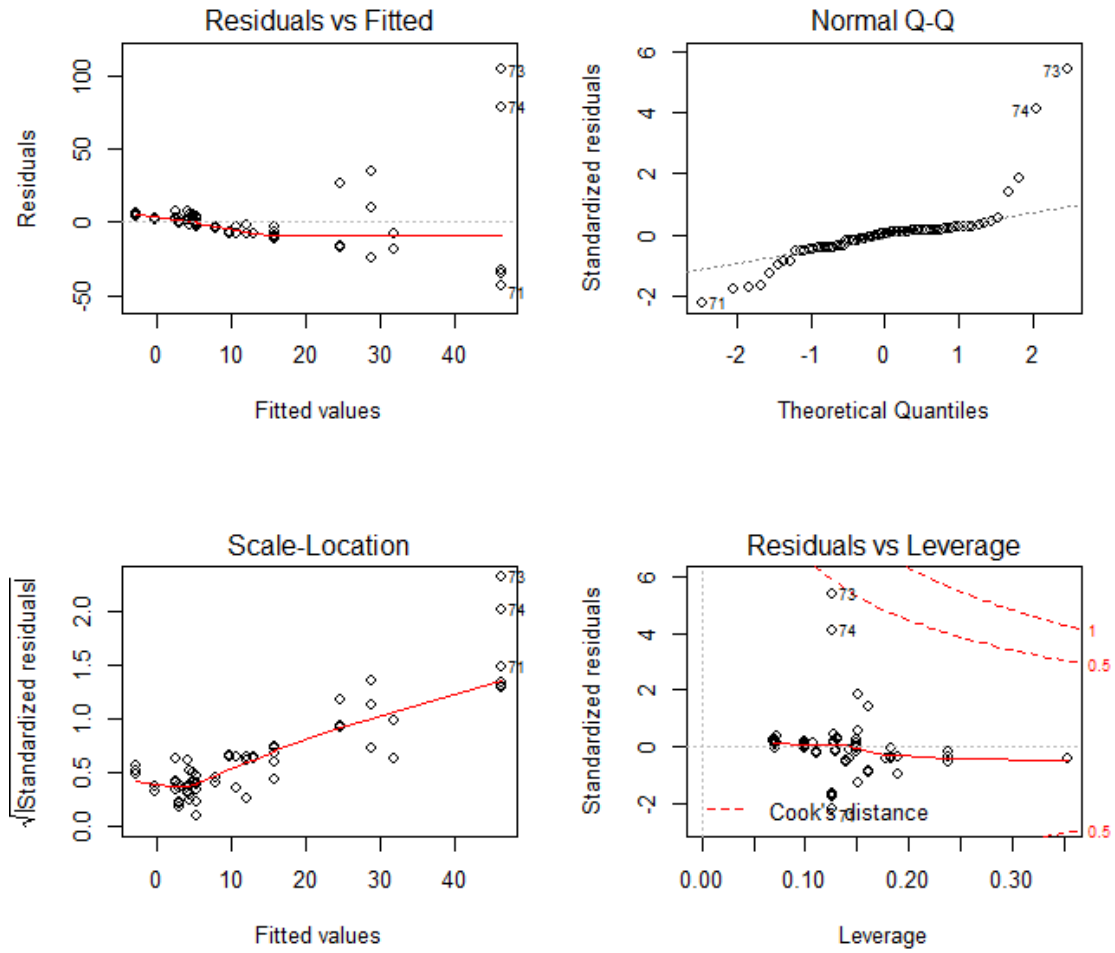


Figura 61. Gráficas básicas de diagnóstico para la validación del modelo para Zn.
Fuente: Elaboración propia, 2020.

11. CONCLUSIONES.

Se encontraron Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Ni, Pb y Zn a distintas concentraciones en muestras de miel provenientes de las 5 regiones de estudio en el estado de Puebla. Las concentraciones de Al en miel fueron superiores a las determinadas en otras investigaciones (Solayman *et al.*, 2016) y mayores que otros metales detectados. El Mg se encontró como un elemento mayoritario y los contenidos Fe fueron reportados dentro del rango de referencia de la FAO (2019) con excepción en algunas muestras. El Cr y el Zn fueron reportados en altas concentraciones, mientras que el Cd, Cu, Pb y Ni presentaron los valores más bajos respectivamente.

Las medias y medianas de todos los metales no fueron las mismas, consecuencia de la alta variabilidad de las concentraciones en las muestras. Los rangos señalaron una amplia distribución de contenido de metales en la miel; esta distribución responde al origen geográfico.

Debido a la distribución de los metales se realizaron pruebas no paramétricas para el tratamiento de los datos; de acuerdo a las medianas obtenidas de todas las regiones, la región Sierra Nororiental presentó los mayores contenidos en Cd, Cr, Cu y Mg, en cuanto a la región Valle de Atlixco se encontraron los mayores contenidos de Fe, Ni y Pb, mientras que la región Serdán presentó los mayores contenidos en Al, Co y Zn. Se presentaron valores atípicos en todas las regiones, estos valores son consecuencia de la variabilidad en las concentraciones a nivel región, y apiario en algunas ocasiones. No obstante las pruebas realizadas comprueban que el contenido mineral en la miel es dependiente del origen geográfico.

Las concentraciones de Al, Cd, Cu, Cr, Pb y Zn se detectaron en concentraciones superiores a los límites máximos establecidos por países como Brasil, China, Colombia, E.U.A, India y Polonia, así como por organizaciones como la Unión Europea y MERCOSUR. Aunado a esto, los contenidos de metales como Cd, Cr, Cu y Pb pueden representar un potencial riesgo para la pérdida de colmenas, puesto que fueron detectados concentraciones superiores a la Dosis Letal media reportada por diversos autores; y si bien no en todos los apiarios se encontraron contenidos superiores a la DL_{50} , los contenidos detectados pudiesen provocar cambios significativos en el metabolismo de las abejas y su comportamiento ecológico.

