

## Serpientes: un campo no explorado Snakes: an unknown field

A. Ibarra-Bautista <sup>a</sup>, E. Otazo-Sánchez <sup>a</sup>, J. C. Gaytán-Oyarzun <sup>b\*</sup>, Y. Marmolejo-Santillán <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Área Académica de Química, Doctorado en Ciencias Ambientales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

<sup>b</sup> Área Académica de Biología, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

### Resumen

Para obtener mejores resultados en las evaluaciones de riesgo ecológico y los estudios de contaminación ambiental por metales pesados, es necesario considerar un buen complemento de los miembros relevantes de los ecosistemas estudiados. Aunque se ha dedicado una atención considerable al campo de la ecotoxicología aplicado a diversos vertebrados, incluyendo a los sauropsidos no aves, las serpientes siguen siendo un grupo poco estudiado. Estos animales son depredadores de segundo, tercero y cuarto grado, cuyo papel ecológico es de suma importancia en los diferentes ecosistemas, sin embargo, aún son pocos los estudios en los que se consideran a estos importantes miembros de la fauna. En esta breve revisión se muestran algunas evaluaciones ecotoxicológicas de metales pesados aplicadas en serpientes. La mayoría de los estudios se centran en la determinación de los elementos bioacumulados en diferentes tejidos de los organismos, así como en la valoración de métodos no letales de muestreo.

### Palabras Clave:

Serpientes, metales pesados, bioacumulación, ecotoxicología.

### Abstract

In order to obtain better results in ecological risk assessments and studies of environmental contamination by heavy metals, it is necessary to consider a good complement to the relevant members of the ecosystems studied. Although considerable attention has been devoted to the field of applied ecotoxicology to various vertebrates, including non-bird sauropsids, snakes remain a poorly studied group. These animals are second, third and fourth degree predators, whose ecological role is of utmost importance in the different ecosystems, however, there are still few studies that consider these important members of the fauna. This brief review shows some ecotoxicological evaluations of heavy metals applied to snakes. Most studies focus on the determination of bioaccumulated elements in different tissues of organisms, as well as the assessment of non-lethal sampling methods.

### Keywords:

Snakes, heavy metals, bioaccumulation, ecotoxicology.

### 1. ¿Qué hay con las serpientes?

A lo largo de la historia de la humanidad y a través de las diferentes culturas, las serpientes han despertado una gran cantidad de sentimientos y sensaciones particulares para cada persona, sentimientos que van desde el temor, el repudio, el respeto y la veneración por mencionar algunos; se les ha atribuido propiedades curativas y poderes místicos a la par que se les ha relacionado con el demonio, la brujería, los hechizos, maldiciones y la mala suerte. Sin duda, las serpientes son uno grupo de animales que ha sido víctima de la ignorancia que

existe en torno a ellas pues la gran cantidad de mitos que se les ha atribuido a lo largo del tiempo, ha evitado que las personas las reconozcan como criaturas verdaderamente fascinantes, de inigualable belleza y, sobre todo, como animales con una enorme importancia ecológica (Fernández-Badillo et al., 2011).

Las serpientes se encuentran dentro del grupo de vertebrados más diverso alrededor del mundo, son animales cuyo papel ecológico es de suma importancia ya que la mayoría son depredadores de segundo, tercero y cuarto grado, los cuales asisten de manera significativa en las redes

\*Autor para la correspondencia: [jcgaytan@uaeh.edu.mx](mailto:jcgaytan@uaeh.edu.mx)

Correo electrónico: [malayopythonreticulatus@gmail.com](mailto:malayopythonreticulatus@gmail.com) (Arnold Ibarra-Bautista), [profe\\_4339@uaeh.edu.mx](mailto:profe_4339@uaeh.edu.mx) (Elena Otazo-Sánchez), [jcgaytan@uaeh.edu.mx](mailto:jcgaytan@uaeh.edu.mx) (Juan Carlos Gaytán-Oyarzun), [yolandam@uaeh.edu.mx](mailto:yolandam@uaeh.edu.mx) (Yolanda Marmolejo-Santillán).

alimenticias, controlando las poblaciones de muchos otros organismos y contribuyendo así a la distribución de la energía en los diferentes niveles tróficos (Campbell & Campbell, 2001). Sin embargo, la existencia de estos importantes miembros de la fauna se encuentra en una situación crítica, pues varias de las especies que conforman este grupo se consideran amenazadas debido a una gran variedad de causas, dentro de las que destaca la contaminación ambiental (Egea-Serrano & Ortiz-Santaliestra, 2013).

