



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

**BIOMAGNIFICACIÓN DE METALES PESADOS EN UNA CADENA TRÓFICA
A TRAVÉS DE UN GRADIENTE DE CONTAMINACIÓN EN HUAUTLA,
MORELOS**

TESIS PROFESIONAL POR ETAPAS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
B I Ó L O G O
P R E S E N T A:
LILIANA SÁNCHEZ SALDAÑA

DIRECTOR:

DR. EFRAÍN TOVAR SÁNCHEZ

CUERNAVACA, MORELOS

octubre, 2020

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco mucho al Dr. Efraín por la confianza que depositó en mí al darme este proyecto, y por su entera disposición para ayudarme y guiarme durante todo el proceso. Así mismo agradezco a mis sinodales la Dra. Mussali, la Dra. Valencia, la Dra. Castrejón y el Dr. Suárez por todas las observaciones que me hicieron, las cuales ayudaron a enriquecer y mejorar el trabajo. Del mismo modo agradezco al equipo del Laboratorio de Investigaciones Ambientales del CEIB, por ayudarme y enseñarme a hacer las digestiones ácidas y la medición de los metales.

DEDICATORIA

A las mujeres de mí vida Pilar y Lulú, ya que siempre han estado para mí de manera incondicional. Siempre cuidándome, guiándome en el camino, enseñándome a enfrentar la vida como venga, a ser positiva y a aprender de mis errores. ¡GRACIAS!

A mis tíos Rocío y Román, a mis primos Ana, Rodrigo, Natalia y Karla y a mis sobrinitos Diego y Sofía. Porque siempre han estado al tanto de mí, apoyándome y aconsejándome y dándome todo su amor.

Si eres una mujer fuerte prepárate para la batalla:

aprende a estar sola [...]

Entrénate en los oficios de la reflexión y el intelecto

Lee, hazte el amor a ti misma [...]

Cuídate

Atesora tu poder

Defiéndelo

Hazlo por ti

Te lo pido en nombre de todas nosotras.

-Gioconda Belli

ÍNDICE

RESUMEN	
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1. La minería en México.....	3
2.2. La minería en Morelos	4
2.3.Efectos de la minería en el medio ambiente.....	5
2.4. Generalidades de los metales pesados.....	6
2.4.1. Impacto ambiental por metales pesados.....	7
2.4.2. Bioacumulación de metales pesados en plantas	8
2.4.3. Bioacumulación de metales pesados en artrópodos	10
2.5. Biomagnificación de metales pesados en cadenas tróficas.....	12
2.6. Influencia de la contaminación de metales pesados sobre la biomasa de los organismos	13
3. ANTECEDENTES	15
4. JUSTIFICACIÓN	17
5. HIPÓTESIS.....	18
6. OBJETIVOS.....	18
7. METODOLOGÍA.....	19
7.1. Sitio de estudio	19
7.2. Criterios generales de inclusión de los sitios de muestreo de artrópodos	22
7.3. Colecta de artrópodos y arañas	23
7.3.1. Muestreo de artrópodos	23
7.3.2. Separación del grupo artrópoda	24
7.3.3. Separación del orden Araneae.....	24
7.3.4. Procesamiento de muestras de artrópodos	25
7.3.5. Digestión ácida	25
7.3.6. Espectrofotometría de Absorción Atómica.....	26
7.4. Análisis de datos	27
8.1. Composición de artrópodos	28

8.1.1. Biomasa	29
8.1.2. Bioacumulación de metales pesados.....	30
8.2. Biomasa de los gremios de artrópodos	32
8.3. Relación entre la distancia al jal y la biomasa de los gremios de artrópodos	34
8.4. Relación entre la Bioacumulación de metales pesados por gremios de artrópodos con y la distancia al jal	36
8.5. Transferencia de MP a través de la cadena trófica por gremio de artrópodos.....	39
8.5.1. Metales no esenciales.....	39
8.5.2. Metales esenciales.....	40
9. DISCUSIÓN	42
9.1. Metales pesados a través del gradiente de lejanía al jale.....	42
9.2. Composición de artrópodos	43
9.3. Relación entre la concentración de metales pesados y los consumidores primarios	44
9.4. Relación entre la biomasa de los gremios de artrópodos con respecto a la distancia al jal ...	45
9.5. Relación entre la biomasa de los gremios de artrópodos y la bioacumulación de metales pesados.....	47
9.6. Relación entre la transferencia de metales pesados en la cadena trófica	48
10. CONCLUSIONES	50
12. LITERATURA CONSULTADA	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Regiones, distritos y zonas mineras. 1-Distrito minero de Huautla. 2-Zona minera de Tlayca. 3-Región minera Cuautla-Tilzapotla. 4-Zona Tehuixtla-Tequesquitengo. 5-Zona minera Tilzapotla-Jojutla. 6-Zona minera Tilzapotla. 7-Zona minera de Yauatepec. 8-Zona minera de Cuernavaca. Fuente: Servicio Geológico Mexicano, 2008.....	21
Figura 2. Distrito minero de Huautla. 2 minas abandonadas. Fuente: Servicio Geológico Mexicano, 2008. .	22
Figura 3. Gradiente de contaminación de MP, de 0 a 1,500 m de distancia al jal en dirección Oeste-Este. El círculo gris representa el jal, y cada punto representa los sitios de colecta de artrópodos asociados al jal. ...	23
Figura 4. Diferencias en la composición de metales pesados (a) y en la composición de la comunidad de artrópodos (b) entre siete zonas con distancia al jale, utilizando la escala multidimensional no métrica (NMDS). Cada punto es una representación bidimensional (eje 1 y eje 2) de la composición de especies de artrópodos (tres puntos por zona de distancia). Las distancias entre los puntos reflejan una matriz de disimilitud creada usando el coeficiente de disimilitud de Bray-Curtis (Faith et al., 1987). Los puntos que están muy juntos tienen comunidades de artrópodos que tienen una composición más similar en comparación con los puntos que están muy separados. Los datos para biomasa (Figura 4a: valores de estrés: 0.039. Inestabilidad final, 0.0003) y para la bioacumulación de metales pesados (Figura 4b: valores de estrés: 0.057. Inestabilidad final, 0.018) se utilizaron en este análisis.....	31
Figura 5. Análisis de regresión lineal entre la biomasa (peso seco g/m^2) de gremios de artrópodos y la distancia con respecto al jal. Otros = Phasmida, Mantodea, Opilionida, Escorpionida y Odonata. En el eje de las X se representa la distancia sobre el gradiente de contaminación, en el eje de las Y se representa la biomasa de los gremios de artrópodos.....	35
Figura 6. Promedio (\pm desviación estándar) de la concentración (mg/kg) de metales pesados (Pb, Cd, Cu, Zn y Fe) bioacumulados en diferentes niveles tróficos de organismos asociados a los jales de Huautla, Morelos. Otros = Phasmida, Mantodea, Opilionida, Escorpionida y Odonata.....	38

Figura 7. Transferencia de metales pesados (Pb, Cd, Cu, Zn y Fe) a través de la cadena trófica (productor
primario- consumidor primario (Orthoptera, Coleoptera, Hemiptera)- consumidor secundario (Araneae y
Otros). Otros = Phasmida, Mantodea, Opilionida, Escorpionida y Odonata. 41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Presencia de gremios de artrópodos colectados sobre un gradiente de contaminación de 0 a 1500 m a partir del jal de Huautla, Morelos.....	29
Tabla 2. Promedio (\pm error estándar) de la biomasa de artrópodos a través del gradiente, y análisis de una vía (ANOVA) para detectar el efecto del gremio de artrópodos.....	33
Tabla 3. Relación entre la distancia al jal y la concentración de metales pesados bioacumulados en diferentes gremios de artrópodos	37

Liliana Sánchez Saldaña. 2020. Biomagnificación de metales pesados en una cadena trófica a través de un gradiente de contaminación en Huautla, Morelos. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Biológicas, UAEM.

RESUMEN

La industria minera ha generado residuos peligrosos (jales), los cuales contienen elementos potencialmente tóxicos (EPT), que producen efectos nocivos sobre el ambiente. En particular el distrito minero de Huautla, Morelos ha generado 780 mil toneladas de residuos, ricos en metales pesados (MP), los cuales dañinos para todos los niveles tróficos. Se ha documentado que los MP son capaces de bioacumularse en los tejidos de los organismos, y de biomagnificarse a través de la cadena trófica, aumentando su concentración a través de cada eslabón trófico. En los ecosistemas terrestres los artrópodos son el grupo con mayor abundancia y diversidad de especies. Asimismo, estudios previos han documentado que las concentraciones de MP disminuyen con forme se alejan de la fuente de contaminación. Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue evaluar el proceso de bioacumulación y biomagnificación de MP en comunidades de artrópodos asociados a los jales de Huautla, Morelos, a través de un gradiente de contaminación de 0 a 1500 m. Los órdenes de artrópodos colectados a través del gradiente de contaminación fueron: Orthoptera, Coleoptera, Hemiptera, Araneae y Otros (Phasmida, Mantodea, Opilionida, Escorpionida, y Odonata) dividiéndose en tres gremios según la forma de alimentación: masticadores (Orthoptera y Coleoptera), chupadores (Hemiptera) y depredadores (Araneae y Otros). Los resultados mostraron que la composición de las comunidades de artrópodos en cada sitio de distancia con respecto al jal tiene diferencias

significativas entre sí. Además, se obtuvo una relación negativa y significativa entre la biomasa de artrópodos con respecto a la distancia al jal. Se detectó una relación negativa y significativa entre la concentración de MP (Cd, Cu, Fe, Pb y Zn) y la distancia al jal para el gremio de chupadores y los depredadores Araneae, es decir, conforme se alejan los sitios del jale, se reduce la concentración de los MP bioacumulados. Por otro lado, se observó que conforme se alejan los sitios del jale, se reduce la concentración de los MP bioacumulados en Araneae y Hemiptera, en contraste en Coleoptera y Orthoptera no se presenta dicha relación. La transferencia de los MP en la cadena trófica fue evidente en todos los gremios analizados. En particular, la biomagnificación de Pb, Cu, Cd a través de los productores primarios- consumidores primarios- consumidores secundarios estuvo bien documentada. Dentro de los herbívoros, el gremio de los chupadores de savia (Hemiptera) fue el que registró los menores valores de transferencia de MP hacia los consumidores secundarios. Este estudio permite documentar la biodisponibilidad de MP que se encuentran en el jale de Huautla y el viaje de éstos a través de las cadenas tróficas, exponiendo a los últimos niveles tróficos a concentraciones mayores de MP, modificando la composición de las comunidades y la dinámica de los ecosistemas.

Palabras clave: Bioacumulación, biomagnificación, biomasa, gremios de artrópodos, metales pesados, composición de la comunidad.

1. INTRODUCCIÓN

La minería es una actividad primaria que se encarga de extraer los minerales puros presentes en la Tierra (Monreal y Hernández, 2015), está se ha desarrollado desde hace más de 10,000 años en diversas culturas alrededor del mundo, estimulando de forma continua el crecimiento de diversos sectores sociales e industriales (Góngora, 2013).

A pesar de los aportes económicos que genera la industria minera, también origina una elevada cantidad de residuos peligrosos, principalmente durante el proceso de separación de los minerales de los materiales sin valor, generando desechos sólidos, líquidos y gaseosos (Espino-Ortega, 2014). En particular, los jales, también llamados presas, colas, relaves o tailings, son residuos de granulometría fina ($\leq 50 \mu\text{m}$), creados durante el proceso de recuperación de los metales, y generalmente se almacenan en los alrededores de las instalaciones de la mina formando depósitos superficiales. Esta fuente de contaminación tiene un elevado impacto ambiental ya que afecta desde el subsuelo hasta la atmósfera, incluyendo a la biota asociada, afectando desde las moléculas hasta los ecosistemas (Mussali-Galante et al., 2013 a).

Frecuentemente, los jales se encuentran expuestos a diferentes elementos del clima y a factores edáficos que intervienen en su redistribución en los suelos. Los jales representan un riesgo al ambiente, debido a su elevado contenido de elementos potencialmente tóxicos (EPT), como los metales pesados (MP), estos últimos se definen como aquellos elementos que presentan una densidad mayor a 5 g/cm^3 en su forma

elemental, además de ser tóxicos en concentraciones muy bajas (Gutiérrez-Ruiz et al., 2007).

México cuenta con una alta tradición minera, su territorio posee una gran riqueza y un alto potencial de recursos minerales, actualmente las actividades mineras se desarrollan en las 32 entidades federativas, posicionándose como uno de los principales productores de minerales metálicos a nivel mundial. En particular, el estado de Morelos ha desarrollado principalmente la actividad minera no metálica y la actividad metálica se ha restringido al municipio de Tlaquiltenango, el cual, se desarrolló durante varias décadas en el poblado de Huautla, donde se extrajo principalmente plata (Ag), plomo (Pb) y zinc (Zn) (Servicio Geológico Mexicano, 2018).

Las minas localizadas en Huautla, Morelos, durante su temporada activa generaron aproximadamente 780,000 toneladas de residuos que no tuvieron ningún tratamiento especial. Dichos jales se encuentran a la intemperie y al borde de una serie de arroyos que desembocan en el río Amacuzac. Estos residuos se caracterizan por presentar EPT, principalmente metales y metaloides solubles como plata (Ag), arsénico (As), cobre (Cu), cadmio (Cd), hierro (Fe), manganeso (Mn), plomo (Pb) y zinc (Zn) (Solís, 2015). En este sentido, se ha documentado que las plantas (productores primarios) establecidos en las cercanías de los jales, tienen la capacidad de bioacumular MP en las raíces y translocarlos a sus partes aéreas (Santoyo-Martínez et al., 2020), quedando disponibles para los herbívoros (consumidores primarios) y para los depredadores de estos últimos (consumidores secundarios), promoviendo un fenómeno de biomagnificación de MP a través de las redes tróficas.

Este trabajo contribuye a los estudios integrativos de las estructuras de las comunidades de artrópodos asociados a ambientes contaminados por MP, producto de la actividad minera en la localidad de Huautla, Morelos. Analizando a través de las redes tróficas las diferencias de concentración de MP a través de los gremios de la comunidad de artrópodos herbívoros y depredadores en un gradiente de contaminación por MP.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 La minería en México

En México se tiene registros de que, desde el Mioceno, los pobladores denominados Clovis hacían uso de minerales para fabricar puntas de roca. Posteriormente, desde el descubrimiento de América y hasta la época de la Colonia Española la minería se convirtió en la principal actividad económica. Con el descubrimiento de la técnica de “beneficio de patio” en 1554, la actividad minera tuvo un fuerte crecimiento, ya que requería de un menor tiempo, mano de obra y número de trabajadores (Monreal y Hernández, 2015). Dicha actividad minera continuó hasta el año 1810, donde se establecen compañías mineras grandes que impulsaron el crecimiento poblacional, sin embargo, en 1800 una serie de rumores sobre el precio del mercurio causó el cierre de muchas minas, y esto empeoró con el inicio de la Independencia de México (Monreal et al., 2015).

En 1910 el movimiento revolucionario y la crisis minera a nivel mundial frenaron la actividad minera. No fue hasta la segunda guerra mundial que se volvió a activar, sin

embargo, esta reactivación duro poco, y al término de la segunda guerra mundial, hubo un declive por la falta de inversión extranjera (Monreal et al., 2015).

En 1961 el gobierno mexicano promulgo la Ley de mexicanización de la minería, el sector minero se renovó en el país, implementando nuevas tecnologías, y descubriendo nuevos sitios con cuerpos mineralizados, que impulso la productividad. Actualmente, México es considerado a nivel mundial como el cuarto país con mayor importancia en exportación de minerales. Se estima que México es el principal productor de plata (Ag), bismuto (Bi), plomo (Pb), oro (Au) y cobre (Cu) a nivel mundial y en cuanto al presupuesto de exploración, México se encuentra en el primer lugar en Latinoamérica (Góngora, 2013).

2.2 La minería en Morelos

La principal actividad minera en Morelos es la de minerales no metálicos, debido a su abundancia en todo el territorio. Los municipios que registran producción de minerales no metálicos son: Axochiapan, Cuautla, Cuernavaca, Emiliano Zapata, Jiutepec, Tilzapotla, y Yautepec.