Los modelos lineales no se adaptaron completamente a los datos, por lo que no se pudo demostrar una relación directa entre los contenidos de metales presentes en la miel y las actividades antrópicas registradas ante el DENUE, esto puede ser así por el hecho de que las abejas no se registren a un radio de acción de tres kilómetros, sino que con base a la disposición de recursos son capaces de reducir o incrementar el área de pecoreo, además de acuerdo a imágenes satélites para el análisis de las zonas de estudio, existen actividades antropogénicas presentes en el principal radio de acción las cuales no se encuentran registradas ante el DENUE. Pese a ello, estos modelos comprobaron en todos los metales una relación significativa directa entre el contenido y el origen geográfico o al menos en algún nivel de la variable propuesta, además de señalar relaciones significativas con la presencia de actividades agrícolas y la intensidad del tráfico. Las pruebas posteriores para aceptar el modelo sugieren la implementación de otros modelos estadísticos no paramétricos que se adapten a la amplia distribución de las concentraciones.

La presencia de metales en miel es influenciada por las actividades antrópicas cercanas a los puntos de producción, sin embargo las fuentes de contaminación puntual no pueden ser detectadas certeramente, por lo que la acumulación de metales en el ambiente, su movilización y la interacción de las abejas con los compartimentos ambientales son la principal causa de la contaminación de la miel.

Si bien la contaminación de la miel por metales pesados no puede atribuirse a una actividad específica, el conjunto de actividades antropogénicas como la industria, la agricultura, el tráfico vehicular y la urbanización son origen de las elevadas concentraciones de metales en el medio y por consecuente en la miel.

Las abejas son indicadoras de contaminación ambiental; la miel al ser un producto de mayor generación, colectada y madurada por la acción de las abejas obreras, que tiene como principal objetivo la reserva para la alimentación y la crianza en las colmenas, es capaz de almacenar metales que en el ambiente se encuentran presentes, evaluando el estado de los ecosistemas a la vez que los efectos de los contaminantes impactan directamente en las abejas y por tanto estimar el riesgo potencial para otros organismos, principalmente polinizadores.

Se comprobó parcialmente la hipótesis, concluyendo que existe una relación entre los contenidos de metales y la presencia de actividades antrópicas. La variación, interacción y

acumulación de los metales generados por estas actividades tienen efectos disímiles en cada región e incluso en cada apiario. Pese a ello, es importante reconsiderar la influencia de estas actividades y los radios de acción de las colmenas, puesto que la movilización de metales en el ambiente (principalmente en la atmósfera y litosfera), y los radios de acción de las colmenas, no están restringidos a un valor establecido, es decir tanto los contaminantes pudiesen provenir de fuentes superiores a los 3 kilómetros, como las abejas pueden ir más allá en busca de recursos y en el proceso coleccionar una mayor cantidad de metales. Así el uso de la miel tiene potencial de ser un indicador de contaminación ambiental, sujeta a fenómenos climáticos, geográficos y antropogénicos.

12. RECOMENDACIONES.

La determinación de contaminantes presentes en la miel en el estado de Puebla es un área de estudio aún poco explorada, se sugiere continuar con la investigación de la presencia de metales pesados en el estado, así como explorar los riesgos toxicológicos a los que se encuentran las abejas al estar expuestas a estos contaminantes.

Se recomienda implementar el potencial de la miel generada por *Apis mellifera* como indicador de contaminación ambiental a través de diversos métodos, con variaciones el análisis analítico y estadístico, con el fin de generar un modelo que se adapte al contexto en el que se genera la producción apícola en el estado.

La apicultura actualmente es una actividad expuesta a problemas ambientales como la contaminación, el cambio climático, la deforestación y el crecimiento de la mancha urbana, se presentan motivos para que la apicultura convencional transite hacia una apicultura orgánica, sujeta a controles de calidad establecidas por diversos países y organizaciones, esto con la finalidad de evitar estragos en las poblaciones de abejas, que impactan ecológica y económicamente, así como dar un valor agregado al producto que en México es de principal exportación.

13. REFERENCIAS.

Acevedo-Sandoval, O., Ortiz-Hernández, E., Cruz-Sánchez, M. y Cruz-Chávez, E. (2004). El papel de óxidos de hierro en suelos. *Terra Latinoamericana*, 22(4), 485-497. E-ISSN: 2395-8030.

Adriano, D. C. (2001). *Trace Elements in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, Bioavailability, and Risk of Metals* (2° Edition). Springer-Verlag New York. ISBN: 978-0-387-21510-5.

Adugna, E., Hymete, A., Birhanu, G., y Ashenef, A. (2020). Determination of some heavy metals in honey from different regions of Ethiopia. *Cogent Food & Agriculture*, 6 (1). DOI: 10.1080/23311932.2020.1764182

AGRICULTURA. (17 de Marzo de 2020). La miel mexicana va endulzando al mundo. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/la-miel-mexicana-va-endulzando-el-mundo?idiom=es>.

AGRICULTURA. (21 de Junio de 2015). ¿Qué es la apicultura?. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/que-es-la-apicultura?tab=>.

AGRICULTURA. (20 de Mayo de 2019). Sin abejas, ¿Qué sería de la agricultura?. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/sin-abejas-que-seria-de-la-agricultura?idiom=es>.

Alda-Garcilope, C., Gallego-Picó, A., Bravo-Yagüe, J. C., Garcinuño-Martínez, R. M., y Fernández-Hernando, P. (2012). Characterization of Spanish honeys with protected designation of origin “Miel de Granada” according to their mineral content. *Food chemistry*, 135 (3), 1785-1788. DOI: 10.1016/j.foodchem.2012.06.057

Alqarni, A. S., Owayss, A. A., Mahmoud, A. A., & Hannan, M. A. (2014). Mineral content and physical properties of local and imported honeys in Saudi Arabia. *Journal of Saudi Chemical Society*, 18 (5), 618-625. DOI: 10.1016/j.jscs.2012.11.009

Altunatmaz, S. S., Tarhan, D., Aksu, F., Ozsobaci, N. P., Or, M. E., y Barutcu, U. B. (2018). Levels of chromium, copper, iron, magnesium, manganese, selenium, zinc, cadmium, lead and aluminium of honey varieties produced in Turkey. *Food Science and Technology*, (AHEAD). DOI: 10.1590/fst.19718.

