

Las aves como bioindicadores de contaminación por metales pesados en humedales

Birds as bioindicators of heavy metal contamination in wetlands

Diana María Estrada-Guerrero¹ & Diego Soler-Tovar²

¹ Programa de Medicina Veterinaria, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de La Salle, Bogotá, D.C., Colombia

² Grupo de Epidemiología y Salud Pública, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de La Salle, Bogotá D.C., Colombia

✉ dianami435@hotmail.com, diegosoler@unisalle.edu.co, dsolert@gmail.com

Resumen

Con el crecimiento de las actividades ganaderas, agrícolas, mineras e industriales muchos ecosistemas, entre ellos los humedales, han sido afectados y deteriorados. Los humedales representan áreas importantes para la conservación de las aves, además de contribuir en actividades económicas de la población vecina. Sin embargo, su mal uso ha llevado a su degradación progresiva en el último siglo, siendo los metales pesados unos de los más importantes contaminantes por ser de gran estabilidad en el ambiente y en los tejidos de seres vivos. Además, las aves se encuentran dentro de las especies más afectadas por estos contaminantes, pudiendo producirse en ellas problemas en la reproducción, alteración en la embriogénesis, signos nerviosos y problemas metabólicos. Se hace por eso importante realizar biomonitoreo de los niveles de los metales pesados más importantes en estos humedales a través de bioindicadores como las aves, las cuales parecen ser apropiadas por su longevidad y sus características biológicas y fisiológicas. La elección de las muestras de aves pueden variar de acuerdo a la especie de ave en estudio, el propósito de la investigación y el tipo de metal a evaluar, así pueden recolectarse muestras de riñón, hígado, músculo, hueso, cartílago o plumas. En Colombia se han realizado varios estudios de contaminación por metales pesados (especialmente en peces), principalmente por mercurio (Hg) en cuerpos de agua, pero son pocos los registrados en los humedales. Por eso, es importante hacer seguimiento a los niveles de metales pesados en bioindicadores de esos humedales como las aves y así poder especificar si dichos niveles representan un peligro para la fauna y la salud pública.

Palabras clave: aves, biomonitoreo, humedales, metales pesados.

Abstract

With the growth of the industrial, livestock, agricultural, and mining activities many ecosystems, including wetlands, have been affected and damaged. Wetlands represent important areas for the conservation of birds, in addition to contributing to economic activities of the neighboring populations. However, misuse of wetlands has led to their gradual degradation in the last century, with heavy metals being among the most important pollutants since they are highly stable in the environment and in the tissues of living beings. In addition, the birds are among the species most affected by these pollutants; they could present problems in reproduction, alteration in embryogenesis, nervous signs and metabolic problems. Therefore, biomonitoring of levels of heavy metals in these most important wetlands is important, through such bioindicators as birds, which seem to be very appropriate due to their longevity and their biological and physiological characteristics. The choice of samples of birds may vary according to the species of bird, the purpose of the investigation and the type of metal to evaluate, so samples of kidney, liver, muscle, bone, cartilage or feathers may be collected. In Colombia there have been several studies of pollution by heavy metals (especially in fish), mainly by mercury (Hg) in water bodies, but there are very few studies in wetlands. It is important to follow the levels of heavy metals in wetlands using bioindicators like birds and in this way to determine if such levels represent a danger to the animals and public health.

Key words: biomonitoring, birds, heavy metals, wetlands.

Los metales pesados son considerados entre los contaminantes más importantes en la naturaleza debido a sus características químicas, que los hacen estables ante procesos de biodegradación y

de fácil afinidad para adherirse a tejidos de los seres vivos, pudiendo así acumularse y permanecer en el ambiente en distintos estados químicos y en los tejidos de los seres vivos por mucho tiempo, causando alteraciones en su salud y un desequilibrio biológico (Mancera-Rodríguez & Álvarez-León 2006, Mejía 2006).

Por otro lado, debido a sus funciones, los humedales constituyen importantes ecosistemas, ya que actúan como reserva de agua natural, muchas veces utilizada para actividades agropecuarias e industriales del ser humano; además, hacen parte del sistema de inundación de ríos, evitan inundaciones indeseadas, regulan el oxígeno, mantienen y conservan diversidad de fauna y flora, controlan la erosión, y actúan como un sitio de eliminación de una cantidad limitada de desechos (Marquéz 2003, Naranjo *et al.* 1999, Smith & Romero 2009, Correa-Araneda *et al.* 2011). Por esto, la influencia de los metales pesados en los humedales es un tema que se ha venido tratando y estudiando a nivel mundial y se recalca, además, el amplio grupo de factores y conflictos sociales, económicos, políticos y culturales que desencadenan la acumulación de niveles tóxicos de metales pesados en los seres vivos y en los suelos y aguas de estos ecosistemas (Mockus 2003, Chaparro 2003). Se hace también referencia en la literatura a la biomonitorización de estos metales, usando para ello muestras bióticas provenientes en la mayoría de los casos de aves, ya que por sus características biológicas, fisiológicas y ecológicas están expuestas a metales pesados a través de varias fuentes, siendo más indicativas las muestras de esta clase de animales que las de otras o las muestras abióticas (Pérez *et al.* 2005, Dauwe *et al.* 2000).

Los humedales ofrecen hogar y alimento a las aves, siendo éstas partícipes de la cadena alimenticia y factor de equilibrio en la cadena trófica. Igualmente para las aves migratorias, éstas encuentran en los humedales un área de descanso y

fuente de alimento para su recuperación fisiológica, después de largas jornadas de vuelo (Andrade & Benitez-Castañeda 2005). Son entonces por estas relaciones recíprocas entre la fauna y el ecosistema, que un desequilibrio en éste último repercute de manera negativa en la salud y el ciclo biológico de los animales, en este caso, de las aves. Se pretende con este artículo exponer las ventajas del uso de muestras provenientes de aves como bioindicadores para la biomonitorización. Presentamos los resultados de una revisión de estudios realizados sobre medición de metales pesados en órganos de aves. Además, enfatizamos que por varias características, la avifauna resulta especialmente afectada por la contaminación con metales pesados en el ambiente (Mockus 2003, Chaparro 2003, Kolf-Clauw *et al.* 2007, Pinilla 2010).

Generalidades de los metales pesados.- Navarro-Aviñó *et al.* (2007) definieron a los metales pesados como “elementos químicos que presentan una densidad igual o superior a 5 g cm^{-3} cuando están en forma elemental, o cuyo número atómico es superior a 20 (excluyendo a los metales alcalinos y alcalinotérreos)”. Entre las importantes características de los metales pesados se encuentran: “su estabilidad, lo cual los hace persistentes y residuales en los ecosistemas, afinidad por grupos tioólicos (-SH -), presentes en la mayoría de las enzimas de cualquier organismo vivo, son biodisponibles en medio acuoso y tienen la capacidad de bioconcentrarse en los organismos acuáticos (peces, crustáceos, algas, entre otros) y terrestres (plantas), afectando la cadena alimenticia de los ecosistemas” (Mejía 2006).