## 2. ¿Y los metales pesados?

Por otro lado, los metales pesados son un tipo de contaminantes ambientales de gran importancia debido a su persistencia en los ecosistemas y a sus efectos nocivos para el bienestar de los seres vivos, sin embargo, es necesario entender, que estos elementos existen de manera natural en el medio ambiente y que incluso su presencia es esencial para el funcionamiento de diferentes organismos, por lo que el riesgo de intoxicación estará determinado por la concentración y disponibilidad de los metales, dos factores que se ven directamente influenciado por acciones antropogénicas (Horne & Dunson, 1995).

Es debido a una serie de características biológicas particulares, que las serpientes resultan ser especialmente vulnerables a la contaminación por metales pesados (Egea-Serrano & Ortiz-Santaliestra, 2013). Su longevidad, su poca vagilidad, su metabolismo poiquilotermo y sus hábitos alimenticios principalmente carnívoros, les proporcionan una alta capacidad para bioacumular y biomagnificar este tipo de xenobioticos, de tal forma que la exposición a estos contaminantes puede llegar a ser sumamente prolongada y causar estragos en los diferentes niveles tróficos en que participan estos animales. (Hopkins, 2000; Quesada et al., 2014).

La Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) sugiere que la contaminación es uno de los factores que amenaza la existencia del 3% de los reptiles en el mundo, porcentaje que incluye a las serpientes. Sin embargo, varios expertos coinciden en que estos valores están subestimando la importancia del impacto de la contaminación sobre este grupo (Egea-Serrano & Ortiz-Santaliestra, 2013).

## 3. Un campo no explorado

Lamentablemente, pese al gran papel ecológico de las serpientes y su vulnerabilidad ante la contaminación por metales pesados, la información que respecta al área de ecotoxicología, en este grupo sigue siendo escasa, representada por solo un 0.8% de trabajos realizados (Egea-Serrano & Ortiz-Santaliestra, 2013). Gran parte de esta problemática es el resultado de las diferentes dificultades metodológicas que se presentan al trabajar con estos organismos, así como de las limitaciones durante la toma de muestras debido al estatus de protección de varias especies. Es por ello que varios investigadores hacen hincapié en que es necesario el incremento de estudios no letales para determinar parámetros de bioacumulación y así mejorar nuestro entendimiento sobre las afecciones que estos contaminantes puedan tener sobre un tipo de fauna que resulta tan relevante para los ecosistemas (Sparling et. al., 2010).

Algunos autores mencionan que, para obtener mejores resultados en las evaluaciones de riesgo ecológico y en los estudios de contaminación ambiental por metales pesados, es necesario considerar un buen complemento de los miembros relevantes de los ecosistemas estudiados (Campbell y Campbell 2001) y aunque actualmente se han incrementado las investigaciones relacionadas al campo de la ecotoxicología aplicada a los sauropsidos no aves, las serpientes siguen siendo un grupo poco estudiado (**Tabla 1**).

Tabla 1 Especies serpientes con las que se han realizado estudios de contaminación ambiental

Especies	Referencias
<i>Agkistrodon piscivorous</i> <sup>v</sup>	(Burger et al., 2006; Quesada et al., 2014)
Cobra de Punjab <sup>v</sup>	(Kaur, 1988)
<i>Elaphe guttata</i> <sup>c</sup>	(Jones & Holladay, 2006)
<i>Natrix maura</i> <sup>a</sup>	(Lemaire et al., 2018)
<i>Natrix natrix</i> <sup>a</sup>	(Gavrić et al., 2019)
<i>Natrix stelata</i> <sup>a</sup>	(Gavrić et al., 2019)
<i>Nerodia fscia</i> <sup>a</sup>	(Burger et al., 2006; Hopkins et al., 2001)
<i>Nerodia spideon</i> <sup>a</sup>	(Campbell et al., 2005; Burger et al., 2005)
<i>Nerodia taxispilota</i> <sup>a</sup>	(Burger et al., 2006)
<i>Pituophis melanoleucos</i> <sup>c</sup>	(Burger et al., 2017)
<i>Thamnophis gigas</i> <sup>a</sup>	(Wylie et al., 2009)