Aranda, P., Planells, E. y Llopis, J. (2000). Magnesio. *Ars Pharmaceutica*, 41 (1), 91-100. E-ISSN: 2340-9894.

Arriaga, L., J.M. Espinoza, C. Aguilar, E. Martínez, L. Gómez y E. Loa (coordinadores). 2000. Regiones terrestres prioritarias de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. México.

ASERCA. (2010). Situación actual y perspectiva de la apicultura en México. *Claridades Agropecuarias*. 199, 3-43. ISSN: 0188-9974.

ATSDR. (2008). *Toxicological profile for Aluminum*. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service.

ATSDR. (2004). *Toxicological profile for Cobalt*. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service.

Avila González, D. A. (2017). Fitoextracción de suelos contaminados por elementos potencialmente tóxicos en la región de Atlixco, Puebla. [Tesis de Maestría]. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.

Balkanska, R. y Salkova, D. (2018). Feeding of the Bee Families with an Addition of CoSO₄. *Iranian Journal of Applied Animal Science*, 8 (2), 343-346.

Bargańska, Ż., Ślebioda, M. y Namieśnik J. (2015). Honey bees and their products: bioindicators of environmental contamination. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 46(3), 235-248. DOI: 10.1080/10643389.2015.1078220.

Bartha, S., Taut, I., Goji, G., Vlad, I. A., y Dinulică, F. (2020). Heavy Metal Content in Polyfloral Honey and Potential Health Risk. A Case Study of Copșa Mică, Romania. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17 (5). DOI: 10.3390/ijerph17051507

Bazeyad, A. Y., Al-Sarar, A. S., Rushdi, A. I., Hassanin, A. S., y Abobakr, Y. (2019). Levels of heavy metals in a multifloral Saudi honey. *Environmental Science and Pollution Research*, 26 (4), 3946-3953. DOI: 10.1007/s11356-018-3909-7.

Belitz, H. D., Grosch, W. y Schieberle. (2009). *Food Chemistry* (4th Edition). Germany: Springer-velarg. DOI 10.1007/978-3-540-69934-7

Bilandžić, N., Đokić, M., Sedak, M., Varenina, I., Kolanović, B. S., Končurat, A., Šimić, B. y Rudan, N. (2012). Content of five trace elements in different honey types from Koprivnica-Krievci county. *Slovenian Veterinary Research*, 49 (4), 167-175.

Birge, W. J., y Price, D. J. (2001). Analysis of metals and Polychlorinated biphenyl (PCB) residues in honey bees, honey and pollen samples collected from the Paducah gaseous diffusion plant and other areas. *Division of Waste Management. Kentucky Department for Environmental Protection*.

Bogdanov, S. (2006). Contaminants of bee products. *Apidologie*, 37(1), 1–18. DOI: 10.1051/apido:2005043

Bradl, H. B. (2005). *Heavy Metals in the Environment: origin, interaction and remediation*. Alemania: Elsevier. ISBN: 0-12-088381-3.

Burden, C. M., Morgan, M. O., Hladun, K. R., Amdam, G. V., Trumble, J. J. y Smith, B. H. (2019). Acute sublethal exposure to toxic heavy metals alters honey bee (*Apis mellifera*) feeding behavior. *Scientific reports*, 9 (1), 1-10. DOI: 10.1038/s41598-019-40396-x.

CartoMinMex (2020). Cartografía Minera [Mapa]. Secretaría de Economía; Dirección General de Minas. Consultado el 03 de Octubre de 2020, disponible en <https://portalags1.economia.gob.mx/arcgis/apps/webappviewer/index.html?id=1f22ba130b0e40d888bfc3b7fb5d3b1b>.

Castañón, C. L. (2009). *Mieles diferenciadas de la Península de Yucatán y su mercado, serie conocimientos, N°8*. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad; Corredor Biológico Mesoamericano México.

Castro-González, N. P., Moreno-Rojas, R., Calderón-Sánchez, F., Moreno-Ortega, A y Tamariz-Flores, V. (2018). Metales pesados en leche de vacas alimentadas con alfalfa producida en suelos irrigados con aguas residuales en Puebla y Tlaxcala, México. *Rev. Mex. De Ciencias Pecuarias*. 9 (3), 467-485. DOI: 10.22319/rmcp.v9i3.4358

Celli, G. y Maccagnani, B. (2003). Honey bees as bioindicators of environmental pollution. *Bulletin of Insectology*. 56 (1), 137-139. ISSN: 2283-0332.

Chicas-Mosier, A. M., Cooper, B. A., Melendez, A. M., Pérez, M., Oskay, D. y Abramson, C. I. (2017). The effects of ingested aqueous aluminum on floral fidelity and foraging strategy in honey bees (*Apis mellifera*). *Ecotoxicology and environmental safety*, 143, 80-86. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2017.05.008.

Choppala, G., Bolan, N., y Park, J. H. (2013). Chromium contamination and its risk management in complex environmental settings. *Advances in Agronomy*, 120, 129-172. DOI: 10.1016/B978-0-12-407686-0.00002-6.

Chua, L. S., Abdul-Rahaman, N. L., Sarmidi, M. R. y Aziz, R. (2012). Multi-elemental composition and physical properties of honey samples from Malaysia. *Food Chemistry*, 135 (3), 880-887. DOI: 10.1016/j.foodchem.2012.05.106.