En contraste, los minerales metálicos no cuentan con una amplia tradición en Morelos, únicamente se encuentra documentado el distrito minero de Huautla, en el municipio de Tlaquiltenango. Este yacimiento comenzó a funcionar a finales del siglo XVII. Durante los 80's la empresa Rosario México S.A. de C.V. fue la última empresa en explotar el yacimiento. En 1993, el distrito minero de Huautla quedo inmerso dentro del

polígono que fue decretado como “Zona Sujeta a Conservaciones Ecológicas Sierra de Huautla” (ZSCESH), y posteriormente Reserva de la Biosfera Sierra de Huautla (REBIOSH). El yacimiento está inactivo desde 1988 (Dorado, 2001; Servicio Geológico Mexicano, 2018).

Actualmente, existen tres minas metálicas en Morelos que explotan hematita (Fe_2O_3), oro (Au) y plata (Ag), y cerca de 32 minas no metálicas de yeso, grava, caliza, tezontle, entre otros (Servicio Geológico Mexicano, 2018).

2.3 Efectos de la minería en el medio ambiente

La actividad minera tiene un impacto negativo en el ambiente, puesto que los métodos de extracción de los recursos minerales, así como su procesamiento generan una cantidad considerable de residuos llamados jales (Sánchez-Salinas y Ortiz-Hernández, 2014). En particular, el recurso hídrico es el más afectado durante la actividad minera, ya que durante el proceso de minado los sulfuros de las rocas son expuestos al aire y al estar en contacto con el agua se forma ácido sulfúrico, provocando drenaje ácido. Si no es controlado el drenaje ácido puede llegar a cuerpos de agua, modificando el pH de aguas subterráneas, ríos, y riachuelos, volviéndolos ácidos (Lillo, 2011).

El pH aceptable en un cuerpo de agua es de 7.0 a 9.0 (Baird, 2004) un valor menor a siete acidifica el medio acuático, provocando cambios en la morfología, el metabolismo y en la reproducción de vertebrados como peces (Broadgate et al., 2008).

De igual manera se pueden disolver metales tóxicos que se sedimentan en el fondo de los cuerpos de agua. Estos metales aun en bajas concentraciones son dañinos para la biota asociada (Lillo,2011). Otra manera en la que el recurso hídrico se ve afectado por la minería es cuando los minerales que se extraen se encuentran en un lugar cercano a una corriente de agua superficial o un lecho inundable (depósito o bordo). La contaminación del agua por este tipo de minería se puede extender por varios kilómetros. Por otro lado, la erosión del suelo causada por la minería cercana a cuerpos de agua provoca que los sedimentos que contiene contaminantes químicos se acumulan en regiones inundables. Al ocurrir la inundación los componentes químicos alteran el hábitat acuático e incluso altas concentraciones pueden provocar efectos tóxicos en flora y fauna (Lillo, 2011).

Por otro lado, la pequeña granulometría que presentan las partículas del jale ($\leq 50 \mu\text{m}$) son fácilmente dispersadas por el viento, lo que permite contaminar grandes extensiones de suelo, que a la vez afectan poblaciones humanas, actividades agrícolas o ecosistemas naturales aledaños, provocando la fragmentación del hábitat obligando a los organismos a desplazarse a otras zonas (Lillo, 2011).

2.4 Generalidades de los metales pesados

El término metales pesados (MP) se refiere a los elementos químicos que presentan un número atómico y masa mayor a 20, y con densidades de 5g/cm^3 (Navarro-Aviñón et al., 2007). Los MP son abundantes en la corteza terrestre, tóxicos para los seres humanos, y afectan los ciclos biogeoquímicos (Sánchez-Salinas et al., 2014).

Las concentraciones altas de MP en el ambiente se pueden dar por actividad volcánica, erosión de rocas, formación de suelo, o por actividades antropogénicas como son la actividad industrial, minera, agrícola y combustión de carburantes fósiles (García et al., 2002; Navarro-Aviñón et al., 2007). Se ha documentado que la exposición crónica a MP puede promover disminución en los niveles de diversidad genética, ruptura en la cadena sencilla de ADN, formación de especies reactivas de oxígeno, provocando daño oxidativo en el ADN de los individuos. Asimismo, los MP puede comprometer la capacidad de reparación enzimática del ADN (Torres et al. 2001; O' Rourke, 2002; Santoyo-Martínez, 2016).

2.4.1. Impacto ambiental por metales pesados

De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, el impacto ambiental causado por la contaminación por MP está en función de los siguientes parámetros: la capacidad de generar drenajes ácidos, estado de oxidación, contenido de materia orgánica, contenido de humedad y conductividad eléctrica, ya que éstos determinan la biodisponibilidad de los metales en suelo (Armienta et al., 2001). Una vez que los MP tienden a ser biodisponibles, pueden ser movilizados hacia los organismos en un proceso denominado bioacumulación, el cual es definido como la tasa de aumento de la concentración de un contaminante en un organismo vivo, de tal forma que llega a ser superior a la concentración de dicho contaminante presente en el ambiente (Angelova et al., 2004). Por lo anterior, la NOM-141-SEMARNAT-2003 estableció que, por las

características tóxicas de los jales, pueden presentar un riesgo para el equilibrio ecológico, el ambiente y la salud de la población.

Los MP derivados de la actividad minera consideran peligrosos para los organismos puesto que no pueden ser asimilados metabólicamente, bioacumulándose e incrementándose dentro del organismo así su potencial tóxico, provocando afectaciones en los niveles de organización biológica, desde las células hasta los ecosistemas (Mussali-Galante et al., 2013 b). A nivel suelo los MP derivados de la actividad minera afecta la diversidad y actividad de los organismos presentes, inhibiendo procesos ecológicos como la descomposición de la materia orgánica. Así mismo los suelos que quedan de la actividad minera, carecen de cubierta vegetal, debido a que contienen materiales residuales. Así mismo se ve afectada en la estructura edáfica, la cantidad de nutrientes fundamentales presentes en el suelo, así como baja profundidad de éste. Todos estos factores afectan directamente el crecimiento de las plantas cercanas a la zona donde hubo actividad minera. A nivel suelo los MP derivados de la actividad minera afecta la diversidad y actividad de los organismos presentes, inhibiendo procesos ecológicos como la descomposición de la materia orgánica (Puga et al., 2006).

2.4.2 Bioacumulación de metales pesados en plantas

Las plantas poseen mecanismos para bioacumular algunos MP esenciales (Cu, Fe, Mn, y Zn) para llevar a cabo procesos fisiológicos de los organismos. Sin embargo, también

pueden ingresar MP tóxicos a las plantas como cadmio (Cd), mercurio (Hg) y plomo (Pb) (Mann et al., 2011).

La biodisponibilidad de los metales pesados, así como sus altas concentraciones en el sustrato es la condicionante para iniciar la absorción de éstos por las plantas (Cabeza et al., 2004; Santoyo-Martínez, 2016). En plantas la absorción de los MP inicia por la raíz (Navarro-Aviñón et al., 2007), por medio de tres vías: 1) difusión en el medio, mediante un flujo masivo o intercambio catiónico (Santoyo-Martínez, 2016). 2) Flujo de masas, el cual se da por medio de un flujo de nutrientes disueltos en el sustrato, y 3) Intercepción, en el cual los iones son absorbidos electrostáticamente por la raíz (Marschener, 2012).

La presencia de microorganismos en el suelo, influyen en la biodisponibilidad de los MP, debido a que son capaces de minimizar la toxicidad y transformar la concentración de los metales pesados presentes en el suelo (Beltrán-Pineda et al., 2016).

Los MP se unen a la superficie celular a grupos hidroxilo, fosforilo o carboxilo, los cuales absorben los iones metálicos y los retienen. Posteriormente, se unen a la superficie celular y son bioacumulados. Este proceso inicia por el ingreso de los MP por medio de un transporte de membrana con gasto de energía. Los MP entran al citoplasma, son secuestrados por fitoquelatinas, y son retenidas en el citoplasma (Beltrán-Pineda et al., 2016). Una vez que los MP ingresan a la raíz los iones son transportados por ósmosis o por la fuerza de succión a través del xilema hasta los órganos aéreos (Navarro-Aviñón et al., 2007).

2.4.3 Bioacumulación de metales pesados en gremios de artrópodos

Los MP pueden ingresar a los organismos vivos de dos maneras: a través de los factores abióticos (agua, sedimentos y suelo), o por ingesta de plantas o presas (Ali et al., 2019). Se ha documentado que los MP que son bioacumulados en insectos herbívoros provocan efectos adversos como inhibición del crecimiento, desarrollo anormal y reducción de la actividad reproductora (Azam et al., 2015), lo que promueve una disminución de la abundancia de los herbívoros (Rajoo et al., 2017).

La bioacumulación de MP en los organismos herbívoros está determinada por el tiempo de exposición a los contaminantes (Mann et al., 2011). Por otro lado, se ha documentado que la cantidad de MP que se bioacumulan en insectos herbívoros depende de la especie, del tipo de alimentación, y si estos se encuentran en contacto directo con los MP. Un ejemplo es el caso de Isopoda, estos organismos viven y se alimentan de la hojarasca contaminada con metales, por lo que bioacumulan mayor cantidad de MP, en comparación con coleptera, los cuales están en menor contacto con los MP (Azam et al., 2015; Gall et al., 2015).

El término gremio se define como un grupo de especies que explotan un recurso de forma similar (Koch et al., 2019). Los gremios se pueden agrupar de acuerdo al papel ecológicos que desempeñan: herbívoros, detritívoros, polinizadores y presas (Hernández-Gómez, 2014). En este sentido los artrópodos pueden ser divididos por su forma de alimentación en gremios de chupadores, masticadores, y depredadores según el aparato bucal que presenten.

En el gremio de masticadores los órdenes Coleoptera, Orthoptera y Lepidoptera, se caracterizan por registrar a la mayoría de sus especies como fitófagas (Southwood, 1996). La adaptación de estos órdenes en la alimentación de plantas verdes es notable, debido a que las plantas son la fuente de alimentación más accesible para las comunidades terrestres. Se ha documentado que, en ambientes perturbados, como aquellos contaminados por MP la diversidad de las comunidades de artrópodos puede verse disminuida (Farfán-Beltrán, 2016; Hernández-Gómez, 2014).

En particular, especies de la familia Carabidae (Coleoptera) son utilizados en estudios de bioacumulación de MP, también como bioindicadores de actividades antropocéntricas. Por ejemplo, en el estudio hecho por Butovsky (2011) en la zona cercana a la planta metalúrgica de Krosogorski, Rusia, documentó que especies de la familia Carabidae bioacumularon mayor concentración de Fe (93 ppm), y en menor concentración Cd (1 ppm). En general, estos coleópteros son los artrópodos que menor acumulación de MP presentan, con respecto a otros órdenes de insectos.

Por otro lado, en un estudio realizado con *Tetrix tenuicornis* (Orthoptera) en una mina de Zn en Polonia, se observó que los organismos expuestos a sitios contaminados por MP presentaron concentraciones de 1.5 mg/kg, de Cu, 4.3 mg/kg de Zn y 4.32 mg/kg de Pb mientras que el Cd se encontró en mayor concentración con 41.73 mg/kg (Warchalowska-Sliwa et al., 2005).

Por su parte, las arañas son artrópodos carnívoros, aunque algunas de ellas se alimentan de néctar (Melic et al., 2015). Son utilizadas como bioindicadores de sitios contaminados por MP (González-Brito, 2015), ya que estos organismos pueden absorber

MP del tejido blando de sus presas. La cantidad de bioacumulación de MP en las arañas varía según la especie; y existen dos tipos de mecanismos regulatorios de ingreso de los MP a la célula: 1) la resistencia de la membrana celular, o 2) la tolerancia, a partir del fenotipo, la morfología o la plasticidad. Si cualquiera de estos no funciona adecuadamente provocarán, efectos en la salud del organismo a nivel celular (Migula et al., 2013). Los resultados obtenidos por el autor antes citado, en la especie *Araneus diadematus* (Araneidae) colectadas en una planta metalúrgica en Olkusz y Welnowiec, Polonia revela concentraciones de Cd 256 mg/g, Cu 152 mg/g, Pb 290 mg/g y Zn 309 mg/g. Mientras que en las especies colectadas en el sitio de referencia Pilica (sitio rural libre de contaminación), la concentración de MP fue mucho menor, con excepción del Zn (613 mg/g) (Migula et al., 2013).

Por su parte, el orden Odonata es utilizado como bioindicador del estado de hábitats acuáticos y terrestres (Ramírez-Ardila, 2016). Son insectos hemimetábolos, es decir que poseen una fase larvaria y una adulta (Torrealba-Burial, 2015). Las larvas de este orden crecen en el medio acuático y pueden ser útiles para evaluar la concentración de MP en el agua.

2.5 Biomagnificación de metales pesados en cadenas tróficas

La cadena trófica es definida como una serie de especies existentes en todo ecosistema, a través del cual se transmite la energía alimenticia (un organismo se alimenta de otro) (Odum et al., 1972). Toda cadena trófica inicia con los organismos vegetales

(productores), seguido de los herbívoros (consumidores primarios), y el último eslabón de la cadena trófica son los carnívoros (consumidores secundarios) (Fraume, 2006).

El proceso de biomagnificación se define como la transferencia de los MP a través de la cadena trófica; incrementando la concentración al pasar a un nivel trófico superior (Molina et al., 2012; Puelles, 2018). Los MP presentes en el suelo ingresan al primer nivel trófico por absorción, posteriormente se transfieren vía ingesta a los consumidores primarios, y secundarios (Del Toro et al., 2010). La transferencia de los MP de presa a depredador va a depender de la capacidad del depredador de minimizar la asimilación de MP contenidos en la presa, así como de la capacidad fisiológica de contrarrestar los efectos dañinos que los MP puedan provocar en el organismo (Mann et al., 2011). Tal como lo observado en el estudio hecho por Dar et al., (2017) donde observo que no hubo biomagnificación de Cd de Afidos (herbívoros) a Coleoptera (depredador). Lo anterior debido a los mecanismos fisiológicos de detoxificación eficiente de Coleoptera.

Así mismo se ha documentado que altas concentraciones de metales como cobre (Cu), hierro (Fe) y Zinc (Zn) se debe a que estos son metales esenciales, los cuales ya están presente en el organismo (Hermoso de Mendoza et al., 2011).

2.6. Influencia de la contaminación de metales pesados sobre la biomasa de los organismos

La biomasa es el peso total de la materia viva en una superficie o área determinada, expresadas en unidades de peso y superficie (Barla, 2014). Los recursos bióticos y

abióticos en conjunto condicionan la cantidad de biomasa en los organismos que se encuentran en un área determinada. Se sabe que la cantidad de materia orgánica presente en el suelo es el principal condicionante de la biomasa de los diferentes grupos de consumidores (primarios y secundarios) de la cadena trófica. Del mismo modo la riqueza de especies vegetales en el área, así como la calidad nutricional (la cantidad de P y N), influye sobre la biomasa de artrópodos (Jochum et al., 2017).

La variación espacial y temporal en la disponibilidad y calidad de recursos alimenticios están directamente relacionados con los niveles de abundancia y biomasa de la fauna que los utiliza (Schowalter, 2006). Por otro lado, la perturbación del hábitat por actividades antropogénicas puede tener un efecto negativo sobre la cantidad de biomasa de artrópodos (Tovar-Sánchez, 2009). Se ha documentado que en ambientes contaminados por MP, estos están relacionados con la reducción del peso corporal y la tasa de crecimiento en los organismos expuestos (Parra-Ochoa, 2014). Tal como lo documentan Soliman et al (2016) donde se observa que el incremento en las concentraciones de metales pesados como Cd, Pb, Cu, y Zn provoca la disminución de la biomasa de saltamontes expuestos a la zona industrial en Al-Tebbin al sur de El Cairo, Egipto. Lo anteriores pueden ser consecuencia de baja calidad nutricional de la vegetación, causada por exposición a altas concentraciones de MP (Mourato et al., 2015).

3. ANTECEDENTES

Las actividades antropogénicas, como la actividad minera generan grandes cantidades de residuos los cuales contienen EPT como los MP. Estos ejercen un efecto negativo sobre los ecosistemas, causando el desequilibrio de este y afectando a todos los niveles de organización (González-Brito, 2015; Osein et al., 2015).