Los metales pesados se clasifican en dos grupos: los oligoelementos o micronutrientes, cuando tienen una función y son necesarios en bajas cantidades para los seres vivos, pero que pueden volverse tóxicos si superan el umbral fisiológico (As, B, Co, Cr, Cu, Mo, Mn, Ni, Se y Zn) y los metales que no cumplen ninguna función biológica conocida y

son tóxicos (Ba, Cd, Hg, Pb, Sb, Bi) (Navarro-Aviñó *et al.* 2007). No obstante, los elementos que conforman estos dos grupos varían según los diferentes autores (Tabla 1).

De acuerdo a Mejía (2006), los metales se encuentran de forma natural en la corteza terrestre de los ecosistemas y estos iones metálicos hacen parte de la geosfera. Las principales fuentes y causas de acumulación natural de metales en los ecosistemas son "la erosión, la actividad volcánica y los incendios forestales, que de la misma manera cumplen ciclos de acumulación y remediación, sin presentarse un efecto tóxico y/o nocivo para los ecosistemas". Además aclara que las actividades humanas y la intervención antrópica de los ecosistemas son la principal causa de encontrar altos niveles de metales pesados en ellos, debido a intensificación de las actividades en los sectores industriales, agrícolas, mineros y urbanos.

Kolf-Clauw *et al.* (2007) consideran que algunas de las fuentes de altas concentraciones de metales pesados en los ecosistemas son suelos para cultivos contaminados con algún fitosanitario (fuente de zinc, mercurio, plomo, arsénico o cobre) o con fertilizaciones intensas (fuente de cadmio), suelos situados en cercanías a industrias metalúrgicas, explotaciones mineras o instalaciones contaminadoras como incineradoras, fabricas recicladoras de plomo o vertimientos de altas cantidades de aguas residuales de producciones de cerdo en terrenos agrícolas (fuente de cobre y zinc), industrias de materiales de plástico, que emplean grandes cantidades de estearato de cadmio (fuente de cadmio), abonos naturales o químicos (fuentes de cadmio), polución automovilística (fuente de plomo), polución por perdigones de plomo usados en la caza (fuente de plomo), incineración de basuras (fuente de cadmio), baterías, revestimiento de cables, pigmentos y productos químicos (fuente de plomo).

Toxicidad de los metales pesados en las aves.- Las

consecuencias en aves expuestas a concentraciones subletales de metales pesados se relacionan con alteración en la reproducción, cambios del comportamiento, disminución de tamaño y peso y alteración en la embriogénesis (Tsipoura *et al.* 2011; Zhang & Ma 2011). Los metales pesados han sido reconocidos como genotóxicos, ya que tienen efectos perjudiciales sobre el ADN y además, han sido documentadas mutaciones en la línea germinal en aves y mamíferos en áreas industriales (Eeva *et al.* 2006).

Szymczyk & Zalewski (2003) reportan que el cadmio es absorbido a través del sistema digestivo y respiratorio, formando complejos con las proteínas que facilitan su transporte y almacenamiento en órganos como el hígado, riñones y en menores cantidades, en páncreas, hueso e intestino. El cadmio provoca efectos negativos como retraso en el crecimiento, descenso de la producción de huevos, adelgazamiento de la cáscara del huevo y alteraciones comportamentales (Pérez *et al.* 2005).

El plomo puede causar inmunodepresión en las aves si se exponen crónicamente a bajos niveles. Este metal también puede afectar el sistema nervioso, contribuyendo a la desmielinización de los nervios periféricos (Redig & Arent 2008) y causando en aves signos nerviosos como debilidad muscular, ceguera y convulsiones (LaBonde 1995, Lightfoot & Yeager 2008, Redig & Arent 2008). El plomo también disminuye la producción de eritrocitos al intervenir negativamente en la síntesis de hemoglobina y aumentar la fragilidad de los glóbulos rojos facilitando su destrucción, dando como resultado hemólisis intravascular y anemia (Redig & Arent 2008, Madani *et al.* 2007). La intoxicación por plomo, además de signos neurológicos y hematológicos, causa signos gastrointestinales como regurgitación, vómito, diarrea y anorexia, entre otros efectos como emaciación, hipoproteïnemia, poliuria, polidipsia y biliverdinuria (Madani *et al.* 2007, Beasley 1999, LaBonde 1995, Redig & Arent 2008), teratogénesis y muerte embrionaria

Tabla 1. Metales pesados esenciales y no esenciales

Metal	Abreviatura	Esencial/ No esencial	Toxico
Arsénico	As	Esenciales	Si superan el umbral fisiológico
Boro	B		
Cobalto	Co		
Cromo	Cr		
Cobre	Cu		
Molibdeno	Mo		
Manganeso	Mn		
Níquel	Ni		
Selenio	Se		
Zinc	Zn		
Cadmio	Cd	No esenciales	Sí, hasta en concentraciones bajas por acumulación crónica
Mercurio	Hg		
Plomo	Pb		
Antimonio	Sb		
Bismuto	Bi		

Adaptado de Navarro-Aviñó *et al.* (2007)

(Lightfoot & Yeager 2008).

De acuerdo a Poppenga (1999), la intoxicación por mercurio también puede causar ataxia, debilidad en las extremidades, incapacidad de volar o caminar, párpados caídos, baja actividad física e hiporreactividad. También puede estimular la producción de huevos sin cáscara (Beasley 1999).

Biomonitoreo y bioindicadores.- Dentro de los contaminantes, los metales pesados tienen un gran impacto a nivel global o local. Es importante poder monitorear a través del tiempo y tener conocimiento de los niveles ambientales de estos contaminantes, su repercusión en la calidad del agua y la salud de la fauna, en este caso de los humedales, así como en la salud de la población humana. En particular, se debe realizar el monitoreo de las concentraciones de los metales pesados en los organismos mismos (el biomonitoreo), porque en ellos se pueden acumular estos contaminantes más allá de sus concentraciones en las mis-

mas aguas. De esta forma, se puede alertar a las autoridades ambientales sobre los efectos negativos de los contaminantes en los ecosistemas y se pueden realizar análisis, estudios o medidas para afrontar y frenar estas consecuencias a través de proyectos de conservación, entre otros (Zhang & Ma 2011).

Un bioindicador es un organismo o grupo de organismos que por sus características permite saber cuantitativa y cualitativamente el estado del ambiente o que son capaces de indicar factores estresores en el mismo, de origen antropogénico (Fränzle 2003). Para monitorear la presencia de metales pesados en el ambiente o ecosistemas, es preciso utilizar muestras de animales que por sus características anatómicas, biológicas y ecológicas son capaces de almacenar cantidades traza de los metales pesados. El uso de tales animales permite evidenciar la presencia de metales pesados mucho antes que si se utilizaran muestras abióticas en el monitoreo (Pérez *et al.* 2005).

Comúnmente se han utilizado las aves como bio-indicadores de un ecosistema. Esto se debe a que la mayoría son especies de relativamente larga vida y que están en lo alto de la cadena alimenticia y están expuestos a los metales pesados a través de varias fuentes como el aire, el agua y el alimento (Dauwe *et al.* 2000). También, debido a la considerable información existente sobre la taxonomía, distribución geográfica, requerimientos ecológicos y fisiológicos de las aves y a su facilidad de estudio comparándolas con otras clases animales, se constituyen como bioindicadores ideales (Ramírez 2000, Zhang & Ma 2011). Según Becker (2003), las aves son indicadores cualitativos (problemas reproductivos, adelgazamiento de la cáscara de los huevos, muerte, entre otros) y cuantitativos de tóxicos como los pesticidas, exponiendo el daño generado a un ecosistema o a una población de aves.