Contreras-Ramos, J. y Díaz-Ruíz, R. Cambios en la Fertilidad del Suelo por Efecto de Monocultivos en un suelo Regosol Tipico de Serdan, Puebla. *Ciencia y Tecnol. Agrop.* 6 (1), 8-16.

CODEX-STAN-012-1981. Norma del Codex para la miel. Rev. 2001, Enmendada 2019. 1987.

Covarrubias, S. A., y Peña-Cabriales, J. J. (2017). Contaminación Ambiental por Metales Pesados en México: Problemática y Estrategias de Fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33, 7-21. DOI: 10.20937/RICA.2017.33.esp01.01

CXS-193-1995. Norma General para los Contaminantes y las Toxinas presentes en los Alimentos y Piensos. Rev. 2009, Enmendada 2019. 1995

CX/S 00/3. Proyecto de Norma Revisado Para la Miel. OMS; FAO. 1999

Dag, A., Afik, O., Yeselson, Y., Schaffer, A., y Shafir, S. (2006). Physical, chemical and palynological characterization of avocado (*Persea americana* Mill.) honey in Israel.

International journal of food science & technology, 41 (4), 387-394. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2005.01081.x.

De-Melo, M. A., De Almeida-Muradian, B. L., Sancho, M., Pascual-Maté, A., (2017) Composition and properties of *Apis mellifera* honey: A review. *Journal of Apicultural Research*, 57 (1), 5-37. DOI: 10.1080/00218839.2017.1338444.

Di, N., Hladun, R. K., Zhang, K., Tong-Xian L. y Trumble, T. J. (2016). Laboratory bioassays on the impact of cadmium, copper and lead on the development and survival of honeybee (*Apis mellifera* L.) larvae and foragers. *Chemosphere*, 152, 530-538. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2016.03.033](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.03.033).

Di, N., Zhang, K., Hladun, K. R., Rust, M., Chen, Y. F., Zhu, Z., Liu, T. y Trumble, J. T. (2020). Joint effects of cadmium and copper on *Apis mellifera* forgers and larvae. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 237. DOI: 10.1016/j.cbpc.2020.108839

DOUE. REGLAMENTO (UE) 2015/1005 de la Comisión. *Contenido máximo de plomo en determinados productos alimenticios*. Bruselas, Bélgica. 26 de Junio de 2015.

Dżugan, M., Wesołowska, M., Zaguła, G., Kaczmariski, M., Czernicka, M. y Puchalski, C. (2018). Honeybees (*Apis mellifera*) as a biological barrier for contamination of honey by environmental toxic metals. *Environmental monitoring and assessment*, 190, 101. DOI: 10.1007/s10661-018-6474-0

Dżugan M., Zaguła G., Wesołowska M., Sowa P. y Puchalski Cz. (2017). Levels of toxic and essential metals in varietal honeys from Podkarpacie. *Journal of Elementology*, 22 (3), 1039-1048. DOI: 10.5601/jelem.2016.21.4.1298

FAO. (17 de Mayo de 2018). Es hora de apreciar la labor de los polinizadores. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <http://www.fao.org/fao-stories/article/es/c/1129811/>.

FAO. (24 de Julio de 2019). Honey. [Infografía]. Recuperado de <http://www.fao.org/resources/infographics/infographics-details/es/c/1202954/>.

FAOSTAT. (2020). Crops and livestock products: Honey, natural. [Data set]. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Recuperado el 14 de Abril de 2020, disponible en <http://www.fao.org/faostat/en/#data/TP/visualize>

FAOSTAT. (2020). Livestock primary: Honey, natural. [Data set]. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Recuperado el 11 de Abril de 2020, disponible en <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QL>

FAOSTAT. (2020). New Food Balances: Honey, natural; Food supply quantity. [Data set]. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Recuperado el 16 de Abril de 2020, disponible en <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FBS>.

Farooq Khan, Z., y Maqbool, T. (2008). Physical and spectroscopic characterization of Pakistani honey. *Ciencia e investigación agraria*, 35 (2), 199-204. 10.4067/S0718-16202008000200009

Farooque, L. M. y Ahmed, C. F. (2019). Minerals content in different types of local and branded honey in Sindh, Pakistan. *Heliyon*, 5 (7). DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e02042.

Farooqui, T. (2008). Iron-induced oxidative stress modulates olfactory learning and memory in honeybees. *Behavioral neuroscience*, 122 (2), 433-447. DOI: 10.1037/0735-7044.122.2.433.

Fideicomiso de Fondo Compartido. (12 de Diciembre de 2016). Apicultura, Actividad de Gran Importancia para la Economía y el Medio Ambiente en México. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.gob.mx/firco/articulos/apicultura-actividad-de-gran-importancia-para-la-economia-y-el-medio-ambiente-en-mexico?idiom=es>.

Formicki, G., Greń, A., Stawarz, R., Zyśk, B. y Gał, A. (2013). Metal Content in Honey, Propolis, Wax, and Bee Pollen and Implications for Metal Pollution Monitoring. *Polish Journal of Environmental Studies*, 22 (1), 99-106.

Fredes, C., y Montenegro, G. (2006). Contenido de metales pesados y otros elementos traza en mieles de abeja en Chile. *Ciencia e Investigación Agraria*, 33 (1), 57-66.

FSANZ. (2002). Food Standards, the 20th Australian Total Diet Survey. Australia; Food Standards Australia New Zealand. ISBN: 0 642 345910.

FSSAI. (2010). Advisory on Standards for Honey and prohibition of antibiotics. Ministry of Health and Family Welfare, Government of India. Consultado el 20 de Agosto de 2020.

Gaete, H., Hidalgo, M. E, Neaman, A. y Avila G. (2010). Evaluación de la toxicidad de Cobre en suelos a través de biomarcadores de estrés oxidativo en *Eisenia foetida*. *Quim Nova*, 33 (3), 566-570. DOI: 10.1590/S0100-40422010000300014

Gauthier, M., Aras, P., Jumarie, C. y Boily, M. (2016). Low dietary levels of Al, Pb and Cd may affect the non-enzymatic antioxidant capacity in caged honey bees (*Apis mellifera*). *Chemosphere*, 144, 848-854. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2015.09.057.