Múltiples trabajos han documentado la existencia de MP en los jales de Huautla, como el hecho por Hernández (2009) donde encontró altas concentraciones Pb y Cd en los jales de Huautla, en contraste con las concentraciones de Cr y Ni las cuales están dentro de las concentraciones máximas permisibles. De igual manera Hernández (2015) reporto la presencia de Cu, Pb y Zn en los jales de Huautla, y estableció un gradiente de contaminación de Cu y Pb, el cual demostró que las concentraciones van disminuyendo al aumentar la distancia al jal. Solís (2015) documenta que las características fisicoquímicas del suelo, como el pH, humedad, tipo de suelo y conductividad eléctrica condicionan la dispersión de los MP. El autor antes citado menciona que en el jale principal del distrito minero de Huautla, Morelos se presenta un pH neutro entre 7.0-7.8 lo que indica que el jale se encuentra estable. González-Brito (2015) encontró que el Zn es el único de los metales evaluados que no disminuye su concentración con la lejanía del jale. También documento que algunas especies de arañas podrían fungir como especies centinelas de contaminación ambiental. Se ha documentado que los MP que contienen los jales y que posteriormente fueron depositados en los suelos de Huautla son incorporados en los productores primarios. Tal como lo documenta Santoyo-Martínez (2016) en el productor

primario dominante en el jal de Huautla, y que corresponde a *Vachellia farnesiana* (antes *Acacia farnesiana*), especie que bioacumula Cu, Zn y Pb, registrando el primer metal un valor de enriquecimiento de 3.2 g/kg. De igual forma se ha documentado que la incorporación de MP en los productores primarios, es el acceso de éstos a la cadena trófica. Lo anterior fue observado por Rebollo-Salinas (2019) en su estudio sobre biomagnificación de MP a de una cadena trófica. La autora registró que el depredador (araña) presenta mayor acumulación de MP. Asimismo, en los herbívoros (chapulines) se encontró una mayor cantidad de MP en las excretas en comparación con el encontrado en el exoesqueleto. Del mismo modo se observó que los metales, cromo (Cr) y cadmio (Cd) no tuvieron un efecto de biomagnificación en la cadena trófica. Así mismo se han hecho estudios en la vegetación cercana a los ales de Huautla, como el realizado por Santoyo-Martínez et al (2020) en el que se medió la capacidad biorremediadora de *Vachellia campechiana*. Se observó que las raíces bioacumularon mayor cantidad de cromo (Cr), cobre (Cu) y plomo (Pb) en comparación con las hojas. Por lo anterior se concluyó que *Vachellia campechiana* puede ser usada para biorremediar suelos contaminados con estos metales (Santoyo-Martínez et al., 2020). De igual manera se ha documentado que *Prosopis leavigata* puede ser utilizada para biorremediar suelos contaminados por cobre (Cu), hierro (Fe), plomo (Pb) y zinc (Zn). (Muro-González et al., 2020).

4. JUSTIFICACIÓN

La industria minera es una de las actividades económicas de mayor tradición en México y de gran aporte económico. Sin embargo, tras varios siglos de actividad minera, el procesamiento de los MP ha generado una gran cantidad de residuos (jales) que ejercen un efecto negativo sobre el ecosistema; debido principalmente, al alto contenido de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT's), como los MP. Huautla, Morelos es una entidad tradicionalmente minera donde como consecuencia de esta actividad se generaron 780 mil toneladas de desechos con altos contenidos de MP solubles.

Los MP en plantas interfirieren con el proceso de absorción y transporte de nutrientes, inhiben la producción de clorofila, así como desencadenan enfermedades y mutaciones. Esta bioacumulación de MP puede transferirse a través de la cadena trófica desde los consumidores primarios, hasta los consumidores secundarios (biomagnificación). El presente estudio pretende evaluar la bioacumulación y biomagnificación de MP a través de la cadena trófica, desde las plantas (productores primarios), hasta consumidores secundarios (artrópodos) siguiendo un gradiente de contaminación en los jales mineros de Huautla, Morelos, con la finalidad de medir el impacto negativo de los jales en las comunidades de plantas y artrópodos, así como en el ecosistema.

5. HIPÓTESIS

Si los metales pesados contenidos en los jales de Huautla, Morelos están biodisponibles y se dispersan por efecto del aire y agua, entonces, se espera encontrar una relación negativa entre la lejanía al jale y las concentraciones de metales pesados solubles en suelo, en productores primarios (plantas), en consumidores primarios (herbívoros) y en consumidores secundarios (depredadores).

6. OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar los niveles de bioacumulación y biomagnificación de metales pesados en una cadena trófica a través de un gradiente de contaminación en los jales mineros de Huautla, Morelos.

Objetivos particulares

- I. Caracterizar los niveles de bioacumulación de metales pesados en productores primarios, consumidores primarios y secundarios a través de un gradiente de contaminación por jales mineros.
- II. Determinar la biomagnificación de metales pesados a través de la cadena trófica: productores primarios – consumidores primarios – consumidores secundarios.

- III. Determinar el efecto del gradiente de contaminación por MP sobre la biomasa de gremios de artrópodos.

7. METODOLOGÍA

7.1 Sitio de estudio

El poblado de Huautla, Morelos se ubica en el Municipio de Tlaquiltenango ($18^{\circ}28'$ latitud N y $99^{\circ}20'$ longitud O), con una extensión territorial de 229 km y una altitud entre 900 y 2,260 m (Hernández-Gómez, 2014), dentro de la Cuenca del Balsas. Huautla se ubica en la Reserva de la Biosfera Sierra de Huautla (REBIOSH), la cual colinda al oeste y suroeste con el estado de Guerrero, y al sur y sureste con el estado de Puebla. Se ubica entre el eje Neovolcánico Transmexicano y la Sierra Madre del Sur. Huautla presenta un clima subhúmedo ($Aw0''(w)(i')g$), con dos estacionalidades muy contrastantes: época de lluvia (junio-septiembre) donde la vegetación presenta follaje parcialmente verde, y en contraste durante la temporada de seca la vegetación pierde en su totalidad el follaje (Dorado et al., 2002; Velasco et al., 2004).

Huautla cuenta con seis minas inactivas desde 1993, las cuales se encuentran dentro de la Reserva de la Biosfera Sierra de Huautla. La constante actividad minera de la zona dejó 780 mil toneladas de residuos mineros dispuestos a la intemperie, y cercanos a arroyos de temporal, los cuales facilitan la dispersión de los residuos mineros (Hernández-Gómez 2014). Se han reportado dos jales en el poblado de Huautla, el principal y de mayor longitud se encuentra a 500 m del poblado ($8^{\circ} 26' 36.37''$ N y 99°

01' 26.71" W), y el segundo se encuentra a 1000 m del pueblo (18° 26' 22.62" N and 99° 01' 51.71" W) (Santoyo-Martínez et al., 2020).

La mina principal de Huautla se localiza al sur del Estado, con una superficie aproximada de 410 km², con presencia de As (Arsénico), Cd (Cadmio), Cu (Cobre), Ag (Plata), Au (oro), Mo (Molibdeno), Pb (Plomo) y Zn (Zinc) y (Figura 1 y 2). Litológicamente, las andesitas e intrusivos afectados por silicificación y piritización se conjugan para que esta área pueda contener un yacimiento de sulfuros metálicos, o localizar una posible prolongación de las vetas que se encuentran en las minas localizadas en el borde noroeste de esta área (Servicio Geológico Mexicano, 2008).

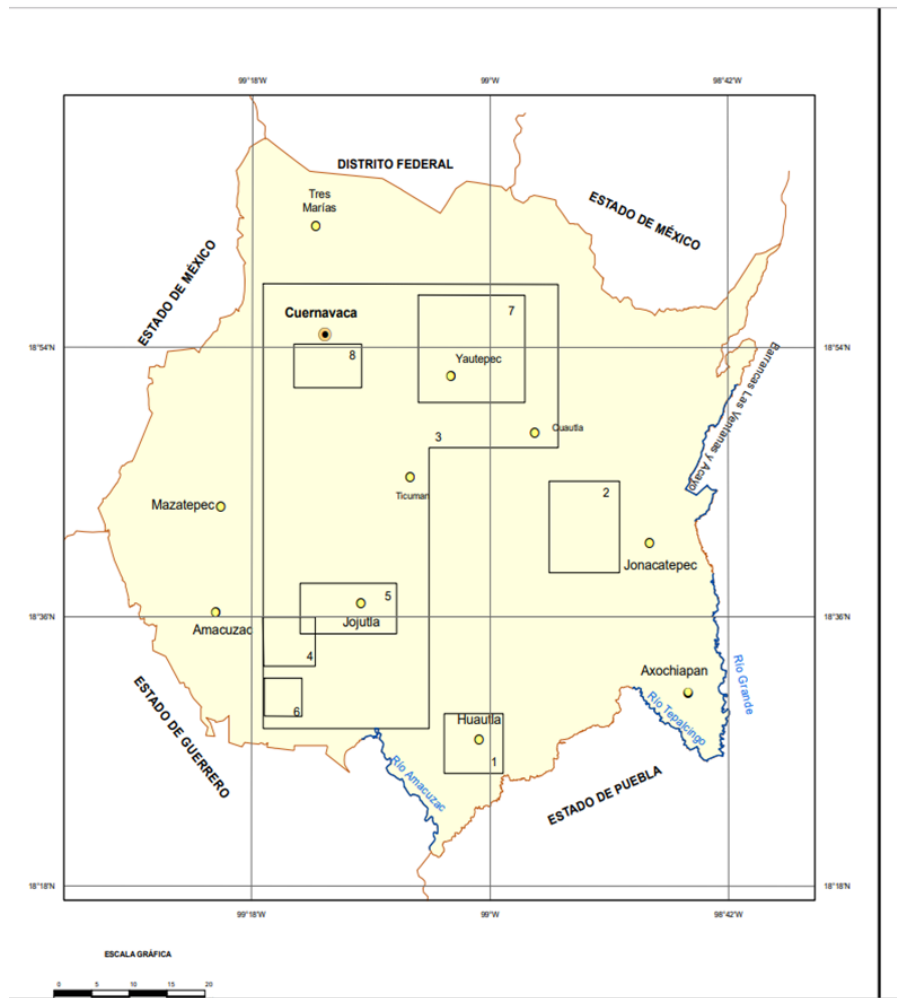


Figura 1. Regiones, distritos y zonas mineras. 1-Distrito minero de Huautla. 2-Zona minera de Tlayca. 3-Región minera Cuautla-Tilzapotla. 4-Zona Tehuixtla-Tequesquitengo. 5-Zona minera Tilzapotla-Jojutla. 6-Zona minera Tilzapotla. 7-Zona minera de Yautepec. 8-Zona minera de Cuernavaca. Fuente: Servicio Geológico Mexicano, 2008.

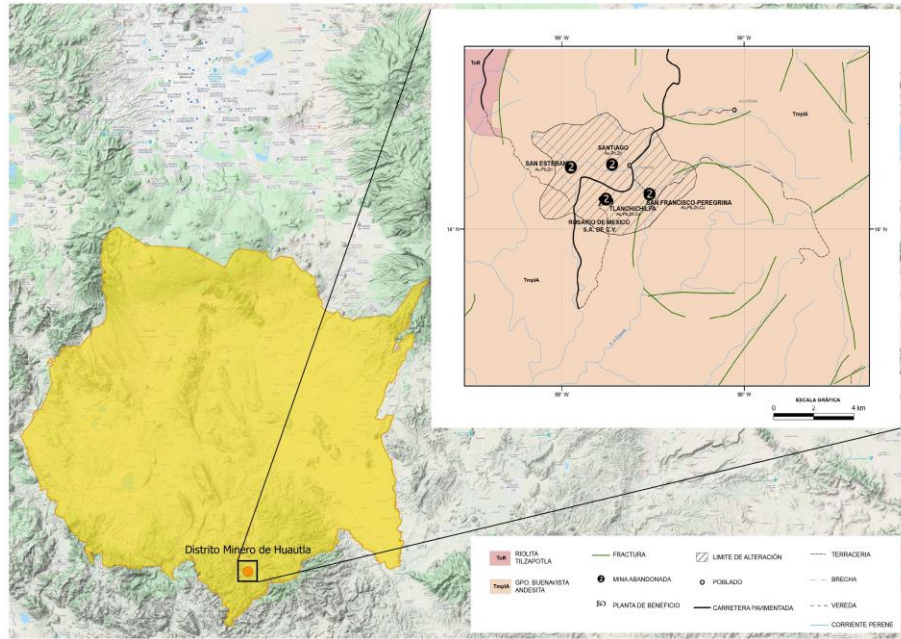


Figura 2. Distrito minero de Huautla. 2 minas abandonadas. Fuente: Servicio Geológico Mexicano, 2008.

7.2 Criterios generales de inclusión de los sitios de muestreo de artrópodos

Para la selección de sitios a través de un gradiente de contaminación por MP provenientes del jale principal de Huautla, Morelos (debido a que tiene un mayor tamaño), se tomó en cuenta la dirección de los vientos predominantes en el lugar que van en dirección Oeste-Este. Se eligieron los meses de julio y agosto para realizar las colectas de artrópodos, debido a que se ha documentado que son los meses con una mayor abundancia relativa de

artrópodos en estadios juveniles y adultos. Para el sitio de colecta se eligieron lugares donde no hubiera antecedentes de otra actividad minera cercana, ni residuos cercanos.

7.3 Colecta de artrópodos y arañas

Para establecer la comunidad de artrópodos asociados a la vegetación se trazó un transecto de 1,500 metros en dirección de Oeste-Este (Figura 3). Posteriormente se determinó un gradiente de contaminación por MP, en el que se delimitaron siete sitios de colecta separados entre sí por 300 metros, iniciando en el jale y hasta los 1,500 m en dirección Este (0, 150, 300, 600, 900, 1,200, y 1,500 m).

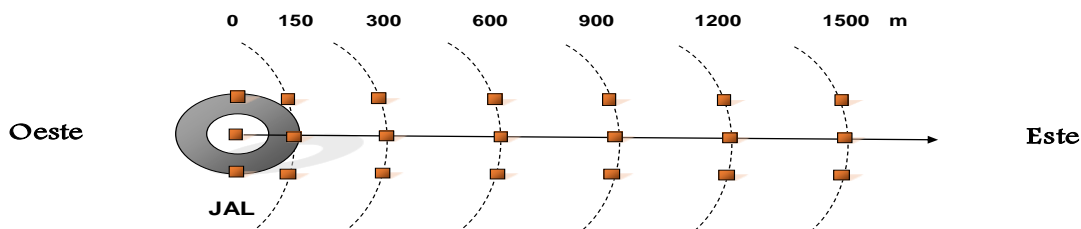


Figura 3. Gradiente de contaminación de MP, de 0 a 1,500 m de distancia al jale en dirección Oeste-Este. El círculo gris representa el jale, y cada punto representa los sitios de colecta de artrópodos asociados al jale.

7.3.1 Muestreo de artrópodos

En cada sitio se delimitaron tres cuadros de 5×5 m, separados entre sí cada 50 m (en total 21 cuadros) (Figura 3). Se realizaron los muestreos de artrópodos en los meses de julio y agosto (estación de lluvias) con la técnica de golpeo de vegetación (durante 20

minutos), haciendo uso de redes de golpeo entomológicas. Las muestras colectadas fueron depositadas en bolsas de plástico y etiquetadas. De igual manera se realizó una búsqueda exhaustiva del orden Araneae, depositando a los ejemplares en recipientes de plástico y etiquetadas previamente.

7.3.2 Separación del grupo artrópoda

Los artrópodos colectados, se llevaron al Centro de Investigación en Biodiversidad y Conservación (CIByC), perteneciente a la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), para retirar la vegetación de los organismos. Este proceso se llevó a cabo sobre charolas, para evitar la pérdida del material.

Posteriormente, los artrópodos se colocaron en recipientes de plástico de 500 mL que contenían alcohol al 70%. Los frascos fueron etiquetados con la fecha y lugar de colecta. Para separar grupos taxonómicos (orden) se utilizó el microscopio estereoscópico (Marca ZEISS modelo Stemi DV4). Para identificar organismos inmaduros y adultos se utilizaron claves taxonómicas (Chu, 1949).