Serpientes venenosas consideradas en algún estudio<sup>v</sup>, Serpientes pertenecientes a la familia Natricidae<sup>a</sup>, Serpientes pertenecientes a la familia Colubridae<sup>c</sup>.

Como ya se mencionó con anterioridad, las serpientes son un grupo de vertebrados muy diverso, hace algunos años, el número de organismos se estimaba por más de 3000 especies alrededor del mundo (Fernández-Badillo et al., 2011) y cuyos hábitats se extienden a través de dos importantes matrices medio ambientales, como son los ambientes acuáticos y terrestres.

En la mayoría de las evaluaciones ecotoxicológicas que se han realizado con estos organismos, las serpientes de hábitos semiacuicolas resultan ser las más utilizadas para medir la presencia de elementos tóxicos. Cabe destacar que la familia a la cual se le ha dado una mayor importancia es Natricidae, ya que esta es una de las más diversas y posee especies con poblaciones relativamente más abundantes en comparación con otras familias. Los Natricidos (**Figura 1**) comúnmente conocidas como culebras de agua, son serpientes de hábitos acuáticos o semiacuaticos, con una dieta muy variada (Fernández-Badillo et al., 2017), por lo que se les considera como buenos modelos de bioacumulación de metales pesados vertidos en cuerpos de agua. También es importante considerar que la mayoría de los miembros de esta familia no poseen veneno y el veneno de los miembros que, si poseen, no resulta letal para el ser humano, por lo que la captura y toma de datos no representa un riesgo para los investigadores.

En la actualidad se cuenta con muy pocos trabajos en donde los organismos estudiados sean serpientes venenosas. Esto, sin duda abre el debate sobre la inclusión de este tipo de serpientes

en estudios de ecotoxicología. La herpetofauna venenosa juega un papel de suma importancia en los ecosistemas naturales, pues su participación en las redes trófica es irremplazable, así mismo también resultan ser organismos muy importantes para las investigaciones médicas de carácter antropocéntrico (Fernández-Badillo et al., 2011), por lo que conocer la respuesta de estos animales ante la contaminación ambiental debe adquirir un mayor interés.



**Figura 1** Familia Natricidae, Culebra de agua *Thamnophis eques*. Imagen tomada de internet.

El género *Agkistrodon* (**Figura 2**) es el único género de serpientes venenosas pertenecientes a la familia Viperidae, que se ha considerado para estudios de evaluación de riesgo ecológico y contaminación ambiental. La mayoría de las especies de este género son animales con hábitos asociados a cuerpos de agua por lo que juegan un rol importante como biomonitores de contaminación acuática. Sin embargo, son animales con poblaciones relativamente bajas y con hábitos secretivos por lo que considerarlos dentro de este tipo de estudios, requiere de un esfuerzo de muestreo mayor. Esto se ve reflejado en las especies mayormente utilizadas, como son los miembros de la familia Natricidae.



**Figura 2** Familia Viperidae, cantil o nauyaca *Agkistrodon bilineatus*. Imagen tomada de internet.

En un estudio realizado por Campbell & Campbell, 2002, se presentó una recopilación de los antecedentes disponibles sobre la implementación de serpientes en estudios

ecotoxicológicos, recalcando la falta de datos para el momento (**Tabla 2**).