Glavan, G., Milivojević, T., Božič, J., Sepčić, K. y Drobne, D. (2017). Feeding preference and sub-chronic effects of ZnO nanomaterials in honey bees (*Apis mellifera carnica*). *Archives of environmental contamination and toxicology*, 72 (3), 471-480. DOI: 10.1007/s00244-017-0385-x.

Gobierno del Estado de Puebla (2015). Ley de Desarrollo Económico Sustentable del Estado de Puebla. Secretaria de Gobernación, Ref. 28 de Junio de 2019. 30 de Marzo de 2015.

Golob, T., Doberšek, U., Kump, P. y Nečemer, M. (2005). Determination of trace and minor elements in Slovenian honey by total reflection X-ray fluorescence spectroscopy. *Food Chemistry*, 91 (4), 593-600. DOI: 10.1016/j.foodchem.2004.04.043.

González, Z. C. y Vallarino, A. (2014). Los bioindicadores ¿una alternativa real para la protección del medio ambiente?. En González, Z. A., Vallarino, A., Pérez, J. C y Low, P. A. (Ed.) *BIONDICADORES: Guardianes de nuestro futuro ambiental*, 21-37. México: El Colegio de la Frontera Sur. ISBN 978-607-8429-05-9.

Grzebisz W. (2011). Magnesium - Food and Human Health. *Journal of Elementology*, 16 (2), 299-323. DOI: 10.5601/jelem.2011.16.2.13.

Gutierrez, T. I. (2015). Empleo de *Apis mellifera* como bioindicador de la contaminación de metales pesados en el término municipal de Córdoba (Tesis doctoral). Universidad de Córdoba, Córdoba, España.

Hladun, K. R., Di, N., Liu, T. X. y Trumble, J. T. (2016). Metal contaminant accumulation in the hive: Consequences for whole-colony health and brood production in the honey bee (*Apis mellifera* L.). *Environmental Toxicology and Chemistry*, 35 (2), 322-329. DOI: 10.1002/etc.3273.

Heard, M. S., Baas, J., Dorne, J. L., Lahive, E., Robinson, A. G., Rortais, A., Spurgeon, D. J., Svendsen, C. y Hesketh, H. (2017). Comparative toxicity of pesticides and environmental contaminants in bees: are honey bees a useful proxy for wild bee species?. *Science of the Total Environment*, 578, 357-365.

Herrero-Latorre, C., Barciela-García, J., García-Martín, S. y Peña-Crecente, R.M. (2017). The use of honeybees and honey as environmental bioindicators for metals and radionuclides: a review. *Environmental Reviews*. 25(4), 463-480. DOI: 10.1139/er-2017-0029

Huidobro, F. J y Simal, J. (1984). Parámetros de calidad de la miel (IV) cenizas. *Farmacia y Sociedad OFFARM*, 3 (10), 619-623. ISSN: 0212-047X.

INEGI (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos; Tlachichuca, Puebla, Clave geoestadística 21179. Recuperado de: http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/21/21179.pdf

INEGI (2020). Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas 04/2020. [Data set]. Recuperado el 28 de Junio 2020.

Insuasty-Santacruz, E., Martínez-Benavides, J. y Jurado-Gómez, H. (2016). Identificación de flora y análisis nutricional de miel de abeja para la producción apícola. *Bioteología en el sector agropecuario y agroindustrial*, 14 (1), 37-44. DOI:10.18684/BSAA(14)37-44.

IPNI (2020). Cobalt; agronomic fact sheets on crop nutrients. [Documento electrónico]. Recuperado el 29 de Mayo de 2020.

Jean-Prost, P. y Le Conte, Y. (2007). *Apicultura: conocimiento de la abeja. Manejo de la colmena*. (4° edición). España: Ediciones Mundiprensa. ISBN: 84-8476-204-1.

Jiménez-Cisneros, B. E. (2001). *La Contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada*. (1° Edición). México: Limusa; Colegio de Ingenieros Ambientales de México; Instituto de Ingeniera de la UNAM y FEMISCA.

Juárez, S. M., Cerdán, M. y Sanchez, S. A. (2007). *Hierro en el sistema suelo-planta*. Departamento de Agroquímica y Bioquímica. Facultad de Ciencias. Repositorio de la Universidad de Alicante, disponible en: <http://hdl.handle.net/10045/1845>.

Jumarie, C., Aras, P. y Boily, M. (2017). Mixtures of herbicides and metals affect the redox system of honey bees. *Chemosphere*, 168, 163-170. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.10.056

Legarreta, P. A., Corral, A. A., Delgado, R. M., Torres, P. J. y Flores, M. J. (2016). Material particulado y metales pesados en aire en ciudades mexicanas. *Cultura Científica y Tecnológica*, 12 (56), 234-245.

Licon, M. A. (30 de Julio de 2013). Derrame de crudo daña arroyo en la Sierra Norte de Puebla. Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en: http://www.agua.unam.mx/noticias/2013/nacionales/not_nac_julio30_4.html.

Machado, A., García, N., García, C., Acosta, L., Córdova, A., Linares, M., Giraldoth, D. y Velásquez, H. (2008). Contaminación por metales (Pb, Zn, Ni y Cr) en aire, sedimentos viales y suelo en una zona de alto tráfico vehicular. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 24 (4), 171-182.