7.3.3 Separación del orden Araneae

Para el orden Araneae se utilizó también el microscopio estereoscópico (ZEISS modelo Stemi DV4) y se emplearon claves taxonómicas limitadas para determinar a las familias y

géneros con el apoyo del M.C. Miguel Menéndez-Acuña (Ubick et al., 2005; Platnick, 2014). Los organismos identificados se almacenaron de manera individual, en viales de 5 mL con alcohol al 70%.

7.3.4 Procesamiento de muestras de artrópodos

Las muestras de artrópodos fueron colocadas en bolsas de papel estraza previamente etiquetada y posteriormente fueron colocadas en un horno de secado a 60°C, subsecuentemente, las muestras fueron molidas con ayuda de un mortero y pesadas con una balanza analítica hasta tener un tamaño de muestra de 0.25g.

7.3.5 Digestión ácida

Para la cuantificación de MP, previamente se realizó una digestión ácida utilizando ácido nítrico HNO_3 puro, por medio de un Sistema de Reacción de Aceleración en Microondas utilizando el método 3051H, siguiendo la siguiente metodología. Los 0.25g de cada muestra fueron colocados en los tubos pertenecientes al equipo, posteriormente se le agregó 10 mL de HNO_3 , donde se realizó un ciclo por cada muestra (en total se realizaron tres ciclos), donde cada muestra paso por cuatro etapas: dos de calentamiento y dos de

enfriamiento, posteriormente pasados 30 min de enfriamiento se filtraron y aforaron las muestras con 50 mL con agua destilada y se colocaron en recipientes de plástico etiquetados para ser refrigeradas a 4°C.

7.3.6 Espectrofotometría de Absorción Atómica

El fundamento de esta técnica es generar átomos en estado basal, y medir la cantidad de energía absorbida por éstos, lo cual es directamente proporcional a la concentración de metales en la muestra (Willard et al., 1991).

La cuantificación de MP se realizó por medio del espectrofotómetro de absorción atómica (GBC SCIENTIFIC EQUIPMENT) en el Laboratorio de Investigaciones Ambientales del Centro de Investigación en Biotecnología (CEIB) de la UAEM. Antes de la lectura del metal, se utilizó una solución (específica para cada metal) de referencia para calibrar el equipo. Posteriormente, la muestra problema fue absorbida por una manguera, hasta la zona de premezcla (lugar donde se une la muestra, el gas combustible y el oxidante). Posteriormente, la muestra fue convertida en aerosol, por un nebulizador. Enseguida inició el proceso de atomización en llama (la muestra se descompone en átomos).

Cabe destacar que el límite de detección (mg/Kg) que tiene el equipo de Absorción Atómica para cada metal es: cadmio (0.0004), cobre (0.001), cromo (0.003), hierro (0.005), plomo (0.01), y zinc (0.0005).

7.4 Análisis de datos

Para calcular la biomasa (peso seco en mg) de los gremios de artrópodos, se utilizó la ecuación $W = (e^{-10.644}) (L^{2.587})$. Siendo W la biomasa en mg, y L la longitud del cuerpo.

Para determinar la relación entre la lejanía al jale y la cantidad de biomasa de los artrópodos de los diferentes niveles tróficos (productor primario, consumidor primario, consumidor secundario) se hicieron análisis de regresión lineal.

Para determinar la relación entre la lejanía al jal y la concentración de MP bioacumulados en los diferentes gremios de artrópodos también se hicieron análisis de regresión lineal.

Se realizaron análisis de varianza de una vía (Anova) para determinar el efecto del nivel trófico sobre la concentración de cada MP bioacumulado. Posteriormente, se utilizaron pruebas a posteriori (Tukey) para determinar diferencias significativas entre pares de promedios (entre niveles tróficos). Los análisis estadísticos se llevaron a cabo usando el programa STATISTICA 8.0.

Para conocer las diferencias en la composición de artrópodos a través de un gradiente de distancia en relación con el jale de Huautla, se utilizaron análisis de escalamiento multidimensional no métrico (NMDS por sus siglas en inglés, non-metric multidimensional scaling). Un análisis se basó en la presencia de los gremios de artrópodos (utilizando como medida de representatividad de cada gremio su biomasa) y otro análisis en la bioacumulación de MP en cada gremio de artrópodo. NMDS fue utilizado para generar una matriz de disimilitud entre el gradiente de distancia (siete zonas de distancia) usando el coeficiente de disimilitud de Bray-Curtis (Faith et al., 1987).

Posteriormente, un análisis de similitud (ANOSIM) fue usado para evaluar las diferencias entre la composición de la comunidad de artrópodos en las siete zonas de distancia. Un análisis de Bootstrap, ANOSIM fue empleado para probar las diferencias entre grupos usando 10,000 reasignaciones aleatorias y determinando si la matriz de disimilitud generada es significativamente diferente del azar (Warwick et al., 1990).

Para comprender la relación entre la composición de la comunidad de artrópodos con base en la biomasa y la composición de artrópodos con base en la bioacumulación de metales pesados en cada zona de distancia, se correlacionaron los resultados de la comunidad de los dos ejes del NMDS para la biomasa. Los análisis estadísticos se llevaron a cabo usando el programa Past 4.01.

8. RESULTADOS

8.1 Composición de artrópodos

En total, la comunidad de artrópodos asociados a los sitios contaminados por los jales de Huautla, están compuestos por nueve órdenes: Orthoptera, Coleoptera, Hemiptera, Araneae, Phasmida, Odonatos, Opilionida, Escorpionida y Mantodea; los cuales se agruparon en tres gremios por tipo de alimentación. Masticadores (Orthoptera y

Coleoptera), Chupadores (Hemiptera), depredadores (Araneae) y otros depredadores (Phasmida, Odonatos, Mantodea, Opilionida y Escorpionida).

Todos los gremios de artrópodos colectados estuvieron presentes en todos los sitios a través del gradiente de contaminación, desde los 0 m, hasta los 1,500 m (Tabla 1).

Tabla 1. Presencia de gremios de artrópodos colectados sobre un gradiente de contaminación de 0 a 1,500 m a partir del jal de Huautla, Morelos.

Distancia (m)	Gremios				
	Masticadores		Chupador	Depredador	
	Orthoptera	Coleopteros	Hemiptera	Araneae	*Otros
0	✓	✓	✓	✓	✓
150	✓	✓	✓	✓	✓
300	✓	✓	✓	✓	✓
600	✓	✓	✓	✓	✓
900	✓	✓	✓	✓	✓
1200	✓	✓	✓	✓	✓
1500	✓	✓	✓	✓	✓

Otros depredadores: Phasmida, Opilionida, Escorpionida, Mantodea, y Odonata

8.1.1 Biomasa

Los resultados obtenidos con el análisis de similaridad (ANOSIM) y de escalamiento multidimensional no métrico (NMDS) sobre la composición de la comunidad de artrópodos en el término de biomasa mostraron diferencias significativas entre los siete sitios de estudio (ANOSIM) $R = 0.7022$, $P < 0.0001$, Figura 4a). Esto muestra que la composición de las comunidades de artrópodos en cada sitio de distancia con respecto al jal tiene diferencias significativas entre sí.

8.1.2 Bioacumulación de metales pesados

Los resultados obtenidos en el análisis de similaridad (ANOSIM) y de escalamiento multidimensional no métrico (NMDS) para la bioacumulación de MP en la comunidad de artrópodos, mostraron que la composición de MP bioacumulados por los artrópodos en cada sitio de estudio (distancia al jal) son significativamente diferentes entre sí (ANOSIM $R = 0.9058$, $P < 0.0001$, Figura 4b), lo que demuestra que la composición de MP biodisponibles en cada sitio de estudio es significativamente diferente entre sí.

La correlación entre los resultados del análisis NMDS en composición de la comunidad de gremios de artrópodos y los ejes NMDS en composición de MP bioacumulados revelaron correlaciones positivas y significativas (eje NMDS eje 1 MP / NMDS eje 1 biomasa: $r = 0.664$, $P = 0.001$; NMDS eje 2 MP / NMDS eje 1 biomasa: $r = 0.534$, $P = 0.01$, NMDS eje 2 MP / NMDS eje 2 biomasa: $r = 0.550$, $P = 0.01$).

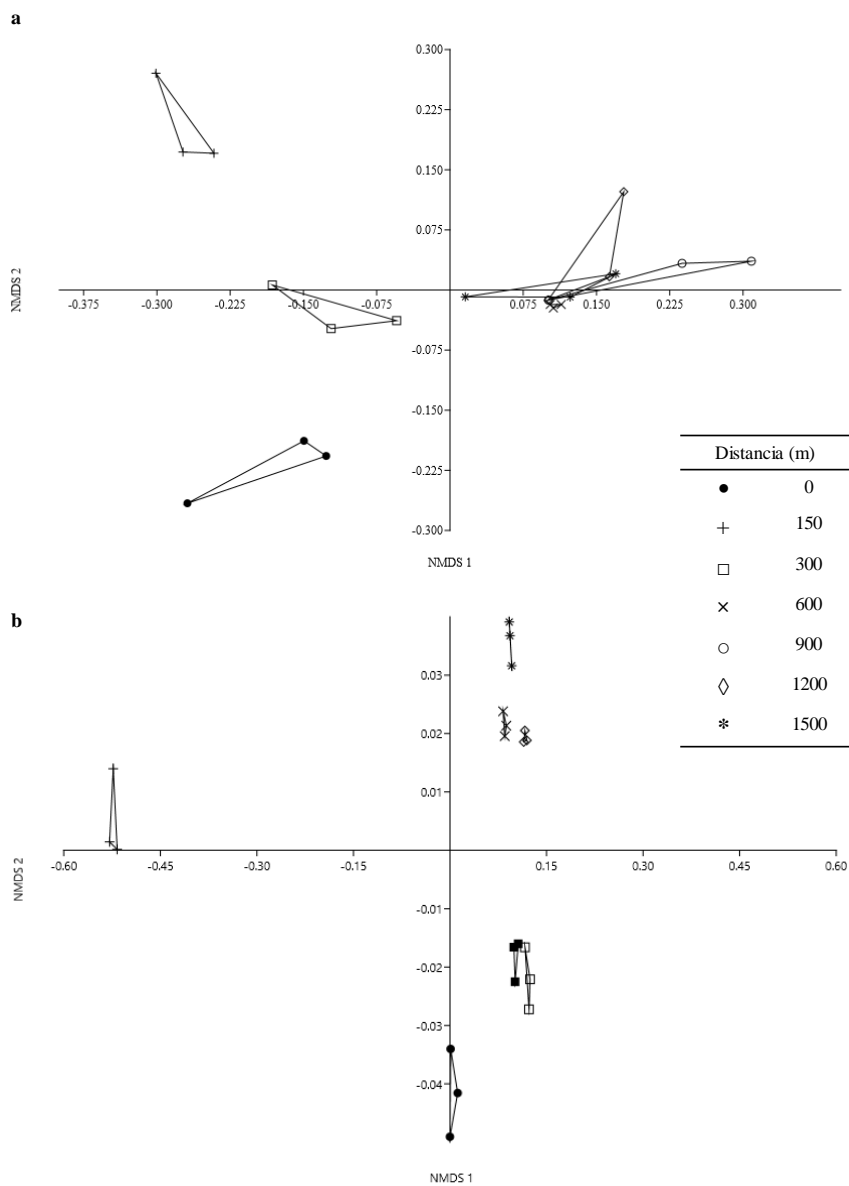


Figura 4. Diferencias en la composición de metales pesados **(a)** y en la composición de la comunidad de artrópodos **(b)** entre siete zonas con distancia al jale, utilizando la escala multidimensional no métrica (NMDS). Cada punto es una representación bidimensional (eje 1 y eje 2) de la composición de especies de artrópodos (tres puntos por zona de distancia). Las distancias entre los puntos reflejan una matriz de disimilitud creada usando el coeficiente de disimilitud de Bray-Curtis (Faith et al., 1987). Los puntos que están muy juntos tienen comunidades de artrópodos que tienen una composición más similar en

comparación con los puntos que están muy separados. Los datos para biomasa (Figura 4a: valores de estrés: 0.039. Inestabilidad final, 0.0003) y para la bioacumulación de metales pesados (Figura 4b: valores de estrés: 0.057. Inestabilidad final, 0.018) se utilizaron en este análisis.

8.2. Biomasa de los gremios de artrópodos

En el 57% de los sitios de estudio (desde los 0 hasta 600 m) se detectó un efecto significativo del gremio de artrópodos sobre los niveles de biomasa (Tabla 2). En general la biomasa no difiere significativamente entre gremios de herbívoros (masticadores y chupadores) exceptuando el sitio de 600 m, donde el gremio Hemiptera obtuvo mayor biomasa. Por su parte, la biomasa del gremio de depredadores (arañas y otros) no mostró un patrón constante. En contraste, a partir de los 900 m la biomasa no difirió significativamente entre gremios de artrópodos (Tabla 2).

Tabla 2 Promedio (\pm error estándar) de la biomasa gremios de artrópodos a través del gradiente, y análisis de una vía (ANOVA) para detectar el efecto del gradiente sobre la biomasa de los gremios de artrópodos.

Distancia m	Gremios						ANOVA <i>F</i>
	Depredadores		Masticadores		Chupadores		
	Otros	Araneae	Coleoptera	Orthoptera	Hemiptera		
0	0.0017 \pm 0.00017 a	0.01334 \pm 0.00090 b	0.01165 \pm 0.00475 b	0.01636 \pm 0.00003 b	0.01634 \pm 0.00000 b	7.776**	
150	0.00903 \pm 0.00020 ab	0.00309 \pm 0.00028 a	0.01183 \pm 0.000457 ab	0.01635 \pm 0.00001 b	0.01640 \pm 0.00003 b	7.4031**	
300	0.00779 \pm 0.00042 a	0.01290 \pm 0.00164 b	0.01636 \pm 0.00002 bc	0.01636 \pm 0.00002 bc	0.01670 \pm 0.00002 c	25.342***	
600	0.01684 \pm 0.00024 ab	0.01638 \pm 0.00003 a	0.01633 \pm 0.00001 a	0.01089 \pm 0.00544 a	0.01703 \pm 0.00014 b	6.92**	
900	0.01633 \pm 0.00797 a	0.01645 \pm 0.00002 a	0.01636 \pm 0.00000 a	0.01639 \pm 0.00001 a	0.01638 \pm 0.00002 a	0.001 n.s.	
1200	0.02003 \pm 0.00207 a	0.01518 \pm 0.00118 a	0.01636 \pm 0.00003 a	0.01627 \pm 0.00008 a	0.01639 \pm 0.00003 a	3.013 n.s.	
1500	0.01697 \pm 0.00261 a	0.01640 \pm 0.00004 a	0.01637 \pm 0.00002 a	0.01634 \pm 0.00001 a	0.01661 \pm 0.00017 a	0.051 n.s.	

Significancia (P): ** = $P < 0.01$, *** = $P < 0.001$, n.s.= no hay significancia. Letras diferentes denotan diferencias significativas (Prueba de Tukey, $P < 0.05$). Otros = Phasmida, Mantodea, Opilionida, Escorpionida y Odonata.

8.3 Relación entre la distancia al jal y la biomasa de los gremios de artrópodos

Los resultados muestran que la biomasa del gremio de depredadores arañas y otros presentan una correlación positiva con respecto a la distancia del jal, es decir, que a mayor distancia respecto al jal existe una mayor biomasa.

En contraste, no hay una relación significativa entre la biomasa de los gremios de herbívoros (Coleópteros, Ortópteros y Hemípteros) y la distancia al jal (Figura 5).