Tabla 2 Número de estudios de contaminación ambiental que existen para diferentes familias de serpientes. Modificado de (Campbell & Campbell 2002)

Familia	Numero de trabajos	Estudios sobre los efectos
Acrochordidae	2	
Aniliidae	1	
Anomalepididae		
Atractaspididae		
Boidae	2	
Bolyeriidae		
Colubridae &	14	4
Elapidae	4	
Leptotyphlopidae	1	
Loxocemidae		
Natricidae	*	*
Pythonidae	*	
Tropidophiidae		
Typhlopidae	1	
Uropeltidae		
Viperidae &	6	1
Xenopeltidae	1	

Familias no consideradas, posiblemente incluidas en otra familia por error de clasificación (Natricidae en Colubridae y Pythonidae en Boidae) \*. Trabajos que hablan sobre los efectos de la acumulación de xenobioticos &.

Como se puede observar, son realmente escasos los trabajos en donde las serpientes son el organismo considerado para evaluar la contaminación por metales pesados en el ambiente, y más escasas son aquellas evaluaciones que hablan sobre el daño causado en las serpientes por la presencia de estos elementos tóxicos. También se nota que existen familias en las que la investigación ha sido prácticamente nula, lo cual abre un gran campo de oportunidades en cuanto a la ecotoxicología de este grupo.

#### 4. Biomonitores ambientales

La mayoría de los estudios realizados se han basado en demostrar el potencial de bioacumulación que ostentan estos animales, medir las concentraciones encontradas en diferentes órganos y compararlas ya sea entre sí, entre machos y hembras, diferentes zonas o a través del tiempo (**Tabla 3**). Campbell y Campbell en el 2001 mencionan que la falta de trabajos relacionados a los efectos adversos que estos elementos tóxicos pueden tener sobre las serpientes, puedan ser debido principalmente a que muchas de las agencias de protección ambiental de Estados Unidos no requieren pruebas en serpientes, sin embargo, los mismos autores hacen énfasis en recapacitar dichas decisiones, principalmente por la gran importancia ecológica que estos organismos poseen.

Tabla 3 Concentraciones (ppb) de elementos tóxicos encontrados en dos especies diferentes de serpientes

Metales	Serpiente de agua		Serpiente de los pinares	
	<i>Nerodia spideon</i>		<i>Pituophis melanoleucus</i>	
	Riñón	Hígado	Machos	Hembras
As	94 ± 47	90 ± 25	60 ± 10	94 ± 27
Cd	15 ± 5.2	22 ± 4.3	35 ± 4	74 ± 10
Cr	79 ± 18	196 ± 64	62 ± 15	42 ± 15
Hg	29 ± 8.6	47 ± 9.3	696 ± 94	1027 ± 110
Mn	NA	NA	786 ± 83	1304 ± 97
Pb	103 ± 40	201 ± 79	61 ± 6	36 ± 4
Se	207 ± 66	171 ± 44	1516 ± 98	1815 ± 131
Fuente	(Burger et al., 2005)		(Burger et al., 2017)	

Concentraciones medias ± la desviación estándar, los elementos no medidos en los trabajos se señalan con NA.

En la tabla anterior, podemos observar tan solo un ejemplo de las concentraciones de metales pesados halladas en serpientes, en dichos trabajos pese a que los autores no realizaron alguna comparación con otro grupo de vertebrados, si sugieren que las serpientes son buenos organismos biomonitores.

Como se mencionó con anterioridad, las historias de vida de las serpientes las vuelven propensas a la bioacumulación de distintos xenobioticos, en este caso a los metales pesados u otros elementos tóxicos. Debido a esto es que se les puede considerar como indicadores útiles de contaminación ambiental, algunos autores hacen énfasis en este aspecto, considerando a las serpientes como auténticos centinelas ambientales (Campbell y Campbell 2001; Burger et al., 2017).

## 5. Los métodos de estudio

Como hemos podido observar, la ecotoxicología con serpientes, es una rama que aún se puede considerar en desarrollo. Gran parte del problema al trabajar con este grupo de vertebrados es que muchas de las especies que lo conforman, se encuentran en algún estatus de amenaza, por lo que la toma de muestras se ve comprometida, lo que obliga a los investigadores a trabajar con animales que puedan encontrarse muertos o bien, optar por trabajar con especies con poblaciones abundantes y que no se encuentren amenazadas (Egea-Serrano & Ortiz-Santaliestra, 2013).