Mancilla-Villa, O., Ortega-Escobar, H., Ramírez-Ayala, C., Uscanga-Mortera, E., Ramos-Bello, R. y Reyes-Ortigoza, A. (2012). Metales Pesados Totales y Arsénico en el Agua para riego de Puebla y Veracruz, México. 28 (1), 39-48. ISSN 0188-4999

Matin, G., Kargar, N. y Buyukisik, H. B. (2016). Bio-monitoring of cadmium, lead, arsenic and mercury in industrial districts of Izmir, Turkey by using honey bees, propolis and pine tree leaves. *Ecological Engineering*, 90, 331-335. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2016.01.035

Meindl, G. A., y Ashman, T. L. (2013). The effects of aluminum and nickel in nectar on the foraging behavior of bumblebees. *Environmental Pollution*, 177, 78-81. DOI: 10.1016/j.envpol.2013.02.017.

Méndez-García, T., Rodríguez, D. L. y Palacios M, S. Impacto del riego con aguas contaminadas, evaluado a través de la presencia de metales pesados en suelos. *Terra Latinoamericana*, 18 (4), 277-288. E-ISSN: 2395-8030.

MERCOSUR/GMC/RES. N° 12/11. REGLAMENTO TÉCNICO MERCOSUR SOBRE LÍMITES MÁXIMOS DE CONTAMINANTES INORGÁNICOS EN ALIMENTOS. Asunción, Paraguay. 17 de Junio de 2011.

Michener, C. D. (2007) *The Bees of the World*. (2nd Edition). John Hopkins University Press, Baltimore. ISBN-10: 0801885736

Mikkelsen, R. (2010). Soil and Fertilizer Magnesium. *Better Crops with plant food*. 94 (2), 26-28.

- Mondragón-Cortez, P., Ulloa, J. A., Rosas-Ulloa, P., Rodríguez-Rodríguez, R. y Resendiz, V. J. (2013). Physicochemical characterization of honey from the West region of México. *CyTA - Journal of Food*, 11 (1), 7-13. DOI: 10.1080/19476337.2012.673175
- Moniruzzaman, M., Chowdhury, M. A. Z., Rahman, M. A., Sulaiman, S. A., y Gan, S. H. (2014). Determination of mineral, trace element, and pesticide levels in honey samples originating from different regions of Malaysia compared to Manuka honey. *BioMed research international*, 2014. DOI: 10.1155/2014/359890
- Montiel, J., Marmolejo, Y., Castellanos, I., Pérez, F., Francisco Prieto, F., Gaytán, J. y Fonseca M. (2020). Niveles de cadmio, cromo y plomo en abejas (*Apis mellifera*) y sus productos en Hidalgo, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 7 (1), 57-68. ISSN 2334-2501.
- Müller, M., Anke, M., y Illing-Günther, H. (1998). Aluminium in foodstuffs. *Food Chemistry*, 61 (4), 419-428. DOI: 10.1016/S0308-8146(97)00085-X
- National Institutes of Health. (2020). Datos sobre el Magnesio. [Hoja Informativa]. Recuperado el 11 de Junio de 2020 de <https://ods.od.nih.gov/factsheets/Magnesium-DatosEnEspañol/>
- Nesse, A., Garbossa, G., Pérez, G., Vittori, D. y Pregi, N. (2003). Aluminio: ¿culpable o inocente?. *Química Viva*. 2(1), 9-16.
- NHFPC (2018). China Releases the Standard for Maximum Levels of Contaminants in Foods. *Global Agricultural Information Network*. Consultado el: 25 de Julio de 2020.
- Nigussie, K., Subramanian, P. A., & Mebrahtu, G. (2012). Physicochemical analysis of Tigray honey: An attempt to determine major quality markers of honey. *Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia*, 26 (1), 127-133. DOI: 10.4314/bcse.v26i1.14.
- Nisbet, C., Güler, A. y Biyik, S. (2019). Effects of different environmental conditions on the cognitive function of honeybee (*Apis mellifera* L.) and mineral content of honey, *Ankara Üniv. Vet. Fak. Derg.*, 66, 95-101
- NMX-F-036-NORMEX-2006. MIEL DE ABEJA. *Especificaciones*. Diario Oficial de la Federación. México, 24 de Enero de 2007.
- NOM-001-ECOL-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación. México, 6 de Enero de 1997.
- NOM-004-SAG/GAN-2018, Producción de miel y especificaciones. Diario Oficial de la Federación. México, 29 de Abril de 2020.
- NOM-041-SSA1-1993. Bienes y Servicios. Agua Purificada Envasada. Especificaciones Sanitarias. Diario Oficial de la Federación. México, 16 de Mayo de 1994.

NOM-130-SSA1-1995, Bienes y servicios. Alimentos envasados en recipientes de cierre hermético y sometidos a tratamiento térmico. Disposiciones y especificaciones sanitarias. Diario Oficial de la Federación. México, 21 de Noviembre de 1997.

Olivares A, L., Valverde S, V., Quiros R, R., García R, N., Muñoz, M., Navarro A. y Cabrera V. (2015). Níquel en alimentos y factores influyentes en sus niveles, ingesta, biodisponibilidad y toxicidad: una revisión. *CyTA - Journal of Food*, 13(1), 87-101, DOI: 10.1080/19476337.2014.917383.

OMS. (2006). Guías para la calidad del agua potable, vol. 1 (3° ed.). Suiza; Organización Mundial de la Salud. ISBN: 92 4 154696 4

ONU (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe*. Chile: Naciones Unidas. ISBN: 978-92-1-058643-6

Oroian, M., Prisacaru, A., Hretcanu, E. C., Silviu-Gabriel S., Leahu A. y Buculei, A. (2016). Heavy Metals Profile in Honey as a Potential Indicator of Botanical and Geographical Origin, *International Journal of Food Properties*, 19 (8), 1825-1836. DOI: 10.1080/10942912.2015.1107578.

Otero-Salinas, A., Meneses-Pérez, J. y Águila-Sánchez K. (2018). Propiedades curativas de la miel: un edulcorante natural proveniente de los principales polinizadores de las plantas. *RD-ICUAP*. Año 4 (3). ISSN 2448-5829.

