



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
ÁREA ACADÉMICA DE QUÍMICA
DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

**El tecolote llanero (*Athene cunicularia*) como especie
indicadora de contaminación por metales pesados en
la ciudad de Pachuca, Hidalgo.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES

PRESENTA:

Luz Maryev Fonseca Contreras

DIRECTORAS:

Dra. Yolanda Marmolejo Santillán

Dra. Iriana Leticia Zuria Jordan

Mineral de la Reforma, Hidalgo. Agosto, 2018.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
Institute of Basic Sciences and Engineering
Dirección
Dean

Mineral de la Reforma, Hgo., a 6 de agosto de 2018

Número de control: ICBI-D/675/2018
Asunto: Autorización de impresión de tesis.

M. EN C. JULIO CÉSAR LEINES MEDÉCIGO
DIRECTOR DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR

Por este conducto le comunico que el comité revisor asignado a la C. Luz Maryev Fonseca Contreras, alumna del Doctorado en Ciencias Ambientales con número de cuenta 320392, autoriza la impresión del proyecto de tesis titulado "El tecolote llanero (*Athene cunicularia*) como especie indicadora de contaminación por metales pesados en la ciudad de Pachuca, Hidalgo" en virtud de que se han efectuado las revisiones y correcciones pertinentes.

A continuación se registran las firmas de conformidad de los integrantes del comité revisor.

PRESIDENTE	Dra. Francisco Prieto García
SECRETARIO	Dra. Iriana Leticia Zuria Jordán
VOCAL	Dr. Yolanda Marmolejo Santillán
SUPLENTE	Dr. Claudia Romo Gómez

Sin otro particular reitero a Usted la seguridad de mi atenta consideración.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Dr. Óscar Rodolfo Suárez Castillo
Director del ICBI



ORSC/BMM



Ciudad del Conocimiento
Carretera Pachuca - Tulancingo km. 4.5
Colonia Carboneras
Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, C.P. 42184
Tel. +52 771 7172000 exts 2231, Fax 2109
direccion_icbi@uaeh.edu.mx

www.uaeh.edu.mx

AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, representada por el rector, Mtro. Adolfo Pontigo Loyola.

- A los miembros del comité tutorial:

Dra. Yolanda Marmolejo Santillán, Directora de tesis.

Estoy muy agradecida de que haya aceptado ser mi directora de tesis, me siento muy afortunada de haber conocido a tan excelente ser humano, no tengo como pagar todo el apoyo, tiempo, conocimiento, consejos y observaciones recibidos en la realización de este proyecto.

- Dra. Iriana Zuria, Directora de Tesis

Gracias por sus acertadas observaciones y por sus comentarios constructivos que ayudaron a mejorar este trabajo. La admiro mucho y considero que es una persona que motiva mucho, la pasión que muestra por la vida, la naturaleza y el ambiente incitan a querer ser mejores.

- Dr. Francisco Prieto García.

Gracias por su tiempo y apoyo durante los seminarios y evaluaciones, cada sugerencia y comentario fue muy importante para el mejoramiento del presente proyecto.

- Dra. Claudia Romo Gómez

Gracias por su apoyo y por compartir sus saberes en el laboratorio, fue parte primordial del desarrollo del presente proyecto.

- Dr. Fidel Pérez Moreno

Gracias por que a pesar de no ser parte del comité, me brindó su apoyo, conocimiento y múltiples saberes, no tengo palabras para expresarle mi gratitud, sus conocimientos permitieron que este proyecto pudiera ser, lo admiro mucho por su humildad y calidad humana.

A todas las personas que de alguna forma ayudaron en la consecución de este trabajo, muchas gracias.



Por el apoyo económico otorgado por el CONACYT como estudiante del Doctorado en Ciencias Ambientales, perteneciente al Programa Nacional de Posgrado de Calidad con registro del PNPC CONACYT 00312.

DEDICATORIAS

A mis perdedores:

Roberto, en la vida hay que tomar muchas decisiones y comenzar una familia contigo es la mejor que pude haber tomado, gracias por tu apoyo, cariño y por estar siempre dispuesto a todo por hacernos felices, te amo.

Emiliano (Cachito), Aún eres chiquito, pero en este proyecto y en mi vida, eres la motivación más grande, gracias por tantas lecciones de vida.

A mis padres:

Gracias por su amor, paciencia y confianza. Gracias por que aún en la distancia sé que cuento con ustedes incondicionalmente.

A mis hermanos:

He aprendido mucho de los tres y conforme pasa el tiempo la vida me hace valorarlos más y más, me hacen muy feliz y estoy agradecida porque me tocaron mis mejores amigos como hermanos, los quiero mucho y les agradezco cada llamada, consejo y mensaje de ánimo, me ayudan mucho a seguir con la mejor actitud cada día.

A Janice:

Gracias por tanto, te convertiste en mi mejor amiga, gracias por permitirme entrar en tu vida y en tu familia, eres parte esencial en el desarrollo de este proyecto, te quiero mucho.

A mis compañeros y amigos del doctorado y laboratorio:

Gracias por su amistad, por los momentos y emociones compartidos y por sus palabras que me infundieron ánimo y me ayudaron a perseverar.

ARTÍCULO

Cadmio en tejidos, plumas y egagrópilas de tecolote llanero de Hidalgo, México

Maryev Fonseca, Yolanda Marmolejo, Iriana Zuria, Francisco Prieto, Fidel Pérez y Claudia Romo
Área Académica de Química - Centro de Investigaciones Biológicas
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo,
Pachuca, Hgo.; México
yolandam@uaeh.edu.mx, izuria@uaeh.edu.mx



Cadmio en tejidos, plumas y egagrópilas de tecolote llanero de Hidalgo, México.

Fonseca, M., Marmolejo, Y., Zuria, I., Prieto, F., Pérez, F. & Romo, C.

Revista: Revista Iberoamericana de ciencia (REICBI), 2017. 144–153, Vol. 4. No. 6, ISSN 2334-2501.

Publicado: Diciembre de 2017.

CONGRESOS

- XIV Congreso internacional y XX Congreso nacional de la Academia Nacional de Ciencias Ambientales, Junio, 2015. Puebla, México.



- XV Congreso internacional y XXI Congreso nacional de la Academia Nacional de Ciencias Ambientales, Junio 2016. Oaxaca, México.



- XVI Congreso internacional y XXII Congreso nacional de la Academia Nacional de Ciencias Ambientales, Junio 2017. Chetumal, Qroo., México.



- VI Congreso Iberoamericano de Química Analítica y Encuentro Nacional de la Academia Nacional de Química Ambiental (CIAQA), Noviembre 2016. Cancún, Qroo., México.



- II Congreso Nacional de Fauna Nativa En Ambientes Antropizados (REFAMA),
Octubre, 2016. Querétaro, México.



ÍNDICE GENERAL

I. RESUMEN.....	1
II. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	2
III. ANTECEDENTES.....	4
1. Metales	4
2. Bioindicadores y biomarcadores	10
3. Aves como bioindicadores de contaminación por metales.....	11
4. <i>Athene cunicularia</i> como especie indicadora de contaminación por metales	12
5. Plumas como unidades indicadoras de contaminación por metales.....	15
6. Egagrópilas como indicadoras de contaminación por metales	16
IV. OBJETIVO GENERAL	17
V. METODOLOGÍA GENERAL.....	18
1. Colectas	18
2. pH del suelo	20
3. Preparación de las plumas	20
4. Preparación de las egagrópilas.....	21
5. Digestión ácida.....	22
6. Lectura de metales.....	23
VI. CAPÍTULO I- Plumas y egagrópilas de <i>Athene cunicularia</i> como unidades indicadoras de metales pesados en Pachuca, Hidalgo. (Análisis espacial)	25
1. INTRODUCCIÓN	25
2. METODOLOGÍA	26
3. RESULTADOS.....	29
4. DISCUSIÓN	33
5. CONCLUSIÓN	38
VII. CAPÍTULO 2. Egagrópilas de <i>Athene cunicularia</i> como unidades biomonitoras de metales pesados en el área urbana de Pachuca, Hidalgo. (Análisis temporal)	40
1. INTRODUCCIÓN	40
2. METODOLOGÍA	41
3. RESULTADOS.....	43
4. DISCUSIÓN	50
5. CONCLUSIÓN	55
VIII. CAPÍTULO III- Tecolote llanero como indicador de cadmio, en Tecocomulco, Hidalgo, México. (Dinámica en <i>Athene cunicularia</i>).....	56

1.	INTRODUCCIÓN	56
2.	METODOLOGÍA	58
3.	RESULTADOS	60
4.	DISCUSIÓN	62
5.	CONCLUSIONES	65
IX.	CONCLUSIÓN GENERAL	67
X.	REFERENCIAS	68
XI.	ANEXOS	79

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Individuo de <i>Athene cunicularia</i> en Pachuca, Hidalgo.	12
Ilustración 2. Distribución de <i>Athene cunicularia</i> en América (Poulin et al., 2011).....	13
Ilustración 3. Metodología para análisis de plumas (Fuente: Dauwe et al., 2003)	15
Ilustración 4. Colecta de suelo plumas y egagrópilas en madriguera de <i>Athene cunicularia</i>	18
Ilustración 5. Egagrópilas y plumas de <i>Athene cunicularia</i>	19
Ilustración 6. Tejidos de <i>Athene cunicularia</i> considerados para análisis	20
Ilustración 7. Segmentación de la pluma para su análisis	21
Ilustración 8. Separación de la egagrópila para obtención de restos de artrópodos pelo y hueso	21
Ilustración 9. Digestión ácida en horno de microondas MARSX	22
Ilustración 10. Espectrómetro de plasma (ICP), Perkin Elmer, Mod. Optima 8300, USA. 23	
Ilustración 11. Ubicación de las áreas de estudio y posibles fuentes de metales.....	27
Ilustración 12. Individuos de <i>Athene cunicularia</i> en las áreas de estudio.....	28
Ilustración 13. Área de colecta de egagrópilas (Biblioteca central, Ricardo Garibay)	42
Ilustración 14. Madriguera de <i>Athene cunicularia</i> en biblioteca Ricardo Garibay (Fotografía. Olivares, 2013).....	42
Ilustración 15. Relación entre el año (2013-2017) y la concentración (mg Kg ⁻¹) de cadmio para artrópodos, hueso y pelo contenidos en egagrópilas de <i>Athene cunicularia</i> de una zona urbana de la ciudad de Pachuca, Hidalgo.	48
Ilustración 16. Relación entre el año (2013-2017) y la concentración (mg Kg ⁻¹) de cromo para artrópodos, hueso y pelo contenidos en egagrópilas de <i>Athene cunicularia</i> de una zona urbana de la ciudad de Pachuca, Hidalgo.....	48

Ilustración 17. Relación entre el año (2013-2017) y la concentración (mg Kg-1) de manganeso para artrópodos, hueso y pelo contenidos en egagrópilas de <i>Athene cunicularia</i> de una zona urbana de la ciudad de Pachuca, Hidalgo.	48
Ilustración 18. Relación entre el año (2013-2017) y la concentración (mg Kg-1) de cobre para artrópodos, hueso y pelo contenidos en egagrópilas de <i>Athene cunicularia</i> de una zona urbana de la ciudad de Pachuca, Hidalgo.....	49
Ilustración 19. Relación entre el año (2013-2017) y la concentración (mg Kg-1) de zinc para artrópodos, hueso y pelo contenidos en egagrópilas de <i>Athene cunicularia</i> de una zona urbana de la ciudad de Pachuca, Hidalgo.....	49
Ilustración 20. Relación entre el año (2013-2017) y la concentración (mg Kg-1) de estroncio para artrópodos, hueso y pelo contenidos en egagrópilas de <i>Athene cunicularia</i> de una zona urbana de la ciudad de Pachuca, Hidalgo.	49
Ilustración 21. Separación y fragmentación de plumas del tecolote llanero para su posterior análisis (de acuerdo a Dauwe et al., 2003).....	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ubicación geográfica de los sitios de muestreo. (Abreviatura del sitio)	26
Tabla 2. pH del suelo de los sitios de muestreo y concentración de cadmio, manganeso y estroncio en suelo.....	30
Tabla 3. Modelos ANOVA significativos.....	32
Tabla 4. Concentración de metales (media \pm E. S; peso seco en mg Kg-1) en restos de artrópodos, hueso y pelo de roedor contenidos en egagrópilas de <i>Athene cunicularia</i> , en la ciudad de Pachuca Hidalgo, durante un periodo de 2013- 2017	47
Tabla 5. Modelo de regresión lineal, relación entre año y concentración de metales.....	48
Tabla 6. Concentraciones promedio de Cd en suelo, plumas y egagrópilas	61
Tabla 7. Concentraciones promedio de Cd en plumas.....	62

ÍNDICE DE GRÁFICAS

- Gráfica 1.** Contenido de cadmio (mg Kg-1) por tipo de muestra (artrópodo, pelo, hueso y pluma) en los sitios de muestreo..... 31
- Gráfica 2.** Contenido de manganeso (mg Kg-1) por tipo de muestra (artrópodo, pelo, hueso y pluma) en los sitios de muestreo..... 31
- Gráfica 3.** Contenido de estroncio (mg Kg-1) por tipo de muestra (artrópodo, pelo, hueso y pluma) en los sitios de muestreo..... 32
- Gráfica 4.** Niveles de cadmio en restos de artrópodos, hueso y pelo de roedor contenidos en egagrópilas de *Athene cunicularia* del área urbana de Pachuca Hidalgo 44
- Gráfica 5.** Niveles de cromo, en restos de artrópodos, hueso y pelo de roedor contenidos en egagrópilas de *Athene cunicularia* del área urbana de Pachuca Hidalgo 44
- Gráfica 6.** Niveles de cobre en restos de artrópodos, hueso y pelo de roedor contenidos en egagrópilas de *Athene cunicularia* del área urbana de Pachuca Hidalgo 45
- Gráfica 7.** Niveles de cobre en restos de artrópodos, hueso y pelo de roedor contenidos en egagrópilas de *Athene cunicularia* del área urbana de Pachuca Hidalgo 45
- Gráfica 8.** Niveles de zinc en restos de artrópodos, hueso y pelo de roedor contenidos en egagrópilas de *Athene cunicularia* del área urbana de Pachuca Hidalgo 46
- Gráfica 9.** Niveles de estroncio en restos de artrópodos, hueso y pelo de roedor contenidos en egagrópilas de *Athene cunicularia* del área urbana de Pachuca Hidalgo 46

I. RESUMEN

El presente escrito se estructuró en tres capítulos. En el capítulo 1 se realizó un análisis comparativo entre cuatro diferentes zonas de anidación de *Athene cunicularia* dentro de la ciudad de Pachuca. Se analizaron muestras de suelo de las madrigueras, así como plumas y contenidos de egagrópilas por espectroscopia de emisión de plasma acoplado inductivamente (ICP). Los metales que se consideraron en este apartado fueron cadmio, manganeso y estroncio. Los tres estuvieron presentes en todas las muestras; el estroncio mostro una alta afinidad a acumularse en hueso; Las muestras de artrópodos presentaron diferencias significativas entre sitios para los tres metales (Cd, Mn y Sr). No se observó mayor acumulación de metales para algún sitio en particular. En el capítulo 2 se realizó un análisis temporal donde se presentan datos de metales en contenidos de egagrópilas colectadas durante 5 años (2013-2017), en una zona urbana de la ciudad de Pachuca. Los metales considerados en este apartado son cadmio, cobre, cromo, manganeso, zinc y estroncio. Los metales estuvieron presentes en todas las muestras y no se observó una tendencia en el tiempo, sin embargo, durante el 2016 la concentración de metales descendió. Se presentó un patrón en cuanto a concentración por metal ($Cu > Sr > Zn > Mn > Cd > Cr$). El Sr y Zn presentaron una mayor acumulación en el tejido óseo, mientras que el Cu estuvo más concentrado en restos de artrópodos. Finalmente, en el capítulo 3 se analizó la dinámica del cadmio en un individuo de *Athene cunicularia* proveniente de Tecocomulco, Hidalgo. Se verificó la presencia de cadmio en suelo, plumas y egagrópilas del individuo, con la finalidad de utilizar estos materiales como indicadores de contaminación y evitar el futuro sacrificio de organismos y obtención de datos confiables. Para llevarlo a cabo, se obtuvieron tejidos internos de tecolote llanero y se compararon con el resto de las muestras. Se confirmó la contaminación por cadmio en suelo del sitio de muestreo, así como su incorporación a diferentes niveles tróficos.

Las plumas y egagrópilas demostraron ser unidades indicadoras no invasivas y eficaces, para confirmar la presencia e incorporación de metales pesados en la fauna de la ciudad de Pachuca, sin necesidad de sacrificar o manipular organismos.

II. INTRODUCCIÓN GENERAL

Los metales pesados son aquellos cuya densidad en forma elemental es igual o superior a 5 g/cm³ o que tienen un número atómico mayor a 20, se han agrupado en oligoelementos o micronutrientes, también denominados *elementos traza*, los cuales son necesarios en pequeñas cantidades para el organismo, ya que intervienen en algunas funciones bioquímicas (Amador *et al.*, 2015).

La presencia de contaminantes, como son los metales pesados, representa grandes riesgos para los organismos vivos incluyendo los humanos (Veerle *et al.*, 2004). De acuerdo con Market *et al.*, (2003) los bioindicadores y biomonitores han demostrado ser excelentes herramientas al momento de evaluar la calidad ambiental, así como, contaminación por diversas sustancias, incluyendo metales pesados. Algunos organismos, han sido usados como bioindicadores, entre ellos las aves han sido de los grupos más utilizados, debido a que presentan características como, por ejemplo: son conspicuas, relativamente fáciles de observar, uno de los grupos de organismos mejor estudiados y particularmente las aves rapaces tienden a acumular sustancias químicas tóxicas, por lo que a menudo han sido en el pasado una advertencia temprana de cambio (Becker, 2003).

El tecolote llanero (*Athene cunicularia*) es un ave rapaz de áreas abiertas, con amplia distribución en América, ya que habita en el oeste de Canadá, el oeste de los Estados Unidos, México, América Central y América del Sur (Pairo *et al.*, 2017). Construye sus nidos a nivel de suelo y de acuerdo con Holroyd *et al.*, (2001) la especie está listada como en peligro de extinción en Canadá, Amenazada en México y como Ave de Conservación Nacional y Regional en los Estados Unidos. Es una especie generalistas y se alimentan de una gran variedad de presas. Cuantitativamente, los artrópodos dominan (80% -90%) la dieta, mientras que los mamíferos pequeños tienden a dominar la biomasa consumida (Poulin y Todd, 2006). *Athene cunicularia* ha sido observada con frecuencia durante los últimos años en la ciudad de Pachuca, Hidalgo (Olivares, 2014).

La ciudad de Pachuca se localiza en un distrito minero, por lo que tiene jales (residuos de mina) que resultaron de la acumulación de más de 200 años de extracción de oro y plata; aunado a esto, las condiciones meteorológicas favorecen la dispersión de partículas de dichos jales (Hernández *et al.*, 2009). En la ciudad de Pachuca se ha reportado un incremento anual en la urbanización de 2.89% (Hernández *et al.*, 2017); así como un crecimiento de la

población en los últimos años del 68 % (INEGI, 2010). Debido a la actual problemática de la ciudad derivada de las actividades antropogénicas antes mencionadas, surge interés por conocer el estado y calidad del ambiente; y por las características que presenta *Athene cunicularia*, se utilizó a esta especie, como indicadora de contaminación por metales pesados.

III. ANTECEDENTES

1. Metales

Los metales pesados son elementos naturales que tienen un alto peso atómico y una densidad al menos 5 veces mayor que la del agua. Sus múltiples aplicaciones industriales, domésticas, agrícolas, médicas y tecnológicas han llevado a su amplia distribución en el medio ambiente; suscitando preocupaciones sobre sus efectos potenciales en la salud humana y el medio ambiente (Gunnar, 2012). Su toxicidad depende de varios factores, incluyendo la dosis, la ruta de exposición y las especies químicas, así como la edad, el género, la genética y el estado nutricional de los individuos expuestos (Tchonwou *et al.*, 2012).

a) Cadmio

Generalidades

El cadmio (Cd) es particularmente importante ya que es la séptima sustancia peligrosa de mayor prioridad según la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR, 2007). El cadmio reúne cuatro de las características más temidas de un tóxico: efectos adversos para el hombre y el medio ambiente, bioacumulable, persistente en el medio ambiente y “viaja” grandes distancias con el viento y en los cursos de agua. (Ramírez, 2002). El cadmio es un elemento metálico perteneciente al grupo 12 de la Tabla Periódica (número atómico: 48, y masa atómica relativa: 112.41). En su forma elemental, es un metal blando y plateado, no suele estar presente en el medio ambiente como un metal puro, rara vez está presente en grandes cantidades como cloruros y sulfatos (ATSDR, 2007).

Fuentes

El cadmio es un elemento con una distribución media de 0.1 mg kg⁻¹ en la corteza, se encuentra generalmente asociado con el zinc y se produce naturalmente en el sistema. Concentraciones particularmente altas proceden de suelos y rocas, carbón y algunos fertilizantes minerales. El cadmio está ampliamente disperso en el medio ambiente y aumenta

con las actividades humanas como la minería, fundición, combustión de combustibles fósiles y el uso industrial. (Nordberg *et al.*, 2002)

De acuerdo con Ramírez (2002), los principales usos y aplicaciones del cadmio o sus compuestos son: como pigmento en pinturas, esmaltes, plásticos, textiles, vidrios, tintas de impresión, caucho, lacas, etc., en aleación con cobre, aluminio y plata, en la producción de pilas de cadmio-níquel, como estabilizador de termoplásticos como el PVC, en fotografía, litografía y procesos de grabado, como “endurecedor” de ruedas y llantas de automóvil, en fabricación de foto-conductores y células solares fotoeléctricas, el electroplatinado, en fabricación de “controles” de reactores nucleares.

Toxicología

El cadmio puede causar efectos sobre la salud tanto a corto y largo plazo. Se han realizado estudios epidemiológicos sobre efectos adversos y se registró un aumento en concentraciones de cadmio durante los últimos años. Es un metal que se acumula en el cuerpo con la edad y tiene una vida media biológica extremadamente larga (ATSDR, 2016). La principal vía de entrada a los individuos es la respiratoria, y no se sabe que el contacto con la piel o la exposición al Cd a través de la piel cause problemas de salud efectos en seres humanos o animales. Se han descrito efectos debidos a la exposición al Cd como daño pulmonar, efectos óseos, disfunción hepática y anomalías en la reproducción (Nordberg *et al.*, 2002).

Yamamoto *et al.*, (2012) reportan que el cadmio puede atravesar la barrera placentaria provocando efectos a nivel embrionario, principalmente en tubo neural, somitas, hígado y en el desarrollo del sistema reproductivo.

b) Cobre

Generalidades

El cobre es un metal de transición perteneciente al grupo 11 de la tabla periódica (número atómico: 29, y masa atómica relativa: 63. 546), su símbolo es Cu, es maleable y dúctil, un

excelente conductor del calor y la electricidad, el cobre es un elemento esencial del metabolismo humano (Gunnar, 2012).

Fuentes

El cobre es un metal rojizo que se produce naturalmente en la roca, el suelo, el agua, los sedimentos y, a niveles bajos, aire. Su concentración media en la corteza terrestre es de alrededor de 50 ppm). El cobre también ocurre naturalmente en todas las plantas y animales. Es un elemento esencial para todos los organismos vivos conocidos, incluidos los seres humanos y otros (ATSDR, 2004).