Si bien el estatus de conservación de este grupo de vertebrados puede ser un impedimento para el desarrollo de estudios de contaminación ambiental y evaluaciones de riesgo ecológico, esta misma condición también puede ser un detonante para impulsar a los investigadores a utilizar métodos no letales de muestreo, los cuales pueden ser fácilmente homologados de estudios en otros grupos de vertebrados.

Actualmente, varios de los trabajos de ecotoxicología realizados con serpientes, han implementado el uso de biomarcadores no letales, tales como los pedazos de cola o “tail clips”, sangre, y más recientemente las mudas de piel (Tabla 4). Algunas investigaciones incluso se han centrado únicamente en corroborar la utilidad de dichos biomarcadores, y otras, como es el caso de lo reportado por Quesada et al., 2014,

proponen biopsias no letales de hígado para el análisis de contaminantes bioacumulados en serpientes.

Evidentemente, el interés por sumar a este grupo de vertebrados a los estudios de contaminación ambiental ha ido aumentando a medida que varios investigadores proponen nuevas metodologías cada vez menos agresivas para trabajar con estos animales, por lo que podemos decir que recientemente las serpientes están comenzando a tener la atención que merecen por parte de esta área de la ciencia.

Tabla 4 Biomarcadores utilizados en diferentes especies de serpientes

Especie	Biomarcador	Fuente
<i>Agkistrodon piscivorous</i>	Sangre y tail clips	(Burger et al., 2006)
<i>Agkistrodon piscivorous</i>	<b>Hígado</b>	<b>(Quesada et al., 2014)</b>
Cobra de Punjab	Escamas	(Kaur, 1988)
<i>Elaphe guttata</i>	<b>Muda de piel</b>	<b>(Jones &amp; Holladay, 2006)</b>
<i>Natrix natrix</i>	Hígado y musculo	(Gavrić et al., 2019)
<i>Natrix strelata</i>	Hígado y musculo	(Gavrić et al., 2019)
<i>Nerodia fsciata</i>	Sangre y tail clips	(Burger et al., 2006)
<i>Nerodia fsciata</i>	Muda de piel, tail clips y sangre	(Hopkins et al., 2001)
<i>Nerodia spideon</i>	Sangre, hígado, riñón, musculo y piel	(Campbell et al., 2005)
<i>Nerodia spideon</i>	Sangre y musculo	(Burger et al., 2005)
<i>Nerodia taxispilota</i>	Sangre y Tail clips	(Burger et al., 2006)
<i>Pituophis melanoleucus</i>	Hígado, riñón, sangre, musculo, corazón y mudas de piel	(Burger et al., 2017)
<i>Thamnophis gigas</i>	Hígado y tail clips	(Wylie et al., 2009)

Se remarcan en negritas los dos trabajos que se han centrado únicamente en la propuesta de nuevos marcadores no letales para el análisis de xenobioticos bioacumulados en serpientes.

El método de análisis mediante “tail clips” es un procedimiento no invasivo, el cual permite analizar hueso, piel, tejido adiposo y sangre sin la necesidad de sacrificar a los animales (Hopkins et al., 2001; Burger et al., 2006; Márquez-Ferrando et al., 2008; Wylie et al., 2009). Según la metodología reportada por los autores, el muestreo por “tail clips” se refiere a la amputación de 1 a 2 cm de la parte final de la cauda y puede ser empleado en serpientes cuya cola no esté implicada principalmente con métodos de cacería o defensa (en el caso del género *Crotalus*), sin embargo, existen algunos puntos discutibles sobre dicho método.

Pese a que se menciona que el biomarcador “tail clips” no compromete la integridad de los ejemplares, hay que analizar ciertos aspectos. Recordemos que las serpientes son animales que dependen únicamente de su cuerpo para desplazarse y que muchas de ellas utilizan la cauda para asirse de ramas y otros lugares, también, algunas de ellas como es el caso de varias especies del genero *Agkistrodon*, utilizan parte de su cola para atraer presas, moviéndola de un lado a otro como, aparentando ser un gusano (Figura 3).