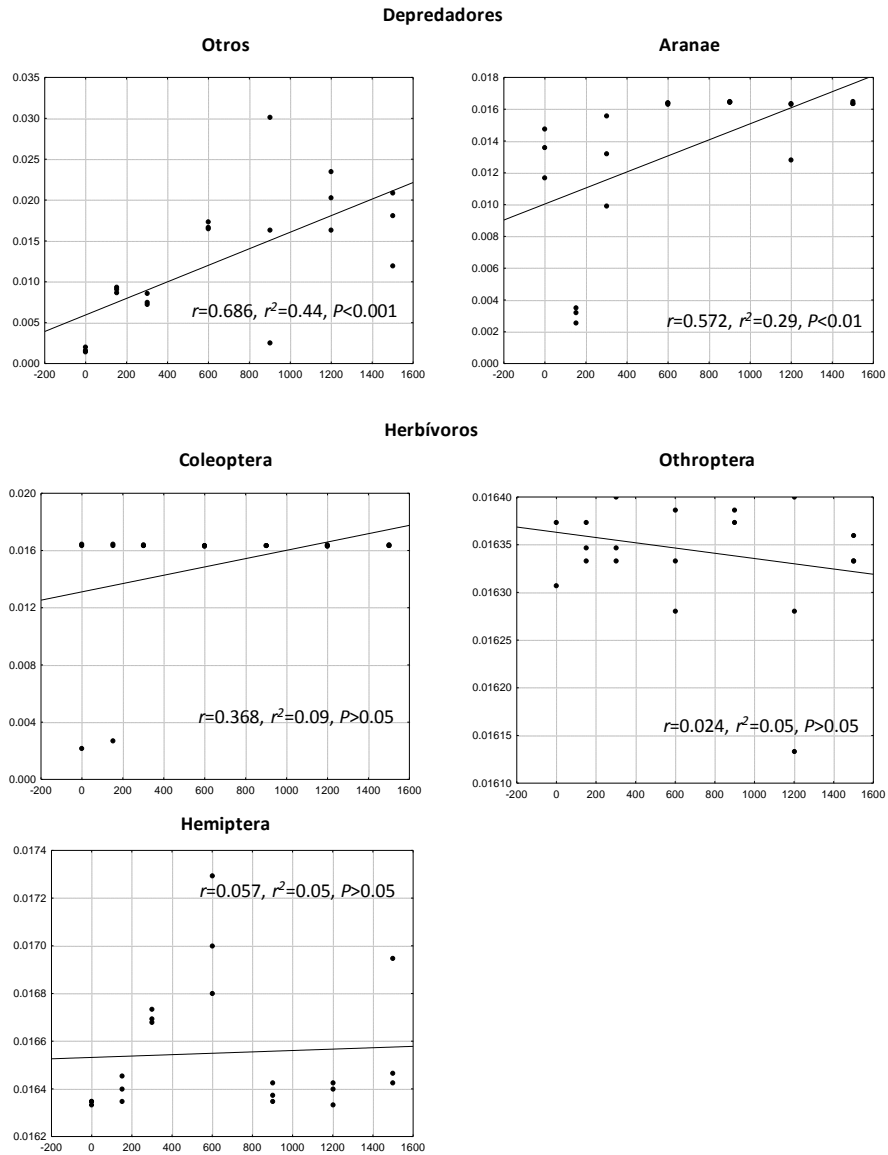


Figura 5. Análisis de regresión lineal entre la biomasa (peso seco g/m^2) de gremios de artrópodos y la distancia con respecto al jal. Otros = Phasmida, Mantodea, Opilionida, Escorpionida y Odonata. En el eje de las X se representa la distancia sobre el gradiente de contaminación, en el eje de las Y se representa la biomasa de los gremios de artrópodos.

8.4 Relación entre la Bioacumulación de metales pesados por gremios de artrópodos con y la distancia al jal

Los resultados de la relación entre la bioacumulación de cada MP por gremio de artrópodos y la distancia al jal se muestra en la tabla 3. En esta sección se excluyó el gremio de depredadores otros, debido a que las muestras obtenidas en peso seco no fueron suficientes para medir la concentración de los MP en todos los sitios (se requieren 0.25g).

Se puede observar en la tabla 3 para el gremio de chupadores (Hemipteros) y los depredadores (Araneae) una relación negativa y significativa entre los metales analizados (Cd, Cu, Fe, Pb y Zn), y la distancia en relación con el jal. Es decir, conforme se alejan los sitios del jale, se reduce la concentración de los MP bioacumulados. El patrón de bioacumulación de MP es el siguiente para Hemiptera $Fe > Zn > Pb > Cu > Cd$, mientras que para Araneae es de $Fe > Zn > Cu > Pb > Cd$ (Tabla 4).

Para los gremios de coleópteros (masticadores) los resultados muestran que no hay una relación significativa entre la bioacumulación de Cd, Cu, Fe y Zn y la distancia en relación con el jale. En contraste, el Pb mostró una relación negativa y significativa con respecto a la distancia al jale. El comportamiento de bioacumulación de MP es: $Fe > Zn > Pb > Cu > Cd$ (Tabla 4).

Para el gremio de Orthoptera (masticador) los resultados muestran que no hay una relación significativa entre la bioacumulación de Pb, Cd, y Cu, y la distancia en relación con el jale. En contraste, el Fe y Zn mostraron una relación negativa y significativa con respecto a la distancia al jale. El comportamiento de bioacumulación de MP es: $Fe > Zn > Pb > Cu > Cd$ (Tabla 4).

Tabla 3. Relación entre la distancia al jal y la concentración de metales pesados bioacumulados en diferentes gremios de artrópodos.

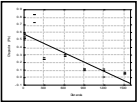
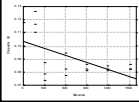
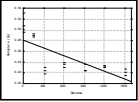
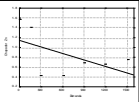
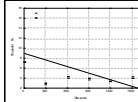
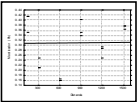
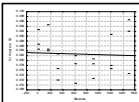
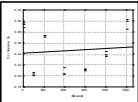
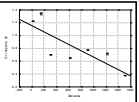
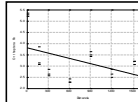
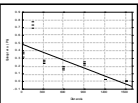
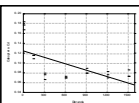
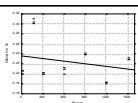
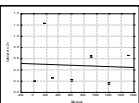
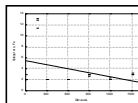
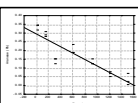
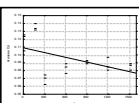
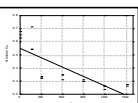
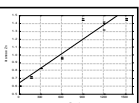
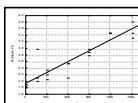
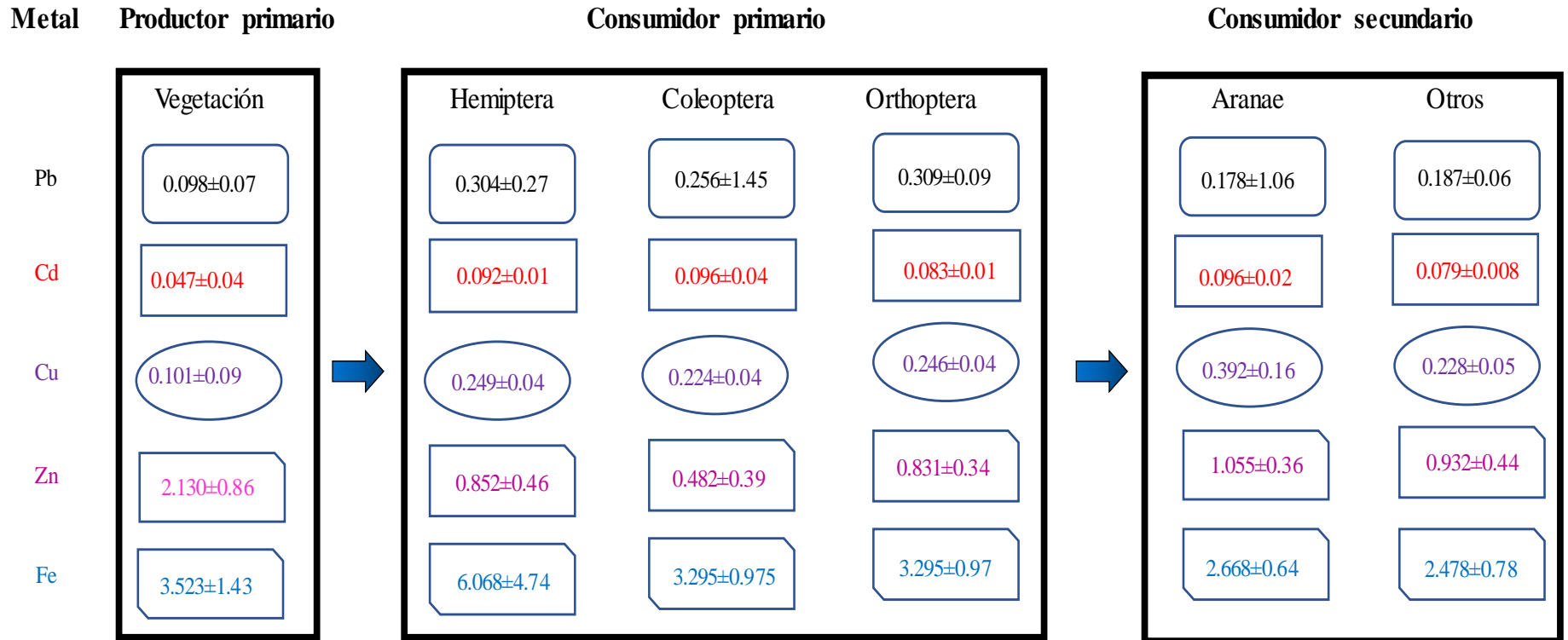
Gremio	Orden	metal				
		Pb	Cd	Cu	Zn	Fe
chupadores	Hemiptera	$r=-0.822$ $r^2=0.823$ $P=0.000$	$r=-0.62$ $r^2=0.346$ $P=0.003$	$r=-0.722$ $r^2=0.823$ $P=0.000$	$r=-0.54$ $r^2=0.250$ $P=0.01$	$r=-0.52$ $r^2=0.230$ $P=0.02$
						
Masticadores	Orthoptera	$r=-0.170$ $r^2=0.052$ $P=0.941$	$r=-0.05$ $r^2=0.05$ $P=0.836$	$r=-0.097$ $r^2=0.052$ $P=0.941$	$r=-0.081$ $r^2=0.639$ $P=0.000$	$r=-0.44$ $r^2=0.154$ $P=0.044$
						
Masticadores	Coleoptera	$r=-0.780$ $r^2=0.584$ $P=0.000$	$r=-0.63$ $r^2=0.363$ $P=0.002$	$r=-0.24$ $r^2=0.008$ $P=0.295$	$r=-0.06$ $r^2=0.049$ $P=0.802$	$r=-0.36$ $r^2=0.081$ $P=0.113$
						
Depredadores	Aranae	$r=-0.910$ $r^2=0.812$ $P=0.000$	$r=-0.49$ $r^2=0.196$ $P=0.02$	$r=-0.90$ $r^2=0.619$ $P=0.000$	$r=-0.946$ $r^2=0.880$ $P=0.000$	$r=-0.91$ $r^2=0.819$ $P=0.000$
						

Figura 6. Promedio (\pm desviación estándar) de la concentración (mg/kg) de metales pesados (Cd, Cu, Fe, Pb y Zn) bioacumulados en diferentes niveles tróficos de organismos asociados a los jales de Huautla, Morelos. Otros = Phasmida, Mantodea, Opilionida, Escorpionida y Odonata.



8.5 Transferencia de MP a través de la cadena trófica por gremio de artrópodos

En general, los resultados obtenidos de transferencia de MP en los gremios de artrópodos (Figura 6), mostraron que los consumidores primarios (Orthoptera, Coleopteros y Hemipteros) bioacumularon mayor cantidad de Cd (>200 veces más que los productores primarios), y en menor proporción Fe y Zn, en comparación con los otros metales. En particular, los Orthoptera y los Hemiptera registraron el mismo patrón de transferencia de MP: Cd>Cu>Pb>Fe>Zn, por su parte los Coleoptera mostraron el siguiente patrón: Cd>Pb>Cu>Fe>Zn.

Por lo que respecta al Pb los herbívoros a los depredadores no muestran un patrón constante (Figura 6). En el gremio Araneae la transferencia de MP por el gremio de herbívoro mostraron el siguiente comportamiento: Orthoptera Cu>Zn>Cd>Pb>Fe; Coleoptera Zn>Cu>Cd>Fe>Pb; Hemiptera Zn>Pb>Cu>Cd>Fe.

Por su parte el gremio de depredadores Otros mostró que el Zn es el MP que más bioacumulan en relación con los herbívoros. Asimismo, registraron el siguiente patrón de transferencia de MP: Orthoptera Zn>Pb>Cu>Cd>Fe; Coleoptera Zn>Cd>Pb=Fe>Cu; Hemiptera Zn>Pb=Cu= Fe>Cd.

8.5.1 Metales no esenciales

El gremio de los herbívoros que más transfiere Cd al depredador Araneae son: Coleoptera > Hemiptera > Orthoptera; mientras que para los otros depredadores el patrón es: Hemiptera = Orthoptera > Coleoptera. Por otro lado, los herbívoros que más transfieren

Pb al gremio Aranae son: Hemiptera > Orthoptera > Coleoptera; mientras que para los depredadores Otros el patrón es: Orthoptera > Hemiptera > Coleoptera.

8.5.2 Metales esenciales

El gremio de los herbívoros que más transfiere Cu al depredador Aranae son: Hemíptera > Coleoptera > Orthoptera; mientras que para los otros depredadores el patrón es: Orthoptera > Coleoptera > Hemiptera. Por otro lado, los herbívoros que más transfieren Zn al gremio Aranae son: Hemiptera > Coleoptera > Orthoptera; mientras que para los otros depredadores el patrón es: Hemiptera > Orthoptera > Coleoptera. Por último, los herbívoros que más transfieren Fe al gremio Aranae y Otros registraron el mismo patrón: > Coleoptera > Orthoptera.

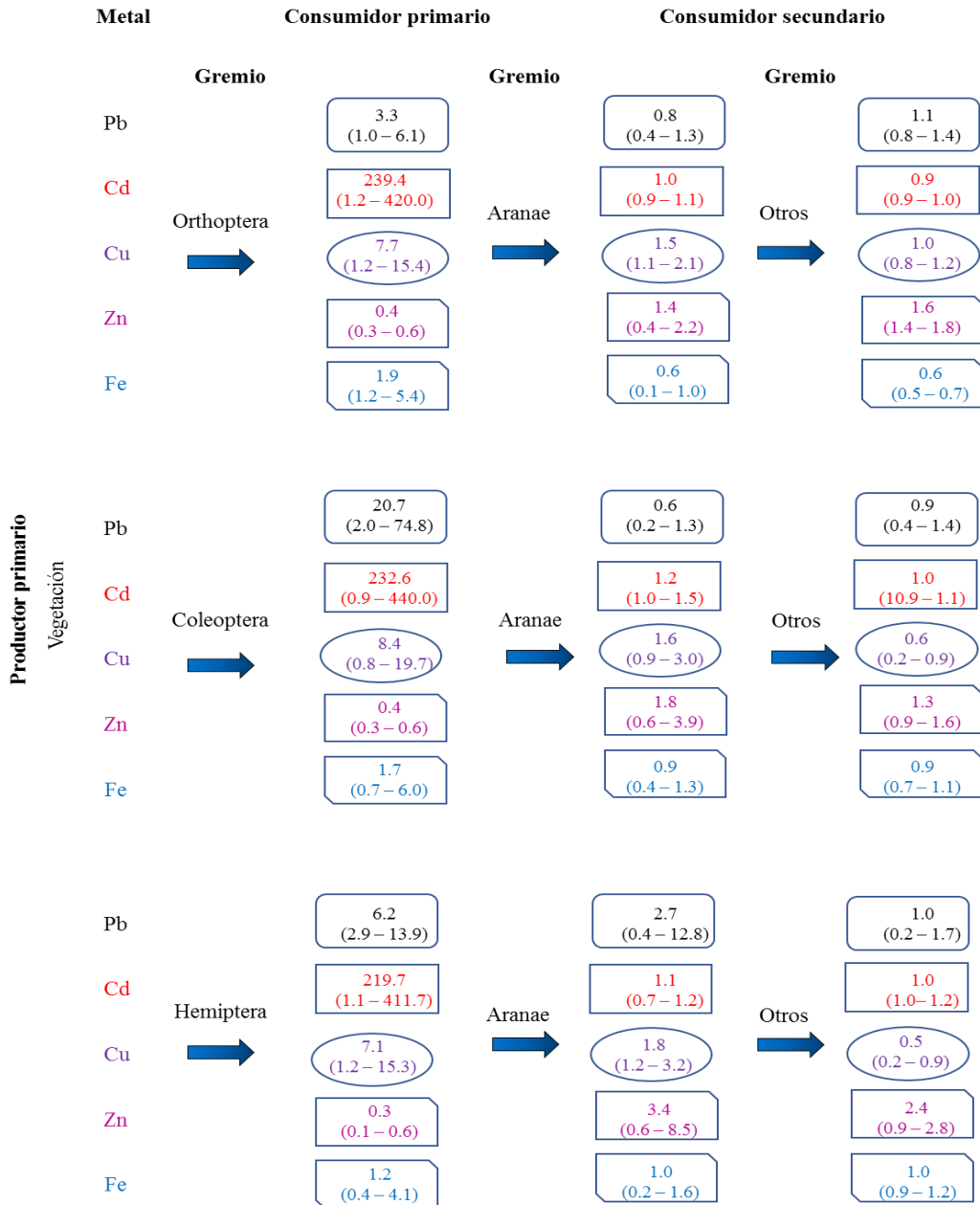


Figura 7. Transferencia de metales pesados (Pb, Cd, Cu, Zn y Fe) a través de la cadena trófica (productor primario- consumidor primario (Orthoptera, Coleoptera, Hemiptera)- consumidor secundario (Aranae y Otros). Otros = Phasmida, Mantodea, Opilionida, Escorpionida y Odonata.