El cobre metálico puede ser usado en cableado eléctrico y algunas tuberías de agua, se encuentra en muchas mezclas de metales, llamados aleaciones, tales como latón y bronce (ATSDR, 2004).

Toxicología

Cuando se ingiere sulfato de cobre, también conocido como piedra azul o azul vitriolo, se producen náuseas, vómitos, diarrea, sudoración, hemólisis intravascular y posible fallo renal; en raras ocasiones, se observan también convulsiones, coma y la muerte. Cuando se beben aguas carbonatadas o zumos de cítricos que han estado en contacto con recipientes, cañerías, grifos o válvulas de cobre se puede producir irritación del tracto gastrointestinal, que pocas veces llega a ser grave (Gunnar, 2012).

c) Cromo

Generalidades

El cromo es un elemento químico de número atómico 24 que se encuentra en el grupo 6 de la tabla periódica de los elementos y con una masa atómica relativa de 51.996. Su símbolo es Cr, El cromo elemental (Cr) no se encuentra como tal en la naturaleza; el único mineral de cromo importante es la espinela, cromita o piedra de cromo hierro, que es cromito ferroso (FeOCr_2O_3) y está ampliamente distribuida en la corteza terrestre (Gunnar, 2012). El cromo abunda en la corteza terrestre y exhibe varios estados de oxidación (0, +2, +3, y +6), siendo los de mayor relevancia el de forma trivalente (Cr III) y el de forma hexavalente (Cr VI) (Becerra *et al.*, 2014).

Fuentes

La cromita puede obtenerse de minas subterráneas o a cielo abierto. La aplicación más importante del cromo puro es el cromado de una gran variedad de equipos, como piezas de automóvil y equipos eléctricos. También es ampliamente utilizado en aleaciones con hierro y níquel para formar acero inoxidable, y con níquel, titanio, niobio, cobalto, cobre y otros metales para formar aleaciones con fines específicos (Gunnar, 2012).

Toxicología

El cromo es uno de los contaminantes ambientales más importantes, pues promueve una amplia variedad de manifestaciones de toxicidad (Becerra *et al.*, 2014). Los compuestos con cromo en estado de oxidación CrIII son considerablemente menos peligrosos que los compuestos de CrVI, los compuestos de CrIII no producen ulceraciones ni suelen producir dermatitis alérgicas; entre las afectaciones más frecuentes por CrVI son, efectos respiratorios agudos, irritación de mucosas, dermatitis, úlceras, necrosis renal y hepática y en casos más severos cáncer, principalmente de pulmón (Gunnar, 2012).

d) Estroncio

Generalidades

El estroncio es un elemento químico de la tabla periódica cuyo símbolo es Sr y su número atómico es 38 y con una masa atómica relativa de 87.62. De acuerdo con el Servicio Geológico Mexicano (SGM), (2017), México es el tercer productor de estroncio a nivel mundial. El estroncio se encuentra en la lista de sustancias peligrosas de la HHAG.

Fuentes

El estroncio es un metal blanco plateado usado en fuegos artificiales, bengalas rojas para señales y balas trazadoras. Se agrega a aleaciones de estaño y plomo para aumentar la dureza y estabilidad, se le utiliza como fuente de energía eléctrica; el estroncio puede ser radioactivo (CCESH, 1998).

Toxicología

Su importancia toxicológica radica en que suele tomar el lugar del calcio durante el desarrollo y formación del hueso (Nielsen, 2004). Uno de los mayores problemas asociados a la amplia persistencia de estos elementos, es el potencial de bioacumulación y biomagnificación a lo largo de la cadena alimenticia (Stankovic y Stankovic, 2013). Se han hecho estudios que demuestran que la exposición a una alta concentración de estroncio está asociada al Parkinson (Sun, 2017).

e) Manganeseo

Generalidades

El manganeseo es un elemento químico de número atómico 25 situado en el grupo 7 de la tabla periódica de los elementos y se simboliza como Mn, se encuentra como elemento libre en la naturaleza, a menudo en combinación con el hierro y en muchos minerales. Concentraciones de manganeseo en el aire son de aproximadamente 5 ng/m³ en zonas no industrializadas y pueden incrementarse a aproximadamente 33 ng/m³ en zonas industrializadas, y en áreas industriales cerradas, la relación manganeseo-aire puede ser de 0.13 µg/m³ o más (WHO, 1996).

Fuentes

El manganeseo se utiliza en la producción del acero como reactivo para reducir el oxígeno y el azufre, y como agente de aleación para la fabricación de aceros especiales, aluminio y cobre. En la industria química se utiliza como agente oxidante y para la producción de permanganato de potasio y otros productos químicos derivados del manganeseo. Además, se utiliza como recubrimiento de electrodos en varillas de soldadura, en los trituradores de rocas y en las agujas y cambios de vía de los ferrocarriles. También se emplea en la fabricación de cerámica, cerillas, vidrio y tintes. Algunas sales de manganeseo se utilizan como fertilizantes y como secantes para el aceite de linaza, en la fabricación de vidrio, como decolorantes de textiles y en el curtido de pieles, el MMT (Metil Manganeseo Tricarbonil) se ha utilizado como inhibidor de humos y antidetonante en gasolinas (Gunnar, 2012).

Toxicología

Ciertos individuos expuestos a niveles de manganeso muy altos por largo tiempo en el trabajo sufrieron perturbaciones mentales y emocionales y exhibieron movimientos lentos y faltos de coordinación, esta combinación de síntomas constituye una enfermedad llamada “manganismo”. El manganismo ocurre debido a que demasiado manganeso se acumula en el área del cerebro encargada de controlar los movimientos. La exposición a altos niveles de manganeso en el aire, como puede ocurrir en una fundición de manganeso o una planta de baterías, puede afectar la habilidad motora tal como mantener una mano inmóvil o la ejecución de movimientos rápidos (ATSDR, 2001).

f) Plomo

Generalidades

El plomo pertenece al grupo 14 de la tabla periódica, su número atómico es el 82 y tiene una masa atómica de 207, presenta dos estados de oxidación (+2 y +4) y cuatro isotopos (204Pb, 206 Pb, 207 Pb and 208 Pb), de los cuales el 208 es el más abundante con el 52% del total.

Fuentes

Los compuestos de plomo se utilizan como pigmento en pinturas, tintes y esmaltes cerámicos. La cantidad de plomo utilizado en estos productos se ha reducido en los últimos años por ser perjudiciales para las personas y los animales. El tetraetilo de plomo y el tetrametil-plomo se utilizaron en los Estados Unidos como aditivos de gasolina para aumentar el octanaje de la gasolina, actualmente se sigue utilizando en la gasolina para vehículos todoterreno y aviones. El plomo también se utiliza en municiones para armas y en baterías (ATSDR, 2007).

Toxicología

Los efectos del plomo son los mismos ya sea si entra al cuerpo a través de la inhalación o por medio de la ingestión. El plomo puede producir un menor desempeño en pruebas aplicadas a adultos para medir el funcionamiento del sistema nervioso, también puede provocar aumento de la presión arterial e incluso causar anemia. La exposición a altos niveles de plomo puede dañar seriamente el cerebro, los riñones, producir un aborto espontáneo y finalmente causar la muerte (ATSDR, 2007).

g) Zinc

Generalidades

El zinc (Zn) pertenece al grupo 2 de la tabla periódica, con 30 como número atómico y masa atómica de 65.38, se encuentra ampliamente distribuido en la naturaleza y constituye aproximadamente un 0,02 % de la corteza terrestre, es el elemento número 24 más abundante en la tierra (70 mg Kg⁻¹). Adopta la forma de sulfuro (esfalerita), carbonato, óxido o silicato (calamina) de zinc, combinado con muchos minerales. El Zn ocupa el cuarto lugar a nivel mundial en cuanto a consumo (Bradl, 2005).

Fuentes

En agricultura el zinc es una importante fuente de micronutrientes, un preservativo de la madera y un insecticida, se encuentra como producto de la minería y la fundición de metales. Los fertilizantes más comunes a base zinc son algunos complejos de amonio. Se ha demostrado que el zinc es el metal más disponible en suelos tratados con aguas negras (Gunnar, 2012).

Toxicología

En la metalurgia y la producción de zinc, las operaciones de soldadura y corte de metales galvanizados o zincados, o las operaciones de fundición y soldadura del latón o el bronce, el riesgo más frecuente derivado del zinc y sus compuestos es la exposición a los humos de óxido de zinc, que puede causar la fiebre de los humos metálicos. Los síntomas de este trastorno son: ataques de escalofríos, fiebre irregular, sudoración profusa, náuseas, sed, cefalea, dolores en las extremidades y sensación de extremo cansancio, las crisis son de corta duración y parece que se desarrolla tolerancia, los humos de cloruro de zinc son irritantes para los ojos y las mucosas además se han presentado efectos cutáneos (Bradl, 2005).

2. Bioindicadores y biomarcadores

Los bioindicadores incluyen procesos biológicos, especies, partes de ellas o comunidades y se utilizan para evaluar la calidad del medio ambiente y cómo este cambia con el tiempo. El

desarrollo generalizado y uso de bioindicadores han incrementado desde los años sesenta. A lo largo de los años, se ha ampliado el repertorio de bioindicadores para estudiar todo tipo de ambientes, utilizando todos los grupos taxonómicos (Stankovic y Stankovic, 2013). Es necesario destacar algunas definiciones con la finalidad de tener claro qué herramienta usar en estudios de bioindicación y biomonitoreo. Bioindicador, es un organismo (o parte de un organismo o comunidad de organismos) que contiene información de la calidad del ambiente. El biomonitor aporta información de los aspectos cuantitativos de la calidad del ambiente, éstos nos pueden dar un panorama de ciertos sucesos, como biomagnificación (Market *et al.*, 2003). Lodenius y Solonen, (2013) reportan que el termino biogmanificación se refiere a un incremento progresivo de algún contaminante en los niveles sucesivos de la cadena trófica, eso se refiere a la diferencia que existe en la concentración en los tejidos entre el depredador y la presa.

De acuerdo con Holt y Miller, (2010) algunas de las características con las que debe contar un indicador son: proveer respuestas medibles (sensible al estrés o alteración pero no presenta mortalidad, o acumula contaminantes directamente del ambiente); reflejar una respuesta del conjunto, población, ecosistema; responder en proporción al grado de degradación o contaminación; adecuado a la densidad de la población actual; comúnmente, incluye su distribución dentro del área de estudio; relativamente estable a pesar de la variabilidad climática y medioambiental moderada; ecología, taxonomía e historia de vida bien estudiados.

3. Aves como bioindicadores de contaminación por metales

Algunos grupos de aves son frecuentemente reportados en la literatura cuando se habla de bioindicadores y metales pesados, en particular las aves rapaces y las acuáticas debido a su jerarquía dentro de la red trófica (Burger y Gochfeld 2001). De acuerdo con Becker (2003) las aves presentan ciertas ventajas que permiten usarlas como indicadores biológicos:

- Las aves son fáciles de identificar y las sistemática y clasificación están bien establecidas.
- La biología general y ecología es bien conocida y hay aves que ocupan diferentes posiciones dentro de la cadena trófica.

- El muestreo de tejidos es relativamente fácil, además de brindar técnicas no invasivas en el caso de especies protegidas o amenazadas.

Lodenus y Solonen, (2013) reportan que la exposición a metales pesados y contaminantes orgánicos es usualmente mayor en la cima de las cadenas tróficas, a este nivel pertenecen especies depredadoras, por lo tanto, las aves de presa, son exitosamente propuestas para monitoreo (Lodenus y Solonen, 2013). La concentración de metales en las aves se puede evaluar en diferentes tipos de muestras, sin embargo los análisis de metales en huevo, sangre, plumas, riñón e hígado dominan la literatura. Las muestras como plumas o huevos son fáciles de coleccionar, lo que implica bajo costo de muestreo y la técnica de muestreo es no destructiva y no invasiva (Stankovic y Stankovic, 2013).

4. *Athene cunicularia* como especie indicadora de contaminación por metales

Tecolote llanero (*Athene cunicularia*)

Familia: Strigidae

Orden: Strigiformes

Clase: Aves



Ilustración 1. Individuo de *Athene cunicularia* en Pachuca, Hidalgo.

a) Características

Pequeño búho que habita en el suelo, presenta una longitud total 19-25 cm, sus patas son largas y escasamente emplumadas por debajo de la articulación tibiotarsal. Tiene cabeza redonda, iris generalmente brillante, amarillo limón, las alas son relativamente largas y redondeadas, con 10 plumas primarias barradas de color marrón y blanquecino (3 más externas con las redes internas sinuadas). La cola es corta con 12 rectrices barradas de color marrón y blanquecino, dorso marrón, resto de las partes inferiores de los adultos blanquecino con barras marrón en ambos lados (Hailey, 2011). En Canadá *Athene cunicularia* es considerada como amenazada, en Estados Unidos, como una especie en alguna categoría de riesgo y en México está sujeta a protección especial (Poulin *et al.*, 2011).

b) Distribución

En el Norte de América, se encuentra desde el sur de Canadá hasta Panamá. Sin embargo, no siempre. En verano, se localizan desde el sur de Canadá, hasta el altiplano de México (Ilustración 2). Pasan el invierno desde el centro sur de México hasta Panamá (Poulin *et al.*, 2011).



Ilustración 2. Distribución de *Athene cunicularia* en América (Poulin *et al.*, 2011)

c) Ecología

Habitán áreas con vegetación corta como praderas de césped corto bien drenadas, pastizales e incluso desiertos; también viven en ambientes modificados como las zonas agrícolas y suburbanas. Algunos tecolotes llaneros dependen de la disponibilidad de una madriguera vacía, mientras que otros son capaces de cavar sus propias madrigueras. Son alimentadores oportunistas y el alimento disponible depende de la época del año y la ubicación (Hailey, 2011).

d) Organización social

Existen tres tipos de órdenes sociales de tecolote llanero, aves solitarias, parejas reproductoras y colonias. Las colonias pueden contener de 9 a 19 aves sin orden social. Estos tecolotes son territoriales durante la época de apareamiento; los machos crean y mantienen un territorio determinado basado en la presencia de madrigueras y sus alrededores y sólo atacarían a otros machos si llegan a acercarse a menos 10 metros de su madriguera, después de hacer una llamada primaria para informar al intruso de su presencia (Hailey, 2011).

e) Hábitos de caza

Athene cunicularia, se alimenta principalmente de invertebrados (insectos y arácnidos), pero también consume mamíferos, anfibios y reptiles, pero cazará cualquier presa potencial que pueda manejar físicamente incluyendo aves, ardillas, ranas, serpientes, lombrices, murciélagos, escorpiones y orugas; es una especie que llega a desplazarse de uno a tres kilómetros al día dependiendo de la disponibilidad de recursos y se alimenta a nivel de suelo (Poulin *et al.*, 2011).

f) Comportamiento reproductivo

Los tecolotes llaneros forman parejas monógamas durante el período reproductivo; anidan a finales de marzo o abril, usan terrenos baldíos, praderas abiertas, granjas, entre otros. La hembra pone un promedio de 6-12 huevos, que incuba de 28-30 días; durante la incubación la hembra permanece en el nido, el macho permanece a menos de 250 metros y cuida el nido y trae comida y 6 semanas después de la eclosión, los juveniles son capaces de dejar la madriguera (Hailey, 2011).

5. Plumas como unidades indicadoras de contaminación por metales

Burger (2013) propuso el uso de plumas como bioindicadores, destacando que éstas pueden secuestrar los elementos metálicos provenientes del torrente sanguíneo, y en ellas se refleja la concentración de metales de los tejidos internos del ave. También reporta que existe correlación entre los niveles de metales en plumas respecto a la dieta del ave. Las plumas son buenas indicadoras de contaminación por metales, especialmente para aquellos ligados a compuestos orgánicos que se acumulan en el plumaje (Zhang y Zhang, 2011). La pluma es muy útil debido a que posterior a su proceso de formación, el suministro de sangre se atrofia y la pluma queda aislada del resto del cuerpo, consecuentemente no puede existir futura acumulación de elementos tóxicos provenientes del flujo sanguíneo (Veerle *et al.*, 2004; Bond y Diamond, 2009).

Dauwe *et al.* (2003) determina que si los niveles de metales en las plumas reflejan con exactitud la carga del cuerpo durante la formación de las plumas (Ilustración 3), las plumas que se reemplazan primero deben contener las concentraciones más altas mientras que las plumas que se mueven en último lugar deben haber acumulado las concentraciones más bajas.

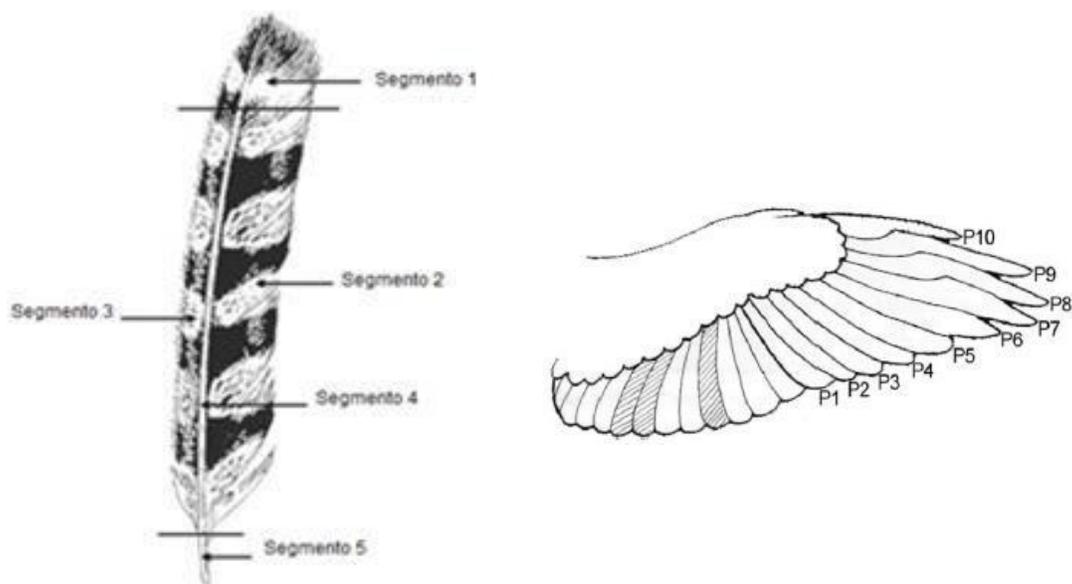


Ilustración 3. Metodología para análisis de plumas (Fuente: Dauwe *et al.*, 2003)

Las plumas de las rapaces deben representar adecuadamente los niveles corporales de contaminantes. Se han utilizado plumas de vuelo (remigeas primarias y rectrices) y plumas corporales en estudios de biomonitorio. Las plumas de vuelo se han utilizado, sin embargo, la elección de las plumas aún no ha sido estandarizada. (Martínez *et al.*, 2012). Para la mayoría de los metales se dispone actualmente de pocos datos sobre el efecto de la contaminación (Dauwe *et al.*, 2003).

6. Egagrópilas como indicadores de contaminación por metales

De acuerdo con la Royal Society for the Protection of Birds (RSPB), las egagrópilas son bolos, que contienen las partes no digeridas del alimento de las aves, se expulsan por el pico, contienen restos de alimento de aves, mamíferos y peces, los dientes, las garras y los picos, las partes de la cabeza y élitros de los insectos y las cáscaras de las semillas de lo que consume el ave. Éstas generalmente están rodeadas por materiales más blandos como pieles, plumas y fibra vegetal. Estas egagrópilas pueden colectarse en sitios de nidificación o percha para posteriormente ser analizadas (Trejo y Ojeda, 2002).

Por lo general, las egagrópilas se analizan en el laboratorio para estudiar la proporción en la que diferentes especies de mamíferos contribuyen a la dieta de las aves rapaces (Gaca *et al.*, 2005). Sin embargo existen algunos estudios en los que se ha implementado el contenido de las egagrópilas (hueso de roedor) en el monitoreo de contaminación por radiactividad (Demajo *et al.*, 2011; Gaca *et al.*; 2005), demostrando que es posible evaluar la calidad del ambiente usando estas técnicas no invasivas y sin sacrificar organismos.

No se ha reportado ningún estudio que refiera el uso de egagrópilas para evaluar contenido de metales pesados con la finalidad de monitorear la calidad del ambiente.

IV. OBJETIVO GENERAL

Analizar muestras de suelo, plumas, tejidos y egagrópilas de tecolote llanero (*Athene cunicularia*), en algunas zonas del estado de Hidalgo, mediante técnicas espectroscópicas, para proponer técnicas no invasivas, en el monitoreo de contaminación por metales pesados, además, brindar información de la calidad del ambiente y posibles efectos a los seres vivos.

V. METODOLOGÍA GENERAL

1. Colectas

a) Suelo

Se realizaron recorridos por la ciudad de Pachuca para localizar las madrigueras de *Athene cunicularia* (Ilustración 4). Una vez localizadas, se siguió la metodología propuesta por la NOM-021-RECNAT-2000, en el apartado AS02. Se tomaron tres muestras de suelo (100 g) de cada madriguera en bolsas plásticas, se etiquetaron y se trasladaron al laboratorio; las muestras se colocaron en charolas y se dejaron a temperatura ambiente para eliminar la humedad, una vez que alcanzaron un peso constante, se tamizaron con un tamiz del número 10 (2mm).



Ilustración 4. Colecta de suelo plumas y egagrópilas en madriguera de *Athene cunicularia*.

b) Plumas

Durante los meses de septiembre y octubre, se intensificaron las visitas a las madrigueras de *Athene cunicularia*, ya que se detectó que las aves mudan las plumas. Se colectaron las plumas encontradas alrededor de la madriguera y sitios de percha, se colocaron en bolsas de papel y se les etiquetó. Fueron llevadas al laboratorio y mediante la guía de identificación de plumas de Scott y Mc Farland (2010) se verificó que pertenecieran a la especie.

c) Egagrópilas

Se realizaron recorridos mensuales en un periodo de 5 años, comprendido entre el 2013 (Olivares, 2014) y 2017. Se colectaron las egagrópilas que se encontraban alrededor de la madriguera y en los sitios de percha, se almacenaron en bolsas de papel y se etiquetaron para ser llevados al laboratorio (Ilustración 5).



Ilustración 5. Egagrópilas y plumas de *Athene cunicularia*

d) Tejidos

Un individuo de *Athene cunicularia* fue donado al laboratorio de Interacciones Biológicas del Centro de Investigaciones Biológicas de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH). Se extrajeron 11 muestras de tejidos (fémur, pico, hígado, riñón, estómago, esternón, glándula uropigial, garras, corazón, pulmón, músculo), los cuales fueron lavados con agua desionizada (Ilustración 6) y sometidos a un proceso de secado en estufa durante 7 días a 60°C, hasta que se logró un peso constante. Al mismo individuo se le extrajeron las plumas de las alas para su análisis.



Ilustración 6. Tejidos de *Athene cunicularia* considerados para análisis.

2. pH del suelo

Una vez tamizadas las muestras de suelo, se pesaron 5 g, se colocaron en un vaso de precipitado de 50 ml y se agregó 10 ml de agua desionizada, con un agitador de vidrio se realizaron agitaciones por intervalos de 5 minutos y reposo de 5 minutos alternados, llegando a 30 minutos de agitación, para un reposo posterior de 15 minutos. Una vez culminado este proceso se registró la lectura del pH mediante un potenciómetro previamente calibrado (NOM 021-RECNAT-2000).