No obstante, hay que mencionar algunas precauciones al utilizar aves como bioindicadores en los humedales. Por un lado, se puede encontrar especies migratorias y por esto, una disminución en su población no sería necesariamente por efecto directo de las condiciones biológicas o ecológicas de un humedal concreto, sino el conjunto de muchos otros factores que se salen de los límites de ese humedal (Green & Figuerola 2003). En estos casos, la exposición a metales pesados va a depender del tipo y extensión de migración de la especie, además de las pautas de alimentación en determinadas épocas como la reproductiva (Zhang & Ma 2011). Igualmente, las comunidades de aves en un humedal dependerán de las características de éste, como su profundidad, salinidad y pH del agua, la cantidad y tipo de vegetación y la dieta (plantas, invertebrados, peces), que a su vez determinan la posición de una especie dada en la cadena alimenticia del humedal. Algunas especies también pueden alimentarse fuera del mismo humedal (*v. gr.*, en campos de cultivo aledañas (Green & Figuerola 2003). Por esto, se debe

realizar un análisis previo del ecosistema a estudiar y una vez elaborado, se debe elegir cuidadosamente la especie de ave como bioindicadora de la salud ecosistémica de un humedal (Green & Figuerola 2003).

Muestras de aves para análisis de metales pesados.- Dentro de las muestras de aves que se han usado para monitorear metales pesados se encuentran sangre y tejidos como músculo, hígado, bazo, hueso, riñón, corazón, pulmón y cerebro. También se han utilizado huevos, plumas y pichones. Las muestras regenerativas, como las plumas, tiene grandes ventajas para el biomonitoreo, ya que son fáciles de obtener, pueden estudiarse durante largos periodos de tiempo y no representan un gran peligro para la supervivencia de una comunidad de aves (Zhang & Ma 2011). Pérez *et al.* (2005) recomendaron el empleo de muestras "renovables" tales como plumas y excretas porque no afectarían a la población; además, afirmaron que los niveles de estos metales pesados que se pueden cuantificar en el plumaje reflejan los niveles sanguíneos de dichos elementos durante el corto periodo de crecimiento de la pluma, durante el cual ésta se conecta con los vasos sanguíneos y los metales se incorporan en la queratina. La fuente de los metales pesados en la sangre (y posteriormente en la pluma) puede ser a través de la ingestión de ciertos alimentos pero al completar su crecimiento, la conexión de la pluma con el sistema vascular se atrofia. Se ha encontrado que muestras de plumaje de la zona pectoral son mejores indicadores de los niveles de metales que las obtenidas de otras zonas del cuerpo (Pérez *et al.* 2005) (Tabla 2). En conclusión, la ventaja de tomar plumas como muestras es que son fáciles de coleccionar, su recolección es menos estresante para el ave y puede obtenerse al mismo tiempo información genética y de concentraciones de metales pesados (Eeva *et al.* 2006). Un menor fuente de entrada de los metales pesados puede ser a través del acicalamiento después del contacto directo

con el agua, el suelo o la vegetación; las plumas pueden ser contaminadas con excrementos o secreciones de la glándula uropigial (Guillén *et al.* 2009). Las aves también pueden deshacerse de cantidades de metales pesados a través de los excrementos, las secreciones de la glándula uropigial y, en el caso de las hembras, a través de los huevos (Dauwe *et al.* 2000; Goutner *et al.* 2001).

También se han utilizado órganos como el hígado de aves encontradas muertas en determinado ecosistema, como en el estudio realizado por Pérez (2005), donde midieron concentraciones de metales pesados en hígado y plumas de aves marinas encontradas muertas en la costa de Galicia, España. Del mismo modo, se ha podido detectar concentraciones de metales pesados en los músculos pectorales de patos (*Anas platyrhynchos*), aunque los resultados del estudio indicaron concentraciones características de metales para las mismas aves (Szymczyk & Zalewski 2003). Por otro lado, se han encontrado altas concentraciones de plomo en hueso de Águila Imperial (*Aquila adalberti*), ya que el plomo suele acumularse principalmente en hígado, riñón y hueso, pero permaneciendo en este último durante años y acumulando durante toda la vida del ave (Pain *et al.* 2005), mientras que las concentraciones en las plumas son solo el acumulo resultante del periodo de formación de la pluma. Sin embargo, aves con una exposición aguda a plomo pueden morir rápidamente sin alcanzar mayores niveles en hueso (Pain *et al.* 2005). También existen reportes sobre el uso de excrementos de ave, cuyas concentraciones de metales pesados parecen ser indicativos de la contaminación ambiental, constituyendo los excrementos como un buen biomonitor de los metales en el ambiente y en la cadena alimenticia (Dauwe *et al.* 2000) (Tabla 2).

Algunos de los metales pesados que se han estudiado en aves son el Cadmio (Cd), Mercurio (Hg), Plomo (Pb), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Zinc (Zn),

Hierro (Fe) y Arsénico (As), siendo tal vez los más ampliamente estudiados los tres primeros (Cd, Hg y Pb) en aves, los cuales son importantes por sus características y por ser metales pesados no esenciales (Tablas 1 y 2).

Hay bastante literatura sobre biomonitorio de metales pesados; no obstante, la dinámica de los metales pesados en el ambiente y la contaminación por estos en el mismo es tan compleja que hace el campo de investigación bastante variado y lleno de interrogantes. Son muchas las variables que influyen en esta dinámica, desde factores externos como las fuentes de contaminación, las características de cada metal, factores propios del tipo de ecosistema y características fisiológicas y biológicas de las especies de animales que habitan en él, las cuales dificultan homogenizar parámetros de análisis, tornándose este campo de investigación bastante interesante e importante por su impacto biológico y humano.

En cuanto a la biomonitorización de metales pesados en aves, se percibe dificultades a la hora de elegir el tejido más representativo de la contaminación ambiental, ya que además algunos metales poseen mayor afinidad por cierto tejido, la acumulación de estos metales en cada tejido en el ave depende también del tipo de ave, de su fisiología, su biología, su dieta, el sexo y el tipo de ecosistema en el que habitan. Por eso, la elección de un tejido de ave para biomonitorización depende del metal en estudio, el tipo de ave, su posición en la cadena trófica, su edad, el periodo de recolección de la muestra, el tipo de ecosistema y el objetivo del estudio.