Pérez, G. P. y Azcona, C. M. (2012). Los efectos del cadmio en la salud. *Revista de especialidades médico-quirúrgicas*, 17 (3), 199-205. ISSN: 1665-7330.

Pérez-Sato, M., Flores-Garrido, A. F., Castro-González, N. P., Escobar-Hernández, R., Soni-Guillermo, E., & Pérez-Hernández, H. (2018). Análisis Palinológico de la Miel de *Apis Mellifera* L., producida en el Altiplano del Estado de Puebla, México. 11 (3), 98-103.

Pisani, A., Protano, G. y Riccobono, F. (2008). Minor and trace elements in different honey types produced in Siena County (Italy). *Food Chemistry*, 107 (4), 1553-1560. DOI: 10.1016/j.foodchem.2007.09.029

Polykretis, P., Delfino, G., Petrocelli, I., Cervo, R., Tanteri, G., Montori, G., Perito. B., Branca. J. J. V., Morucci, G. y Gulisano, M. (2016). Evidence of immunocompetence reduction induced by cadmium exposure in honey bees (*Apis mellifera*). *Environmental Pollution*, 218, 826-834. DOI: 10.1016/j.envpol.2016.08.006

Porrini, C., Sabatini, A. G., Girotti, S., Ghini, S., Medrzycki, P., Grillenzoni, F., Bortolotti, L., Gattavecchia, E. y Celli, G. (2003) Honey bees and bee products as monitors of the environmental contamination. *Apicata*, 38, 63–70.

Przybyłowski, P., & Wilczyńska, A. (2001). Honey as an environmental marker. *Food chemistry*, 74 (3), 289-291. DOI: 10.1016/S0308-8146(01)00153-4

Quigley, T. P., Amdam, G. V., & Harwood, G. H. (2019). Honey bees as bioindicators of changing global agricultural landscapes. *Current opinion in insect science*, 35, 132-137. DOI: 10.1016/j.cois.2019.08.012.

Ramírez, M. V., Ayala, R. y González, D. H. (2014) Abejas como bioindicadores de perturbaciones en los ecosistemas y el ambiente. En González. Z. A., Vallarino, A., Pérez, J. C y Low, P. A. (Ed.) *BIONDICADORES: Guardianes de nuestro futuro ambiental*. (pp. 347-370). México: El Colegio de la Frontera Sur. ISBN 978-607-8429-05-9.

Ramírez, V., Baez, A., López, P., Bustillos, R., Villalobos, M. A., Carreño, R., Contreras, J. L., Muñoz-Rojas, Fuentes, L. E., Martínez, J. y Munive, J. A. (2019). Chromium hyper-tolerant *Bacillus* sp. MH778713 assists phytoremediation of heavy metals by mesquite trees (*Prosopis laevigata*). *Frontiers in microbiology*, 10. DOI: 10.3389/fmicb.2019.01833

Rashed, M. N., El-Haty, M. T. A., & Mohamed, S. M. (2009). Bee honey as environmental indicator for pollution with heavy metals. *Toxicological and Environmental Chemistry*, 91 (3), 389-403. DOI: 10.1080/02772240802294870.

Reyes, Y. C., Vergara, I., Torres, O. E., Díaz-Lagos, M., y González, E. E. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo*. 16 (2), 66-77. ISSN: 2422-4324.

Rivera, Y., Moreno, L., Herrera, M., & Romero, H. M. (2016). La toxicidad por aluminio (Al³⁺) como limitante del crecimiento y la productividad agrícola: el caso de la palma de aceite. *Palmas*, 37 (1), 11-23. ISSN 0121-2923.

Rocha, C. (2000), Principios Básicos De Espectroscopía. México; Editorial UACH,. ISBN 968-6331-63-8

Rodríguez-Serrano, M., Martínez-de la casa, N., Romero-Puertas, M. C., del Rio, L. A. y Sandalio, L.M. (2008). Toxicidad del Cadmio en plantas. *Ecosistemas*, 17(3), 139-146. ISSN: 1697-2473.

Roman, A. (2010). Levels of Copper, Selenium, Lead, and Cadmium in Forager Bees. *Polish Journal of Environmental Studies*, 19 (3), 663-669.

Salama, A. S., Etoriki, A. M., y Awad, M. H. (2019). Determination of Physicochemical Properties and Toxic Heavy Metals Levels in Honey Samples from West of Libya. *Journal of Advanced Chemical Sciences*, 5 (1), 618-620. DOI: 10.30799/jacs.207.19050104.

Salihaj, M., y Bani, A. (2017). The nickel content in honey derived from serpentine and non-serpentine areas of Kosovo. *Albanian Journal of Agricultural Sciences*, (Special edition) 557-563.

Secretaría de Sustentabilidad Ambiental y Ordenamiento Territorial (2012). Gestión de la Calidad del Aire del Estado de Puebla 2012-2020 (1° Ed.). Gobierno de Puebla. México.

SENASICA (2020). *Tabla de Límites Máximos de Residuos 2020*. Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. Disponible en:

<https://www.gob.mx/senasica/documentos/limites-maximos-de-residuos-toxicos-y-contaminantes?state=published>.

SENASICA, SAGARPA, CGG (2018). Manual de Buenas Prácticas Pecuarias en la Producción Primaria de Miel (Act. UNAM). Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación; México.

Sgolastra, F., Blasioli, S., Renzi, T., Tosi, S., Medrzycki, P., Molowny-Horas, R., Porrini, C. y Braschi, I. (2018). Lethal effects of Cr (III) alone and in combination with propiconazole and clothianidin in honey bees. *Chemosphere*, 191, 365-372. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.10.068.

Solayman, M., Islam, M. A., Paul, S., Ali, Y., Khalil, M. I., Alam, N., y Gan, S. H. (2016). Physicochemical properties, minerals, trace elements, and heavy metals in honey of different origins: a comprehensive review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15 (1), 219-233. DOI: 10.1111/1541-4337.12182.