3. Preparación de las plumas

Del individuo de *Athene cunicularia* se extrajeron las 10 plumas primarias de cada ala, se etiquetaron y se procedió con el tratamiento para éstas y el resto de las plumas colectadas en campo. Las plumas fueron lavadas con agua desionizada y posteriormente segmentadas (Ilustración 7) de acuerdo a la metodología propuesta por Dawue (2003). Se tomaron los segmentos 1 (ápice) y 5 (cálamo) para su análisis. Se pesaron en una balanza analítica y se prepararon para la digestión ácida.

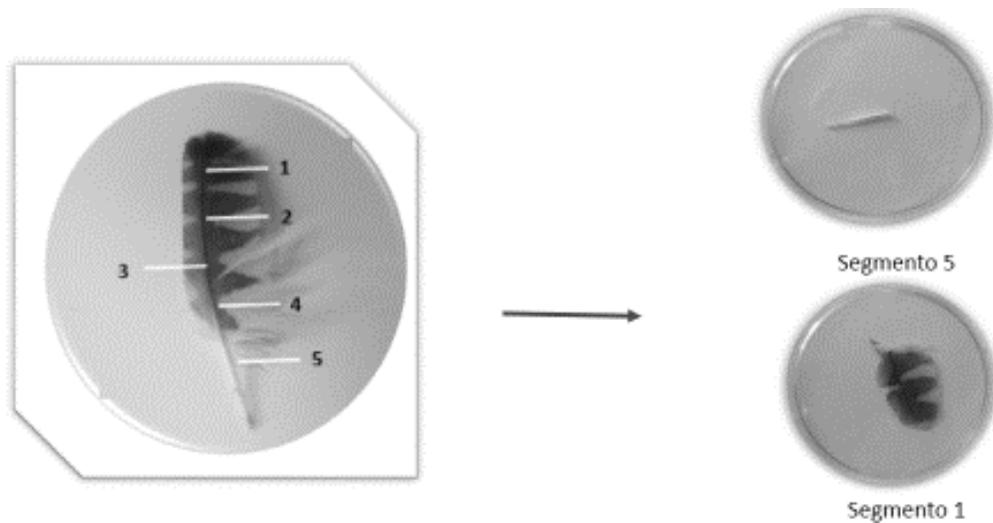


Ilustración 7. Segmentación de la pluma para su análisis

4. Preparación de las egagrópilas

A cada una de las egagrópilas colectadas se le colocó en una caja Petri y se le adicionó agua desionizada para hidratarla y facilitar el proceso de separación. Cuando se humedeció lo suficiente, con apoyo de un microscopio óptico y mediante una aguja de disección, se procedió a separar los restos de artrópodos, hueso y pelo de roedor. Una vez separados los contenidos (Ilustración 8) se dejaron secar a temperatura ambiente hasta alcanzar peso constante, para proceder a la digestión ácida.



Ilustración 8. Separación de la egagrópila para obtención de restos de artrópodos pelo y hueso

5. Digestión ácida

a) Suelo

Las muestras tamizadas se pesaron con una balanza analítica para obtener 2g de suelo, se depositaron en vasos de propileno para microondas a los que se les agregó, 5 ml de agua desionizada, 5 ml ácido fluorhídrico (HF), 1ml ácido nítrico (HNO_3) y 3 ml de ácido clorhídrico (HCl). Al término de la preparación se estandarizaron las condiciones para comenzar la digestión ácida en un horno de microondas MARSX (Ilustración 9), bajo las siguientes consideraciones: 1200 W de potencia, 190 °C de temperatura, 200 PSI de presión. Posteriormente se sometió a una segunda rampa a 600 W, 190°C, 200 PSI, por un tiempo de 15 minutos, mantenimiento 10 minutos, enfriamiento 10 minutos. Al término de la segunda digestión se agregaron a cada muestra 35 ml de ácido bórico, con la finalidad de neutralizar al ácido fluorhídrico y finalmente se realizó una tercera digestión bajo las siguientes condiciones, 600 W, 190 °C, 200 PSI, a un tiempo de 15 minutos, mantenimiento 10 minutos, enfriamiento 10 minutos. La muestra resultante fue aforada a 50 ml con agua desionizada.

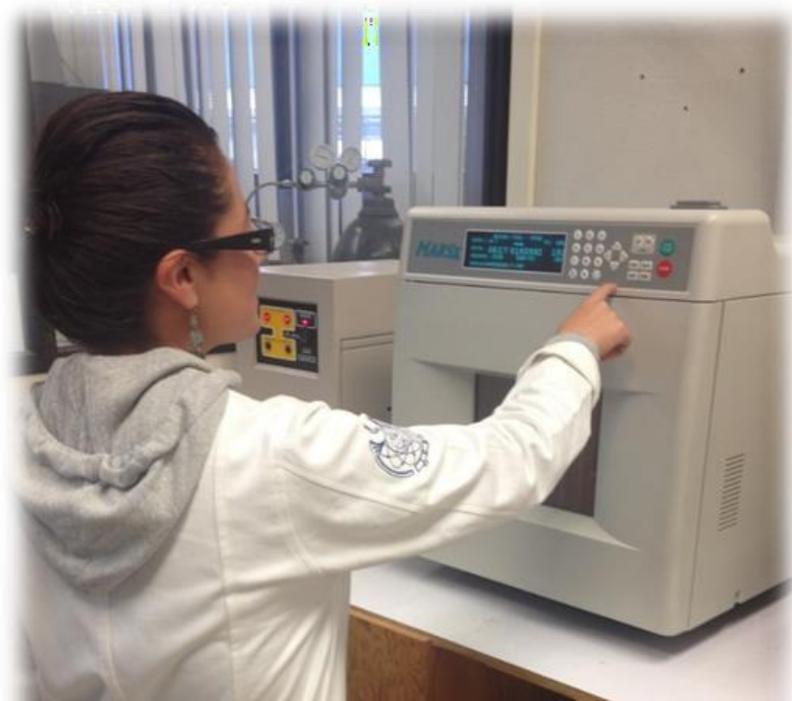


Ilustración 9. Digestión ácida en horno de microondas MARSX

b) Tejidos, plumas y egagrópilas

Las muestras se pesaron en una balanza analítica, se colocaron en vasos de polipropileno para microondas y a cada vaso se les adicionaron 2 ml ácido nítrico (HNO_3), 1 ml de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y 5 ml agua desionizada. La digestión se realizó en un horno de microondas MARSX, bajo las siguientes condiciones de trabajo: 1200 W de potencia, 190 °C de temperatura y 200 PSI de presión máxima, con una rampa de calentamiento de 25 °C a 190 °C en un tiempo de 25 min. Una vez terminada la digestión, se enfriaron a temperatura ambiente y cada muestra se llevó a un volumen de 10 ml en matraz volumétrico, las muestras se almacenaron en refrigeración para su posterior lectura espectroscópica.

6. Lectura de metales

Las muestras fueron analizadas por la técnica de espectroscopia de emisión atómica de plasma por acoplamiento inductivo (ICP) utilizando un equipo Perkin Elmer, Mod. Optima 8300, USA (Ilustración 10). A partir de un estándar certificado multielemental, se prepararon estándares de trabajo para realizar la curva de calibración (ver curvas en anexos).

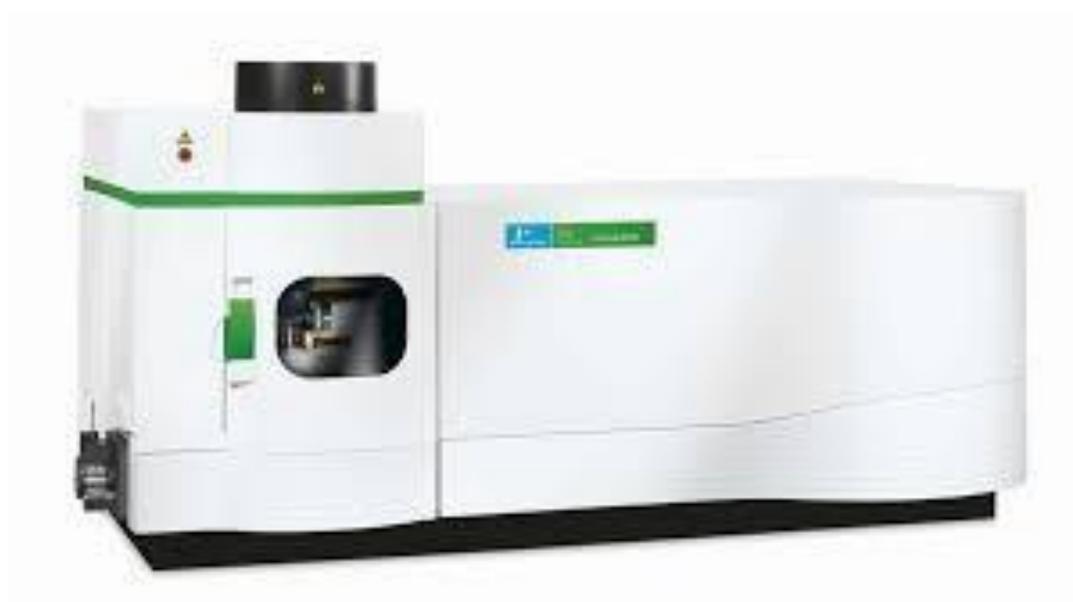


Ilustración 10. Espectrómetro de plasma (ICP), Perkin Elmer, Mod. Optima 8300, USA.

Los metales se determinaron en las muestras en base seca utilizando la ecuación 1

$$Cr = \frac{C_l}{P_m} \times V_{af} \times F_d \quad (1)$$

Donde:

Cr: es concentración real (mg Kg⁻¹)

C_l: Concentración leída en el espectrofotómetro de plasma (μg L⁻¹)

V_{af}: Volumen de aforo (L)

F_d: Factor de dilución= volumen de aforo/ volumen de alícuota

P_m: Peso de la muestra (g)

VI. CAPÍTULO I- Plumas y egagrópilas de *Athene cunicularia* como unidades indicadoras de metales pesados en Pachuca, Hidalgo. (Análisis espacial)

1. INTRODUCCIÓN

Un contaminante es cualquier sustancia en el medio ambiente, que provoca efectos desfavorables, perjudicando el bienestar del medio ambiente, reduciendo la calidad de vida y eventualmente causando la muerte (Duruibe *et al.*, 2007). Los metales pesados pueden ser considerados como contaminantes; su toxicidad depende de varios factores, incluyendo la dosis, la ruta de exposición y las especies químicas, así como la edad y el género del organismo expuesto. Sus múltiples aplicaciones industriales, domésticas, agrícolas, médicas y tecnológicas han llevado a su amplia distribución en el medio ambiente (Tchounwou *et al.*, 2012). Debido a los riesgos potenciales inducidos por el aumento de las concentraciones de metales, es importante desarrollar metodologías para monitorear los niveles de metales en el medio ambiente (Lodeni y Solonen, 2013). Por ejemplo, se han utilizado los bioindicadores, que son organismos o partes de los mismos que permiten obtener información de la calidad del ambiente (Market *et al.*, 2003). Algunos grupos de aves son frecuentemente reportados en la literatura cuando se habla de bioindicadores y metales pesados, en particular las aves rapaces y las acuáticas debido a su jerarquía dentro de la red trófica (Burger y Gochfeld 2001). De acuerdo con Becker, (2003) las aves presentan ventajas que permiten usarlas como indicadores biológicos, entre ellos destacan que son un grupo bastante conocido y con amplia distribución. El tecolote llanero (*Athene cunicularia*) es un ave rapaz de la familia Strigidae, se distribuye a lo largo del continente Americano (Poulin *et al.*, 2011). Su dieta consiste en artrópodos como escarabajos y saltamontes, pequeños mamíferos como roedores y ardillas y otras aves pequeñas (Hailey, 2011). Su hábito de anidación es a nivel de suelo, ya que utiliza madrigueras para anidar. En México, la especie está sujeta a protección especial (Poulin *et al.*, 2011) por lo tanto, al trabajar con estos organismos es importante considerar el no sacrificar individuos. Por razones éticas, el sacrificio de individuos es cada vez menos utilizado y en su lugar se utilizan técnicas de muestreo y análisis no invasivas (Trejo y Ojeda, 2002). Burger (2013) propuso el uso de plumas como indicadores no invasivos de contaminación por metales, destacando que éstas pueden secuestrar los elementos metálicos provenientes del torrente sanguíneo, y en ellas se

refleja la concentración de metales de los tejidos internos del ave; esto debido a que posterior a su proceso de formación, el suministro de sangre se atrofia y la pluma queda aislada del resto del cuerpo, consecuentemente no puede existir futura acumulación de elementos tóxicos provenientes del flujo sanguíneo (Veerle *et al.*, 2004; Bond y Diamond, 2009). Existen además, algunas otras técnicas de muestreo no invasivas, por ejemplo, Gaca *et al.* (2005) proponen el uso de egagrópilas como herramienta para monitoreo de isotopos radioactivos. Estas egagrópilas pueden colectarse en sitios de nidificación o percha y analizarse posteriormente (Trejo y Ojeda, 2002). No se ha reportado ningún estudio que refiera el uso de egagrópilas para evaluar contenido de metales pesados con la finalidad de conocer la calidad del ambiente. El presente estudio tiene como objetivo principal verificar la presencia de metales pesados (Cd, Mn, Pb y Sr) en suelo, plumas y egagrópilas de *Athene cunicularia*, en cuatro diferentes áreas, en la zona metropolitana la ciudad de Pachuca, para saber si existe variación en la concentración de metales entre sitios e identificar las posibles fuentes de contaminación. Además, se propone el uso de egagrópilas como una técnica no invasiva en el monitoreo de metales pesados en diferentes ambientes.

2. METODOLOGÍA

La egagrópilas fueron colectadas en el municipio de Pachuca de Soto, que se encuentra entre los 20° 11' y los 20° 01' de latitud norte, y entre los 98° 41' y 98° 52' de longitud oeste, cuenta con un clima semi-árido, la temperatura promedio es de 14 °C, la dirección del viento es de norte a sur y de noreste a suroeste. (SMIN, 2017). Las áreas de estudio se enlistan en la Tabla 1 y se muestran en la Ilustración 11.

Tabla 1. Ubicación geográfica de los sitios de muestreo. (Abreviatura del sitio)

Sitio	Latitud (N)	Longitud (O)
Montessori (MN)	20°4'56.72''	98°47'18.81''
Villas Fontana (VF)	20°1'12.43''	98°46'44.88''
Biblioteca (BI)	20°5'38.90''	98°46'26.70''
Casa verde (CV)	20°2'13.72''	98°47'21.46''



A) Montessori (MN).

- Terrenos agrícolas (Cebada)
- Carreteras de tránsito continuo
- Aeropuerto
- Ductos de Pemex
- Rodeado de área urbana



B) Biblioteca (BI).

- Áreas verdes con vegetación manejada
- Carreteras de tránsito continuo
- Aeropuerto
- Jales mineros
- Área urbana



C) Villas fontana (VF).

- Terrenos agrícolas, riego aguas negras.
- Aplicación de agroquímicos
- Incremento de área urbana
- Granja ganadera
- Pastoreo continuo



D) Casa verde (CV).

- Terrenos agrícolas, riego aguas negras
- Carreteras de tránsito continuo
- Incremento de área urbana
- Pastoreo continuo

Ilustración 11. Ubicación de las áreas de estudio y posibles fuentes de metales.

Plumas. Se realizó la colecta de las plumas que se encontraban alrededor de las madrigueras de *Athene cunicularia* (Ilustración 12) durante el periodo de muda invernal (septiembre- octubre), se almacenaron en bolsas de papel y se trasladaron al laboratorio para su análisis. Se partió de la metodología propuesta por Dauwe *et al.* (2003) y las plumas se segmentaron en 5 partes, de cada pluma se tomó sólo el segmento 5 (cálamo) para el análisis de contenido de elementos tóxicos. Posteriormente se prepararon las muestras para someterlas al proceso de digestión ácida en horno de microondas.



Ilustración 12. Individuos de *Athene cunicularia* en las áreas de estudio.

Suelo. Para la colecta de muestras de suelo, se siguió la metodología sugerida por la REC NAT-2000. Se tomaron 3 muestras de 100 g, las cuales fueron expuestas en charolas a temperatura ambiente, con la finalidad de secado.

Prueba pH. Se determinó la prueba de pH de acuerdo a la técnica de la NOM-021- REC NAT-2000 en su apartado AS-14, la cual se menciona en metodología general del presente estudio.

Digestión de muestras orgánicas. Se adicionaron a la muestra 2 ml ácido nítrico (HNO_3), 1 ml de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y 5 ml agua desionizada. Una vez terminada la digestión, se enfriaron a temperatura ambiente y cada muestra se llevó a un volumen de 10 ml en matraz volumétrico.

Análisis espectroscópico de metales. Las muestras fueron analizadas por la técnica de espectroscopia de emisión atómica de plasma por acoplamiento inductivo (ICP) utilizando un equipo Perkin Elmer, Mod. Optima 8300, USA.

Digestión de muestras de suelo. El suelo fue pesado y preparado para el proceso de digestión ácida, se realizaron dos digestiones, la muestra resultante fue aforada a 50 ml con agua desionizada.

Los metales se determinaron en las muestras en base seca utilizando la ecuación 1

$$Cr = \frac{c_i}{P_m} \times V_{af} \times F_d \quad (1)$$

Una vez obtenidos los datos, se compararon los valores entre años utilizando análisis de varianza (ANOVA) para conocer si las concentraciones cambian de acuerdo al sitio. Cuando se encontraron diferencias significativas se realizaron las pruebas a posteriori de Tukey. Se mencionan en el texto sólo las comparaciones más relevantes. Se utilizó un $\alpha=0.05$. Los análisis se realizaron utilizando el programa Sigma Stat 3.5.

3. RESULTADOS

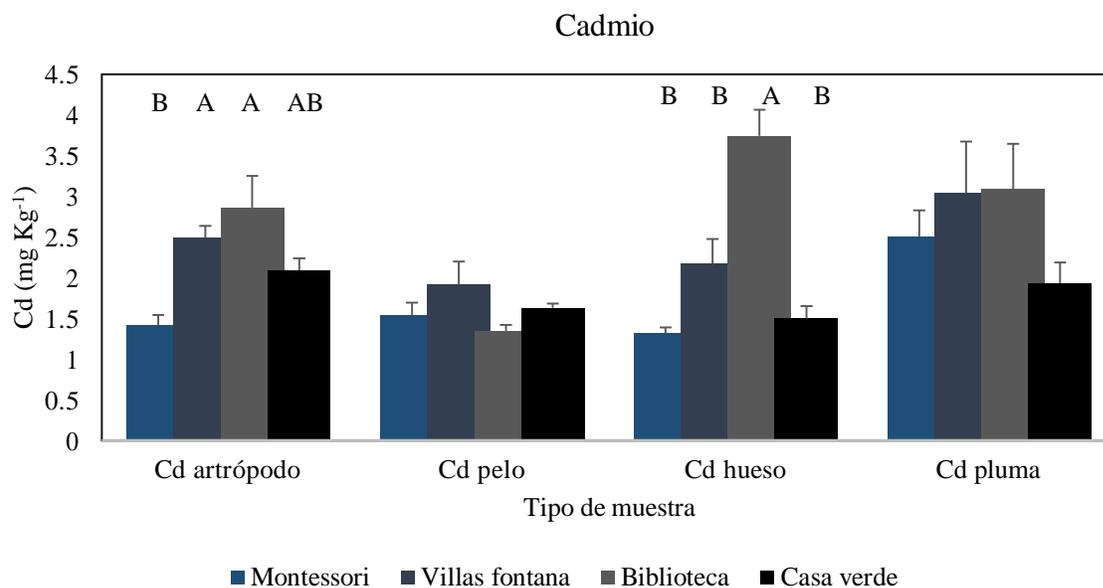
De acuerdo al pH el suelo se clasifica como ligeramente alcalino. Se observó la presencia de Cd, Mn y Sr en las muestras de los suelos aledaños a las madrigueras (Tabla 2). No se detectó plomo en los suelos analizados. Al realizar el análisis de varianza se encontraron diferencias significativas para Cadmio y Manganeso y no se encontraron diferencias para el caso de estroncio. Los resultados con los datos de significancia se presentan en la tabla 3.

Tabla 2. pH del suelo de los sitios de muestreo y concentración de cadmio, manganeso y estroncio en suelo.