9. DISCUSIÓN

9.1 Metales pesados a través del gradiente de lejanía al jale

Los resultados de este estudio señalan que la concentración de MP va disminuyendo conforme aumenta la distancia al jale. Estos resultados son sustentados por los estudios realizados en los jales de Huautla, Morelos, donde se han evaluado de forma independiente las concentraciones de metales asociados al suelo a través de un gradiente de contaminación producto de los jales. El primero de ellos fue hecho por González-Brito (2015) en el que se estableció un gradiente de contaminación de 3,000 m en dirección al jale; el segundo estudio fue hecho por Vargas-Arellano (2019), donde estableció un gradiente de contaminación de 1,200 m en dirección al poblado de Huautla; el cual se ubica a 500 m del jal. En ambos estudios se documentó una reducción de la concentración de MP conforme aumentaba la distancia al jal. Asimismo, Puga et al. (2006), señala que los MP se concentran en mayor cantidad en la capa superficial del suelo, y que sus concentraciones son proporcionales a la distancia a la fuente de contaminación.

Lo antes mencionado puede estar relacionado con fuerzas eólicas o hídricas, que son las principales causas de dispersión de MP presentes en los jales. En ambientes xéricos como la Selva Baja Caducifolia, representante de la zona de Huautla, se ha observado que el viento es la principal causa de dispersión de los jales, los cuales poseen una granulometría de $\leq 45\mu\text{m}$ y tienen adheridos EPT's como los MP (Velasco et al., 2004; Puga et al., 2006). Además, se ha documentado que el viento puede dispersar las partículas de los jales hasta una distancia de 25 km (Rabitsch, 1995).

9.2 Composición de artrópodos

Los resultados obtenidos en este estudio muestran que la composición de artrópodos asociados a la vegetación a través del gradiente de distancia al jal varió significativamente entre los sitios de estudio. Las diferencias antes mencionadas pueden ser consecuencia de cambios espaciales en las características edáficas, ocasionadas por la disposición de MP, los cuales son dispersados desde el jale.

Una vez depositados en el suelo, los MP tienden a permanecer, al menos inicialmente, en los horizontes superficiales. Posteriormente, los MP promueven la disminución o ausencia de la estructura edáfica, propiedades químicas anómalas, ruptura de los ciclos biogeoquímicos, y baja profundidad efectiva (Velasco et al., 2004; Puga et al., 2006). Por lo anterior, a través del gradiente de distancia se pueden observar cambios en la bioacumulación de MP en los productores primarios, que son la primera entrada de estos elementos a la cadena trófica.

Lo antes mencionado, se puede observar en los resultados del análisis NMDS sobre la composición de MP bioacumulados en los gremios de artrópodos, el que muestra que la composición de MP varía significativamente entre sitios de estudio. Aunado a lo anterior, este estudio también documenta que la composición de la comunidad de artrópodos cambia significativamente entre sitios de estudio. Más aún, cuando se correlacionaron los resultados de los análisis antes mencionados se observó que la bioacumulación de MP determina la composición de artrópodos, es decir, que los MP son un factor que contribuye a que las comunidades se estructuren con base a la biodisponibilidad de MP.

Lo anterior debido a que altas concentraciones de MP provocan cambios espaciales en las características edáficas, así como disminución de la materia orgánica presente en el suelo. Ocasionando la disminución vegetal de la zona contaminada, afectando directamente a los organismos asociados a la vegetación (Jochum et al., 2017).

9.3 Relación entre la concentración de metales pesados y los consumidores primarios

Los resultados denotan que la bioacumulación de MP en el nivel trófico de los consumidores primarios se reduce significativamente con la lejanía al Jale. Una posible explicación es que los consumidores primarios están respondiendo a la concentración de MP que bioacumulan los productores primarios a través del gradiente de contaminación. Lo anterior, es respaldado por los estudios de González-Brito (2015) donde se demostró un efecto del gradiente de contaminación sobre la bioacumulación de MP en plantas.

En particular, en los jales de Huautla se ha documentado que especies vegetales dominantes en los jales tienen la capacidad de bioacumular MP en sus tejidos aéreos y generar de esta manera la entrada de estos elementos a la cadena trófica. Ejemplo de estas especies bioacumuladoras de MP en los jales de Huautla son: *Pithecellobium dulce* (Castañeda-Bautista, 2016) *Prosopis laevigata* (Fuentes-Reza, 2017; Muro-González, 2020) *Vachellia campechiana* (Santoyo-Martínez et al., 2020), y *Wigandia urens* (Cobarrubias-Escamilla, 2017).

Por otro lado, en los resultados obtenidos de bioacumulación de MP en los consumidores primarios (artrópodos herbívoros) se observó que el gremio Hemiptera (chupadores) presentó los menores valores de bioacumulación de MP con respecto al

gremio de masticadores (Coleoptera y Orthoptera). Esto puede ser explicado por la cantidad de recursos alimenticios que utilizan. Los hemipteros son fitófagos y únicamente se alimentan de la savia bruta de las plantas, la cual transporta los MP absorbidos por las raíces (Lenicov et al., 2006; Solís-Aguilar et al., 2015; Megías et al., 2017). En comparación con Orthoptera y Coleoptera, los cuales se alimentan del tejido foliar y de la savia, como lo documentó Santoyo-Martínez (2016) en donde el tejido foliar fue el que acumuló mayor concentración de metales pesados. Otra posibilidad es que los Coleopteros y Orthopteros estén asociados a plantas hiperacumuladoras de MP. Esto es lo que se documentó en un estudio hecho en artrópodos asociados a especies hiperacumuladoras de MP como *Streptanthus polygaloides*, especie hiperacumuladora de Ni (Wall et al., 2002). Además, las interacciones entre metales no esenciales (As, Cd, Cr, Hg Pb y As) y metales esenciales (Cu, Fe y Zn) influyen en la concentración de MP presentes en el cuerpo de los organismos. Un ejemplo es el caso del Pb, el cual incrementa cuando hay deficiencia de Zn en el organismo (López et al., 2004). Asimismo, los MP no esenciales pueden fungir como competidores o antagonistas de los metales esenciales, sustituyéndolos en sus funciones fisiológicas; por ejemplo, el Ca y Zn los cuales son sustituido por Cd y Pb en la activación de la enzima fosfatasa (Soto-Jiménez, 2011; Mercado-Mercado et al., 2012).

9.4 Relación entre la biomasa de los gremios de artrópodos con respecto a la distancia al jal

Los resultados obtenidos muestran una relación positiva y significativa entre la lejanía al jale de Huautla y la biomasa de los gremios de depredadores (Araneae y Otros), ya que a mayor distancia mayor biomasa.

Los resultados reflejan una clara variación de la biomasa de los depredadores, siendo los sitios cercanos al jal los que registraron los menores valores de biomasa. Lo anterior puede ser consecuencia de la cantidad de materia orgánica presente en el suelo en los sitios de estudio, puesto que se ha documentado una relación positiva entre la biomasa de las arañas y la cantidad de materia orgánica presente en el suelo (Jochum et al., 2017). La densidad en la población de organismos descomponedores (como detritívoros), disminuye con la presencia de MP, provocando el aumento en la cantidad de materia orgánica (Nahmani y Lavelle, 2002). Lo anterior es apoyado por el trabajo de Hernández-Gómez (2014) quien estudió la estructura de la comunidad de microartrópodos a través de un gradiente de contaminación por metales pesados en Huautla, Morelos. La autora documentó una relación negativa y significativa entre la concentración de Cd y Pb, y la riqueza de colémbolos y ácaros, es decir, el incremento en la concentración de Cd y Pb reduce significativamente la diversidad de microartrópodos.

En contraste, el gremio de los herbívoros no mostró cambios de la biomasa a través del gradiente de distancia al jale. Estos resultados pueden ser consecuencia de una aversión desarrollada por los organismos herbívoros a las plantas acumuladoras de MP (Gall et al., 2015) como lo observado en el helecho *Pteris vittata* (helecho hiperacumulador de As), donde se documentó un efecto disuasivo sobre el chapulín *Schistocerca americana*, demostrando que los ortópteros no consumieron hojas de helecho tratadas con arsénico (Rathinasabapathi et al., 2007).

Otra posible explicación involucra el nivel de especialización de los ortópteros y coleópteros (polífagos, oligófagos y monófagos); como lo reportado por Tovar-Sánchez (1996) en el chapulín de la milpa (*Sphenatium purpurascens*) especie asociada a los jales de Huautla, Morelos (Rebollo-Salinas, 2019), este chapulín es una especie polífaga, ya que se alimenta de más de 40 especies de plantas de 24 familias, y tiene mayor probabilidad de evitar el consumo de sustancias nocivas provenientes de las plantas (Tovar-Sánchez op. cit.). Este mismo comportamiento se ha registrado en *Curculionidae* que es una de las familias de coleópteros más abundantes en Huautla, integrada por herbívoros fitófagos de hábitos polífagos (Toledo-Hernández et al., 2009; Quispe y Mamani, 2018.)

Los resultados obtenidos para el gremio de chupadores (Hemípteros) no muestran una correlación significativa entre la biomasa de los hemípteros y la distancia al jal. Una posible explicación a estos resultados es lo reportado por Van Straalen y Roelofs (2005) y Merritt y Bewick (2017), en donde los organismos pudieron haber desarrollado una tolerancia fisiológica a los MP.

9.5 Relación entre la biomasa de los gremios de artrópodos y la bioacumulación de metales pesados

En los resultados obtenidos de la biomasa de los artrópodos se observó un efecto significativo entre la biomasa de los artrópodos desde los 0 hasta los 600 m; es decir la biomasa de artrópodos se ve afectada por las altas concentraciones de MP en los sitios más cercanos al jale. Esto puede estar relacionado con los resultados obtenidos de

bioacumulación de MP, donde de manera general se observa que Fe, Pb y Zn son los metales con mayor bioacumulación en los artrópodos.

Esta idea está sustentada por los estudios hechos por Xiao-qiong et al. (2011) y donde se observó una reducción del peso corporal en *Pardosa astrigera* (Araneae) al estar expuesto a sales de Zn y Pb en el agua potable de las arañas. Del mismo modo Chan-Sik et al. (2005) observó pérdida de peso corporal en *Pardosa astrigera* (Araneae), al estar expuestas a agua contaminada con Cd. Asimismo, se ha observado que el Cd y Cu reducen el crecimiento de los microartrópodos edáficos (ácaros oribátidos) (Hernández-Gómez, 2014).

Mientras que Żmudzki et al., (2012) encontró que en la zona de minas de Polonia los valores de diversidad para todos los niveles taxonómicos de las arañas disminuyeron con el aumento de Zn en el suelo y en los pastizales estudiados, por lo que, la presa potencial de las arañas puede verse directamente afectado por metales, lo que resulta en una disminución de su abundancia y por consiguiente de su biomasa.

Por lo que respecta a la bioacumulación de los MP, se observó que entre los Hemipteros y sus depredadores (Aranae) tienen una relación significativa, ya que a mayor distancia del jal en el gradiente de contaminación existe una menor acumulación. Como lo observado por González-Brito (2015) en donde el mismo comportamiento se dio con menor abundancia relativa de órdenes de artrópodos, siendo afectados por el gradiente de contaminación.

9.6 Relación entre la transferencia de metales pesados en la cadena trófica

Los consumidores primarios de los gremios de masticadores (Orthoptero y Coleoptero) y chupadores (Hemiptera) bioacumulan en promedio 230 veces más Cd, 10 veces más Pb, ocho veces más Cu, y dos veces más Zn, que el reportado en los productores primarios. En contraste, los consumidores primarios bioacumularon menos Zn que los niveles registrados en los productores primarios. Por otro lado, la transferencia en promedio de los MP antes mencionados entre los consumidores primarios y los consumidores secundarios (Aranae y Otros) es \geq a uno, es decir, los consumidores secundarios bioacumulan más o igual cantidad de MP que los registrados en los consumidores primarios. Lo antes mencionado, apoya la hipótesis de biomagnificación de MP a través de las cadenas tróficas, incrementando la concentración del MP al pasar a un nivel trófico superior (Molina et al., 2012; Puelles, 2018).

En este estudio, se detectaron diferencias en los niveles de transferencia de MP entre los gremios de consumidores primarios, siendo los chupadores el gremio (Hemiptera) que bioacumuló menos MP en comparación con los masticadores. Lo anterior, puede atribuirse al tipo de alimentación que presentan, ya que se ha reportado al gremio Hemiptera como organismos chupadores que se alimentan exclusivamente de la savia de las plantas, por lo que, sólo puede bioacumular MP que son transportados a través del xilema y floema, en contraste, el gremio de masticadores no sólo se alimenta de la savia, sino también del resto del tejido foliar al ser cortadores de la lámina. Por último, la transferencia de los MP de presa a depredador va a depender del tipo de alimentación del depredador, la capacidad del depredador de minimizar la asimilación de MP contenidos en la presa, así como de la capacidad fisiológica de contrarrestar los efectos dañinos que los MP puedan provocar en el organismo (Mann et al., 2011).

10. CONCLUSIONES

En el jal principal de Huautla, Morelos se comprobó que existe un gradiente de contaminación por MP, debido a que se encontró mayor concentración de éstos en los sitios más cercanos al jal, y disminuyó conforme aumentó la distancia. En general se demostró que en los sitios más cercanos al jal existe un efecto negativo y significativo en la biomasa y la bioacumulación de MP en los gremios de artrópodos. Se observó que la biomasa de los organismos herbívoros no se ve afectada por el gradiente de contaminación. En cuanto a la bioacumulación de MP en los artrópodos se observó que en los gremios de chupadores (Hemipteros) y depredadores (Araneae) existe una relación negativa y significativa entre la bioacumulación de todos los MP estudiados, con respecto a la distancia al jal, siendo Fe el metal con mayor bioacumulación en ambos gremios. Para el gremio de Orthoptera el Fe y el Zn si mostraron que existe una gradiente de contaminación que disminuye con la distancia al jal, en comparación con los otros MP estudiados. Para el gremio de Coleoptera se observó una relación negativa y significativa en la bioacumulación de Pb y la distancia al jal. Se comprobó que existe un proceso de biomagnificación de MP en la cadena trófica: productor primario- consumidor primario- consumidor secundario. Los consumidores primarios de los gremios Orthoptera, coleoptera y Hemiptera bioacumulan en promedio 230 veces más Cd, 10 veces más Pb, 8 veces más Cu, y dos veces más Zn, que el reportado en los productores primarios. En contraste, los consumidores primarios bioacumularon menos Zn que los niveles registrados en los productores primarios. La transferencia promedio de MP de los consumidores primarios a los consumidores secundarios es \geq a uno, por lo que, los

consumidores secundarios bioacumulan más o igual cantidad de MP que los registrados en los consumidores primarios.

11. PERSPECTIVAS

En los jales de la mina de Huautla, los cuales están abandonados desde los años 80's, se ha documentado que los residuos que permanecen en el jal contienen elementos potencialmente tóxicos, como los metales pesados (Ag, As, Cd, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn). Estos residuos generados por las actividades mineras del pasado causan efectos adversos por la liberación de metales pesados que llegan a todos los compartimientos ambientales (agua, suelo, aire y biota), modificando o alterando su composición. Por lo que, es importante conocer, no sólo las concentraciones que se tienen en los diversos compartimientos ambientales, sino también, como se transfieren en la cadena alimenticia.