Figura 3 *Agkistrodon bilineatus* cazando. La serpiente utiliza la cola como anzuelo a la espera de una presa. Imagen tomada de internet.

Por otro lado, las serpientes del genero *Crotalus* dependen de su cola para advertir a sus depredadores de su potencial peligro, si bien en este caso, el cascabel que ostentan estos animales al final de la cauda, es una estructura que puede ser reemplazable, cortar parte de la cola evitaría la nueva formación del cascabel (Figura 4). Por lo tanto, el biomarcador “tail clip” puede considerarse un avance en la implementación de métodos no letales de muestreo, sin embargo, no podría definirse como un método completamente no invasivo.

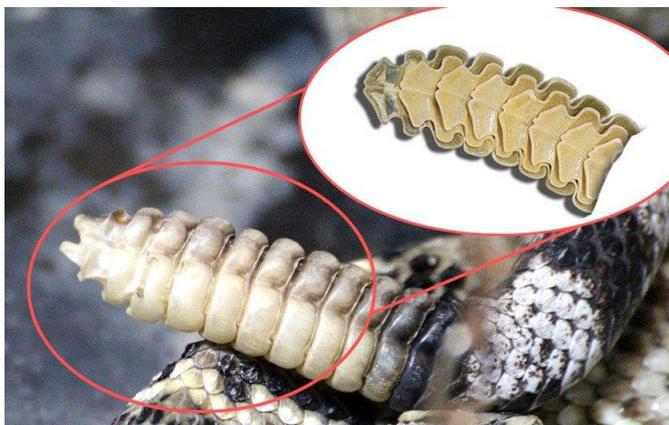


Figura 4 Vista anatómica del cascabel de una serpiente. El cascabel es una estructura queratinosa, hueca, formada por la muda de la serpiente, cada anillo se forma con cada muda de piel y pueden fácilmente quebrarse y reponerse. Imagen tomada de internet

Muchas de las investigaciones realizadas en búsqueda de biomarcadores no letales proponen el uso de la muda de piel

(Tabla 5), esto puede ser un gran avance en la búsqueda de métodos de muestreo que no representen peligros particulares para este sub-orden, pues como ya se ha visto anteriormente en otros grupos de vertebrados, las estructuras queratinosas tienden a ser propensas a la bioacumulación de metales pesados y otros elementos tóxicos, de esta manera, los metales que entren al organismo de estos escamados podrán ser acumulados en la piel y posteriormente desechados junto con la misma (Jones & Holladay, 2006). La implementación de la muda de piel como un biomarcador para la bioacumulación de metales pesados, supone una técnica no invasiva, ideal para trabajar con especies cuyo estatus de protección limita los muestreos de otro tipo (Burger et al., 2017). Cabe destacar, que, en los trabajos revisados las concentraciones halladas en muda de piel se correlacionan significativamente con las concentraciones de órganos internos según los autores.

Tabla 5 Concentraciones (ppb) de elementos tóxicos encontrados en mudas de piel de tres especies diferentes de serpientes

Metales	Culebra de agua <i>Nerodia spideon</i>	Serpiente ratonera <i>Elaphe guttata</i>	Serpiente de los pinares <i>Pituophis melanoleucus</i>
As	36.9 ± 4.4	NA	91.4 ± 21.7
Cd	26.1 ± 4.3	806 ± 143	19.8 ± 3.4
Cr	105 ± 23.9	NA	161 ± 46.0
Hg	500 ± 45.4	403 ± 89	41.5 ± 7.1
Mn	3,557 ± 573	NA	NA
Pb	161 ± 26.5	234 ± 72	172 ± 57.0
Se	942 ± 85.7	NA	182 ± 35.8
Fuente	(Campbell et al., 2005)	(Jones & Holladay, 2006)	(Burger et al., 2017)

Concentraciones medias ± la desviación estándar, los elementos no medidos en los trabajos se señalan con NA.