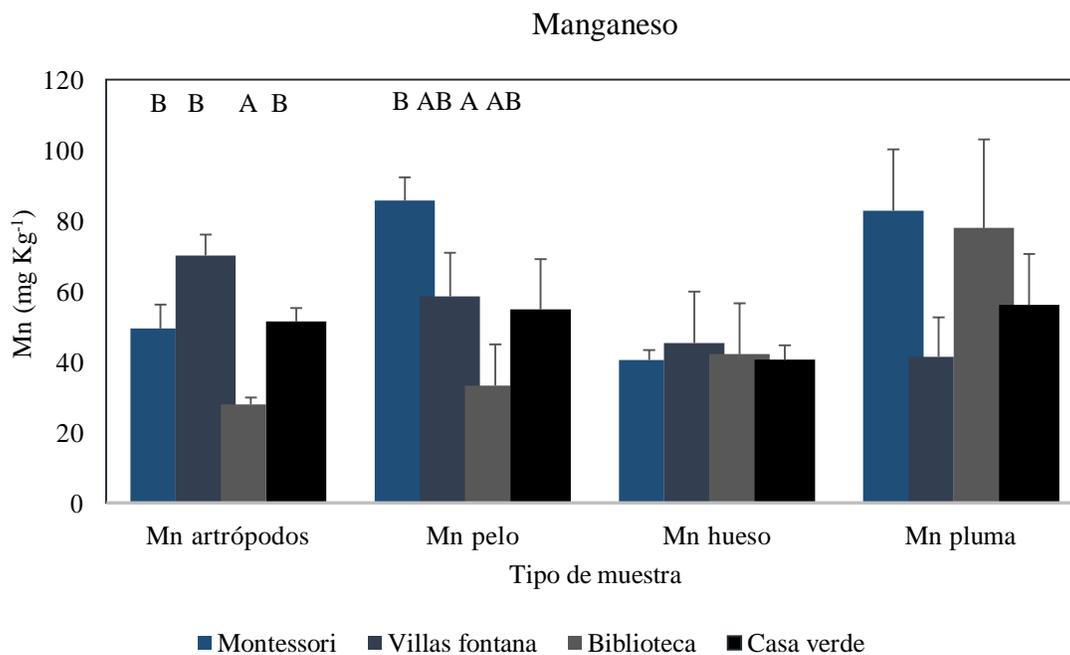
Sitio	Ph	Cd	Mn	Sr
Montessori	7.78	29.28±5.86 ^A	194.89±8.90 ^A	75.94±10.30*
Villas fontana	7.59	76.73±0.13 ^{AB}	87.47±8.84 ^B	188.51±4.34*
Casa verde	8.29	82.73±5.32 ^B	98.76±19.0 ^B	154.58±6.11*
Biblioteca	7.55	44.30±7.27 ^{AB}	91.02±8.41 ^B	31.86±13.01*

Las letras en la parte superior de cada dato indican significación estadística ($P < 0.05$) entre sitio. Los sitios que comparten la misma letra no son diferentes. Expresado en mg Kg^{-1} , peso seco. (* sin diferencias significativas)

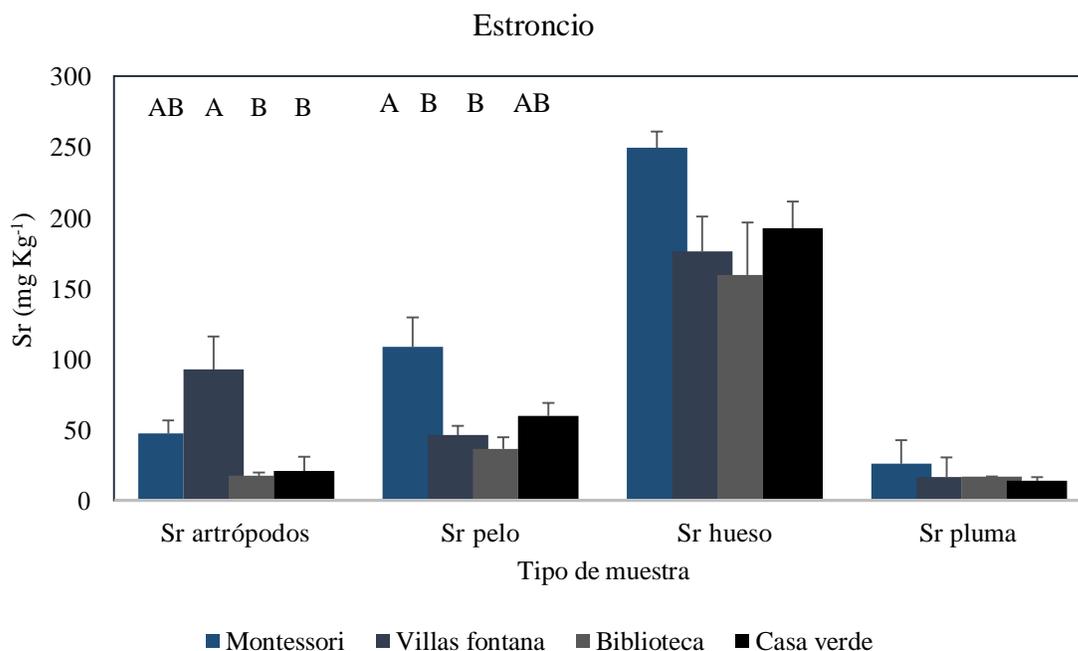
Los resultados de análisis entre sitios de cadmio, manganeso y estroncio en muestras de artrópodos, hueso y pelo de roedor y plumas obtenidas de las egagrópilas, así como de las plumas de los tecolotes, se presentan en las gráficas 1, 2 y 3. Al igual que en suelo, no se detectó plomo en las muestras. En la graficas 1,2 y 3 se presentan las concentraciones de metales (media \pm E. S; peso seco en mg Kg^{-1}) en restos de artrópodos, hueso y pelo de roedor contenidos en egagrópilas, además de los datos observados en plumas de *Athene cunicularia*, en cuatro sitios de distribución del tecolote llanero en Hidalgo. Las letras en la parte superior de cada columna indican significación estadística ($P < 0.05$) entre sitios. Los sitios que comparten la misma letra no son diferentes. De manera general se observó que el estroncio tiene mayor afinidad a concentrarse en hueso de roedor.



Gráfica 1. Contenido de cadmio (mg Kg^{-1}) por tipo de muestra (artrópodo, pelo, hueso y pluma) en los sitios de muestreo. Letras en la parte superior indica diferencia significativa entre sitios, ausencia de letras, sin diferencia significativa.



Gráfica 2. Contenido de manganeso (mg Kg^{-1}) por tipo de muestra (artrópodo, pelo, hueso y pluma) en los sitios de muestreo. Letras en la parte superior indica diferencia significativa entre sitios, ausencia de letras, sin diferencia significativa.



Gráfica 3. Contenido de estroncio (mg Kg⁻¹) por tipo de muestra (artrópodo, pelo, hueso y pluma) en los sitios de muestreo. Letras en la parte superior indica diferencia significativa entre sitios, ausencia de letras, sin diferencia significativa.

Tabla 3. Modelos ANOVA significativos.

Metal/ Muestra	F	G. L	P
Cadmio			
Artrópodos	13.218	3, 25	0.004
Hueso	19.623	3,25	0.001
Suelo	9.464	3,12	0.02
Manganeso			
Artrópodos	9.417	3, 25	0.001
Pelo	4.112	3,25	0.02
Suelo	18.968	3,12	0.001
Estroncio			
Artrópodos	13.190	3, 25	0.004
Pelo	5.905	3,25	0.005

4. DISCUSIÓN

pH en suelo

El pH del suelo varió de 7.55 en biblioteca a 8.29 en casa verde, entrando en la clasificación de acuerdo a la NOM 021 RECNAT, (2000) como suelos medianamente alcalinos. Según Huertos y Romero (2008), los suelos alcalinos no permiten que la mayoría de los metales se encuentren disponibles, excepto As, Mo, Se y Cr, que son más móviles a pH alcalino. En general mientras menor sea el pH del suelo mayor será la retención de metales, esto es debido a la formación de especies químicas con menor densidad de carga negativa por la unión del ion metálico con los iones OH y el incremento de las cargas negativas en la superficie de óxidos o de otros materiales de carga variable donde el ion metálico puede adsorberse (Wu *et al.*, 2000).

Cadmio

Uno de los mayores agentes tóxicos asociado a contaminación ambiental e industrial es el cadmio, pues reúne cuatro de las características más importantes de un tóxico como efectos adversos para el hombre y el medio ambiente, altamente bioacumulable, gran tiempo de persistencia en el ambiente y fácil dispersión, tanto en viento como en agua (Ramírez, 2002).

Artrópodos. La mayor concentración de cadmio en el presente estudio, se encontró en biblioteca (2.86 ± 0.39), sin embargo, sólo se encontró diferencia significativa al comparar con Montessori, a pesar de que los sitios son cercanos entre sí, la diferencia puede atribuirse a que en biblioteca existe un mayor porcentaje de urbanización, así como la aplicación de agroquímicos para el tratamiento de jardines. Al comparar con literatura previa, Sánchez *et al.* (2010) reportan una concentración de 2.60 mg Kg^{-1} en coleópteros y para la familia *Blattidae* de 3.39 mg Kg^{-1} , esto, en un basurero a cielo abierto en la ciudad de Medellín. Al comparar los resultados del presente estudio se puede observar que se encuentran en el rango reportado en la literatura para sitios considerados como contaminados.

Pelo. La concentración de cadmio varió entre 1.35 y 2.05 mg Kg^{-1} y no se encontró diferencia significativa los cuatro sitios. De acuerdo con Mc Lean *et al.* (2009) el pelo cobra importancia como indicador de contaminación de metales pesados, debido a su alta afinidad por los grupos sulfhídrico de la queratina, así mismo reportaron concentraciones en *Rattus norvegicus*, para una zona cercana a una fundidora en Australia, que varían de 0.16 a 1.03 mg Kg^{-1} . Pereira *et al.*

(2006) encontró una concentración para *Mus spretus* de $0.432 \pm 0.083 \text{ mg Kg}^{-1}$ en una zona minera en Portugal. Se observa que los datos del presente estudio se encuentran en el rango de lo reportado en la literatura, cabe mencionar que todos son zonas bajo alguna presión de contaminación derivada de actividades antropogénicas. Sin embargo, a la fecha no existe un reporte que mencione la presencia de efectos adversos a dichas concentraciones.

Hueso. Al realizar en análisis de varianza se encontraron diferencias significativas en biblioteca con respecto a los demás sitios. De acuerdo con Martiniaková *et al.* (2010) el cadmio se encuentra listado como uno de los metales más tóxicos, causando daño al hueso, alterando el metabolismo del calcio lo que conlleva a la osteomalacia, así mismo reporta concentraciones de 1.93 a 3.95 mg Kg^{-1} en fémur de *Apodemus flavicollis*, en una zona cercana a una central eléctrica de carbón en Eslovaquia. Al comparar estos datos se puede observar que el rango de concentración es similar a lo reportado en la literatura.

Plumas. En general, las concentraciones de contaminantes de metales pesados como el cadmio en plumas puede reflejar la dieta y la contaminación ambiental alrededor de un sitio, también el cadmio en las plumas se asoció fuertemente con las concentraciones en hígado (Kim y Oh, 2014). Al consultar la literatura, Ansara- Ross *et al.* (2013) reportaron concentraciones de $0.389 \pm 0.198 \text{ mg Kg}^{-1}$ en *Tyto alba* y $0.063 \pm 0.011 \text{ mg Kg}^{-1}$ en *Tyto capensis*, en una zona agrícola y próxima a minas en Sudáfrica. Kim y Oh (2014) obtuvieron una concentración de $0.090 \pm 0.17 \text{ mg Kg}^{-1}$ *Nycticorax nycticorax* en una zona agrícola en Corea. Al comparar los datos obtenidos en el presente estudio con lo citado en la literatura, se observa que las plumas de *Athene cunicularia* presentan una concentración mayor, esto se puede deber a sus hábitos de anidación a nivel de suelo lo que representa mayor susceptibilidad a entrar en contacto con el cadmio de suelo.

Suelo. Al comparar los valores con lo establecido por la nom-147-semarnat/ssa1-2004, la concentración con fines de uso agrícola, residencial o comercial, no debe exceder los 37 mg Kg^{-1} y para uso industrial, de 450 mg Kg^{-1} , por lo que la concentración obtenida en el presente estudio, excede los límites en la concentración para uso agrícola (excepto biblioteca). De acuerdo con Ramírez (2002), el cadmio llega al suelo por deposición aérea (41%), por fertilizantes fosfatados (54%), por aplicación de abono de estiércol (5%), y siendo Pachuca un área con diversas actividades antropogénicas como, agricultura, urbanización, ganadería y minería, éstas son las posibles fuentes de contaminación.

Manganeso

El manganeso es un metal muy tóxico que suele causar afectaciones como consecuencia principalmente de una inhalación crónica de partículas provenientes de minas de manganeso, industrias químicas y fábricas de acero (Hubbart, 2012). De acuerdo con SGM (2017), México es el noveno lugar a nivel mundial en la producción de manganeso, el cual se encuentra destinado en un 29 % a la construcción, 10% a la maquinaria, 10% a la transportación y el 51 % a diversas aplicaciones concernientes a la industria del hierro y el acero.

Artrópodos. La concentración de manganeso varió de 27.71 a 70.13 (mg Kg⁻¹), la mayor concentración se observó en Villas fontana, así mismo al realizar el análisis de varianza se encontraron diferencias significativas en Biblioteca con respecto a los demás sitios, ya que biblioteca presentó una concentración inferior a los demás sitios. Butovsky (2011) reporta para carábidos concentraciones de 24.3 a 29.2 (mg Kg⁻¹), dichos valores se encuentran dentro del rango para Biblioteca, sin embargo, las concentraciones del resto de los sitios son superiores a lo reportado, esto puede deberse a las especies contenidas en la dieta de los individuos o bien a diversas fuentes como el tránsito vehicular, el uso de agroquímicos y el incremento en la urbanización.

Pelo. Los pequeños mamíferos, especialmente roedores han demostrado ser indicadores buenos para la contaminación por metales pesados. La elección del pelo como método no invasivo es relevante debido a que es fácil de obtener, manejar y no requiere el sacrificio animal (Pereira *et al.*, 2006). En el presente estudio se encontró manganeso en todas las muestras analizadas, al realizar el análisis de varianza se encontraron diferencias significativas entre los sitios de biblioteca y Montessori, así mismo las concentraciones variaron de 33.20 a 85.68 (mg Kg⁻¹). Kahazae *et al.* (2015) reportan una concentración de 36.4 ±8.3 (mg Kg⁻¹) para pelo de *Meriones persicus* en una zona minera en Irán y concluyen que la concentración de manganeso en pelo es mayor respecto a los tejidos internos. De igual manera se observa que la concentración en el presente estudio es superior a lo reportado, esto puede atribuirse a que en el estado de Hidalgo, de acuerdo con Hernández (2009) el municipio de Pachuca pertenece a un distrito minero con jales que resultaron de más de 200 años de minería.

Hueso. De acuerdo con Kahazae *et al.* (2015) todos los tejidos calcificados tienden a acumular los metales pesados a los que están expuestos los organismos durante su fase de formación y

desarrollo. En el presente estudio se encontró manganeso en todas las muestras de hueso, para los cuatro sitios, sin embargo, al realizar el análisis de varianza, no se encontraron diferencias significativas. Los datos variaron de 40.55 a 45.32 mg Kg⁻¹. Gdula *et al.* (2004) reportan en huesos (dientes) de *Clethrionomys glareolus* una concentración de 7.26 a 140.1 mg Kg⁻¹ en Polonia, lo cual puede atribuirse a la especie y tipo de dieta de los roedores.

Plumas. El manganeso se presentó en todas las plumas analizadas para los cuatro sitios con una variación de 41.42 a 82.80 mg Kg⁻¹. Al realizar el análisis de varianza no se encontró diferencia significativa entre sitios. Al comparar con lo citado en la literatura Ansara- Ross *et al.* (2013) reportaron concentraciones de 11.6 ± 1.33 mg Kg⁻¹ con una variación de 1.23 a 66.4 mg Kg⁻¹ en *Tyto capensis* y de 9.21 ± 3.19 mg Kg⁻¹ con una variación de 0.517–151 para *Tyto alba* en una zona agrícola y próxima a minas en Sudáfrica. Se puede observar que las concentraciones encontradas en el presente estudio, se encuentran en el rango reportado, por lo tanto, sería conveniente investigar en un futuro si los niveles del presente estudio pueden representar algún riesgo a los seres vivos.

Suelo. El manganeso se encontró en todas las muestras de suelo analizadas, presentando Montessori la mayor concentración (194.89 ± 8.90 mg Kg⁻¹), de igual manera al realizar el análisis de varianza se encontró diferencia significativa entre Montessori respecto a los demás sitios de muestreo, la concentración de manganeso en las muestras de suelo de Montessori es significativamente mayor que el resto de los sitios. Dicha diferencia se puede atribuir a que la madriguera de este sitio se encuentra en un terreno con prácticas agrícolas y colindantes a vías altamente transitadas. Al comparar con literatura previa, Pereira *et al.* (2006) reportan una concentración de 145 y 1608 mg Kg⁻¹ en una zona minera en Portugal. La Guía de referencia de la Agencia para las sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (2001) reporta una concentración máxima para manganeso en suelo de 300 (mg Kg⁻¹), por lo tanto, las zonas de muestreo no se determinaron como contaminadas.

Estroncio

De acuerdo con Pemmer *et al.* (2013) el estroncio es un elemento muy similar al calcio y puede remplazarlo en algunas funciones metabólicas de los organismos, se encuentra en la lista de sustancias peligrosas por el grupo de evaluación de salud humana de la agencia protección al ambiente (EPA). ATSDR (2001) reporta en la ficha de seguridad del estroncio que en animales

expuestos a estroncio radioactivo se han observado defectos de nacimiento. La exposición a altos niveles de estroncio estable, puede alterar el crecimiento de los huesos. Los juveniles, pueden ser más susceptibles que los adultos a los efectos perjudiciales del estroncio radioactivo y la exposición a altos niveles puede causar cáncer.

Artrópodos: Al realizar la lectura de estroncio se encontró que está presente en todas las muestras de artrópodos, la concentración varió de 17.39 a 92.64 mg Kg⁻¹, la mayor concentración fue para Villas Fontana, se encontraron diferencias significativas entre Villas fontana respecto a Casa verde y Biblioteca. Al comparar con lo citado en la literatura Godwin *et al.*, (2016) reportaron una concentración de 0.6 a 150.5 mg Kg⁻¹ en contenidos estomacales de *Tachycineta bicolor* en una zona de arenas bituminosas en Canadá. La concentración del presente estudio se encuentra dentro del rango reportado previamente. La diferencia entre sitios puede atribuirse a que Villas fontana recibe las descargas de aguas negras de la ciudad y el lugar donde se localiza la madriguera, es un terreno agrícola donde se practica el riego con estas aguas, por lo tanto, los artrópodos están en contacto directo con los contaminantes.

Pelo. Cada pelo está continuamente en contacto con el torrente sanguíneo mediante el folículo e incorpora los metales a la par del crecimiento, como consecuencia el pelo puede reflejar la concentración de metales en tejidos (Beernaert *et al.*, 2007). En el presente estudio el estroncio se encontró en todas las muestras de pelo, las concentraciones variaron de 36.21 a 108.59 (mg Kg⁻¹), la mayor concentración se observó en Montessori y al comparar los datos, se encontró diferencia significativa entre Montessori respecto a Biblioteca y Villas Fontana. Kahazae *et al.* (2015) reportaron una concentración de 8.8 a 44.1 mg Kg⁻¹ para pelo de *Meriones persicus* en una zona minera en Irán, el presente estudio presenta concentraciones superiores a las reportadas en la literatura, lo que puede atribuirse a que el elemento existe de manera natural en el ambiente. De acuerdo con SGM (2017) México es tercer lugar en producción de estroncio a nivel mundial, pero no se tienen datos respecto a la demanda de estroncio en Pachuca, sin embargo es un metal cada vez más utilizado en la medicina e industria.

Hueso. De acuerdo con Kahazae *et al.* (2015) el estroncio puede ser toxico dependiendo de la dosis, Nielsen (2004) menciona que un síntoma de exposición constante al Sr es el raquitismo. Los datos obtenidos al realizar la lectura de las muestras de hueso demuestran que se encuentra en los cuatro sitios de muestreo, las concentraciones van de 159.38 a 249.50 mg Kg⁻¹. Al

comparar entre sitios, no se encontraron diferencias significativas ($p=0.091$). Kahazae *et al.*, (2015), reportaron una concentración de 180.1 a 202.8 mg Kg⁻¹ para hueso de *Meriones persicus* en una zona minera en Irán, por lo que se observa que la concentración del presente estudio es ligeramente mayor a lo reportado en la literatura. Con los resultados obtenidos se comprobó que el estroncio tiene una mayor afinidad a fijarse en tejido óseo, lo que en un futuro puede llegar a provocar anomalías en la formación y desarrollo del hueso.

Plumas. El estroncio varió de 13.82 a 25.86 mg Kg⁻¹ y no se encontraron diferencias significativas entre sitios de muestreo. Ansara- Ross *et al.* (2013) reportaron concentraciones de 0.063 a 3.11 mg Kg⁻¹ en plumas de *Tyto capensis* y de 0.07 a 7.39 mg Kg⁻¹ en *Tyto alba*, en una zona agrícola y próxima a minas en Sudáfrica. La concentración del presente estudio es superior a lo citado en la literatura, lo cual, se atribuye a la práctica frecuente de pirotecnia en la ciudad y algunas otras prácticas, como las aleaciones de metales y en la energía eléctrica.

Suelo. Villas fontana presentó mayor concentración de estroncio (188.51±4.34 mg Kg⁻¹); al realizar el análisis de varianza no se encontró diferencia significativa entre sitios, Ballesta *et al.* (2010) menciona que la media mundial de estroncio en suelo oscila en 220 mg Kg⁻¹. Los niveles en el presente estudio se encontraron entre 131.86 y 188.50 mg Kg⁻¹, por lo tanto, el presente estudio no refiere alguna anomalía respecto a los niveles de concentración.

5. CONCLUSIÓN

Se verificó la presencia de Cd, Cr y Mn en las muestras analizadas (suelo, plumas y egagrópilas de *Athene cunicularia*). Por medio de las muestras de suelo, se confirmó la contaminación por cadmio en suelos de los sitios donde habita *Athene cunicularia*. Así mismo se observó que la concentración de cadmio en plumas excede los 2 mg Kg⁻¹, nivel al que de acuerdo con Burger y Gochfeld (1994) se presentan efectos adversos en aves. El estroncio presentó una mayor afinidad a concentrarse en hueso de roedor.

No existe una marcada variación entre sitios, lo cual puede atribuirse a las características geográficas de la ciudad de Pachuca, así como a la capacidad de dispersión del viento en la zona. De igual manera, se cuenta con un único canal de aguas negras, el cual recorre la mayor parte de la ciudad; por lo cual se determina que las principales fuentes de metales en la ciudad provienen de urbanización, jales mineros, constante tránsito vehicular, entre otros.

De manera general se observa una ventaja al trabajar con egagrópilas respecto a las plumas, por la disponibilidad del material; las plumas ofrecen un panorama de lo que ocurre a un nivel superior en la red trófica, sin embargo, su colecta está ligeramente limitada a las temporadas de muda. En este estudio las plumas y las egagrópilas de *Athene cunicularia* permitieron conocer los niveles Cd, Mn y Sr en diferentes especies de fauna urbana en la ciudad de Pachuca, Hidalgo.

VII. CAPÍTULO 2. Egagrópilas de *Athene cunicularia* como unidades biomonitoras de metales pesados en el área urbana de Pachuca, Hidalgo. (Análisis temporal)

1. INTRODUCCIÓN

Los metales pesados en el ambiente han sido producto de la minería, urbanización y diferentes actividades antropogénicas durante años, y a pesar de que se tiene conocimiento de los efectos adversos a la salud de diversos organismos y al ambiente, su utilización y la exposición a los metales pesados continúa, e incluso está aumentando en algunas partes del mundo, en particular en países menos desarrollados (Yadav *et al.*, 2017). En México la contaminación por metales pesados es un problema que va en aumento debido a la actividad antrópica, y en particular el estado de Hidalgo se encuentra entre los sitios más afectados por las altas concentraciones de metales pesados en suelos (Covarrubias y Peña, 2016). Los metales pueden ser sustancias tóxicas peligrosas y oligoelementos, algunos esenciales en muchos procesos biológicos, pero en cantidades mayores pueden ser dañinos e incluso tóxicos para diversos organismos (Stankovic y Stankovic, 2013; Lodenius y Solonen, 2013). Los metales pesados son persistentes en la naturaleza y se pueden bioacumular y biomagnificar (Gochfeld y Burger, 1998). Debido a los riesgos potenciales para la salud inducidos por el aumento en las concentraciones de metales, es importante desarrollar metodologías para monitorear los niveles de metales en el medio ambiente (Lodenius y Solonen, 2013). Por ejemplo, se pueden utilizar bioindicadores los cuales son organismos o partes de los mismos que permiten obtener información de la calidad del ambiente (Market *et al.*, 2003). A lo largo del tiempo se han usado diferentes especies como bioindicadoras (Stankovic *et al.*, 2013; Becker, 2003), y específicamente las aves han sido un grupo muy útil en este tipo de estudios, debido a que se cuenta con amplio conocimiento de sus aspectos biológicos y ecológicos (Becker, 2003). Sheffield y Howery (2001) reportaron que dentro de las especies más interesantes como bioindicadoras se encuentran las aves rapaces, ya que están en la parte superior de las redes tróficas y pueden ser susceptibles a efectos negativos por envenenamiento secundario y bioacumulación de contaminantes, sin embargo, la mayoría de las aves rapaces se encuentran en alguna categoría de riesgo de extinción por lo que no deben ser sacrificadas y por tanto se suelen utilizar las plumas para obtener datos sobre la concentración de contaminantes. Por razones éticas, el sacrificio de individuos es cada vez

menos utilizado y en su lugar se recurre a técnicas de muestreo y análisis no invasivas, (Trejo y Ojeda, 2002).