Este trabajo aporta información reciente y nueva sobre la bioacumulación de MP en los consumidores primarios y su transferencia hacia los consumidores secundarios a través de los gremios de artrópodos en un gradiente de contaminación, demostrando cuales metales ingresan a la cadena trófica.

Lo anterior resulta en nuevos enfoques de investigación para la zona de Huautla como:

- a) Evaluar los diferentes mecanismos que presenta Araneae para detoxificar los metales pesados que adquiere a través de su alimentación.

- b) Determinar en los diferentes estadios de desarrollo de los artrópodos la bioacumulación de MP y en cuál de éstos se bioconcentran.
- c) Evaluar integralmente la transferencia de MP desde el suelo hasta los consumidores secundarios a través del gradiente de contaminación, con la utilización de gremios de especies bioindicadoras relacionadas en la cadena trófica para poder establecer una zona de recuperación.

12. LITERATURA CONSULTADA

1. Ali, H., Khan, E., y Ilahi, I. (2019). Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of Chemistry*, 2019, 1-14.
2. Angelova, V., Ivanova, R., Delivaltova, V., y Ivanova, Kr. (2004). Bio-accumulation and distribution of heavy metals in fibre crops (fla, cotton and hemp). *Industrial Crops and Products*, 19 (3), 197-205.
3. Armienta, M., Villaseñor, G., Rodríguez, R., Ongley L., y Mango, H. (2001). The rol o arsenic-bearing rocks in Groundwater pollution at Zimapan Valley, Mexico. *Environmental Geology*, 40 (4-5), 571-581.
4. Azam, I., Afsheen, S., Zia, A., Javed, M., Saeed, R., Kaleem, M., y Munir, B. (2015). Evaluating insects as a Bioindicators of Heavy metal contamination and accumulation near industrial area of Gujrat, Pakistan. *BioMed Research International*, 25, 1-11.
5. Baird, C. (2004). *Química ambiental*, Barcelona, España, Reverté, SA.
6. Barla, R. (2014). Un diccionario para la educación ambiental. Recuperado de http://www.elcastellano.org/glosario_ambiental.pdf.
7. Beltrán-Pineda, M., y Gómez-Rodríguez, A. (2016). Biorremediación de metales pesados cadmio (Cd), Cromo (Cr) y Mercurio (Hg) Mecanismos Bioquímicos e ingeniería genética: una revisión. *Facultad de Ciencias Básicas*, 12 (2), 172-197.
8. Broadgate, W., Armstrong, C., Brewer, P., Denman, K., Feely, R., Gao, K., Gattuso, J., Isensee, K., Kleypas, J., Laffoley, D., Orr, J., Portner, H., Rezende, C., Schmidt, D., Urban, E., Waite, A.,

- y Valdés, L. (2008). Ocean acidification summary for policymakers. International geosphere–biosphere programme.
9. Butovsky, R. (2011). Heavy metal in Carabids (Coleóptera, Carabidae). *Zookeys*, 100, 215–222.
 10. Cabeza, J.G., Alonso, J., Pastor, J., Sastre–Conde, I., y Lobo, M.C. (2004). Absorción y acumulación de metales pesados en tres especies vegetales en suelos enmendados con lodos de depuradora. Poggi–Varaldo, H. M., Ríos–Leal, E., Esparza–García, F., García–mena, J., Conde–Sastre, I., Zitomer, D., Macarie, H. y Garibay–Orijel (Eds.), *Environmental Biotechnology and Engineering*, pp 1–13.
 11. Cárdenas, J. (2013). La minería en México: Despojo a la nación. *Revista Mexicana de Derecho Constitucional*, (28), 36–74.
 12. Castañeda–Bautista, J. (2016). Estudio ecotoxicológico de los jales mineros de Huautla, Morelos: el caso de *Pithecellobium dulce* (Roxb.) Beth. (Fabaceae). (tesis de maestría). Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México.
 13. Chan–Sik, J., Su, L., Myung–Pyo, J., Joon–Ho, L., Seungwhan, L., y Se, L. (2005). Accumulated heavy metal content in wolf spider, *Pardosa astrigera* (Araneae: Lycosidae), as a bioindicator of exposure. *Journal of Asia–Pacific Entomology*, 8(2), 185–192.
 14. Chu, H. 1949. How to know the immature insects. Pictured Key Nature Series. China. 233 p.
 15. Cobarrubias–Escamilla, D. L. (2017). Evaluación del daño genotóxico y daño morfológico de *Wigandia urens* expuesta a metales pesados en presas de jales abandonados. (tesis de licenciatura). Universidad Autónoma de Morelos, México.

16. Irfan-Dar, M., Green, I., Naikoo, M., Khan, F., Ansari, A., Lone, M. (2017). Assessment of biotransfer and bioaccumulation of cadmium, lead and zinc from fly ash amended soil in mustard-aphid-beetle food chain. *Science of total environment*. 17, 1-43.
17. Muro-González, D. A., Mussali-Galante, P., Valencia-Cuevas, L., Flores-Trujillo, K., & Tovar-Sánchez, E. (2020). Morphological, physiological, and genotoxic effects of heavy metal bioaccumulation in *Prosopis laevigata* reveal its potential for phytoremediation. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-18.
18. Del Toro, J., Floyd, K., Gardea-Torresdey, J., y Borrok, D. (2010). Heavy metal distribution and bioaccumulation in Chihuahuan Desert Rough Harvester ant (*Pogonomyrmex rugosus*) population. *Environmental Pollution*, 158(5), 1281-1287.
19. Dorado O., Arias D., Alonso G. & Maldonado B. 2002. Educación ambiental para la biodiversidad en el trópico seco, reserve de la biosfera sierra de Huautla, Morelos, México. *Tropicos en Educación Ambiental*. 4: 23-33.
20. Dorado-Ramírez, O. R (2001). Sierra de Huautla-Cerro Frío, Morelos: Proyecto de reserva de la biosfera. Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Centro de Investigación en Biodiversidad y Conservación. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. Q025. México D. F.
21. Espino-Ortega, V. (2014). Afectación de los suelos y sedimentos por la dispersión de los residuos mineros históricos del distrito minero San Antonio – El triunfo, B.C.S.
22. Faith, D., Minchin, P., y Belbin, L. (1987). Compositional dissimilarity as a robust measure of ecological distance. *Junk Publisher, Dordrecht*, 69, 57-168.

23. Farfán-Beltrán, M. (2016). Estructura de la comunidad de artrópodos en sitios conservados, perturbados y sujetos a restauración ecológica en el pedregal se San Ángel, D.F., México. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de México.
24. Fraume, N. (2006). Abecedario ecológico la más completa guía de términos ambientales, Bogotá, Colombia: San Pablo. 51 p.
25. Fuentes-Reza, A. (2017). Bioacumulación y análisis de la estructura y diersidad genética de *Prosopsis leaigata* por exposición a metales, en Huautla, Morelos. (tesis de licenciatura). Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México.
26. Gall, J., Boyd, R., y Rajakaruna, N. (2015). Transfer of heavy metal through terrestrial food webs: a review. 187 (4), 201.
27. García, C., Moreno, J., Hernández, M., y Polo, A. (2002). Metales pesados y sus implicaciones en la calidad del suelo. Ciencia y medioambiente. 125-138.
28. Góngora, J.P. (2013). Evolución reciente de la minería en México. Comercio exterior, 63 (4), 1-6.
29. González-Brito, W. (2015). Efectos de un gradiente de contaminación por jales mineros sobre la comunidad de artrópodos asociados a la vegetación y con énfasis en el orden Araneae en Huautla, Morelos. (tesis de licenciatura). Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México.
30. Gutiérrez-Ruiz, M., Romero, M., y Gonzales-Hernández, G. (2007). Suelos y sedimentos afectados por la dispersión de jales inactivos de sulfuro metálico en la zona minera de SANTA Bárbara, Chihuahua México. Revista mexicana de ciencias geológicas. 24 (2), 170-184.

31. Hermoso de Mendoza, M., Soler, F., García-Fernández, E., Llana, L. y Pérez, M. (2011). Diferencia del sexo y la edad en el contenido de metales pesados (Cd, Cu, Pb y Zn) en pelos del lobo ibérico (*Canis lupus signatus*) del norte de España. *Revista de Toxicología*. 28, 140-146
32. Hernández, B. (2015). Análisis de la anatomía y morfología de *Prosopis leavigata* por acumulación de metales pesados en la Sierra de Huautla, Morelos (tesis de licenciatura). Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
33. Hernández, M. (2009). Estudio de la acumulación de Plomo y Cadmio por *Asphodelus fistulosus* L. y *Brassica juncea* L. para fitorremediar jales. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Metropolitana.
34. Hernández-Gómez, M. A. (2014). Estructura de la comunidad de microartrópodos a través de un gradiente de contaminación por metales pesados en Huautla, Morelos. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
35. Jochum, M., Barnes, A., Weigelt, P., Ott, D., Rembold, K., Farjallah, A., y Brose, U. (2017). Resource stoichiometry and availability modulate species richness and biomass of tropical litter macro-invertebrates. *Journal of Animal and Ecology*. 86, 114-1123.
36. Koch, E., Castañeda-Meneses, G., y Delabie, J. (20019). El concepto de gremio: del feudalismo a la ecología de comunidades. *Revista UNAL*. 24 (2), 224-231.
37. Lenicov, R., Marino, A., Paradell, L., y Catalano, I. (2006). Hemípteros aquenorrincos asociados al cultivo de sorgo en la Argentina (Insecta hemiptera). *Revista de investigaciones agropecuarias*, 35 (2), 3-20.
38. Lillo, J. (2011). Impactos de la minería en el medio natural. Grupo de Geología Universidad Rey Juan Carlos, Madrid, España.

39. López, M., Prieto, F., Miranda, M., Castillo, C., Hernández, J., y Benedito, J. (2004). Interactions between toxic (As, Cd, Hg, and Pb) and nutritional essential (Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Se, Zn) elements in the tissues of cattle from NW Spain. *Biometals*. 17. 389-397.
40. Mann, R.N., Vijver, M.G., y Peijnerburg, W. (2011). Metals and metalloids in terrestrial system: Bioaccumulation, biomagnification and subsequent adverse effects. Sánchez-Bravo, F., van den Brink, P. J. y Mann, R (Eds.), *Ecological Impacts of Toxic Chemicals*, pp 43-62. Sydney, Australia.
41. Marschener, P., y Rengel, Z. (2012). Disponibilidad de nutrientes en los suelos. Marschener, P (Ed), *Nutrición mineral de plantas superiores*, pp 645-651. Adelaida, Australia.
42. Martínez-Becerril, C. (2009). Efecto de los metales pesados en los jales mineros sobre la comunidad vegetal de la microcuenca Huautla y el daño genotóxico en su herbívoro dominante *Peromyscus levipes* (Rodentina: Muridae). (tesis de maestría). Universidad Autónoma de Querétaro, México.
43. Megías, M; Molist, P., y Pombal, A. (2017). Atlas de histología animal y vegetal. Recuperado de <https://mmegias.webs.uvigo.es/descargas/descargas.php>.
44. Melic, A., Barrientos, J., Morano, E., y Urones, C. (2015). Orden Araneae Idea. Ibero Diversidad Entomológica. Recuperado de http://sea-entomologia.org/IDE@/revista_11.pdf.
45. Mercado-Mercado, G., Duarte-Muñoz, N., Álvarez-Parrilla, E., De la Rosa, L., y Wall-Medrano, A. (2012). Fosfatasa alcalina (E.C.3.1.3.1): bioquímica y aplicaciones en las ciencias biomédicas, ecológicas y alimentarias. *Tecnociencia*. 4 (2), 112-122.

46. Merritt, T., y Bewick, A. (2017). Genetic diversity in insect metal tolerance. *Frontiers in genetics*. 8 (172), 1-6.
47. Migula, P., Wilczek, G., y Babezyska, A. (2013). Effects of heavy metals contamination. Nentwig, W (Ed), *Spider ecophysiology* pp 403-415. Katowice, Polonia.
48. Molina, C., Ibañez, C., y Francois-Marie, G. (2012). Proceso de biomagnificación de metales pesados en un lago hiperhalino (Poopó, Oruro, Bolivia): Posible riesgo en la salud de consumidores. *Ecología en Bolivia*. 47 (2), 99-118.
49. Monreal, R., y Hernández, P.Y. (2015). *Mi México es minero*, México DF, México: Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México A.C.
50. Mourato, M., Moreira, I., Leitão, I., Pinto, F., Sales, J., y Martins, L. (2015). Effects of heavy metals in plants of the genus *Brassica*. *International journal of molecular sciences*. 16, 17995- 17998.
51. Muro-González, D. (2020). *Caracterización de especies vegetales para fitorremediar suelos contaminados con metales pesados en los jales mineros*. (tesis de doctorado). Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México.
52. Mussali-Galante, P., Tovar-Sánchez, E., Valverde, M., Valencia-Cuevas, L. y Rojas, E. (2013). Evidence of population genetic effects in *Peromyscus melanophrys* chronically exposed to mine tailings in Morelos, México. *Environmental science and pollution research*, 20, 7666-7679 b.
53. Mussali-Galante, P., Tovar-Sánchez, E., Valverde, M., y Rojas del Castillo, E. (2013). Biomarcadores de exposición para evaluar la contaminación ambiental por metales: de moléculas a ecosistemas. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29 (1), 117-140 a.

54. Nahmani, J., y Lavelle, P. (2002). Effects of heavy metal pollution on soil macrofauna in grassland of Northern France. *European journal of soil biology*, 38, 297–300.
55. Navarro-Aviñón, J.P., Aguilar, I., y López-Moya, J.R. (2007). Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Ecosistemas*, 16 (2), 10–25.
56. Noguera, F., Zaragoza-Caballero, S., Chemsak, J., Rodríguez-Palafox, A., Ramírez, E., Gonzales-Soriano, E., y Ayala, R. (2002). Diversity of the familia Cerambycidae (Coleoptera) of the Tropical Dry Forest of Mexico, I. Sierra de Huautla, Morelos. *Conservation Biology and Biodiversity*, 95 (5), 617–627.
57. NOM-141-SEMARNAT-2003. Diario oficial de la República Mexicana, México, 13 de septiembre de 2004.
58. O'Rourke, Eyleen J. (2002). Identificación, caracterización e importancia biológica de las ADN glicosilasas del sistema de reparación del ADN por escisión de bases de *Helicobacter pylori*. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.
59. Odum, E. P., y Barrett, G. W. (1972). *Ecología*. España: tercera edición, Nueva editorial Americana.
60. Parra-Ochoa, E. (2014). Aves silvestres como bioindicadores de contaminación ambiental y metales pesados. *Revista CES Salud Pública*. 5, 59–56.
61. Platnick, N. (2014). *The World Spider Catalog*. Natural History Museum Bern. Recuperado de <https://wsc.nmbe.ch/archive/>
62. Puelles, D. (2018). Bioacumulación de metales pesados en una comunidad de artrópodos de la comuna Puchuncaví, Región de Valparaíso (tesis de maestría). Universidad de Chile.

63. Puga, S., Sosa, M., Lebgue, T., Quintana, C., y Campos, A. (2006). Contaminación por metales pesados en suelo provocada por la industria minera: Heavy metals pollution in soils damaged by mining industry. *Ecología Aplicada*. 5, 149-155.
64. Quispe, D. y Mamani, M. (2018). La Oca "*Oxalis tuberosa*" y su principal plaga: *Adioristidius tuberculatus* en Puno. *Revista científica de investigaciones ambientales*, 1 (1), 9-18.
65. Rabitsch W. (1995). Metal accumulation in arthropods near a lead/zinc smelter in Arnoldstein, Austria. III. Arachnida. *Environmental Pollution*. 90(2), 249-257.
66. Rajoo, K.S, Ismaili, A., Karam, D. S, Zulkifli, Omar, H., Lim, A. (2017). Heavy metal bioaccumulation in soil arthropods at Malaysian sanitary landfill. *Journal of Environmental Science and Pollution Research*, 3 (1), 160-163.
67. Ramírez-Ardila, T. (2016). Bioacumulación de metales pesados en odonatos de humedales de la Sabana de Bogotá una aproximación a estos como indicadores de contaminación de ecosistemas dulceacuícolas (tesis de licenciatura). Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
68. Rathinasabapathi, B., Rangasamy, M., Froeba, J., Cherry, R., McAuslane, H., Capinera, J., Srivastava, M. y Ma, L. (2007). Arsenic hyperaccumulation in the Chinese brake fern (*Pteris vittata*) deters grasshopper (*Schistocerca americana*) herbivory. *New Phytologist* 175, 363-369.
69. Rebollo-Salinas, D. (2019). Biomagnificación de metales pesados en una cadena trófica en los jales de Huautla, Morelos. (tesis de licenciatura). Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México.