Spirić, D., Ćirić, J., Đorđević, V., Nikolić, D., Janković, S. Nikolić, A., Petrović, Z., Katanić, N. y Teodorović, V. (2019): Toxic and essential element concentrations in different honey types, *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 99 (5), 474-485. DOI: 10.1080/03067319.2019.1593972

SIAP (2020). Avance por producto: miel. [Data set]. Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural (AGRICULTURA). Recuperado el 12 de Abril de 2020, disponible en: http://infosiap.siap.gob.mx/repoAvance_siap_gb/pecAvanceProd.jsp

SIAP. (12 de Septiembre de 2019). La miel de abeja [Mensaje en un blog]. Recuperado de https://www.gob.mx/siap/es/archivo/articulos?filter_id=1404&filter_origin=archive&idiom=es&page=12.

SIE API. (2020). Exportaciones totales: 0409 Miel natural de abeja. [Data set]. Banco de México (BANXICO). Recuperado el 12 de Abril de 2020, disponible en: <https://www.banxico.org.mx/SieInternet/consultarDirectorioInternetAction.do?sector=1&accion=consultarCuadro&idCuadro=CE37&locale=es>.

Silva, A. D. S., Alves, C. N., Fernandes, K. D. G., y Müller, R. (2013). Classification of honeys from Pará State (Amazon region, Brazil) produced by three different species of bees. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 24 (7), 1135-1145. DOI: 10.5935/0103-5053.20130147.

Singh, C., Shubharani, R., y Sivaram, V. (2014). Assessment of heavy metals in honey by atomic absorption spectrometer. *World journal of pharmacy and pharmaceutical sciences*, 3 (8), 509-515. DOI: ISSN 2278 – 4357.

Terrab, A., & Heredia, F. J. (2004). Characterisation of avocado (*Persea americana* Mill) honeys by their physicochemical characteristics. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84 (13), 1801-1805. DOI: 10.1002/jsfa.1888.

Tutun, H., Kahraman, H. A., Aluc, Y., Avci, T., y Ekici, H. (2019). Investigation of some metals in honey samples from West Mediterranean region of Turkey. *Veterinary Research Forum*, 10 (3) 181-186. DOI: 10.30466/vrf.2019.96726.2312

Ulloa, J. A., Mondragón-Cortez, P. M., Rodríguez-Rodríguez, R., Reséndiz, V. J., y Rosas-Ulloa, P. (2010). La miel de abeja y su importancia. *Revista Fuentes*, 2(4) 11-18. ISSN: 2007-0713.

USDA (2019). SR Legacy: Honey. [Data set]. U. S. Department of Agricultura. Recuperado el 20 de Junio de 2020, disponible en <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/169640/nutrients>.

Unión Europea. (2015). REGLAMENTO (UE) 2015/1005 de la comisión que modifica el Reglamento (CE) no 1881/2006 por lo que respecta al contenido máximo de plomo en determinados productos alimenticios. Bruselas, 25 de junio de 2015.

Valdivia, C. y Rodríguez, C. M. (2015). Características físicas y químicas en suelos de cultivo de las regiones de Acatzingo y Tochimilco, Puebla, para determinar su fertilidad. [Tesis]. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.

Verde, M. M. (2014). Apicultura y seguridad alimentaria. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*. 48(1), 25-31. ISSN: 0034-7485.

Wieczorek, J., Pietrzak, M., Pomianowski, J. y Wieczorek, Z. (2014). Honey as a source of bioactive compounds. *Polish Journal of Natural Sciences*, 29 (3), 275-285.

White, J. W. y Doner, W. L. (1980). Honey composition and properties. En *Beekeeping in the United States. Agriculture No. 335 handbook*, 82-91. Whashington, D.C., USA: U.S Department of Agriculture.

Yücel, Y., y Sultanoğlu, P. (2013). Characterization of Hatay honeys according to their multi-element analysis using ICP-OES combined with chemometrics. *Food Chemistry*, 140 (1-2), 231-237. DOI: 10.1016/j.foodchem.2013.02.046.

Zamudio, S. A. (2017). Evaluación de residuos de plaguicidas y metales tóxicos en miel de abejas producida en zonas de cultivos de fresa y cítricos (Tesis). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

FIGURAS

Arnold, N., Zepeda, R., Vásquez, D. M & Aldasoro, M. M. (2018). Distribución de *Apis mellifera*. [Mapa]. Recuperado de Arnold, N., Zepeda, R., Vásquez, D. M & Aldasoro, M. M. (2018). *Las abejas sin Aguijón y su cultivo en Oaxaca, México: con catálogo de especies*. (1ª edición) San Cristóbal de las casas, Chiapas, México: El Colegio de la Frontera Sur: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad: Rémy Benoit Marie Vandame. ISBN: 978-607-8429-53-0.

Arnold, N., Zepeda, R., Vásquez, D. M & Aldasoro, M. M. (2018). Cantidad de alimentos para un desayuno. [Fotografía]. Recuperado de Arnold, N., Zepeda, R., Vásquez, D. M & Aldasoro, M. M. (2018). Las abejas sin Aguijón y su cultivo en Oaxaca, México: con catálogo de especies. (1ª edición) San Cristóbal de las casas, Chiapas, México: El Colegio de la Frontera Sur: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad: Rémy Benoit Marie Vandame. ISBN: 978-607-8429-53-0.

Solayman, M., Islam, M. A., Paul, S., Ali, Y., Khalil, M. I., Alam, N., & Gan, S. H. (2016). Esquema de flujo del mecanismo simple de entrada para contaminantes en la miel. [Diagrama]. En Solayman, M., Islam, M. A., Paul, S., Ali, Y., Khalil, M. I., Alam, N., & Gan, S H. (2016). Physicochemical properties, minerals, trace elements, and heavy metals in honey of different origins: a comprehensive review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(1), 219-233. DOI: 10.1111/1541-4337.12182.