Espín *et al.* (2012) encontraron mayores concentraciones de Hg en cerebro, músculo, riñón y plumas de aves adultas (*Alca torda*) en comparación a aves jóvenes. Al parecer, depende de si las aves adultas comen presas más grandes y más contaminadas o si solo es el reflejo de un acumulo de

Tabla 1. Niveles de metales pesados encontrados en plumas y distintos órganos de aves

Metal	Nivel	Órgano	Especie de Ave	Argumento	Referencia
Mercurio Hg	2.85 ± 0.90 mg/kg peso seco	Hígado	Alca común (<i>Alca torda</i>)	Concentraciones cercanas al nivel crítico, asociadas a mortalidad embrionaria y lesiones cerebrales	Espín, Martínez-López, Gómez-Ramírez, María-Mojica y García-Fernández (2012)
	2.23 ± 0.87 mg/kg peso seco	Riñón	Alca común (<i>Alca torda</i>)	Niveles insuficientes para causar efectos adversos de salud	
	1.54 ± 0.54 mg/kg peso seco	Músculo	Alca común (<i>Alca torda</i>)		
	1.48 ± 0.54 mg/kg peso seco	Cerebro	Alca común (<i>Alca torda</i>)	Niveles insuficientes para causar efectos adversos de salud	
	1.5 – 18 mg/kg peso seco	Huevo	Especies como <i>Phasianus colchicus</i> , <i>Anas rubripes</i> , <i>Anas platyrhynchos</i> , <i>Sterna hirundo</i> .	Niveles suficientes para causar disminución del peso en el huevo, malformaciones embrionarias, incubabilidad baja, disminución de crecimiento y supervivencia de los polluelos	Burger & Gochfeld (1997)
	0.04 ± 0.007 mg/kg peso húmedo	Hígado	<i>Branta canadensis</i>	Niveles inferiores a los encontrados por estos autores en otros trabajos. Niveles inferiores a los perjudiciales.	Tsipoura, Burger, Newhouse, Jeitner, Gochfeld & Mizrahi 2011
	0.01 ± 0.003 mg/kg peso húmedo	Músculo	<i>Branta canadensis</i>		
	0.26 ± 0.04 mg/kg peso seco	Plumas	<i>Branta canadensis</i>		
	0.004 ± 0.0003 mg/kg peso húmedo	Huevos	<i>Branta canadensis</i>		
	5.0 mg/kg Hg en peso fresco	Plumas	-	Criterio mínimo genérico para la protección de las aves	Eisler 1987
	2.66 ± 1.60 mg/kg peso seco	Vexilo de la pluma	<i>Alca común</i> (<i>Alca torda</i>)		Espín, Martínez-López, Gómez-Ramírez, María-Mojica y García-Fernández (2012)
	1.30 ± 0.76 mg/kg peso seco	Cálamo de la pluma	<i>Alca común</i> (<i>Alca torda</i>)		Espín, Martínez-López, Gómez-Ramírez, María-Mojica y García-Fernández (2012)
	5 – 40 mg/kg peso seco	Pluma	Varias especies de aves como <i>Black duck</i> , <i>Mallards</i> , <i>Sparrow hawk</i>	Infertilidad, anormalidades comportamentales, baja eclosión de los huevos	Burger & Gochfeld (1997)
Zinc Zn	94.4 mg/kg peso seco	Hueso	<i>Aythya marila</i>	-	Kalisińska, Salicki, Kavetska & Ligocki 2007
	149.1 mg/kg peso seco	Cartilago	<i>Aythya marila</i>	-	
	102.0 mg/kg peso seco	Hueso	<i>Aythya ferina</i>	-	
	165.8 mg/kg peso seco	Cartilago	<i>Aythya ferina</i>	-	

Metal	Nivel	Órgano	Especie de Ave	Argumento	Referencia
Hierro	20.2 mg/kg peso seco	Hueso	<i>Aythya marila</i>	-	Kalisińska, Salicki, Kavetska & Ligocki 2007
Fe	58.4 mg/kg peso seco	Cartílago	<i>Aythya marila</i>	-	
	24.7 mg/kg peso seco	Hueso	<i>Aythya ferina</i>	-	
	116.3 mg/kg peso seco	Cartílago	<i>Aythya ferina</i>	-	
Cobre	0.19 mg/kg peso seco	Hueso	<i>Aythya marila</i>	-	Kalisińska, Salicki, Kavetska & Ligocki 2007
Cu	1.41 mg/kg peso seco	Cartílago	<i>Aythya marila</i>	-	
	0.26 mg/kg peso seco	Hueso	<i>Aythya ferina</i>	-	
	3.31 mg/kg peso seco	Cartílago	<i>Aythya ferina</i>	-	
Plomo	1.8 – 27.6 mg/kg peso seco	Hueso	<i>Aythya marila</i>	Niveles sugestivos de leve influencia ambiental.	Kalisińska, Salicki, Kavetska & Ligocki 2007
	Pb	2.5 – 76.8 mg/kg peso seco	Cartílago		
1.7 – 56.2 mg/kg peso seco		Hueso	<i>Aythya ferina</i>		
2.3 – 101.1 mg/kg peso seco		Cartílago	<i>Aythya ferina</i>		
	No detectables – 0.13 mg/kg peso húmedo	Huevos	<i>Phalacrocorax carbo</i>	Niveles sugestivos de leve influencia ambiental.	Goutner, Papagiannis & Kalfakakou 2001
	No detectables – 0.18 mg/kg peso húmedo	Huevos	<i>Larus cachinnans</i>		
	No detectables – 0.17 mg/kg peso húmedo	Huevos	<i>Larus melanocephalus</i>		
	0.003 – 0.37 mg/kg peso húmedo	Huevos	<i>Recurvirostra avosetta</i>		
	0.004 – 0.31 mg/kg	Huevos	<i>Sterna hirundo</i>		
	0.25 ± 0.045 mg/kg peso húmedo	Hígado	<i>Branta canadensis</i>	Niveles por debajo de los de envenenamiento subclínico (2000 – 5900 ppb) y clínico (6000 – 15 000 ppb)	Tsipoura, Burger, Newhouse, Jeitner, Gochfeld & Mizrahi 2011
	0.014 ± 0.008 mg/kg peso húmedo	Músculo	<i>Branta canadensis</i>	Niveles bajos	
	1.91 ± 0.39 mg/kg peso seco	Plumas	<i>Branta canadensis</i>	Niveles bastante altos, en comparación a otros estudios	
	0.16 ± 0.04 mg/kg peso húmedo	Huevos	<i>Branta canadensis</i>	Niveles altos en comparación a la media tomada de 29 estudios en especies piscívoras	
	> 5 mg/kg peso seco (1.5 mg/kg peso húmedo)	Hígado	Ánade Real (<i>Anas platyrhynchos</i>)	Por encima de este nivel, son concentraciones anormales	Szymczyk & Zalewski 2003