## 6. Discusión

En cualquier evaluación de riesgo ecológico, se debe considerar a todos los miembros relevantes de los ecosistemas estudiados. Los reptiles en general, y las serpientes en particular, son componentes con una gran importancia ecológica en los diferentes ecosistemas terrestres y acuáticos, que a menudo no son considerados en este tipo de evaluaciones. Estos grupos tan diversos e importantes, ecológicamente hablando, deben de incluirse en cualquier estudio sobre contaminación ambiental (Campbell & Campbell, 2001).

La contaminación por metales pesados, productos de actividades como la minería, la industria, el tránsito de vehículos y otras fuentes antropogénicas, se considera como un problema grave en todo el mundo. Sin embargo, aún existe poca información sobre la bioacumulación de metales pesados en las serpientes. La mayoría de los estudios de contaminantes son para serpientes de la familia Natricidae, esto es de esperarse debido a que esta familia incluye más del 70% de todas las especies de serpientes. Las especies más estudiadas en esta familia son las comúnmente llamadas serpientes de agua (genero *Nerodia*), que se encuentran en el este y centro

de los Estados Unidos, México y Cuba. Existen estudios realizados para especies de la familia Viperidae, siendo los ejemplares del género *Agkistrodon*, los más estudiados, debido a ser considerados como depredador tope en ambientes semiacuáticos.

Los resultados de estos estudios revisados indican que las serpientes se pueden usar de manera efectiva para determinar el grado de contaminación por metales pesados en un ambiente particular. Sin embargo, aún no se han evaluado los efectos de la bioacumulación de metales pesados en estos vertebrados.

La mayoría de los estudios revisados, se enfocan en determinar las concentraciones de metales pesados bioacumulados en diferentes tejidos de las serpientes, con el fin de demostrar su gran relevancia al momento de realizar una evaluación de daño ecológico y contaminación ambiental. Otro punto a favor de estos estudios, es el hecho de que muchos pretenden implementar métodos de muestreo no letales, varios de ellos, corroborando las cantidades de xenobioticos obtenidas en los biomarcadores no letales, con otros marcadores conocidos, obteniendo resultados positivos que sustentan el uso de estos nuevos biomarcadores.

Si bien, actualmente, la ecotoxicología de serpientes parece generar un mayor interés hacia los investigadores a nivel mundial, en México aún es un campo no explorado. Nuestro país siempre ha asombrado al mundo por su extraordinaria diversidad biológica, los datos de hace algunos años señalan que México posee cerca del 10 % de todos los reptiles alrededor del mundo, siendo las serpientes el grupo más diverso. Pese a esto, la mayoría de trabajos disponibles sobre contaminación ambiental en nuestro país no aborda a este importante grupo taxonómico.

## 7. Conclusión

Como se puede observar, es evidente que en el campo de la ecotoxicología se sigue ignorando a un taxón sumamente valioso desde el punto de vista ecológico, pese a que la ciencia ahora parece prestar más atención a este grupo de vertebrados, aún queda mucho trabajo por realizar, pues la ecotoxicología de serpientes aun presenta muchos baches metodológicos que pueden mejorarse para así brindar evaluaciones ambientales muchos más completas al considerar a uno de los grupos de animales más diverso y con una gran importancia ecológica.

## Agradecimientos

Este trabajo no pudo haber sido realizado sin el valioso apoyo de la Dra. Elena Otazo Sánchez; el Dr. Juan Carlos Gaytán Oyarzun, quien me ha permitido seguir trabajando con los organismos que tanto me apasionan; y el M. en C. Leonardo Fernández Badillo quien me ha inspirado a trabajar con estos maravillosos animales desde el principio de mi formación como profesional de las ciencias biológicas.