El tecolote llanero (*Athene cunicularia*) es un ave rapaz que se distribuye en el continente americano desde el sur de Canadá hasta Sudamérica, se alimenta principalmente de invertebrados (insectos y arácnidos), pero también consume mamíferos, anfibios, reptiles y otras aves; su hábito de anidación es a nivel de suelo (Poulin *et al.*, 2011). A pesar de estar distribuido ampliamente en Norteamérica, muchas poblaciones han declinado y en Estados Unidos y Canadá se ha considerado bajo alguna categoría de riesgo. En México, la especie está sujeta a protección especial (NOM-059-ECOL-2010) por lo tanto, al trabajar con las poblaciones es importante considerar el no sacrificar individuos. Los tecolotes regurgitan periódicamente materiales no digeridos de su dieta tales como pelo, huesos y partes esclerotizadas de insectos en forma de egagrópilas, y que son de suma utilidad para estudiar la dieta de las aves que las producen. Gaca *et al.* (2005) reportaron el uso de contenido de egagrópilas (hueso de roedor) para analizar los isotopos radioactivos en una zona contaminada de Polonia, confirmando la eficacia de la técnica. El pelo y el hueso de roedor, así como los artrópodos han sido utilizados en diferentes estudios como indicadores de contaminación por metales de manera aislada (Skubala y Kafel, 2004; Gaca *et al.*, 2005; Pereira, *et al.*, 2006; Mc Lean, 2009; Martiniavková *et al.*, 2010; Sánchez *et al.*, 2010; Butovski, 2011; Khazae *et al.*, 2015; Godwing *et al.*, 2016), sin embargo, en dichos estudios los animales son generalmente sacrificados para obtener las muestras. Por su parte, las egagrópilas permiten obtener información de las muestras antes mencionadas sin manipular ni sacrificar organismos. El presente estudio tiene como objetivo principal monitorear los metales pesados (Cd, Cr, Mn, Cu, Zn y Sr) en un intervalo de tiempo de 5 años (2013- 2017) mediante egagrópilas de Tecolote llanero, en un área urbana de la ciudad Pachuca, Hidalgo, para conocer si hay tendencia en los niveles de metales en el tiempo. Además de proponer el uso de egagrópilas como una técnica efectiva y no invasiva para el monitoreo de metales pesados en diferentes ambientes.

2. METODOLOGÍA

Área de estudio.

Las egagrópilas fueron colectadas en la ciudad de Pachuca, en el municipio de Pachuca de Soto, específicamente en la parte exterior de la Biblioteca Central del Estado, Ricardo Garibay

(19°52'04.618" latitud norte y 98°22'02.100" longitud oeste) (Ilustración 13). La ciudad cuenta con un clima semi-árido, la temperatura promedio es de 14°C, la dirección del viento es de norte a sur y de noreste a suroeste (SMIN, 2017). En la ciudad se han localizado varias madrigueras activas de *A. cunicularia* desde el 2013 (Olivares, 2013).

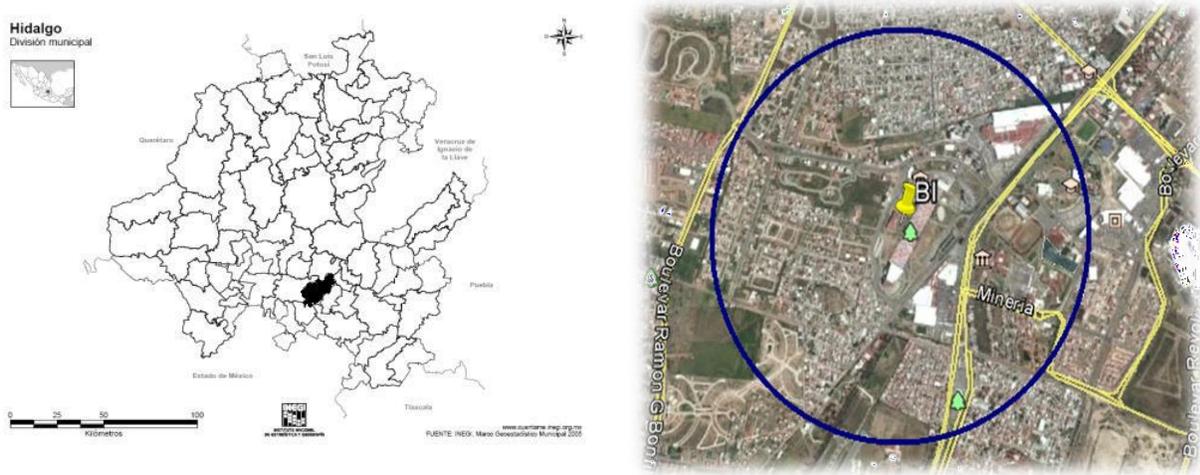


Ilustración 13. Área de colecta de egagrópilas (Biblioteca central, Ricardo Garibay)

Las egagrópilas se colectaron mensualmente, alrededor de la madriguera en el periodo comprendido entre el 2013-2017. Las muestras fueron hidratadas con agua desionizada por 30 min para facilitar su separación, una vez hidratadas se separó el contenido en hueso, pelo y artrópodos.



Ilustración 14. Madriguera de *Athene cunicularia* en biblioteca Ricardo Garibay (Fotografía. Olivares, 2013)

Las muestras se pesaron y se colocaron en vasos de polipropileno, para su digestión ácida en horno de microondas. Las muestras se llevaron a un volumen de 10 ml en matraz volumétrico para posteriormente ser analizadas por la técnica de espectroscopia de emisión atómica de plasma por acoplamiento inductivo (ICP) utilizando un equipo Perkin Elmer, Mod. Optima 8300, USA.

Los metales se determinaron en las muestras en base seca utilizando la ecuación 1

$$Cr = \frac{C_t}{P_m} \times V_{af} \times F_d \quad (1)$$

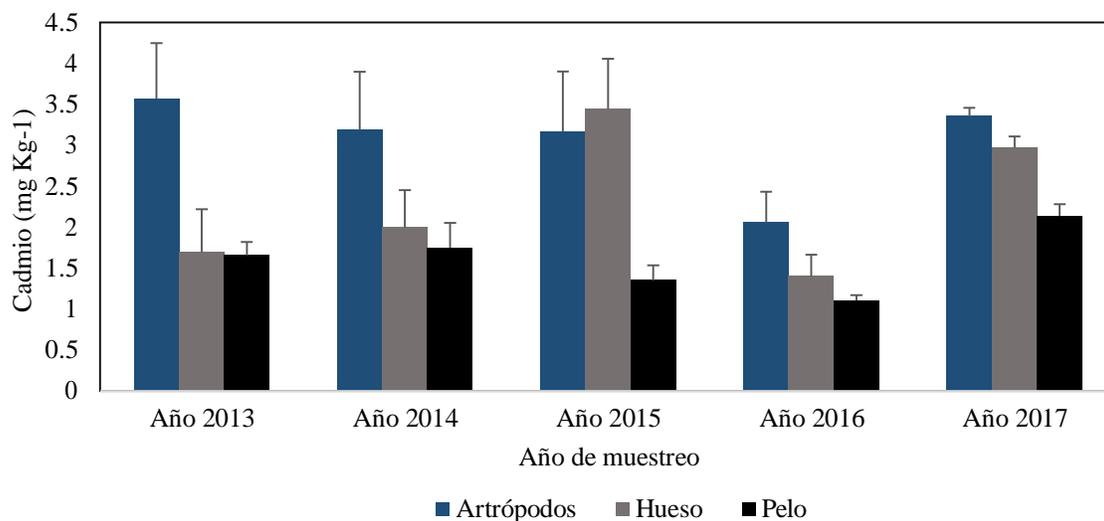
Se colectaron un promedio de 20 egagrópilas anuales, de las cuales, se obtuvieron 5 réplicas de cada muestra (artrópodos, hueso y pelo de roedor). Se determinaron los intervalos de concentración para las diferentes muestras, así mismo los promedios y el error estándar. Para conocer si existe una tendencia en el tiempo, se realizaron regresiones, relacionando el año (2013-2017) y la concentración (mg Kg^{-1}) de metales pesados para artrópodos, hueso y pelo contenidos en egagrópilas. Se utilizó un $\alpha=0.05$. Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el programa Sigma Stat 3.5.

3. RESULTADOS

Las concentraciones promedio de Cd, Cr, Mn, Cu, Zn y Sr en muestras de egagrópilas se presentan en la Tabla 4. El Cd y el Cu presentaron una mayor concentración en muestras de artrópodos, así mismo, el Zn y Sr en hueso de roedor.

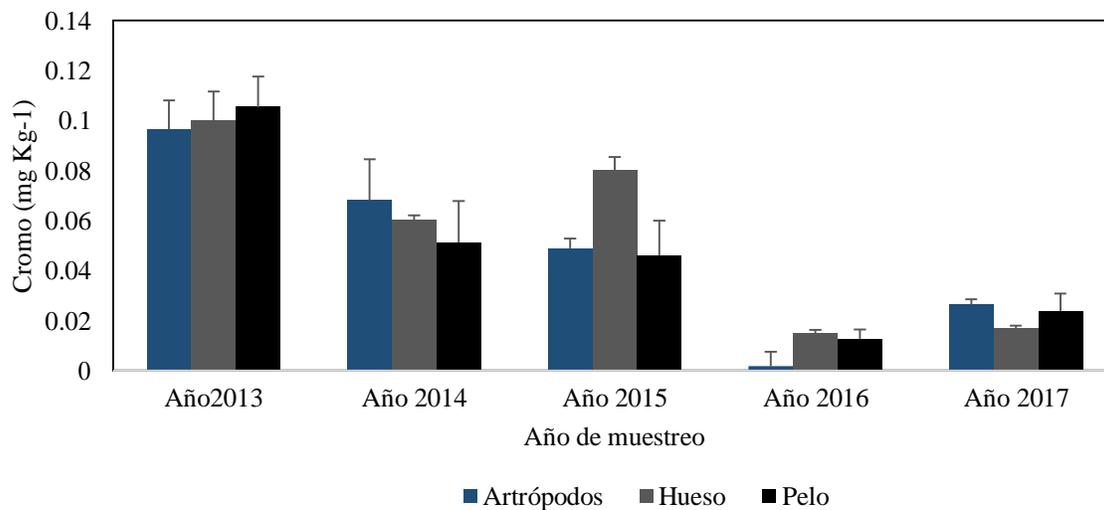
Al comparar las concentraciones entre años, de manera general se observó un descenso durante el 2016 en todas las concentraciones de metales. Se presentó una mayor acumulación de zinc y estroncio en tejido óseo y de cobre en restos de artrópodos. En las ilustraciones 15 a 20 se muestra la relación entre el año (2013-2017) y la concentración (mg Kg^{-1}) de metales pesados para artrópodos, hueso y pelo contenidos en egagrópilas de *Athene cunicularia* de una zona urbana de la ciudad de Pachuca.

Cadmio en egagrópilas (2013-2017)



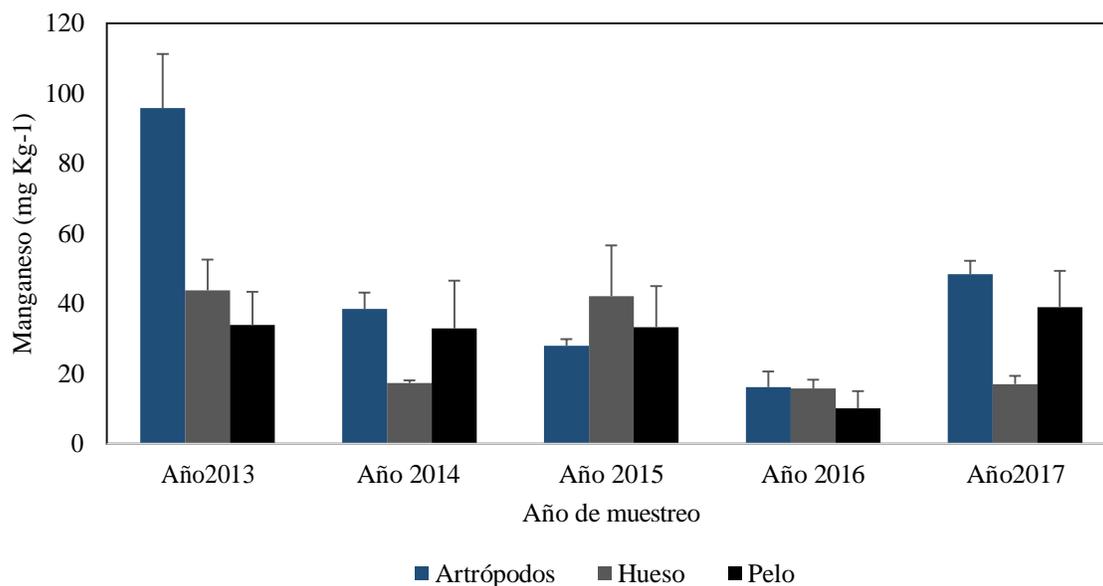
Gráfica 4. Niveles de cadmio en restos de artrópodos, hueso y pelo de roedor contenidos en egagrópilas de *Athene cunicularia* del área urbana de Pachuca Hidalgo

Cromo en egagrópilas (2013-2017)



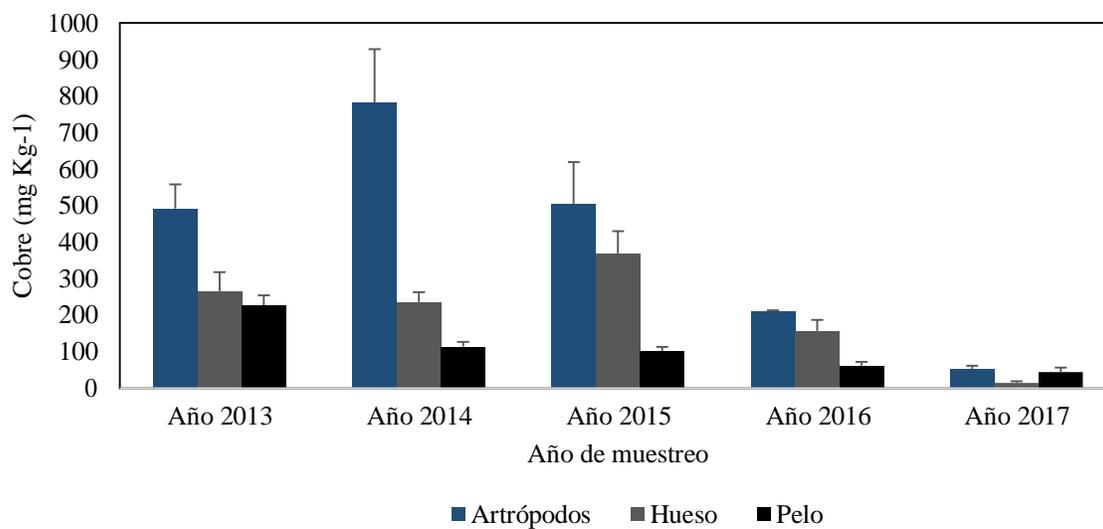
Gráfica 5. Niveles de cromo, en restos de artrópodos, hueso y pelo de roedor contenidos en egagrópilas de *Athene cunicularia* del área urbana de Pachuca Hidalgo

Manganeso en egagrópilas (2013-2017)



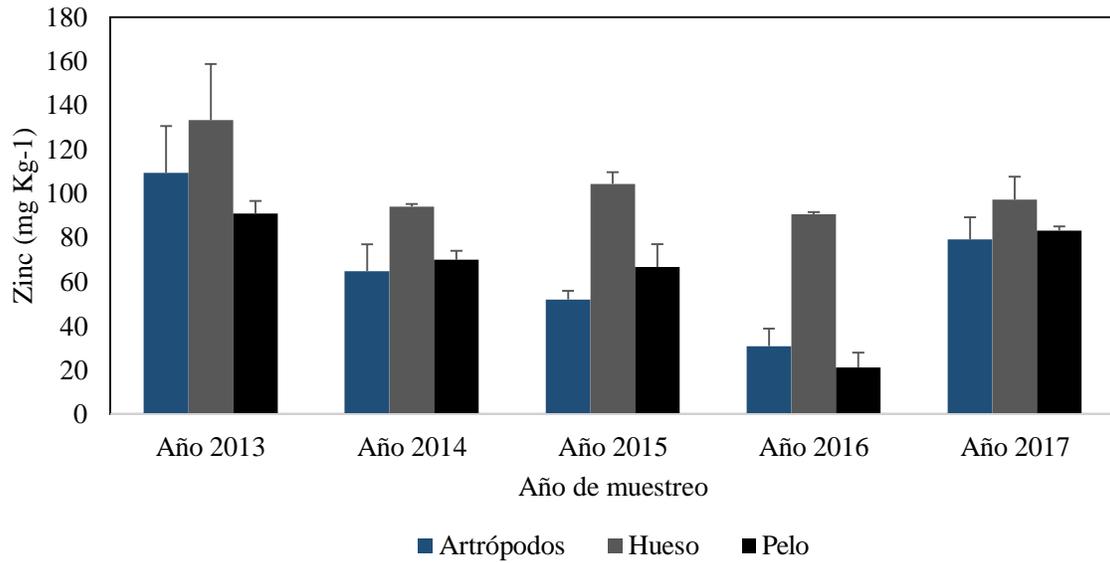
Gráfica 6. Niveles de cobre en restos de artrópodos, hueso y pelo de roedor contenidos en egagrópilas de *Athene cucicularia* del área urbana de Pachuca Hidalgo

Cobre en egagrópilas (2013-2017)



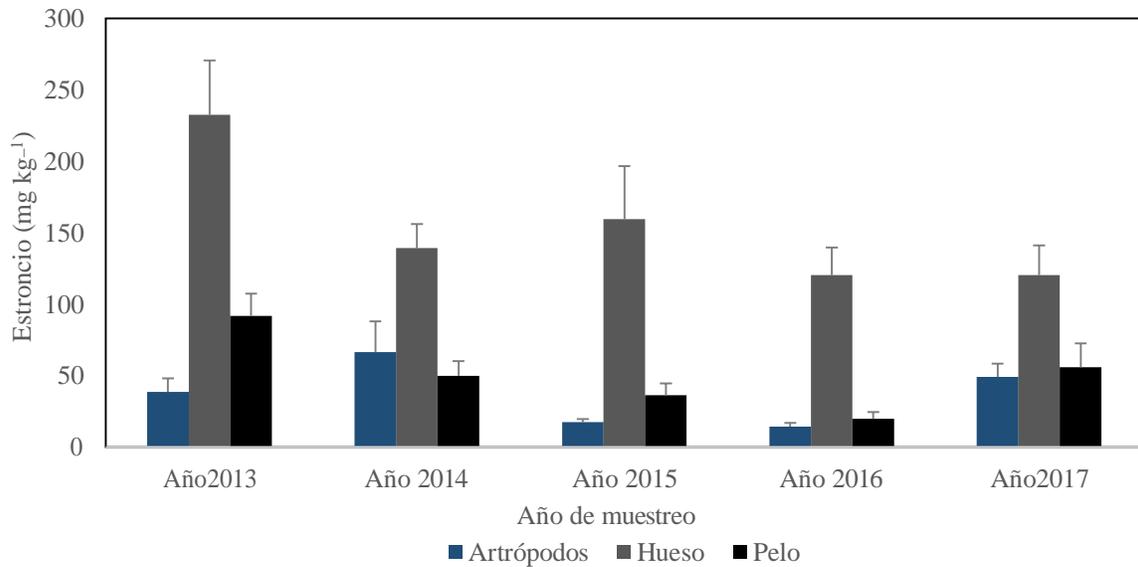
Gráfica 7. Niveles de cobre en restos de artrópodos, hueso y pelo de roedor contenidos en egagrópilas de *Athene cucicularia* del área urbana de Pachuca Hidalgo

Zinc en egagrópilas (2013-2017)



Gráfica 8. Niveles de zinc en restos de artrópodos, hueso y pelo de roedor contenidos en egagrópilas de *Athene cunicularia* del área urbana de Pachuca Hidalgo

Estroncio en egagrópilas (2013-2017)



Gráfica 9. Niveles de estroncio en restos de artrópodos, hueso y pelo de roedor contenidos en egagrópilas de *Athene cunicularia* del área urbana de Pachuca Hidalgo

Tabla 4. Concentración de metales (media \pm E. S; peso seco en mg Kg-1) en restos de artrópodos, hueso y pelo de roedor contenidos en egagrópilas de *Athene cunicularia*, en la ciudad de Pachuca Hidalgo, durante un periodo de 2013- 2017. Se reporta el intervalo de concentración (entre paréntesis)

Metal/ Muestra	2013	2014	2015	2016	2017
Cadmio					
Artrópodos	3.57\pm0.67 (2.57-5.69)	3.18\pm0.71 (1.79-3.99)	3.16\pm0.73 (1.79-4.68)	2.05\pm0.37 (0.84-2.12)	3.35\pm0.10 (0.05-0.16)
Hueso	1.69\pm0.52 (1.16-2.90)	1.74\pm0.30 (1.73-2.68)	1.34\pm0.18 (1.95-4.49)	1.10\pm0.06 (1.26-1.58)	2.13\pm0.14 (0.57-0.19)
Pelo	1.65\pm0.16 (1.47-1.81)	1.74\pm0.30 (1.40-2.29)	1.34\pm0.18 (1.14-1.65)	1.10\pm0.06 (0.99-1.16)	2.13\pm0.14 (0.08-0.59)
Cromo					
Artrópodos	0.096\pm0.016 (0.06-0.17)	0.068\pm0.016 (0.06-0.10)	0.048\pm0.003 (0.03-0.058)	0.017\pm0.005 (0.001-0.01)	0.026\pm0.002 (0.022-0.028)
Hueso	0.18\pm0.01 (0.09-0.15)	0.060\pm0.001 (0.05-0.06)	0.080\pm0.005 (0.06-0.09)	0.015\pm0.001 (0.013-0.016)	0.017\pm0.001 (0.015-0.017)
Pelo	0.105\pm0.012 (0.04-0.2)	0.051\pm0.016 (0.04-0.2)	0.046\pm0.013 (0.02-0.13)	0.013\pm0.003 (0.04-0.2)	0.024\pm0.007 (0.01-0.03)
Manganeso					
Artrópodos	95.83\pm15.41 (45.69-184.19)	38.52\pm4.61 (22.17-51.04)	27.91\pm1.93 (20.62-35.09)	16.10\pm4.50 (8.44-24.02)	48.43\pm3.74 (43.92-55.86)
Hueso	43.75\pm8.84 (24.90-65.13)	17.35\pm0.74 (15.68-18.46)	42.01\pm14.48 (14.17-103.62)	15.80\pm2.4 (14.78-16.92)	16.92\pm2.4 (11.59-19.90)
Pelo	33.86\pm9.43 (175.68-304.38)	32.84\pm13.65 (86.75-175.54)	33.19\pm11.75 (77.99-140.04)	10.09\pm4.85 (42.92-78.59)	38.98\pm10.28 (47.46-75.29)
Cobre					
Artrópodos	492.18\pm65.88 (356.20-671.80)	782.69\pm146.26 (259.80-1330.1)	505.34\pm114.25 (213.66-930.51)	211.45\pm50.61 (66.16-316.61)	244.58\pm80.34 (161.15-298.06)
Hueso	265.92\pm52.60 (175.57-414.55)	235.54\pm27.80 (160.94-320.85)	367.26\pm63.19 (195.22-556.29)	156.72\pm30.61 (78.59-251.53)	194.67\pm30.91 (215.01-247.72)
Pelo	227.27\pm27.10 (175.65-304.38)	113.57\pm13.35 (86.75-175.54)	102.83\pm9.89 (77.99-140.04)	61.71\pm10.34 (42.92-78.59)	59.23\pm12.12 (47.46-75.29)
Zinc					
Artrópodos	109.44\pm21.22 (47.28-137.40)	64.84\pm12.03 (60.66-106.15)	51.96\pm3.94 (34.73-62.78)	30.71\pm7.92 (19.18-45.92)	79.28\pm9.28 (63.43-97.56)
Hueso	133.40\pm25.39 (92.87-207.74)	94.14\pm1.18 (90.54-96.55)	104.39\pm5.24 (93.34-127.14)	90.61\pm0.99 (88.92-92.38)	97.31\pm10.39 (85.03-117.99)
Pelo	90.935\pm5.82 (77.43-105.50)	69.97\pm4.06 (62.25-86.55)	66.69\pm10.32 (32.64-103.79)	21.03\pm6.82 (11.95-34.40)	83.16\pm2.05 (80.77-87.26)
Estroncio					
Artrópodos	38.44\pm9.68 (12.80-68.51)	66.41\pm21.42 (28.94-143.05)	16.38\pm2.25 (8.77-22.53)	14.22\pm2.76 (8.82-17.95)	49.01\pm9.30 (38.06-67.53)
Hueso	232.58\pm37.89 (148.58-307.38)	139.25\pm16.95 (108.14-181.92)	159.38\pm37.18 (88.40-317.02)	120.33\pm19.37 (110.40-130.29)	120.31\pm20.75 (92.63-160.94)
Pelo	91.67\pm15.75 (73.58-154.56)	49.89\pm10.31 (33.93-85.55)	36.21\pm8.33 (19.39-69.60)	19.85\pm4.52 (12.77-28.27)	55.85\pm16.82 (24.60-82.26)