Metales pesados y aves

Metal	Nivel	Órgano	Especie de Ave	Argumento	Referencia
Plomo Pb	≤ 0.023 mg/kg en peso seco	Plumas	Arao común (<i>Uria aalge</i>), <i>Fratercula común (Fratercula arctica)</i> y <i>Alca co-</i>	No indicativos de una exposición ambiental elevada	Pérez et al. 2005
	15 mg/kg	Plumas	Águila Española Imperial (<i>Aquila</i>)	Indicativo de exposiciones elevadas a Pb en Águila Imperial (<i>Aquila adalberti</i>)	Pain et al. 2005
Cadmio Cd	0.062 – 0.233 mg/kg peso seco	Hueso	<i>Aythya marila</i>	-	Kalisińska, Salicki, Kavetska & Ligocki 2007
	0.098 – 0.428 mg/kg peso seco	Cartílago	<i>Aythya marila</i>	-	
	0.065 – 0.353 mg/kg peso seco	Hueso	<i>Aythya ferina</i>	-	
	0.112 – 0.597 mg/kg peso seco	Cartílago	<i>Aythya ferina</i>	-	
	No detectables – 0.01 mg/kg peso húmedo	Huevos	<i>Phalacrocorax carbo</i>	Niveles sugestivos de leve influencia ambiental.	Goutner, Papagiannis & Kalfakakou 2001
	0.001 – 0.008 mg/kg peso húmedo	Huevos	<i>Larus cachinnans</i>		
	No detectables – 0.024 mg/kg peso húmedo	Huevos	<i>Larus melanocephalus</i>		
	0.003 – 0.009 mg/kg pso húmedo	Huevos	<i>Recurvirostra. avosetta</i>		
	0.001 – 0.012 mg/kg peso húmedo	Huevos	<i>Sterna hirundo</i>		
	0.2 ± 0.03 mg/kg peso húmedo	Hígado	<i>Branta canadensis</i>		
	0.006 ± 0.0009 mg/kg peso húmedo	Músculo	<i>Branta canadensis</i>		
	0.09 ± 0.01 mg/kg peso seco	Plumas	<i>Branta canadensis</i>		
	0.0002 ± 0.00008 mg/kg peso húmedo	Huevos	<i>Branta canadensis</i>		
	1.121 - 1.274 mg/kg peso húmedo	Hígado	Ánade Real (<i>Anas platyrhynchos</i>) y <i>faisanes</i>	Posible indicativo de contaminación ambiental	Szymczyk & Zalewski 2003
	≤ 0.05 mg/kg en peso seco	Plumas	Rapaces	No indicativos de una exposición ambiental elevada	Pérez et al. 2005

Metal	Nivel	Órgano	Especie de Ave	Argumento	Referencia
Arsénico	0.004 ± 0.002 mg/kg peso húmedo	Hígado	<i>Branta canadensis</i>	Niveles inferiores a los necesarios para anticipar impactos biológicos (2000 – 10 000 ppb)	Tsipoura, Burger, Newhouse, Jeitner, Gochfeld & Mizrahi 2011
As	0.0006 ± 0.0004 mg/kg peso húmedo	Músculo	<i>Branta canadensis</i>		
	0.07 ± 0.03 mg/kg peso seco	Plumas	<i>Branta canadensis</i>		
	0.006 ± 0.003 mg/kg peso húmedo	Huevos	<i>Branta canadensis</i>		
Cromo Cr	0.16 ± 0.04 mg/kg peso húmedo	Hígado	<i>Branta canadensis</i>	Niveles inferiores a los necesarios para evidenciar contaminación (4000 ppb peso seco)	Tsipoura, Burger, Newhouse, Jeitner, Gochfeld & Mizrahi 2011
	0.07 ± 0.02 mg/kg peso húmedo	Músculo	<i>Branta canadensis</i>		
	1.36 ± 0.24 mg/kg peso seco	Plumas	<i>Branta canadensis</i>		
	0.04 ± 0.006 mg/kg peso húmedo	Huevos	<i>Branta canadensis</i>		

este metal por un periodo de tiempo más largo.

Las concentraciones de Hg en plumas tienden a ser más altas que en el resto de órganos internos de aves adultas. Esto se debe a que durante el periodo de crecimiento de la pluma, el Hg presente en el hígado se mueve por circulación hasta las plumas, donde se une a la queratina de estas y se transforma en metilmercurio. Alrededor de un 90% de Hg es eliminado del cuerpo del ave con cada muda. Espín *et al.* (2012) también observaron diferencias en concentraciones de Hg en distintas partes de la pluma. Las concentraciones del vexilo fueron mayores a las del cálamo. Puede ser por varias razones, primero por una influencia de la contaminación externa, segundo por la composición química estructural del vexilo y el cálamo y la capacidad de unión del Hg, y tercero porque el Hg se acumula en el vexilo (en las barbas) después de pasar por el cálamo. Sin embargo, el cálamo parece ser una muestra más representativa de los niveles internos de Hg, ya que no tiene tanta influencia de contaminación externa como el vexilo, sobre el cual persiste a pesar de los lavados rigurosos antes de su análisis. Pero se debe tener cui-

dado porque las concentraciones de mercurio en las plumas reflejan las concentraciones de mismo en los órganos solo durante el periodo de crecimiento de la pluma (3 semanas), y no necesariamente los niveles en plumas y órganos internos reflejan el mismo periodo de exposición; es decir, debe considerarse el tiempo entre la muda y la recolección de la muestra (Eisler 1987; Espín *et al.* 2012; Burger & Gochfeld 1997).

Diferentes autores coinciden que las plumas representan una buena muestra para la evaluación de metales pesados en animales vivos, aunque también coinciden en varios factores que contribuyen un poco a la complejidad de su análisis. Se han usado plumas primarias o de vuelo, pero una muda incompleta puede afectar la interpretación de resultados. Las plumas del cuerpo tienen la ventaja de que se pueden utilizar en mayor cantidad, pero una muda incompleta también puede afectar y muchos estudios no han proporcionado datos sobre cuáles plumas o partes de éstas han sido usados en el análisis. Por ejemplo, Debén *et al.* (2012) midieron concentraciones de plomo en varios tipos de plumas en dos especies de aves ra-

paces (*Strix aluco* y *Accipiter gentilis*), encontrando una gran variación en la concentración de metales como el plomo entre plumas de distinto origen (plumas del manto, plumas pectorales, ventrales, primarias y coberteras de las secundarias).

Otros autores han estudiado las concentraciones de ciertos metales en hueso y cartílago de aves; la deposición de metales en estos tejidos duros es lenta pero una vez se establecen allí, los metales permanecen y acumulan por mucho tiempo (Kalisińska *et al.* 2007). Esto hace que tal vez no se utilicen tanto estas muestras de aves a diferencia de las de hígado y riñón donde los metales tienden a acumularse con mayor rapidez; sin embargo, las muestras de huesos y cartílagos permiten conocer cantidades acumuladas durante toda la vida del animal. Estos mismos autores han demostrado que las concentraciones de metales esenciales (Fe, Zn, Cu) y no esenciales (Pb y Cd) son más altas en cartílago (tráquea) que en hueso de aves. Las cantidades de metales que se acumulen en estos órganos depende del estado de desarrollo ontogénico y fisiológico del ave, y de la cantidad de metales que consume (Kalisińska *et al.* 2007).