## Referencias

- Burger, J., Campbell, K. R., Campbell, T. S., Shukla, T., Jeitner, C., & Gochfeld, M. (2005). Use of skin and blood as nonlethal indicators of heavy metal contamination in northern water snakes (*Nerodia sipedon*). *Arch Environ Contam Toxicol*, 49(2), 232-238. doi: 10.1007/s00244-004-0098-9
- Burger, J., Gochfeld, M., Jeitner, C., Zappalorti, R., Pittfield, T., & DeVito, E. (2017). Arsenic, Cadmium, Chromium, Lead, Mercury and Selenium concentrations in Pine Snakes (*Pituophis melanoleucus*) from the New Jersey pine barrens. *Arch Environ Contam Toxicol*, 72(4), 586-595. doi: 10.1007/s00244-017-0398-5
- Burger, J., Murray, S., Gaines, K. F., Novak, J. M., Punshon, T., Dixon, C., & Gochfeld, M. (2006). Element levels in snakes in South Carolina: differences between a control site and exposed site on the Savannah River site. *Environ Monit Assess*, 112(1-3), 35-52. doi: 10.1007/s10661-006-0695-3
- Campbell, K., & Campbell, T. (2002). A logical starting point for developing priorities for lizard and snake ecotoxicology: A review of available data. *Environmental toxicology and chemistry / SETAC*, 21, 894-898. doi: 10.1002/etc.5620210502
- Campbell, K. R., & Campbell, T. S. (2001). The accumulation and effects of environmental contaminants on snakes: A review. *Environ Monit Assess*, 70(3), 253-301. doi: 10.1023/A:1010731409732
- Campbell, K. R., Campbell, T. S., & Burger, J. (2005). Heavy metal concentrations in northern water snakes (*Nerodia sipedon*) from East Fork Poplar Creek and the Little River, East Tennessee, USA. *Arch Environ Contam Toxicol*, 49(2), 239-248. doi: 10.1007/s00244-004-0200-3
- Egea-Serrano, A., & Ortiz-Santaliestra, M. E. (2013). Análisis del impacto de la contaminación química sobre la herpetofauna: Nuevos desafíos y aplicaciones prácticas. *Boletín de la Asociación Herpetológica Española*, 24, No 1, 2-34.
- Fernández-Badillo, L., N. Morales Capellán e I. Goyenechea. 2011. Serpientes Venenosas del Estado de Hidalgo. CONACYT UAEH. 112 p. ISBN: 978-607-482-161-1.
- Fernández-Badillo, L., Capellán, N. M., Olvera, C. R. O., Canales, G. M., & Mayer-Goyenechea, I. G. (2017). *Guía de las serpientes del estado de Hidalgo*: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Gavrić, J., Despotović, S., Prokić, M., Gavrilović, B., Radovanović, T., Anđelković, M., . . . Saičić, Z. (2019). Do different diets affect oxidative stress biomarkers and metal bioaccumulation in two snake species? *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 223, 26-34. doi: https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2019.05.010
- Hopkins, W. A. (2000). Reptile toxicology: Challenges and opportunities on the last frontier in vertebrate ecotoxicology. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 19(10), 2391-2393. doi: 10.1002/etc.5620191001
- Horne, M. T., & Dunson, W. A. (1995). Effects of low pH, metals, and water hardness on larval amphibians. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 29(4), 500-505. doi: 10.1007/BF00208380
- Jones, D. E., & Holladay, S. D. (2006). Excretion of three heavy metals in the shed skin of exposed corn snakes (*Elaphe guttata*). *Ecotoxicol Environ Saf*, 64(2), 221-225. doi: 10.1016/j.ecoenv.2005.03.018
- Quesada, R. J., McCleary, R. J., Heard, D. J., & Lillywhite, H. B. (2014). Non-lethal sampling of liver tissue for toxicologic evaluation of Florida cottonmouths snakes, *Agkistrodon piscivorus conanti*. *Ecotoxicology*, 23(1), 33-37. doi: 10.1007/s10646-013-1148-8
- Sparling, D.W., Linder, G., Bishop, C.A. & Krest, S. (2010). *Ecotoxicology of Amphibians and Reptiles*. Second Edition. SETAC Press. Pensacola
- Wylie, G. D., Hothem, R. L., Bergen, D. R., Martin, L. L., Taylor, R. J., & Brussee, B. E. (2009). Metals and trace elements in giant garter snakes (*Thamnophis gigas*) from the Sacramento Valley, California, USA. *Arch Environ Contam Toxicol*, 56(3), 577-587. doi: 10.1007/s00244-008-9265-8