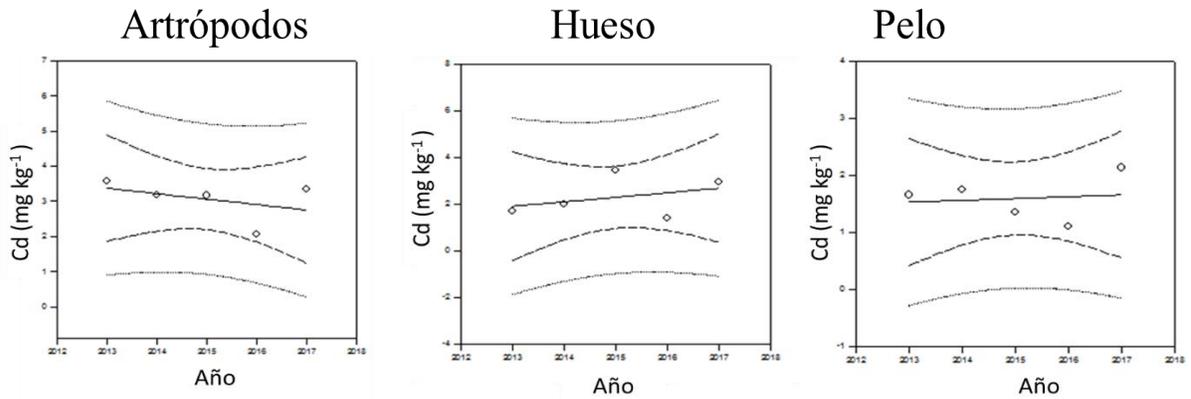


Ilustración 15. Relación entre el año (2013-2017) y la concentración (mg Kg-1) de cadmio para artrópodos, hueso y pelo contenidos en egagrópileas de *Athene cucicularia* de una zona urbana de la ciudad de Pachuca, Hidalgo.

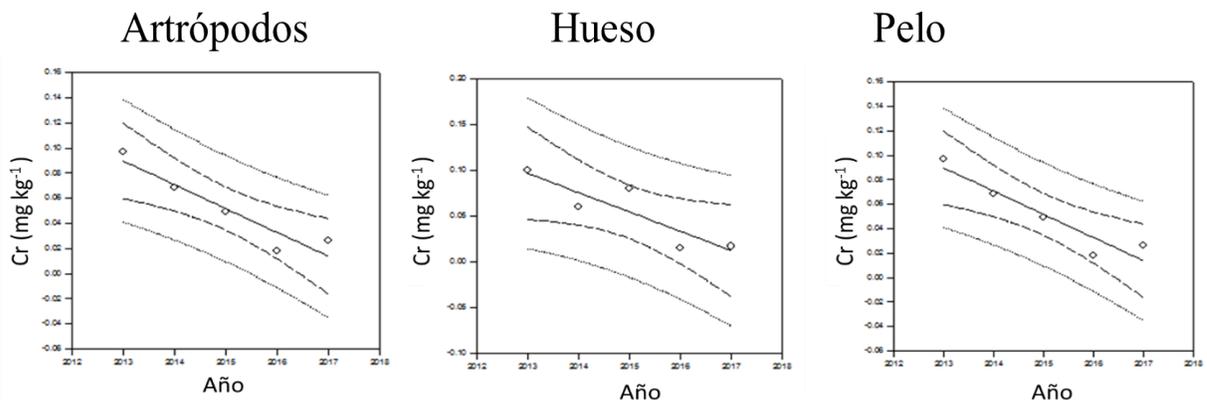


Ilustración 16. Relación entre el año (2013-2017) y la concentración (mg Kg-1) de cromo para artrópodos, hueso y pelo contenidos en egagrópileas de *Athene cucicularia* de una zona urbana de la ciudad de Pachuca, Hidalgo.

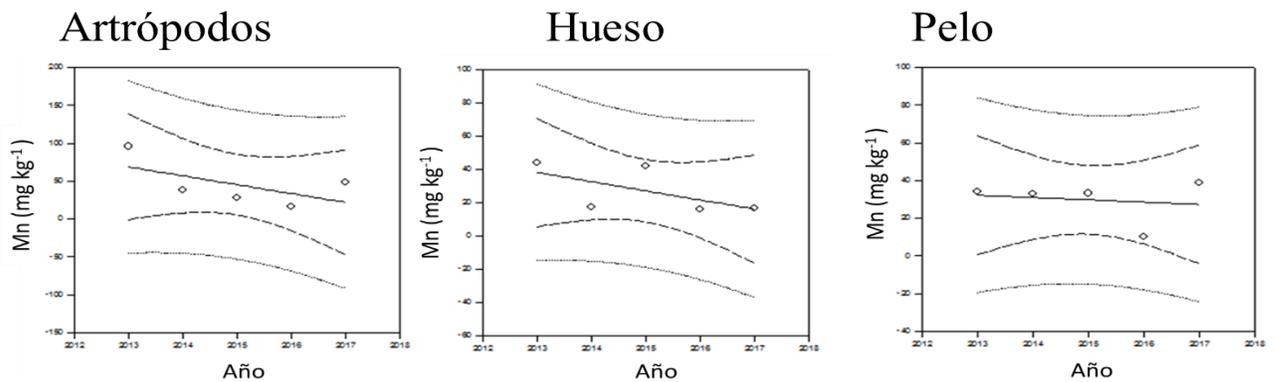


Ilustración 17. Relación entre el año (2013-2017) y la concentración (mg Kg-1) de manganeso para artrópodos, hueso y pelo contenidos en egagrópileas de *Athene cucicularia* de una zona urbana de la ciudad de Pachuca, Hidalgo.

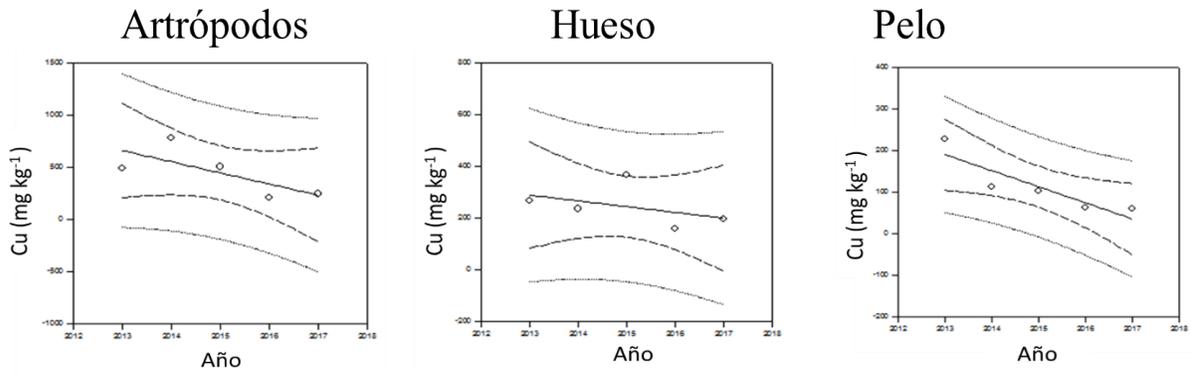


Ilustración 18. Relación entre el año (2013-2017) y la concentración (mg Kg-1) de cobre para artrópodos, hueso y pelo contenidos en egagrópilas de *Athene cunicularia* de una zona urbana de la ciudad de Pachuca, Hidalgo.

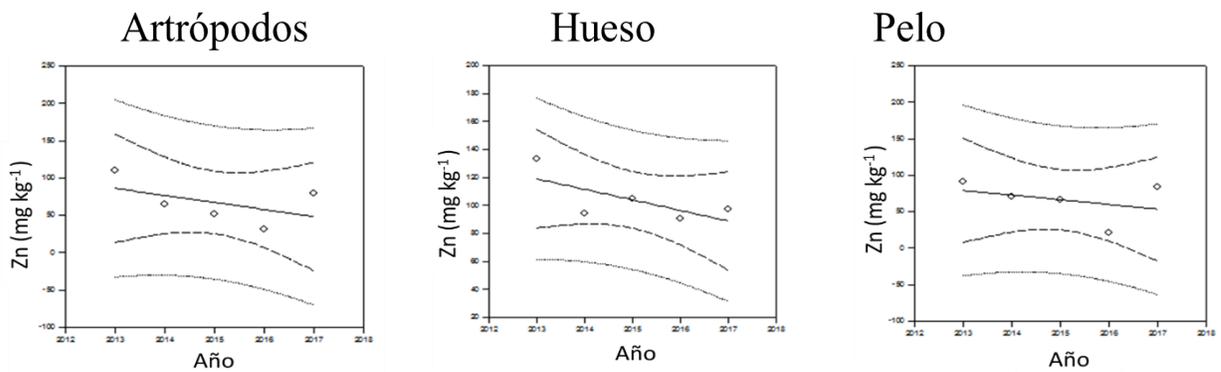


Ilustración 19. Relación entre el año (2013-2017) y la concentración (mg Kg-1) de zinc para artrópodos, hueso y pelo contenidos en egagrópilas de *Athene cunicularia* de una zona urbana de la ciudad de Pachuca, Hidalgo.

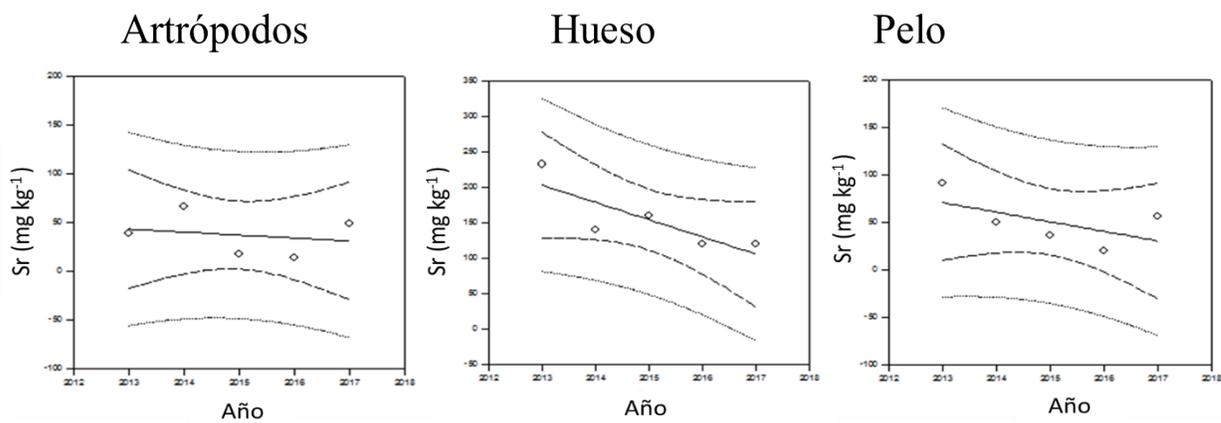


Ilustración 20. Relación entre el año (2013-2017) y la concentración (mg Kg-1) de estroncio para artrópodos, hueso y pelo contenidos en egagrópilas de *Athene cunicularia* de una zona urbana de la ciudad de Pachuca, Hidalgo.

Tabla 5. Modelo de regresión lineal, relación entre año y concentración de metales.

Metal/ Muestra	R²	F	p
Cadmio			
Artrópodos	0.177	0.647	0.476
Hueso	0.125	0.429	0.561
Pelo	0.0164	0.050	0.841
Cromo			
Artrópodos	0.855	24,575	0.016
Hueso	0.780	10.627	0.047
Pelo	0.891	24.575	0.016
Manganeso			
Artrópodos	0.365	1.725	0.280
Hueso	0.368	1.746	0.277
Pelo	0.0306	0.094	0.776
Cobre			
Artrópodos	0.530	3.383	0.163
Hueso	0.190	0.703	0.461
Pelo	0.806	12.426	0.039
Zinc			
Artrópodos	0.255	1.026	0.384
Hueso	0.483	2.806	0.190
Pelo	0.141	0.491	0.532
Estroncio			
Artrópodos	0.050	0.159	0.715
Hueso	0.682	6.437	0.084
Pelo	0.360	1.691	0.283

4. DISCUSIÓN

En general, todas las muestras analizadas presentaron metales pesados. Su presencia puede atribuirse a actividades como la minería y la urbanización. La ciudad de Pachuca se localiza en un distrito minero, por lo que tiene jales (residuos de mina) que resultaron de la acumulación de más de 200 años de extracción de oro y plata; aunado a esto, las condiciones meteorológicas favorecen la dispersión de partículas de dichos jales (Hernández *et al.*, 2009). Así mismo, el proceso de urbanización se encuentra altamente asociado al incremento de metales pesados en ambiente, particularmente para zonas residenciales y recreativas, se ha visto una alta asociación con cadmio, plomo, zinc y cobre (Wang *et al.*, 2017). En la ciudad de Pachuca se ha reportado un incremento anual en la urbanización de 2.89% (Hernández

et al., 2017); así como un crecimiento de la población en los últimos años del 68 % (INEGI, 2010).

Se observó que el patrón en la concentración para los tres tipos de muestras (pelo, hueso y restos de artrópodos) es similar ($\text{Cu} > \text{Sr} > \text{Zn} > \text{Mn} > \text{Cd} > \text{Cr}$). Es importante detallar de manera particular el comportamiento de cada uno de los metales, por lo tanto, se describen a continuación los aspectos más relevantes.

Cobre

El cobre es un elemento esencial en el metabolismo humano, y es ampliamente utilizado en tuberías, cableado y aleaciones (ATSDR, 2004). Los niveles de cobre observados en el presente estudio se encuentran en el rango de lo reportado por Skubala y Kafel (2004) (774.4 mg Kg^{-1}) en diferentes especies de artrópodos del género *Oribatidae*. Para las muestras de roedor la literatura reporta concentraciones inferiores, en hueso Martiniaková *et al.* (2011) obtuvieron concentraciones entre 0.87 a 4.66 mg Kg^{-1} en *Microtus arvalis*. Para el pelo, Kahazae *et al.* (2015) observaron una concentración de $10.2 \pm 3.7 \text{ mg Kg}^{-1}$ en *Meriones persicus*. La concentración alta ($78.59\text{-}556.29 \text{ mg Kg}^{-1}$) en pelo de roedores puede ser debida a que en el área de estudio hay tuberías de cobre que son utilizadas por los roedores como zona de resguardo, sin embargo, se presenta una tendencia a disminuir a través del tiempo, esto puede deberse a que las tuberías de cobre son cada vez menos utilizadas en la construcción. Para artrópodos, la concentración de cobre se atribuye en parte a la quitina; de acuerdo con Skubala y Kafel (2004) los artrópodos cuentan con una proteína llamada hemocianina, la cual realiza un papel homólogo a la hemoglobina, sin embargo, a diferencia de ésta, que forma enlaces con hierro, la hemocianina forma enlaces con cobre.

Estroncio

De acuerdo con el SGM (2017) México es el tercer productor de estroncio a nivel mundial. El estroncio se encuentra en la lista de sustancias peligrosas de la Health Hazards Assessments Group (HHAG). Es un metal usado en pirotecnia y bengalas rojas (ATSDR, 2004). Se han reportado estudios que demuestran que la exposición a una alta concentración de estroncio está asociada a Parkinson (Sun, 2017). El nivel de Sr en el presente estudio se encontró dentro del intervalo reportado por Godwing *et al.* (2016) en contenidos estomacales de *Tachycineta bicolor* (de 0.6 a 150 mg Kg^{-1}); por Kahazae *et al.* (2015) en pelo y hueso

de *Meriones persicus* (8.8 a 44.1 mg Kg⁻¹ y 180.1 a 202.8 mg Kg⁻¹ respectivamente), en ninguno de estos estudios se observaron efectos adversos en los organismos a dichas concentraciones. El estroncio no presentó una tendencia definida a lo largo del tiempo, sin embargo, se observó que su acumulación en las muestras sí cumple un patrón (hueso >pelo> artrópodos), esto se debe a que el estroncio suele tomar el papel del calcio durante el desarrollo y formación del hueso (Martiniavková *et al.*, 2010), así mismo, estos autores mencionan que una exposición constante a este elemento puede inducir osteomalacia y raquitismo.

Zinc

El Zinc es un metal esencial (Bradl, 2005). Se han observado altas cantidades en aguas negras, en las zonas de minería, la fundición de metales y algunos agroquímicos; es importante destacar que la exposición a altos niveles de Zn puede provocar desde ligeros trastornos hasta cáncer (Gunnar, 2012). En la actualidad, la mayoría de los rodenticidas se fabrican a base de zinc (Aranda *et al.*, 2001). En el área de estudio se ha observado el uso de algunas de las fuentes de zinc antes mencionadas (riego con aguas tratadas, agroquímicos y trampas de cebo para roedores), a pesar de estas prácticas, los niveles obtenidos en el presente estudio se encontraron dentro del intervalo reportado para otros roedores. Por ejemplo, Hubbard (2012) reportó una concentración de 150 mg Kg⁻¹ en pelo de *Spermophilus beecheyi*; Martiniavková *et al.* (2011) en fémur de *Microtus arvalis* reportaron de 129.45 a 138.52 mg Kg⁻¹ de Zn en Eslovaquia. Para artrópodos la información a la fecha es escasa, sin embargo, se encontró un estudio en diferentes especies de coleópteros, realizado por Butovsky (2011), donde se reporta una concentración de 62.8 a 118.7 mg Kg⁻¹. En ninguno de estos estudios se han observado daños en los organismos a dichas concentraciones. La ATSDR (2005) reportó que a una concentración de 333 mg Kg⁻¹ de sulfato de zinc se alcanza la LD (dosis letal) en ratas, por lo tanto, en futuras investigaciones sería conveniente analizar las formas en las que se encuentra el zinc o sus interacciones con otros elementos en el área de estudio. Durante el monitoreo del zinc no se observó una tendencia a incrementar o disminuir a través de los años, al igual que el resto de los metales se presentó un descenso en los niveles durante el 2016. De acuerdo con Rubio *et al.* (2007), el hueso alberga hasta el 90% de la carga corporal de zinc, ya que forma parte del metabolismo y desarrollo del tejido óseo, en el

presente estudio se confirma que existe mayor acumulación en hueso de roedor respecto a la concentración en pelo de roedor y restos de artrópodos.

Manganeso

El manganeso es un producto de la minería, además se utiliza principalmente en la producción del acero, es antidetonante en gasolinas en forma de MMT (*Metilciclopentadienil Manganeso Tricarbonil*) y se encuentra en algunos agroquímicos (Gunnar, 2012). Es un elemento esencial en cantidades traza, sin embargo, una exposición prolongada a niveles elevados, puede desencadenar daños en los seres vivos (ATSDR. 2001). El manganeso se observó en todas las muestras analizadas y su presencia se atribuye a que el área de estudio es una zona urbana con un continuo tránsito vehicular y jardines con vegetación ornamental. Los datos obtenidos en el presente estudio se encuentran dentro de los intervalos reportados en la literatura, y no se encontró algún reporte de efectos adversos a dichas concentraciones. Hubbart (2012) reportó concentraciones en pelo de *Spermophilus beecheyi* de 22.49 mg Kg⁻¹ de Mn en California, concentración inferior al promedio en el presente estudio, sin embargo, Gdula *et al.* (2004) reportaron en huesos (dientes) de *Clethrionomys glareolus* una concentración de hasta 140.1 mg Kg⁻¹ en Polonia, superior a la concentración máxima encontrada en este trabajo (103.62 mg Kg⁻¹). Así mismo, Butovsky (2011) reportó para diferentes especies de coleópteros concentraciones de manganeso de 26.7 a 29.1 mg Kg⁻¹. A excepción del pelo, las muestras se encuentran dentro de los intervalos de los datos reportados en la literatura. Las muestras al igual que con el resto de los metales, presentaron un descenso en la concentración de Mn durante el 2016.

Cadmio

El cadmio, es particularmente importante ya que es el séptimo elemento tóxico de mayor prioridad según la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR, 2016). Se cuenta con escaso conocimiento sobre el nivel al que se pueden presentar efectos adversos en los seres vivos; sin embargo, es importante considerar en futuras investigaciones, algunos parámetros de muestreo y observar si existen anomalías en los grupos a estudiar (morfométricas, celulares, densidad poblacional, entre otras). Al comparar los datos del presente estudio con la literatura, se observa un nivel de cadmio similar a lo reportado para artrópodos por Sánchez *et al.* (2010) (2.60 mg Kg⁻¹); en hueso de roedor (*Microrus arvalis*) por Martiniaková *et al.* (2010) (0.93 a 4.05 mg Kg⁻¹); y en pelo de roedor (*Rattus norvegicus*)

por Mc Lean, *et al.* (2009) (0.16 a 1.3 mg Kg⁻¹), dichos estudios se realizaron en zonas con algún grado de perturbación por actividades antropogénicas, a pesar de esto, no mencionan anomalías a dichas concentraciones. Los restos de artrópodos analizados mostraron niveles más altos de cadmio en comparación con pelo y hueso, lo que puede atribuirse a la presencia de quitina en los artrópodos, ya que algunos metales pesados tienen una alta afinidad por la misma, particularmente el cadmio y el cromo (Anastopoulos *et al.*, 2017). En el presente estudio, el comportamiento del cadmio en el tiempo no tiene una tendencia establecida, sin embargo, es evidente un descenso de los niveles durante el año 2016 para los tres tipos de muestras. El área de muestreo, cuenta con zonas de vegetación ornamental y se aplican diferentes agroquímicos para su manejo, así como el riego frecuente mediante aguas tratadas, por lo tanto, esto puede ser un factor que esté propiciando la variación entre años. El cadmio, en Hidalgo cobra importancia debido a que es un promotor de los defectos de tubo neural en neonatos (Fernández *et al.*, 2004) y en Pachuca particularmente, la quinta causa de muerte en recién nacidos es por defectos de tubo neural, ya que tiene la capacidad de atravesar la barrera placentaria (Muñoz y Ortíz, 2003).