Problemas de los metales pesados para la salud pública.- La contaminación por metales pesados afecta no solo el equilibrio en los ecosistemas, sino que también afecta la salud y bienestar de los humanos, por eso este problema tiene un alto impacto y es trascendental en la salud pública, debido a que son muchas las fuentes de contaminación con éstos y además, pueden causar toxicidad, ya sea aguda o crónica. Entre los metales de impacto en la salud pública, por su exposición en el ambiente y especialmente por su potencial de ingestión vía alimentaria, se encuentran el plomo, el cromo, el cadmio y el mercurio. El plomo y el mercurio tienen importancia por su neurotoxicidad, el cromo es alergénico y el cadmio produce afectación pulmonar y renal, osteomalacia y osteoporosis (Zubero *et al.* 2008). El plomo puede

causar, entre muchos otros efectos, anemia, alteraciones histológicas y en la fisiología renal, gota, hipertensión, efectos neurológicos y neurotóxicos, especialmente en niños, los cuales pueden ir desde letargia hasta ataxia, convulsiones y coma. Este metal además puede llevar a problemas en la audición, junto con problemas cognitivos y afectación de las capacidades de aprendizaje (Anónimo 2006, Pérez *et al.* 2005). El cromo y el cadmio son cancerígenos según la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC) (Anónimo 1990, Anónimo 2012). La exposición al cromo puede causar cáncer de pulmón (Anónimo 1990) y de igual modo, la exposición al cadmio puede aumentar el riesgo de desarrollar cáncer de pulmón, riñón, vejiga, mama y endometrio (Anónimo 2012). Los metales pueden acumularse en las células de cerebro, hígado, riñón, corazón, páncreas, tejido muscular, huesos, sangre, entre otros, en complejos peptídicos llamados metalotieninas. Los metales pesados pueden además causar en el hombre problemas como ulceraciones en la piel, irritaciones gastrointestinales, aparición de cáncer, enfermedades degenerativas y provocar mutaciones genéticas (Mejía 2006).

Por sus características acumulativas y de permanencia, los metales pesados se encuentran en el aire, agua, suelos, flora, fauna y en los humanos (Ferré-Huguet *et al.* 2007). Adicionalmente, los metales pesados no pueden ser degradados o destruidos y se pueden incorporar al organismo humano a través de la ingestión de agua contaminada con estos elementos o a través de la absorción dérmica por contacto con esa agua; también pueden ser inhalados, ingeridos con los alimentos o absorbidos dérmicamente debido a partículas de polvo (Nadal *et al.* 2004, Ferré-Huguet *et al.* 2007).

Estudios sobre contaminación por metales pesados en Colombia.- El mercurio ha sido uno de los metales más estudiados por sus características tó-

xicas. En Colombia, la minería aurífera es un factor especialmente importante en la contaminación por mercurio de aguas dulces de algunas regiones del país; la utilización de este metal durante el proceso de extracción de oro repercute negativamente en los ecosistemas y en su fauna, además de depositar cianuro también en el ambiente, teniendo éste un efecto letal en la biota (Mancera-Rodríguez & Álvarez-León 2006). El mercurio se encuentra en varios estados en el ambiente, siendo el principal el mercurio elemental, forma insoluble, que puede oxidarse cuando entra en contacto con las gotas de la lluvia y el oxígeno pasando a un estado soluble en el que puede depositarse en suelos y cuerpos de agua, donde en la parte más profunda, por acción de las bacterias anaerobias, se forma el estado más peligroso del mercurio: el metilmercurio, forma orgánica de este elemento que le permite acumularse en los tejidos de las especies de la cadena trófica, ya que posee afinidad por proteínas celulares que contiene el aminoácido cisteína y este a su vez grupos sulfhidrilos (-SH-), de este modo puede penetrar y permanecer en la cadena trófica (Castillo 2008; Poulin & Gibb 2008).

En Colombia aún es escasa la información sobre la deposición de metales pesados en cuerpos de agua y el impacto que éstos generan en la salud humana (Mancera-Rodríguez & Álvarez-León 2006). Sin embargo, se han realizado algunos estudios sobre las concentraciones de metales pesados en peces de agua dulce en el país, especialmente el mercurio. Los peces podrían ser buenos bioindicadores porque al poseer un importante nivel en la cadena trófica, pueden acumular altas cantidades de metilmercurio en su organismo y retener concentraciones mayores de metales pesados que las presentes en el agua; así, su consumo representa un riesgo potencial para la salud humana (Mancera-Rodríguez & Álvarez-León 2006).

Gracia *et al.* (2010) demostraron que los habitan-

tes del municipio de Ayapel, en Córdoba, poseen en su cabello concentraciones de mercurio superiores a las permitidas y que esto se debe a la cantidad y frecuencia de consumo de pescado proveniente de la ciénaga de Ayapel. El 42% del total de especies de peces evaluadas de esta ciénaga presentaban concentraciones de mercurio superiores a 0.5 µg/g, el límite aceptado por la Organización Mundial de la Salud (OMS), como segura para el consumo humano. Esta misma organización estableció un límite permisible de mercurio de 0.2 µg/g, con el fin de proteger la población más vulnerable como niños, mujeres embarazadas y consumidores frecuentes. Este último límite fue sobrepasado por el 80% del total de las muestras de peces evaluadas. Esto concuerda con Marrugo *et al.* (2007) quienes demostraron que existe un riesgo potencial para la salud humana en el municipio de Ayapel por consumir pescados carnívoros y no carnívoros provenientes de la ciénaga, debido a los altos niveles de mercurio encontrados en músculo de estos animales. Resultados similares encontraron Marrugo-Negrete *et al.* (2008) con elevadas concentraciones de mercurio en el agua, sedimento, zooplancton, fitoplancton y peces de la ciénaga Grande en el municipio de Montecristo en Bolívar. Los altos niveles de mercurio en el cabello de los habitantes de la zona aledaña comprueba que los residuos de la minería del oro elaborada en la zona constituyen un riesgo para la salud de personas que consumen pescado de la ciénaga. Teniendo en cuenta las características culturales y socioeconómicas de la población de esta zona, recomendaron a las autoridades sanitarias de la zona prestar atención a este problema.

Igualmente, se han realizado estudios de las concentraciones de metales pesados en aguas del río Magdalena, principalmente para el mercurio, pero también se han analizado otros metales como cromo, plomo, cadmio, níquel, cobre, hierro y zinc en sedimento, plantas, agua y peces, resaltando los altos niveles encontrados de estos metales (Mancera-Rodríguez & Álvarez-León 2006).

Alonso *et al.* (2000) compararon los niveles de mercurio en dos especies de peces de dos lugares distintos en la costa caribe de Colombia, la bahía de Cartagena y la Ciénaga Grande de Santa Marta (área de baja contaminación). Las concentraciones de éste metal fueron más altas en los peces de la bahía de Cartagena, aunque aún por debajo del límite permisible para consumo humano. También se encontró que las concentraciones eran más altas en peces omnívoros (*Eugerres plumieri*) o depredadores que en los no depredadores. En la Ciénaga Mina Santa Cruz en el noroccidente de Colombia, se analizaron niveles de mercurio en el sedimento, macrófitos y peces de las especies con diferentes posiciones, concluyendo que los niveles fueron más altos en los peces detritívoros, que buscan su alimento en el sedimento, donde se encuentra más el mercurio, pero que las especies más consumidas por la población humana eran las que menores niveles registraron, constituyendo un riesgo de toxicidad baja.

Aún se han realizado pocos estudios tomando como bioindicadores a las aves en un ecosistema. Olivero-Verbel *et al.* (2013) compararon niveles de mercurio en cáscara de huevos de las aves garceta nívea (*Egretta thula*) de dos regiones en el norte Colombia, la bahía de Cartagena en una zona industrial y la ciénaga del Totumo, de baja contaminación sin influencias industriales. Se encontró mayor concentración de mercurio en los huevos de la bahía de Cartagena, al igual que un menor espesor de la cáscara de los huevos, aunque no se encontró relación directa con las cantidades de mercurio encontradas. Se requieren mayores investigaciones para profundizar en este problema, ya que si se ha reportado que concentraciones altas de este metal pueden disminuir el grosor de las cáscaras de los huevos y disminuir el índice de reproducción de las aves (Olivero-Verbel *et al.* 2013).