70. Sánchez-Salinas, E., y Ortiz-Hernández, L. (2014). Escenarios sociales y ambientales de la minería a cielo abierto. *Inventio*. 10 (2), 27-34.
71. Santoyo-Martínez, M. (2020). Heavy metal bioaccumulation and morphological changes in *Vachellia campechiana* (Fabaceae) reveal its potential for phytoextraction of Cr, Cu and Pb in mine tailings. *Environmental Science and Pollution Research*, pp 1-19.
72. Santoyo-Martínez, M. (2016). Bioacumulación, daño genotóxico y cambios en la morfología foliar de *Acacia farnesiana* en los jales de Huautla, Morelos. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México.
73. Santoyo-Martínez, M., Mussali-Galante, P., Hernández-Plata, I., Valencia-Cuevas, L., Flores-Morales, A., Ortiz-Hernández, L., Flores-Trujillo, K., Ramos-Quintana, F. y Tovar-Sánchez, E. (2020). Heavy metal bioaccumulation and morphological changes in *Vachellia campechiana* (Fabaceae) reveal its potential for phytoextraction of Cr, Cu and Pb in mine tailings. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 27, 11260-11276.
74. Schowalter, T. (2006). *Insect ecology*. Louisiana: Academic press.
75. Servicio Geológico Mexicana (SGM), 2018. Panorama Minero del Estado de Morelos. Secretaría de Economía. pp. 10.
76. Servicio Geológico Mexicana (SGM). (2008). Monografía Geológica-Minera del Estado de Morelos. Secretaría de Economía. pp 89.
77. Soliman, M., Haggag, A., y El-Shazly, M. (2016). Assessment of grasshopper diversity along a pollution gradient in the Al- Tebbin regions, South Cairo, Egypt. *Journal of entomology and zoology study*, 5 (1), 298-306.

78. Solís, U. (2015). Evaluación de parámetros fisicoquímicos del jal principal de Huautla, Morelos, a través de un gradiente de distancias. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México.
79. Solís-Aguilar, J., Flores-Moreno, D., Díaz-Nájera, J., Tejada-Reyes, M. y Marroquín-Pérez, T. (2015). Extracto de *Tagetes* spp. en el control de *Aphis gossypii* (hemiptera: aphididae) en pepino, en ciudad Ayala, Morelos. *Entomología agrícola*, 2, 451-455.
80. Soto-Jiménez, M. (2011). Trace element trophic transfer in aquatic food webs. *Hidrobiológica*, 21 (3), 239-248.
81. Southwood, T. R. E. (1996). Insect plant relations: overview from the symposium. In proceedings of the 9th international Symposium on insect plant relationships, 80, 320-324.
82. Toledo-Hernández, V., y Corona-López, A. (2009). Comunidad de Buprestidae, Cerambycidae y Cleridae (Coleoptera) de la Reserva de la Biosfera Sierra de Huautla, Morelos, México. En E. Ruíz y J. Coronad. (Ed.), Taller internacional de Recursos naturales pp 78-82. Cd. Victoria, México.
83. Torralba-Burrial, A. (2015). Orden Odonata Idea. Ibero Diversidad Entomológica. Recuperado de http://sea-entomologia.org/IDE@/revista_41.pdf.
84. Torres, K., y Johnson, M. (2001). Bioaccumulation of metals in plants, arthropods, and mice at a seasonal wetland. *Environmental toxicology and chemistry*, 20 (11), 2617-2626.
85. Tovar-Sánchez, E. (1996). Ecología del forrajeo de *Sphenarium purpurascens* (Ortóptera: Acrididae) en la reserva del Pedregal de San Ángel, DF. México. (tesis de licenciatura). Universidad Autónoma de México.

86. Tovar-Sánchez, E. (2009). Canopy arthropods community within and among oak species in central Mexico. *Current Zoology*, 55 (2), 132-144.
87. Ubick D., Paquin P., Cushing P. y Roth V. (2005). Spiders of North America and identification manual. Arachnological Society. Estados Unidos 377 p.
88. Van Straalen, N., y Roelofs, D. (2005). Cadmium tolerance in soil arthropod a model of real-time microevolution. *Entomologische*. 65 (4), 105-111.
89. Vargas-Arellano, C. (2019). Bioacumulación de metales pesados y daño genotóxico en cultivos de traspatio *Zea mays* L. (raza pepitilla) en suelos expuestos a jales mineros, en Huautla, Morelos: bases para generar una propuesta de mitigación. (tesis de maestría). Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México.
90. Velasco J., Rosa D., Solórzano, G., y Volke T. (2004). Primer informe del proyecto: evaluación de tecnologías de remediación para suelos contaminados con metales. Dirección general del centro nacional de investigación y capacitación ambiental. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAT-INE. México. 36 p.
91. Wall, M., y Boyd, R. (2002). Nickel accumulation in serpentine arthropods from the red Hills, California. *Pan-Pacific entomologist*, 78 (3), 168-176.
92. Warchalowska-Sliwa, E. Niklinska, M. Gorlich, A., Michailova, P., y Pyza, E. (2005). Heavy metal accumulation, heat shock protein expression and cytogenetic changes in *Tetrix tenuicornis* (L.) (Tetrigidae, Orthoptera) from polluted areas. *ELSEVIER*, 133 (2), 73-381.
93. Warwick, R., Clarke, K., y Gee, J. (1990). The effect of disturbance by soldier crabs, *Mictyris platycheles* H. Milne Edwards, on meiobenthic community structure. *Journal of experimental marine biology and ecology*, 135 (1), 19-33.

94. Willard H. Hobart, Merrit L. Lynne, Dean A. John, Settle A. Frank. (1991). Métodos Instrumentales de Análisis. Capítulo 9. Espectroscopías de Emisión de Flama y de Absorción. Grupo Editorial Iberoamérica. 219-252.
95. Xiao-qiong, C., Zheng-tian, Z., Ran, L., Xiu-Ling, Z., Jan, C., y Yu, P. (2011). Effects of the metals lead and zinc on the growth, development, and reproduction of *Pardosa astrigera* (Araneae: Lycosidae). *Bulletin of environmental contamination and toxicology*. 86, 203-207.
96. Żmudzki, S., y Laskowski, R. (2012). Biodiversity and structure of spider communities along a metal pollution gradient. *Ecotoxicology*, 21(5), 1523-1532.

Cuernavaca, Mor. a 3 de Noviembre del 2020

DRA. DULCE MARÍA ARIAS ATAIDE
DIRECTORA GENERAL DE SERVICIOS ESCOLARES
P R E S E N T E.

Por este conducto comunico a Usted, que he revisado el documento que presenta la Pasante de Biólogo: **Liliana Sánchez Saldaña**, con el título del trabajo: **Biomagnificación de metales pesados en una cadena trófica a través de un gradiente de contaminación en Huautla Morelos**. Quien optó por la Modalidad de Titulación: **Trabajo de Desarrollo Profesional por Etapas**, como lo marca el Reglamento de Titulación Profesional vigente de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

En calidad de miembro de la comisión revisora, expreso la siguiente decisión:

VOTO A FAVOR: SI () NO ()

A T E N T A M E N T E

DRA. PATRICIA MUSSALI GALANTE



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

PATRICIA MUSSALI GALANTE | Fecha:2020-11-03 12:05:44 | Firmante

ItsNDSeqaVlsm19pkiWshSEh8K0Jitj9smvl6zqlHrbsWAuBNM6G12ISOqCTudLMprNssVsOK4cuNC3EUHCHibhLV2AO2MRNZsG5F5a6qYxzuykutYy7WSXcdFPIwmxYMn2NnpR
VuGkB2+kj++1E2iChvZd3hEPknOJUDMsYGijDdDFs4mbPnpPP3+DurfxoiXejnUpm7c+SWVVGwollDl/1vVwVScdQYpMpu+psidtlPPgBj34Hfyzllv/4PkUvLdix0Gar8DLDepQ13Rub
XVffJ1ID9NLHTqQgkyd1FeB9WUOUfL1NcohgMRI91hVlgU6OHgUYnWRDcU73/7G03r3Q==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[MeuYUy](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/BnUd189aQCIXZ8DziuZ5m9O8eTHsVG3m>





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



FACULTAD
DE CIENCIAS
BIOLÓGICAS

FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

Licenciatura en Biología

Programa Educativo de Calidad *Acreditado* por el CACEB 2018-2023

Cuernavaca, Mor., a 12 de octubre de 2020

DRA. DULCE MARÍA ARIAS ATAIDE
DIRECTORA GENERAL DE SERVICIOS ESCOLARES
P R E S E N T E.

Por este conducto comunico a Usted, que he revisado el documento que presenta la Pasante de Biólogo: **Liliana Sánchez Saldaña**, con el título del trabajo: **Biomagnificación de metales pesados en una cadena trófica a través de un gradiente de contaminación en Huautla Morelos**. Quien optó por la Modalidad de Titulación: **Trabajo de Desarrollo Profesional por Etapas**, como lo marca el Reglamento de Titulación Profesional vigente de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

En calidad de miembro de la comisión revisora, expreso la siguiente decisión:

VOTO A FAVOR: SI (X) NO (___)

A T E N T A M E N T E

DR. EFRAÍN TOVAR SÁNCHEZ



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

EFRAIN TOVAR SANCHEZ | Fecha:2020-10-12 12:41:44 | Firmante

HD1nrmO/e3vfnfb0hh/k7kgk0j7m3A2EIH4IWlnRZJRDIInWFb2TXdp3datfWqAhVCuV817B1MJBw7vatnLXz5a3C3WlbtCpBvZ8R5k1z0M6fbjMeHrveq38y0LfuRNA3unQrJVm
aW2k7IDMnVXNyW1Kqi9gA1hcodL/BiPwAeZpts1eKysV88+mj7x50EINij6lqRGqOOGkPSeglhHhgjERxjaZbf13IKcowYYaZ87XwdpcbSFxGQrY+XGvIF5DuglxOoijjLJLlz/yoy8
bjqjYCH6NSKJ4i5AYe/MbkbWO7SnaGbwDRFDkkG1hhGAjtlAlqdFwXYcY275mKl8gsMg==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[njrmie](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/3QyZGkj3Dh64ahHixckniQFPebTYPCKe>



Cuernavaca, Mor., a 20 de octubre de 2020

DRA. DULCE MARÍA ARIAS ATAIDE
DIRECTORA GENERAL DE SERVICIOS ESCOLARES
P R E S E N T E.

Por este conducto comunico a Usted, que he revisado el documento que presenta la Pasante de Biólogo: **Liliana Sánchez Saldaña**, con el título del trabajo: **Biomagnificación de metales pesados en una cadena trófica a través de un gradiente de contaminación en Huautla Morelos**. Quien optó por la Modalidad de Titulación: **Trabajo de Desarrollo Profesional por Etapas**, como lo marca el Reglamento de Titulación Profesional vigente de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

En calidad de miembro de la comisión revisora, expreso la siguiente decisión:

VOTO A FAVOR: SI (X) NO (____)

ATENTAMENTE



DRA. LETICIA VALENCIA CUEVAS



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

LETICIA ISABEL VALENCIA CUEVAS | Fecha:2020-10-20 10:43:50 | Firmante

pXQW+kHxrvQu6iY90AQ9CsBXU98hiZArpc7zREThX0RzuTJ3bfiv+S3RNOeYMAONDSLUCI72CcZe43nuKzltbJkEA0xiMSIw3tVn0X54P/EfQ9P2dm/I5HNwhzOnNK8BLagTbm
GWkJe9aEBuA3oYu0wHFI55DNFjQbla1Uh11y1po2oXOD10nMGgjXT5AAyW2sPWzqyaQxjcOAvkARLmI2FCnelFJPVHSYFbzXFDaMIkNtuL7rQOOKIzyWMyiT+wmq53P+/y1/
RGsqgUnXQ9KyOtuQefLlIF0aHtuPmXhpXahGgrSFuRF+ZUNaHzKyUynL9V76ErsI/JBxKozqxxQ==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



dc6a2E

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/tpIRCytfR0IYsjIPKNqFLIbU07idjFFS>



Cuernavaca, Mor., 16 de octubre de 2020

DRA. DULCE MARÍA ARIAS ATAIDE
DIRECTORA GENERAL DE SERVICIOS ESCOLARES
P R E S E N T E.

Por este conducto comunico a Usted, que he revisado el documento que presenta la Pasante de Biólogo: **Liliana Sánchez Saldaña**, con el título del trabajo: **Biomagnificación de metales pesados en una cadena trófica a través de un gradiente de contaminación en Huautla Morelos**. Quien optó por la Modalidad de Titulación: **Trabajo de Desarrollo Profesional por Etapas**, como lo marca el Reglamento de Titulación Profesional vigente de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

En calidad de miembro de la comisión revisora, expreso la siguiente decisión:

VOTO A FAVOR: SI (X) NO (____)

A T E N T A M E N T E

DRA. MARÍA LUISA CASTREJÓN GODÍNEZ



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

MARIA LUISA CASTREJON GODINEZ | Fecha:2020-10-17 13:40:46 | Firmante

qbQbl1CY3JuSd0PGcKAYITwk9S1TICKsRI4.Jp9TzkDVQ/ZZBZchvO/OM4CbHEhoWhFHOd65hFmooC+g/f4JE/B3yPjXUBjYDzuYPx/+icj8b2cgcWVvaqjnj/GBsBhs+2sLw6fAJOW
PPhZylmbi7b+/4NqkU+Wnr0y9D1nrgaepEGU694jL6O79PAuPqG907ptw64KxTJSHEn3PBVViG5O/g+B9ediRgVHPToSbyaPwboTpOiq3vHV27n904J0W2lwUINvfGr1bBVyYC1
Mzfk/E441BDA46amFUg8TjBRs0kbtQPHQ4tbBZt4AGewbh1P8l2/1i8vewSMQRRw6kZXg==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[pkCnll](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/NmHNqrlQiZKIZRPvjFtXpBS4irkRLReg>



Cuernavaca, Mor., 12 de octubre de 2020

DRA. DULCE MARÍA ARIAS ATAIDE
DIRECTORA GENERAL DE SERVICIOS ESCOLARES
P R E S E N T E.

Por este conducto comunico a Usted, que he revisado el documento que presenta la Pasante de Biólogo: **Liliana Sánchez Saldaña**, con el título del trabajo: **Biomagnificación de metales pesados en una cadena trófica a través de un gradiente de contaminación en Huautla Morelos**. Quien optó por la Modalidad de Titulación: **Trabajo de Desarrollo Profesional por Etapas**, como lo marca el Reglamento de Titulación Profesional vigente de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

En calidad de miembro de la comisión revisora, expreso la siguiente decisión:

VOTO A FAVOR: SI (**X**) NO ()

ATENTAMENTE



DR. RAMÓN SUÁREZ RODRÍGUEZ



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

RAMON SUAREZ RODRIGUEZ | Fecha:2020-10-12 11:07:30 | Firmante

d4E2uSEj1Y8TQTE2e8aunMm8DisOHKOvNvGHQ++i7jGaGBgE4xrwZw88r5VgylIiCIYALBJRaSgZXDoqGatOEI83UASPBW1rbhyiW+DwUJLH8t2cQGSEQ5xsdDXZC9mJXxM70dlrDpAAqfTO+6tuM2acWL8n/S98g3hrh1bMmF3uEd6ohNNnLQ5K+W4MmxIsx2V2GKjnuvSBhhEpo8P7/o6exAsFMDcSi95MBhZqcoM1JP493E5HlzhsSR0gSt4GB0lpi5PXcf52UGU8ja4nfxCcJEscxQu1W0N9MkBZ2qWt647S7F5Y2GlnFctXjGfAGDq24RvyWxBFwYtAXRBQ==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



6zbW3X

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/zMGcN60gbNn5ObhDi9YoPbrLnbLRTb8X>