Cromo

El cromo es uno de los contaminantes ambientales más importantes, origina una amplia variedad de manifestaciones de toxicidad (Becerra *et al.*, 2014). El aire urbano tiene más cromo respecto al rural debido al hecho de que las actividades antropogénicas son la principal causa de liberación de Cr. Las fuentes de Cr incluyen fundiciones, instalaciones de galvanizado, plantas de energía, vehículos de motor y asfalto (Hui, 2002). Como referencia los datos obtenidos en el presente estudio, se encuentran en el intervalo reportado por Pereira *et al.* (2006) en pelo de *Rattus rattus* y *Mus spretus* respectivamente (0.232 - 0.066 y 0.579 - 0.165 mg Kg⁻¹) en una zona minera de Portugal. En hueso de roedor Kahazae *et al.* (2015) reportaron una concentración de 0.0075–0.0148 mg Kg⁻¹ en *Rattus norvegicus* en una zona de minera en Irán. En artrópodos obtenidos del contenido estomacal de *Tachycineta bicolor* en Canadá, Godwing *et al.* (2016) reportaron concentraciones de 0.642–1.377 mg Kg⁻¹. La concentración de cromo no presentó un patrón de acumulación; en estudios previos realizados por Kahazae *et al.*, (2015) al comparar las concentraciones de pelo y hueso en *Rattus norvegicus*, tampoco se presentó una mayor afinidad, por alguna de las dos muestras. Respecto a la comparación entre años, se observó un descenso en la concentración durante

el 2016; así mismo se observó una tendencia a disminuir a lo largo del tiempo para los tres tipos de muestras. Se ha considerado que el pelo es un buen material como indicador biológico en el monitoreo de contaminación ambiental por cromo, ya que se ha comprobado que existe una alta correlación entre la concentración encontrada en hígado y riñón con el pelo de roedores (Pereira *et al.*, 2006). Por lo tanto, la concentración de Cr en pelo encontrado en el presente estudio refleja la presencia y acumulación de este metal en órganos internos.

5. CONCLUSIÓN

Se verificó la presencia de Cd, Cr, Mn, Cu, Zn y Sr en egagrópilas de tecolote llanero (*Athene cunicularia*) en la ciudad de Pachuca, Hidalgo. El monitoreo de las concentraciones de metales en egagrópilas permitió confirmar la incorporación de estos elementos en diferentes niveles tróficos, además de conocer que, de manera general a excepción del cadmio, los elementos no se encuentran a concentraciones que se consideren alarmantes, sin embargo, esto también puede deberse a la escasez de datos como comparativo. El zinc y el estroncio se presentaron en mayor concentración en tejido óseo de roedores, así mismo el cobre tendió a acumularse en artrópodos. Por lo tanto, se concluye que las egagrópilas son una herramienta eficaz y no invasiva que puede utilizarse para el monitoreo de metales pesados en diferentes ambientes.

VIII. CAPÍTULO III- Tecolote llanero como indicador de cadmio, en Tecocomulco, Hidalgo, México. (Dinámica en *Athene cunicularia*)

1. INTRODUCCIÓN

Las actividades antropogénicas han incrementado la emisión de metales pesados al ambiente, los cuales son no biodegradables, tienden a acumularse en los organismos vivos y circulan a través de las redes tróficas (Khazaei *et al.* 2015). Estudios previos han reportado que existe una correlación positiva entre los metales pesados en el ambiente y la concentración en poblaciones naturales de animales (Beernaert *et al.* 2007; Tete *et al.* 2014; Khazaei *et al.* 2015). El cadmio es un elemento metálico pesado no esencial para el desarrollo de plantas y animales, presenta alta toxicidad aun a muy baja concentración y causa efectos agudos y crónicos en la salud de la población humana y el medio ambiente, no es degradable en la naturaleza y, por lo tanto, una vez liberado al medio ambiente permanece en circulación, además tiene una vida media muy amplia y tiende a ser bioacumulable (Ehn, 2003).

Para conocer el efecto de los metales pesados en los organismos vivos se requiere del uso de bioindicadores, ya que éstos pueden presentar un panorama de la calidad de su hábitat (Market *et al.*, 2003). Algunos grupos de aves son frecuentemente reportados en la literatura cuando se habla de bioindicadores y metales pesados, en particular las aves rapaces y las acuáticas debido a su jerarquía dentro de la red trófica (Burger y Gochfeld, 2001).

El tecolote llanero (*Athene cunicularia*) es un ave rapaz que se distribuye en el continente Americano desde el sur de Canadá hasta Sudamérica, se alimenta principalmente de invertebrados (insectos y arácnidos), pero también consume mamíferos, anfibios, reptiles y otras aves; es una especie que llega a desplazarse de uno a tres kilómetros al día dependiendo de la disponibilidad de recurso, su hábito de anidación es a nivel de suelo (Poulin *et al.* 2011). En Canadá *Athene cunicularia* es considerada como amenazada, en Estados Unidos, como una especie de preocupación menor y en México está sujeta a protección especial (Poulin *et al.* 2011). Es importante considerar que al trabajar con especies amenazadas o en peligro de extinción, el sacrificio de los individuos para evaluar el contenido de metales tóxicos no sólo implica perturbaciones de la dinámica de la población, sino también la disminución de individuos, por lo tanto, por razones éticas, el sacrificio de individuos es cada vez menos utilizado y en su lugar se utilizan técnicas de muestreo y análisis no invasivas, las cuales han adquirido mayor auge (Tete *et al.*, 2014).

El contar con respuestas anticipadas a un posible daño por metales es una de las funciones principales de los indicadores biológicos, es por esta razón que en el presente estudio se hace énfasis en el uso y evaluación de dos indicadores no invasivos, las plumas y egagrópilas obtenidos de tecolote llanero (*Athene cunicularia*) sin necesidad de manipular o sacrificar individuos.

Burger, (2013) propuso el uso de plumas como bioindicadores, destacando que éstas pueden secuestrar los elementos metálicos provenientes del torrente sanguíneo, y en ellas se refleja la concentración de metales de los tejidos internos del ave; también reporta que existe correlación entre los niveles de metales en plumas respecto a la dieta del ave. Las plumas son buenas indicadoras de contaminación por metales, especialmente para aquellos ligados a compuestos orgánicos como mercurio (Hg) o selenio (Se) que se acumulan en el plumaje (Zhang y Zhang, 2011). La pluma es muy útil debido a que posterior a su proceso de formación, el suministro de sangre se atrofia y la pluma queda aislada del resto del cuerpo, consecuentemente no puede existir futura acumulación de elementos tóxicos provenientes del flujo sanguíneo (Veerle *et al.* 2004; Bond y Diamond, 2009).

Por otro lado, las aves rapaces regurgitan periódicamente materiales no digeridos de su dieta tales como pelo, plumas, huesos, partes esclerotizadas de insectos, etc. Las egagrópilas o bolos de regurgitación son materiales de suma utilidad para estudiar la dieta de las aves que las producen (Trejo y Ojeda, 2002), además de que los materiales que las componen pueden ser utilizados como indicadores de contaminación ambiental por metales pesados Demajo *et al.* (2011). Mc Lean *et al.* (2009), han mencionado particularmente que el pelo de roedores ofrece un panorama amplio de la concentración de elementos contaminantes en los tejidos internos de los organismos, evitando su sacrificio; de esta manera, las egagrópilas pueden proporcionar información de la cantidad de elementos metálicos contenidos en los diferentes organismos que se encuentran en la dieta de los tecolotes y permiten tener un panorama de bioacumulación de los metales en los diferentes niveles de la red trófica.

Por lo anterior, en el presente estudio se utilizó el tecolote llanero para investigar la presencia de cadmio (Cd) en tejidos internos y externos y conocer si las plumas y egagrópilas pueden ser útiles como modelo que permita monitorear contaminación por elementos metálicos en diversos ambientes mediante técnicas no invasivas, a bajo costo y que ofrezcan datos

confiables. Se eligió el elemento Cd porque es uno de los cinco elementos más tóxicos y con mayor tiempo de permanencia y vida media; en pequeñas concentraciones produce efectos de toxicidad en los organismos, y su importancia toxicológica radica en que es mutágeno, teratógeno y cancerígeno (Waalkes, 2003). El Cd suele sustituir a otros elementos metálicos durante las fases de formación y desarrollo de los tejidos (Martiniaková *et al.* 2010).

El estudio se realizó en la laguna de Tecocomulco, Hidalgo; donde el aprovechamiento inadecuado de los recursos naturales, así como la presión por cambio de uso del suelo hacia las actividades agrícolas y el pastoreo desmedido han tenido un efecto negativo no sólo en los ecosistemas terrestres y en los agrosistemas, si no en el ambiente en general (FIR, 2003).

2. METODOLOGÍA

Un cadáver de tecolote llanero *Athene cunicularia* fue donado al Laboratorio de Interacciones Biológicas del Centro de Investigaciones Biológicas de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. El individuo provino de un área adyacente a la laguna de Tecocomulco, en el municipio de Cuatepec de Hinojosa, estado de Hidalgo (entre los 20° 46' y los 28° 26' LN y 98° 17" y 98° 30' LO). La temperatura media anual es de 15 °C, con un clima templado frío. El suelo es de tipo semidesértico rico en materia orgánica y nutrientes su uso es principalmente de agostadero, forestal y agrícola.

Obtención y preparación de muestras

Plumas. Se separaron las plumas primarias de ambas alas (10 de cada ala); se enumeraron de la P1 a P10 y se segmentaron como se muestra en la ilustración 1. De cada pluma se tomó el segmento 1 (barbas) y el segmento 5 (cálamo) para el análisis de contenido de Cd.

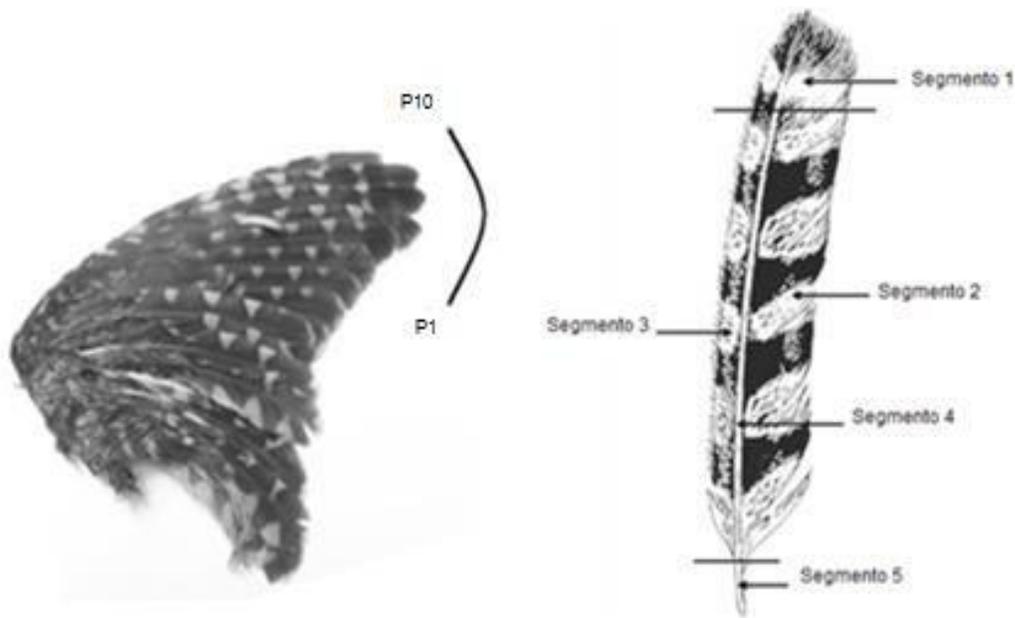


Ilustración 21. Separación y fragmentación de plumas del tecolote llanero para su posterior análisis (de acuerdo a Dauwe et al., 2003)

Tejidos. Se realizó la taxidermia del organismo y se extrajeron 11 muestras: hígado, riñón, pulmones, fémur, esternón, pico, garras, corazón, estómago, músculo y glándula uropigeal. Las muestras de tejido se lavaron con agua desionizada y se secaron en una estufa hasta alcanzar un peso constante.

Egagrópilas: Se colectaron egagrópilas alrededor de la madriguera, estas muestras fueron hidratadas con agua desionizada por 30 min para facilitar su separación, una vez hidratadas se separó el contenido en hueso, pelo y artrópodos.

Suelo. Se colectaron tres muestras de 100 g de suelo superficial cerca de la madriguera, éstas, fueron secadas a temperatura ambiente hasta que se mantuvieron a peso constante para su posterior análisis.

Procesamiento de las muestras

Digestión de muestras orgánicas. Las muestras se pesaron en una balanza analítica, se colocaron en vasos de polipropileno. Una vez terminada la digestión, se enfriaron a temperatura ambiente y cada muestra se llevó a un volumen de 10 ml en matraz volumétrico

Digestión de suelo. Se colocaron 0.2 g de suelo en un vaso de polipropileno, se adicionaron 5 ml agua desionizada, 5 ml de ácido fluorhídrico (HF), 1 ml de HNO₃ y 3 ml de HCl. La

digestión se realizó en las mismas condiciones mencionadas anteriormente (metodología general); finalmente las muestras se aforaron a 50 ml con agua desionizada.

Análisis de Cd. Las muestras fueron analizadas por la técnica de espectroscopia de emisión atómica de plasma por acoplamiento inductivo (ICP) utilizando un equipo Perkin Elmer, Mod. Optima 8300, USA. A partir de un estándar certificado de Cd se prepararon estándares de trabajo para realizar la curva de calibración.

El Cd se determinó en las muestras en base seca utilizando la ecuación 1

$$Cr = \frac{C_l}{P_m} \times V_{af} \times F_d \quad (1)$$

Análisis estadísticos. Los datos de concentración de Cd entre las plumas internas y externas del ala se analizaron mediante pruebas de t pareada. La normalidad de los datos se verificó con la prueba de bondad de ajuste de Kolmogórov-Smirnov. Se utilizó un $\alpha=0.05$ y, en caso de haber réplicas, se reporta la media±error estándar. Los análisis se realizaron utilizando el programa Sigma Stat 3.5.

3. RESULTADOS

Los valores medios de la concentración de Cd en suelo, plumas, egagrópilas y tejidos de *Athene cunicularia* se muestran en la Tabla 6. Los rangos de concentración en la mayoría de las muestras analizadas son muy amplios debido a que son diferentes entre tipo de muestra. La mayor concentración de Cd se presentó en suelo. En todos los tejidos, así como en plumas y egagrópilas, se comprobó la presencia de Cd. Dentro de los diferentes tejidos del tecolote la mayor concentración se presentó en plumas y las menores concentraciones en tejidos internos como músculo, hígado y fémur. Por otra parte, en las egagrópilas la cantidad de Cd más alta se observó en los restos de artrópodos.

Tabla 6. Concentraciones promedio de Cd en suelo, plumas y egagrópilas

	MUESTRA	Cd (mg Kg⁻¹)*	N
Suelo	Suelo	66.82±6.73	3
Plumas	Pluma cálamo	3.32 ±0.2	10
	Pluma barbas	2.80±0.2	10
	Pluma cálamo **	2.96±0.40	10
	Pluma barbas **	3.09±0.31	10
Egagrópilas	Pelo (roedor)	0.87 ± 0.09	4
	Hueso (roedor)	0.69 ± 0.05	4
	Artrópodos	0.93 ± 0.22	3
Tejidos	Fémur	0.216	1
	Pico	0.262	1
	Hígado	0.228	1
	Riñón	0.618	1
	Estómago	0.224	1
	Esternón	0.352	1
	Glándula uropigial	0.533	1
	Garras	0.866	1
	Corazón	0.261	1
	Pulmón	0.621	1
	Músculo	0.186	1

*Concentración promedio ± error estándar. N= número de muestras

** Correspondiente al ala 2

Las concentraciones promedio de Cd determinadas para cada pluma (P1-P10) y para ambas alas se muestran en la Tabla 7. El contenido de Cd en las plumas varió entre 1.65 y 4.37 mg Kg⁻¹. Se encontró una mayor concentración de Cd en los cálamos de las plumas de la parte interna del ala (P1-P5) que en la parte externa (P6-P10) ($t = 7.451$, $g.l= 4$, $P = 0.002$). Para las barbas se observó el mismo patrón ($t = 10.170$, $g.l=4$, $P = 0.001$). Al comparar los cálamos del ala 1 contra los cálamos del ala 2 no se encontraron diferencias significativas ($t = 1.369$, $g.l=9$, $P = 0.204$).

Tabla 7. Concentraciones promedio de Cd en plumas

Muestra	Cd (mg Kg ⁻¹)	
	Cálamo	Barbas
P1	3.74	3.57
P2	4.37	3.39
P3	4.19	3.57
P4	3.59	3.41
P5	3.61	3.73
$\bar{x} \pm E.S^*$	3.89±0.16	3.53±0.06
Pluma	Cálamo	Barbas
P6	2.97	2.73
P7	2.73	2.32
P8	2.38	2.33
P9	1.65	2.24
P10	2.18	2.17
$\bar{x} \pm E.S^*$	2.38±0.23	2.36±0.09

*Concentración promedio \pm error estándar.

4. DISCUSIÓN

Suelo

El contenido de Cd en suelo fue de 66.82 ± 6.73 mg Kg⁻¹, y este valor excede los límites permisibles para tierras de uso agrícola, residencial o comercial de acuerdo con la norma mexicana (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004), ya que no debe sobrepasar los 37 mg Kg⁻¹. Por lo tanto, se considera a los suelos de la laguna de Tecocomulco como suelos contaminados por Cd. En los terrenos aledaños a la laguna de Tecocomulco se realizan algunas prácticas no reguladas, como las actividades agrícolas y el pastoreo desmedido y de acuerdo con Ramírez (2002), estas prácticas contribuyen al incremento de cadmio en el ambiente y particularmente en suelo, ya que del total de la carga de este elemento, el 54% se debe a fertilizantes fosfatados, el 41 % a deposiciones aéreas y el 5 % a estiércol de animales.

Plumas

Burger y Gochfeld, (1994) determinaron que a partir de 2 mg Kg⁻¹ de cadmio en plumas se pueden presentar distintos desórdenes de conducta, fisiológicos y alimentarios en las aves. En el presente estudio, la concentración observada en plumas (2.96 ± 0.40 - 3.32 ± 0.2 mg Kg⁻¹) supera lo reportado, sin embargo, hasta la fecha no se ha realizado ningún estudio que describa anomalías en la etología de las aves de Tecocomulco, Hgo.

Egagrópilas

Los restos de artrópodos analizados, presentaron la mayor concentración de cadmio en comparación al resto de las muestras obtenidas de las egagrópilas. Los artrópodos que consumen los tecolotes son principalmente artrópodos que viven en el suelo (e.g., escarabajos, hormigas, arañas, etc.), por lo tanto, incorporan contaminantes del mismo. Los artrópodos constituyeron el mayor porcentaje en la dieta de *A. cunicularia*, por lo que puede pensarse que estos animales contribuyen de manera importante a la incorporación de cadmio a la especie. Godwin *et al.* (2016), mencionan que las concentraciones de Cd varían de 0.008 a 1.339 mg Kg⁻¹ en contenidos estomacales de *Tachycineta bicolor*, en zonas de explotación de arenas petrolíferas en Canadá. Por lo tanto los valores obtenidos en el presente estudio se encuentran en el rango de lo reportado previamente.

En cuanto al pelo de roedor, los datos del presente estudio son superiores al intervalo de datos reportados por Pereira *et al.*, (2006), quienes obtuvieron concentraciones de 0.228±0.027 a 0.401±0.214 mg Kg⁻¹, en diferentes especies de roedores en una zona contaminada por minería en Portugal. La presencia de Cd se atribuye a la contaminación del área y a que el pelo es un tipo de tejido formado por queratina, lo que de acuerdo con Khazae *et al.* (2015), facilita que algunos metales como el cadmio se acumulen.

Hueso de roedor, al comparar los resultados obtenidos en el presente estudio, éstos son superiores a lo reportado por Martiniaková *et al.*, (2010) quienes encontraron concentraciones de Cd de 0.00274 a 0.00376 mg Kg⁻¹ en hueso de diferentes especies de roedores del género *Apodemus*, en una zona contaminada de Eslovaquia. La importancia del cadmio en el hueso radica en que suele sustituir al calcio durante la formación y desarrollo del tejido óseo y de esta manera se bioacumula en este tejido.

Al confirmar la presencia de cadmio en egagrópilas, se infiere que parte de la concentración encontrada en plumas de *Athene cunicularia* puede atribuirse a la dieta, ya que la pluma es uno de las principales vías de excreción de metales en aves; así mismo estos datos permiten verificar la presencia de cadmio tanto en roedores como en artrópodos de una manera no invasiva, para ambos niveles tróficos.

Tejidos

A pesar de que todas las muestras de tejidos analizadas presentaron Cd, no existe literatura suficiente para comparar y conocer el estado en el que se encuentra este organismo. En

músculo se encontró que la concentración promedio de Cd fue de 0.186 mg Kg⁻¹, una concentración alta al compararla con lo reportado por Ansara et al., (2013) en *Tyto capensis* y *Tyto alba* (0.015 ± 0.005 mg Kg⁻¹ y 0.007 ± 0.001 mg Kg⁻¹ respectivamente).

En el caso de los órganos internos, la concentración de Cd en pulmón fue alta (0.621 mg Kg⁻¹), confirmando con esto lo reportado previamente por Goyer y Clarkson, (1996) ya que la principal vía de ingreso del Cd a los seres vivos es por inhalación. Cui et al., (2011) reportaron para *Columba livia*, en un área urbana de Amsterdam una concentración de 0.116 mg Kg⁻¹, la concentración en el tejido analizado en el presente estudio es mayor y puede atribuirse tanto a la distribución como a los hábitos de anidación de la especie.

En hígado de *Athene cunicularia* se encontró una concentración de 0.228 mg Kg⁻¹, lo cual se encuentra dentro del intervalo reportado por Castro et al., (2011) en hígado de *Buteo buteo* y *Strix aluco* (0.36 mg Kg⁻¹ y 0.178 mg Kg⁻¹ respectivamente) en Galicia, España.

La mayor concentración de Cd en el organismo se encontró en el riñón (0.618 ± 0.15 mg Kg⁻¹) lo cual confirma que la orina es una de las principales vías de eliminación de Cd. (Burger, 1993).

Para el análisis de hueso se tomaron muestras de fémur y esternón, obteniendo una concentración 0.216 mg Kg⁻¹ y 0.352 mg Kg⁻¹ respectivamente. De acuerdo con García et al., (1996), el 3.5 % aproximadamente de Cd que se encuentra en un organismo está alojado en huesos. Así mismo, de acuerdo con Martiniaková et al., (2010), la importancia de analizar el Cd en hueso, radica en que es un metal que se aloja en el mismo y es bioacumulable, por lo tanto el tejido óseo brinda basta información sobre el nivel de contaminación en el ambiente en que se encuentran los organismos.