En cuanto a otras medidas de salud ambiental en

los humedales usando datos limnológicos, Pinilla (2010), encontró que de seis humedales, Meridor, Jaboque y Guaymaral tenían condiciones aceptables; los de condiciones limnológicas regulares eran Santa María del Lago y Juan Amarillo y aquel con pobres condiciones limnológicas era Tibanica. Sin embargo, no se hizo análisis de metales pesados, y especialmente para estos ecosistemas, las aves podrían ser los organismos más apropiados para el biomonitoreo. Dada la proximidad de estos humedales a la población humana, estos análisis deben ser de alta prioridad. Igualmente, el río Bogotá está expuesto a varias fuentes potenciales de contaminación de estos metales. Como las aguas del río y los humedales asociados son utilizadas para el riego de hortalizas y de potreros para la ganadería lechera, es importante iniciar programas de biomonitoreo de metales pesados.

Conclusión.- Existen pocos reportes de biomonitorización de metales pesados en los humedales, siendo estos importantes áreas de conservación y de prestación de servicios. Es esencial indagar más a fondo sobre las concentraciones de metales pesados en los humedales, ya que sus áreas adyacentes son usadas por la población humana para actividades agrícolas y ganaderas, en muchos casos utilizando sus aguas para el riego de las cosechas y potreros.

Para el monitoreo de la ecotoxicología, es esencial contar con bioindicadores que, por sus características biológicas y ecológicas, permitan medirse en éstos las concentraciones de metales pesados como representativas de la contaminación del ecosistema (Pérez *et al.* 2005). Las aves acuáticas pueden actuar como bioindicadores, al estar arriba de la cadena trófica y en contacto directo con el agua. Además, estas especies han demostrado tener la capacidad de acumular grandes cantidades de metales pesados en tejidos como plumas, hígado y cáscaras de huevo. Por esto, a partir de las aves se puede evaluar el estado ecotoxicológico

de un ecosistema, en este caso, el de un humedal (Pérez *et al.* 2005). Sin embargo, es importante prestar especial atención a la especie de ave, sus características biológicas y fisiológicas y edad para realizar esos estudios. Además, especialmente en la Sabana de Bogotá, hay varias especies endémicas y en alguna categoría de riesgo de extinción (Rosselli & Stiles 2011), de tal forma que sería importante escoger con cuidado las especies y el método de biomonitorio. El uso de las plumas podría ser especialmente apropiado en estos casos, ya que podrían ser recogidas con cierta facilidad, especialmente alrededor de los garceros. Podría ser especialmente importante comparar los niveles de estos metales en plumas de *Ardea alba* y *Nycticorax nycticorax* (depredadores de peces y ranas), *Bubulcus ibis* (que consume insectos en los potreros) y *Phimosus infuscatus* (que come invertebrados de los sedimentos).

Finalmente, el monitoreo de compuestos tóxicos en el ambiente es la base para estimular y desarrollar programas de control y gestión ambiental (Kolf-Clauw *et al.* 2007). Establecer los niveles de los contaminantes en el ambiente y en los seres vivos en una determinada zona permitirá conocer la dinámica de las concentraciones de éstos tóxicos, observando si dichas cantidades aumentan o disminuyen a través del tiempo (Kolf-Clauw *et al.* 2007).

Agradecimientos

Agradecemos a G. Stiles y a dos evaluadores anónimos por sus valiosos aportes en la construcción de este artículo.

Literatura citada

- ALONSO, D., P. PINEDA, J. OLIVERO, H. GONZÁLEZ & N. CAMPOS. 2000. Mercury levels in muscle of two fish species and sediments from the Cartagena Bay and the Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. *Environmental Pollution* 109:157-163.
- ANDRADE, M. E. & H. BENITEZ-CASTAÑEDA. 2005. Los humedales de la Sabana de Bogotá: Área importante para la conservación de las Aves de Colombia y el Mundo. Instituto De Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Bogotá, Colombia.
- ANÓNIMO. 1990. IARC Monographs on the evaluation of carcinogen risks to humans. Chromium, Nickel and Welding. Volumen 49. International Agency for Research on Cancer, IARC, Lyon, France.
- ANÓNIMO. 2006. IARC Monographs on the evaluation of carcinogen risks to humans. Inorganic and Organic Lead Compounds. Volumen 87. International Agency for Research on Cancer, IARC, Lyon, France.
- ANÓNIMO. 2012. IARC Monographs on the evaluation of carcinogen risks to humans. Arsenic, Metals, Fibres and Dusts. A review of human carcinogens. Volumen 100 C. International Agency for Research on Cancer, IARC, Lyon, France.
- BEASLEY, V. (Ed.). 1999. Toxicants with mixed effects on the central nervous system. *Veterinary Toxicology*. International Veterinary Information Service. www.ivis.org. Department of Veterinary Biosciences, College of Veterinary Medicine, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, USA.
- BECKER, P.H. 2003. Chapter 19: Biomonitoring with birds. Págs. 677-736 en: B. A. Markert, A. M. Breure & H. G. Zechmeister (eds). *Bioindicators and biomonitors*. Kidlington, Oxford, Inglaterra.
- BURGER, J. & M. GOCHFELD. 1997. Risk, Mercury levels, and birds: Relating adverse laboratory effects to field biomonitoring. *Environmental Research* 75:160-172.
- CASTILLO, M.P. 2008. El mercurio como metal pesado proveniente de la minería en Colombia, un pasivo ambiental y un problema de salud pública subregistrado. Facultad de Ingeniería. Universidad de los Andes. Bogotá.
- CHAPARRO, B. 2003. Reseña de la vegetación en los humedales de la Sabana de Bogotá. En: A. GUARNIZO & B. CALVA-CHI (eds). *Los humedales de Bogotá y La Sabana*. Tomo I. Acueducto de Bogotá y Conservación Internacional, Bogotá, Colombia.
- CORREA-ARANEDA, F., J. URRUTIA & R. FIGUEROA. 2011. Estado del conocimiento y principales amenazas de los humedales boscosos de agua dulce de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural* 84:325-340.
- DAUWE, T., L. BERVOETS, R. BLUST, R. PINXTEN & M. EENS. 2000. Can excrement and feathers of nestling songbirds be used as biomonitors for heavy metal pollution?. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 39:541-546.
- DEBÉN, S., J.A. FERNÁNDEZ, J.R. ABOAL & A. CARBALLEIRA. 2012. Evaluation of different contour feather types for biomonitoring lead exposure in Northern goshawk (*Accipiter gen-*