La concentración encontrada en muestras de pico, glándula uropigeal y garras fue de 0.262 mg Kg⁻¹, 0.533 mg Kg⁻¹, y 0.866 mg Kg⁻¹ respectivamente, sin embargo a pesar de que no se cuenta con literatura para realizar la comparación de los datos, se puede observar, que en el caso de las garras, el contenido es mayor a la concentración del resto de los tejidos, lo que sugiere que la contaminación proviene del suelo donde habita el ave, además de que, de acuerdo con Khazae et al., (2015), la mayoría de los metales presentan una alta afinidad a los grupos sulfhidrilo de la queratina.

Comparación entre plumas

Al comparar las concentraciones de cadmio en las plumas para ambas alas no se encontraron diferencias significativas, lo cual implica que existe una distribución homogénea de Cd entre ambas alas y durante el proceso de formación de la pluma.

Las concentraciones de Cd encontradas en el segmento apical de las plumas (barbas) son altas en comparación a los presentados por otros autores. Por ejemplo, Dauwe *et al.*, (2003), encontraron concentraciones de 0.570 ± 0.07 mg Kg⁻¹ para *Tyto alba* y de 0.340 ± 0.20 mg Kg⁻¹ para *Accipiter nissus*. La concentración de cadmio en las plumas de *A. cunicularia* del presente estudio se atribuye a la contaminación que existe en el suelo y a su hábito de anidación en madrigueras en el suelo, las diferencias en concentraciones con respecto a la ubicación de la pluma dentro del ala, puede deberse a que las plumas p1-p5 son las primeras en formarse, lo que conlleva a una mayor acumulación de contaminantes respecto a las últimas, en las cuales el cadmio provendría de los alimentos (Martínez *et al.*, 2012)

El comparar las concentraciones entre plumas de acuerdo a su posición y por segmentos, permite confirmar la importancia en el reconocimiento de la pluma colectada durante los muestreos, para interpretar de manera adecuada los resultados en cuanto a la concentración de cadmio y el origen del contaminante. Actualmente existe un método estandarizado por Martínez *et al.*, (2012) el cual propone la pluma a muestrear (p6- p7), dependiendo de la especie en estudio, sin embargo en dicho trabajo sólo se trabajó con mercurio. En el presente estudio se observó que la excreción es mayor en las plumas p1 a p5, lo que se atribuye a la cinética del cadmio y posiblemente a los hábitos particulares de esta ave rapaz.

5. CONCLUSIONES

Las plumas y egagrópilas son una herramienta eficaz en el monitoreo de metales pesados. Se verificó la presencia de Cd en el ecosistema de Tecocomulco, Hidalgo, y se comprobó que este metal se está incorporando a la fauna silvestre del sitio.

De manera general se observó que *Athene cunicularia* presentó una mayor concentración de cadmio en tejidos externos; sin embargo, en los tejidos internos se confirmó presencia, bioacumulación y cinética del contaminante, principalmente en pulmón (vía de entrada de Cd) y en riñón que es la ruta de eliminación del mismo, ya que ambas muestras presentaron las mayores concentraciones con respecto al resto de los tejidos internos.

El monitoreo de las concentraciones de cadmio en plumas y egagrópilas permitieron confirmar la presencia de este elemento en diferentes niveles tróficos, además de brindar un panorama de lo que está sucediendo en el área aledaña a la laguna de Tecocomulco.

Usar herramientas no invasivas en el monitoreo de contaminantes permite conocer la calidad del ambiente sin necesidad de recurrir al sacrificio de los organismos. El Cd se encuentra listado como un metal altamente tóxico y la constante exposición al mismo puede ser causa de cáncer, por lo tanto, continuar con el monitoreo no invasivo podrá proporcionar información que permita regular las fuentes de emisión de cadmio en Tecocomulco, Hgo., y en áreas con problemática ambiental semejante, evitando futuras afectaciones al ambiente y a los seres vivos.

IX. CONCLUSIÓN GENERAL

Al utilizar plumas y egagrópilas como bioindicadores, se confirmó la presencia de metales pesados en diferentes niveles tróficos, además se obtuvo un panorama de lo que está sucediendo en algunas zonas del estado de Hidalgo. De manera general, el cadmio, zinc y estroncio, se observaron en mayor cantidad en muestras de hueso y las muestras de restos de artrópodos presentaron la mayor cantidad de cobre.

Se confirmó la contaminación por cadmio en los suelos de las zonas donde se distribuye *Athene cunicularia* en el estado de Hidalgo.

Las egagrópilas de *Athene cunicularia* permitieron realizar el monitoreo de metales pesados, para algunas especies de fauna urbana de la ciudad de Pachuca, Hidalgo, por lo tanto, se considera a *Athene cunicularia*, una especie adecuada para desarrollar futuros proyectos en relación de materia ambiental.

No existe ningún reporte en el que se haga uso de egagrópilas como indicadoras de contaminación por metales pesados.

X. REFERENCIAS

- Anastopoulos, I., Bhatnagar, A., Bikiaris, D. N., y Kyzas, G. Z. (2017). Chitin adsorbents for toxic metals: a review. *International journal of molecular sciences*, 18(1), 114.
- Ansara R., T. M., Ross, M. J. y Wepener, V. (2013). The use of feathers in monitoring bioaccumulation of metals and metalloids in the South African endangered African grass-owl (*Tyto capensis*). *Ecotoxicology*, 22(6), 1072-1083.
- Aranda L., Castillo H., Amador R. (2001). Efecto del fosforo de zinc sobre la función neuromuscular en la rata. *Methods*, 1 (9), 108.
- ATSDR (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades). 2001. *Reseña Toxicológica del manganeso*. Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública.
- ATSDR (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades). 2004. *Reseña Toxicológica del Estroncio (en inglés)*. Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública
- ATSDR (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades). 2005. *Reseña Toxicológica del Cinc (versión para comentario público)*. Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública
- ATSDR (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades). 2007. *Reseña Toxicológica del Cinc (versión para comentario público)*. Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública
- ATSDR (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades). 2016. *Reseña Toxicológica del Cadmio*. Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública
- Amador, L. R. T., Martínez, F. D. G., Hernández, L. J. M., Vergara, L. A. W., y Suárez, J. N. C. (2015). Niveles de metales pesados en muestras biológicas y su importancia en salud. *Revista Nacional de Odontología*, 11(21).
- Ballesta, R. J., Bueno, P. C., Rubí, J. A. M., y Giménez, R. G. (2010). Pedo-geochemical baseline content levels and soil quality reference values of trace

elements in soils from the Mediterranean (Castilla La Mancha, Spain). *Central European Journal of Geosciences*, 2(4), 441-454.

- Becerra T. S., Soria, F.C., Jaramillo J.F., y Moreno-H. J. L. (2014). Trastornos a la salud inducidos por cromo y el uso de antioxidantes en su prevención o tratamiento. *Journal of Pharmacy y Pharmacognosy Research*, 2(2), 19-30.
- Becker, P. H. (2003). Biomonitoring with birds. *Trace Metals and other Contaminants in the Environment*, 6, 677-736.
- Beernaert, J., Scheirs, J., Leirs, H., Blust, R. y Verhagen, R. (2007). Non-destructive pollution exposure assessment by means of wood mice hair. *Environmental Pollution*, 145(2), 443-451.
- Bond, A. L. y Diamond, A. W., (2009). Total and methyl mercury concentrations in seabird feathers and eggs. *Arch Environ Contam Toxicol*, 56(2): 286-291.
- Bradl, H. (Ed.). (2005). *Heavy metals in the environment: origin, interaction and remediation* (Vol. 6). Academic Press.
- Burger, J. (1993). Metals in feathers of brown noddy (*Anous stolidus*): Evidence for bioaccumulation or exposure levels? *Environmental monitoring and assessment*, 24(2), 181-187.
- Burger, J. y Gochfeld, M. (1994). Behavioral impairments of lead-injected young herring gulls in nature. *Toxicological Sciences*, 23(4), 553-561.
- Burger, J. y Gochfeld. M., (2001). Metal levels in feathers of cormorants, flamingos and gulls from the coast of Namibia in Southern Africa. *Environ Monit Assess*, 69(2), pp. 195-203.
- Burger, J. (2013). Temporal trends (1989-2011) in levels of mercury and other heavy metals in feathers of fled gling greets nesting in Barnegat Bay, NJ. *Environ Res*, 122, 11-17. doi: 10.1016/j.envres.2013.01.003
- Butovsky, R. O. (2011). Heavy metals in carabids (Coleoptera, Carabidae). *ZooKeys*, 100, 215-222.
- Castro I., Aboal JR., Fernández JA. y Carballeira A. (2011). Use of raptors for biomonitoring of heavy metal: gender, age and tissue selection. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 86, 347-351.

- CCESH (Consejo Consultivo de Ecología, Seguridad e Higiene), (1998). www.dcne.ugto.mx/Contenido/CCESH/Fichas%20Seguridad/Estroncio.pdf
- Covarrubias, S. y Peña, J. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 33, 7-21
- Cui BS, Zhang QJ, Zhang KJ, Liu XH, Zhang HG (2011) Analyzing trophic transfer of heavy metals for food webs in the newly formed wetlands of the Yellow River Delta, China. *Environ Pollut* 159:1297–1306.
- Duruibe, J. O., Ogwuegbu, M. O. C., y Egwurugwu, J. N. (2007). Heavy metal pollution and human biotoxic effects. *International Journal of physical sciences*, 2(5), 112-118.
- Dauwe, T., Bervoets, L., Pinxten, R., Blust, R. y Eens, M. (2003). Variation of heavy metals within and among feathers of birds of prey: effects of molt and external contamination. *Environmental Pollution*, 124(3), 429-436.
- Demajo M., Cvetičanin, J., Stoiljković, M., Trpkov, D., Andrić, V., Onjia, A. and Nešković, O. (2011). Detection of elements and radioactivity in pellets from long-eared owls (*Asio otus*) inhabiting the city of Belgrade (Serbia). *Chem. Ecol.*, 27(5): 393–400.
- Ehn, C. (2003). Cadmium review. Nordic Council of Ministers, 1(4), 2-22.
- Fernández, E. L., Svenson, C., Dencker, L., y Gustafson, A. L. (2004). Disturbing endoderm signaling to anterior neural plate of vertebrates by the teratogen cadmium. *Reproductive toxicology*, 18(5), 653-660.
- FIR, 2003. Fichas Informativas Ramsar, disponible en <http://ramsar.conanp.gob.mx>
- Gaca P, Mietelski J., Kitowski I., Grabowska E, Tomankiewicz E. ^{40}K , ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{238,239+240}\text{Pu}$ and ^{241}Am in mammals' skulls from owls' pellets and owl skeletons in Poland *Journal of Environmental Radioactivity*, 78 (2005), pp. 93-103
- García F, A. J., Sánchez G, J. A., Gómez Z, M., y Luna, A. (1996). Distribution of cadmium in blood and tissues of wild birds *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 30(2), 252-258

- Gdula A., Appleton J., Sawicka K y Spence B. Further investigation of the heavy metal content of the teeth of the bank vole as an exposure indicator of environmental pollution in Poland. *Environmental Pollution*, 131 (2004), pp. 71-79
- Gochfeld M, Burger J. (1998) Temporal trends in metal levels in eggs of the endangered roseate tern (*Sterna dougallii*) in New York. *Environmental Research* 77:36–42
- Godwin, C. M., Smits, J. E. y Barclay, R. M. (2016). Metals and metalloids in nestling tree swallows and their dietary items near oil sands mine operations in Northern Alberta. *Science of the Total Environment*, 562, 714-723.
- Goyer, R. A. y Clarkson, T. W. (1996). Toxic effects of metals. Casarett y Doull's Toxicology. The Basic Science of Poisons, Fifth Edition, Klaassen, CD [Ed]. McGraw-Hill Health Professions Division, ISBN, 71054766.
- Gunnar, N. 2012. Metales: propiedades químicas y toxicidad. En: enciclopedia de la OIT. España: D-INSHT (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo).
- Hailey, A. 2011. "The online guide to the animals of Trinidad and Tobago" (On-line). The University of the West Indies. Consultado en Octubre, 2017 en https://sta.uwi.edu/fst/lifesciences/documents/Athene_cunicularia.pdf
- Hernández. E., Mondragón E., Cristobal A., Rubinos P.J.E. y Robledo, S.E. (2009) Vegetación, residuos de mina y elementos potencialmente tóxicos de un jal de Pachuca, Hidalgo, México [Vegetation, Mine Waste and Potentially Toxic Elements of Tailings from Pachuca, Hidalgo, México]. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 15, 109-114.
- Hernández F.M., Otazo S. E. M., Galeana P. M., Roldán C., E. I., Razo R. R., González R. C. A. y Gordillo M. A. J. (2017). Urban driving forces and megacity expansion threats. Study case in the Mexico City periphery. *Habitat International*, 64, 109-122.
- Holroyd, G. L., Rodríguez E. R., y Sheffield, S. R. (2001). Conservation of the burrowing owl in western North America: issues, challenges, and recommendations. *Journal of Raptor Research*, 35(4), 399-407.

- Holt, E. A. y Miller., S. W. (2010). Bioindicators: Using Organisms to Measure Environmental Impacts. *Nature Education Knowledge*, 3(10).
- Hubbart, J. A. (2012). Hair analysis as an environmental health Bioindicator: a case-study using pelage of the California Ground Squirrel (*Spermophilus beecheyi*). *International Journal of Applied*, 2(3), 277-294.
- Huertos, E. G., y Romero-Baena, A. J. (2008). Contaminación de suelos por metales pesados. *Macla: revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, (10), 48-60.
- Hui, (2002). Concentrations of chromium, manganese, and lead in air and in avian eggs *Environmental Pollution*, 120 pp. 201-206
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), (2010) Principales resultados del censo de población y vivienda 2010
- Khazaei, M., Hamidian, A. H., Shabani, A. A., Ashrafi, S., Mirjalili, S. A. A., y Esmailzadeh, E. (2015). Accumulation of heavy metals and as in liver, hair, femur, and lung of Persian jird (*Meriones persicus*) in Darreh Zereshk copper mine, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(4), 3860-3870.
- Kim, J., y Oh, J. M. (2014). Lead and cadmium contaminations in feathers of heron and egret chicks. *Environ Monit Assess*, 186(4), 2321-2327. doi: 10.1007/s10661-013-3540-5
- Lodenius, M., y Solonen, T. (2013). The use of feathers of birds of prey as indicators of metal pollution. *Ecotoxicology*, 22(9), 1319-1334. doi: 10.1007/s10646-013-1128.
- McLean, C. M., Koller, C. E., Rodger, J. C. y MacFarlane, G. R. (2009). Mammalian hair as an accumulative bioindicator of metal bioavailability in Australian terrestrial environments. *Science of the Total Environment*, 407(11), 3588-3596.
- Market B.A., Breure A.M. y Zechmeister H.G. Bioindicators and Biomonitors: Principles, Concepts, and Applications, Elsevier Science B.V., Amsterdam, 2003, pp. 677.
- Martínez, A., Crespo, D., Fernández, J.A., Aboal, J.R. y Carballeira, A., (2012). Selection of flight feathers from *Buteo buteo* and *Accipiter gentilis* for use in biomonitoring heavy metals contamination. *Sci. Total Environ.* 425, 254–261.

- Martiniaková, M., Omelka, R., Jancová, A., Stawarz, R., y Formicki, G. (2010). Heavy metal content in the femora of yellow-necked mouse (*Apodemus flavicollis*) and wood mouse (*Apodemus sylvaticus*) from different types of polluted environment in Slovakia. *Environmental monitoring and assessment*, 171(1-4), 651-660.
- Martiniaková M, Omelka R, Jančová A, Stawarz R, Formicki G. (2011) Concentrations of selected heavy metals in bones and femoral bone structure of bank (*Myodes glareolus*) and common (*Microtus arvalis*) voles from different polluted biotopes in Slovakia. *Arch Environ Contam Toxicol* 60:524–532
- Muñoz J. S., y Ortiz E., R. M. (2003). Mortalidad en el estado de Hidalgo por defectos de cierre del tubo neural. Consultado en <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/handle/231104/1782>
- Nielsen, S. P. (2004). The biological role of strontium. *Bone*, 35(3), 583-588.
- NOM-021-RECNAT-2000. (2002), Diario Oficial de la Federación Norma Oficial Mexicana 31/12/2002. 2ª Sec. México. pp. 1-67.
- NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. (2007), Diario Oficial de la Federación. Norma Oficial Mexicana., México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- NOM-059-ECOL-2010. (2010), Diario Oficial de la Federación, Norma Oficial Mexicana: “Protección ambiental, especies de flora y fauna silvestres de México, categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio, y lista de especies en riesgo”. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales (SEMARNAT).
- Nordberg, G. F., Nogawa, K., y Nordberg, M. (2002). Cadmium. In *Handbook on the Toxicology of Metals* (pp. 231-270).
- Olivares, A. (2014). Sitios de anidación y dieta del tecolote llanero (*Athene cunicularia*) en localidades con diferente urbanización en Hidalgo, México (tesis de maestría). Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México.
- Pairo, P. E., Leveau, L. M., y Bellocq, M. I. (2017). Selección del hábitat de nidificación de la lechuza vizcachera (*Athene cunicularia*) en agroecosistemas de la Pampa Ondulada. *Ecología Austral*, 27(3), 375-384.

- Pemmer B, Roschger A. (2013) Spatial distribution of the trace elements zinc, strontium and lead in human bone tissue. *Bone* 57:184–193
- Pereira, R., Pereira, M. L., Ribeiro, R. y Gonçalves, F. (2006). Tissues and hair residues and histopathology in wild rats (*Rattus rattus L.*) and Algerian mice (*Mus spretus Lataste*) from an abandoned mine area (Southeast Portugal). *Environmental Pollution*, 139(3), 561-575.
- Poulin, R. G., y Todd, L. D. (2006). Sex and nest stage differences in the circadian foraging behaviors of nesting Burrowing Owls. *The Condor*, 108(4), 856-864.
- Poulin R.L., Danielle T. E. A., Haug, B.A. y Martell M. S. (2011). Burrowing Owl (*Athene cunicularia*). *The Birds of North America Online* (A. Poole, Ed.). Ithaca: Cornell Lab of Ornithology; Retrieved from the Birds of North America Online: <http://bna.birds.cornell.edu/bna/species/061>, consultado: Enero, 2017.
- Ramírez, A. (2002). Toxicología del cadmio. Conceptos actuales para evaluar exposición ambiental u ocupacional con indicadores biológicos. In *Anales de la Facultad de Medicina* (Vol. 63, No. 1, pp. 51-64.
- Royal Society for the Protection of Birds (RSPB), (2017). <https://www.rspb.org.uk/>
- Rubio, C., González Weller, D., Martín-Izquierdo, R. E., Revert, C., Rodríguez, I., y Hardisson, A. (2007). El zinc: oligoelemento esencial. *Nutrición Hospitalaria*, 22(1), 101-107
- Sánchez, M. S., Bedoya, A., y Barahona, R. (2010). Estudio preliminar de la fauna en el morro de basuras de Moravia y presencia de metales pesados en artrópodos y roedores. *Universitas Scientiarum*, 15(1), 49-58.
- Scott, S. D., y McFarland, C. (2010). *Bird feathers: a guide to North American species*. Stackpole Books.
- SGM (Servicio Geológico Mexicano). (2017). <http://portalweb.sgm.gob.mx/economia/es/tabla-periodica.html>
- Sheffield, S. R. y M. Howery. (2001). Current status, distribution, and conservation of the Burrowing Owl in Oklahoma. *Journal Raptor Research* 35:351–356
- Skubala P. y Kafel A. (2004). Oribatid mite communities and metal bioaccumulation in oribatid species (Acari, Oribatida) along the heavy metal gradient in forest ecosystems *Environmental Pollution*, 132, pp. 51-60

- SNIM (Sistema Nacional de Información Municipal). 2017. <http://www.snim.rami.gob.mx/>
- Stankovic, S., Kalaba, P., y Stankovic, A. R. (2013). Biota as toxic metal indicators. *Environmental Chemistry Letters*, 12(1), 63-84. doi: 10.1007/s10311-013-0430-6
- Sun, H. (2017). Association of soil selenium, strontium, and magnesium concentrations with Parkinson's disease mortality rates in the USA. *Environmental Geochemistry and Health*, 1-9
- Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., y Sutton, D. J. (2012). Heavy metal toxicity and the environment. In *Molecular, clinical and environmental toxicology* (pp. 133-164). Springer, Basel.
- Tete N, Afonso E, Crini N., Drouhot S, Prudem A.S. y Schielfer R. (2014) Hair as a noninvasive tool for risk assessment: Do the concentrations of cadmium and lead in the hair of wood mice (*Apodemus sylvaticus*) reflect internal concentrations? *Ecotoxicol Environ Saf* 108:233–241.
- Trejo, A. y Ojeda, V. (2002). Identificación de egagrópilas de aves rapaces en ambientes boscosos y ecotonales del Noroeste de la Patagonia argentina. *Ornitología Neotropical*, 13, 313-317.
- Veerle, J., Tom, D., Rianne, P., Lieven, B., Ronny, B. y Marcel, E. (2004). The importance of exogenous contamination on heavy metal levels in bird feathers. A field experiment with free-living great tits, (*Parus major*). *Journal of Environmental Monitoring*, 6(4), 356-360.
- Waalkes, M. P. (2003). Cadmium carcinogenesis. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 533(1), 107-120.
- Wang, M., Liu, R., Chen, W., Peng, C., y Markert, B. (2017). Effects of urbanization on heavy metal accumulation
- WHO (World Health Organization), (1996). Health risks of heavy metals from long-range transboundary air pollution.. Regional Office for Europe Copenhagen, Denmark ISBN 978 92 890 7179 6
- Wu, Q.; W.H. Hendershot; W.D. Marshall y Y. Ge. 2000. Speciation of cadmium, copper, lead, and zinc in contaminated soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 31.

- Yadav S., Upadhyay S., Tripathi S. y Prakash R. (2017). Heavy metal pollution and health hazards around Singrauli region India. *International Journal of Applied Research*. 3(5): 05-08
- Yamamoto, F. Y., Neto, F. F., Freitas, P. F., Ribeiro, C. O., y Ortolani-Machado, C. F. (2012). Cadmium effects on early development of chick embryos. *environmental toxicology and pharmacology*, 34(2), 548-555.
- Zhang, W. y Zhang. M. J., 2011. Waterbirds as bioindicators of wetland heavy metal pollution. *Procedia Environmental Sciences*, Volumen 10, pp. 2769-2774.

ABREVIATURAS

ANOVA - Análisis de varianza

ATSDR-Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades

BI- Biblioteca

Cd-Cadmio

Cl- Concentración leída

Cr- Cromo

Cr- Concentración real

CV-Casa Verde

EPA- Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos

Fd- Factor de dilución

G.L-Grados de libertad

Hgo. - Hidalgo

HNO₃- Ácido nítrico

H₂O₂- Peróxido de Hidrogeno

HF- Ácido fluorhídrico

H₃BO₃- Ácido bórico

ICP- Espectroscopia de emisión por plasma acoplado inductivamente

INEGI- Instituto Nacional de Estadística y Geografía

MMT- Metil ciclopentadienil Manganeso Tricarbonil

MN-Montessori

Mn- Manganeso

NOM- Norma Oficial Mexicana

pH- Potencial de Hidrogeno

Pb- Plomo

Pm- Peso de la muestra

PSI- Libras de presión

PVC- Plicloruro de vinilo

SMIN- Sistema Nacional de Información Municipal

Sr- Estroncio

Vaf- Volumen de aforo

VF- Villas Fontana

WHO- World Health Association

Zn- Zinc

XI. ANEXOS

Curvas de calibración