- tilis*) and tawny owl (*Strix aluco*). *Ecotoxicology and Environmental Safety* 85:115-119.
- EEVA, T., E. BELSKII & B. KURANOV. 2006. Environmental pollution affects genetic diversity in wild bird populations. *Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis* 60:8-15.
- EISLER, R. 1987. Mercury hazards to fish, wildlife, and invertebrates: a synoptic review. U.S. Fish and Wildlife Service Biological Report 85(1.10).
- ESPIN, S., E. MARTINEZ-LÓPEZ, P. GÓMEZ-RAMÍREZ, P. MARÍA-MOJICA & A.J. GARCÍA-FERNÁNDEZ. 2012. Razorbills (*Alca torda*) as bioindicators of mercury pollution in the southwestern Mediterranean. *Marine Pollution Bulletin* 64:2461-2470.
- FERRÉ-HUGUET, N., M. SCHUHMACHER, J. M. LLOBET & J. L. DOMINGO. 2007. Diseño de un software para evaluar los riesgos de la exposición ambiental a través del agua, suelos y aire. *Metales pesados y salud. Mapfre Seguridad* 108:50-58.
- FRÄNZLE, O. 2003. Chapter 2: Bioindicators and environmental stress assessment. Pags. 41-84 en: B. A. MARKERT., A. M. BREURE & H. G. ZECHMEISTER (eds). *Bioindicators and biomonitoring*. Kidlington, Oxford, Inglaterra.
- GOUTNER, V., I. PAPAGIANNIS & V. KALFAKAKOU. 2001. Lead and cadmium in eggs of colonially nesting waterbirds of different position in the food chain of Greek wetlands of international importance. *The Science of the Total Environment* 267:169-176.
- GRACIA, L., J. MARRUGO & E. ALVIS. 2010. Contaminación por mercurio en humanos y peces en el municipio de Ayapel, Córdoba, Colombia, 2009. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública* 28: 118-124.
- GREEN, A. J & J. FIGUEROLA. 2003. Aves acuáticas como bioindicadores en los humedales. Págs. 47-60 en: M. Paracuellos (coord.). *Ecología, manejo y conservación de los humedales*. Instituto de Estudios Almerienses, España.
- GUILLÉN, M. J., S. JEREZ, G. NAVARRO, C. BALLESTEROS & M. MORTAS. 2009. Evaluación de la exposición a metales pesados en autillos de la Comunidad de Madrid y sus posibles efectos inmunodepresores. *Congreso Nacional del Medio Ambiente. Conama10*. Universidad de Murcia.
- KALISINSKA, E., W. SALICKI, K.M. KAVETSKA & M. IGOCKI. 2007. Trace metal concentrations are higher in cartilage than in bones of scaup and pochard wintering in Poland. *Science of the Total Environment* 388:90-103.
- KOLF-CLAUW, M., A. GUÉNIN & M. PÉREZ. 2007. Micromamíferos y metales pesados: Biomonitorización del medio ambiente. *Observatorio Medioambiental* 10:19-37.
- LABONDE, J. 1995. Toxicity in Pet Avian Patients. *Seminars in Avian and Exotic Pet Medicine* 4: 23 – 31.
- LIGHTFOOT, T.L. & J. M. YEAGER. 2008. Pet bird toxicity and related environmental concerns. *Veterinary Clinics of North America: Exotic Animal Practice* 11:229-259.
- MADANI, S.A., A. VAJHI, A. ROSTAMI, M. M. DEHGHAN, S. SOORORI & F. A. KHAZAEI. 2007. Clinical and radiographic findings of heavy metal poisoning in psittacine birds. *Iranian Journal of Veterinary Surgery* 2:17-23.
- MANCERA-RODRÍGUEZ, M. J. & R. ÁLVAREZ-LEÓN. 2006. Estado del conocimiento de las concentraciones de mercurio y otros metales pesados en peces dulceacuícolas de Colombia. *Acta Biológica Colombiana* 11:3-23.
- MÁRQUEZ, G. 2003. Bienes y servicios ecológicos de los humedales. En: A. Guarnizo & B. Calvachi (eds). *Los humedales de Bogotá y La Sabana*. Tomo II. *Acueducto de Bogotá y Conservación Internacional*, Bogotá, Colombia.
- MARRUGO, J., E. LANS & L. BENÍTEZ. 2007. Hallazgo de mercurio en peces de la ciénaga de Ayapel, Córdoba, Colombia. *Revista MVZ Córdoba* 12:878-886.
- MARRUGO-NEGRETE, J., L. N. BENITEZ & J. OLIVERO-VERBEL. 2008. Distribution of mercury in several environmental compartments in an aquatic ecosystem impacted by gold mining in Northern Colombia. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 55:305-316.
- MEJÍA, G. 2006. Aproximación teórica a la bioabsorción de metales pesados por medio de microorganismos. *Revista CES Medicina Veterinaria y Zootecnia* 1:77-99.
- MOCKUS, A. 2003. Introducción. En: A. GUARNIZO & B. CALVACHI (eds). *Los humedales de Bogotá y la Sabana*. Tomo I. *Acueducto de Bogotá y Conservación Internacional*, Bogotá, Colombia.
- NADAL, M., M. SCHUHMACHER & J.L. DOMINGO. 2004. Metal pollution of soils and vegetation in an area with petrochemical industry. *Science of the Total Environment* 321:59-69.
- NARANJO, L. G., G. I. ANDRADE, E. PONCE DE LEÓN & J. ESCOBAR (ed.). 1999. *Humedales interiores de Colombia: Bases técnicas para su conservación y uso sostenible*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Ministerio del Medio Ambiente, Bogotá, Colombia.
- NAVARRO-AVIÑÓ, J. P., I. AGUILAR & J.R. LÓPEZ-MOYA. 2007. Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Ecosistemas* 16:10-25.
- OLIVERO-VERBEL, J., D. AGUDELO-FRIAS & K. CABALLERO-GALLARDO. 2013. Morphometric parameters and total mercury in eggs of Snowy Egret (*Egretta thula*) from Cartagena Bay and Totumo Marsh, north of Colombia. *Marine Pollution Bulletin* 69:105-109.
- PAIN, D. J., A. A. MEHARG, M. FERRER, M. TAGGART & V. PENTERIANI. 2005. Lead concentrations in bones and feathers of the globally threatened Spanish imperial eagle. *Biological Conservation* 121:603-610.
- PÉREZ, M., F. CID, D. HERNÁNDEZ, A. L. OROPESA, A. LÓPEZ, L. E.

- FIDALGO & F. SOLER. 2005. Contenido de metales pesados en hígado y plumas de aves marinas afectadas por el accidente del "Prestige" en la costa de Galicia. *Revista de Toxicología* 22:191-199.
- PINILLA, G. 2010. An index of limnological conditions for urban wetlands of Bogotá city, Colombia. *Ecological Indicators* 10: 848 – 856.
- POPPENGA, R. H. (1999). Intoxicaciones corrientes en aves acuáticas, somorgujos y aves de presa. Págs. 123-136 en: M. UHART & M. E. ZACCAGNINI (eds). *Manual de Procedimientos Operativos Estandarizados de Campo para Documentar Incidentes de Mortandad de Fauna Silvestre en Agroecosistemas*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Buenos Aires, Argentina.
- POULIN, J & H. GIBB. 2008. Evaluación de la carga de morbilidad ambiental a nivel nacional y local. Organización Mundial de la Salud. Ginebra.
- RAMÍREZ, A. 2000. Utilidad de las aves como indicadores de la riqueza específica regional de otros taxones. *Ardeola* 47:221-226.
- REDIG, P. T. & L. R. ARENT. 2008. Raptor Toxicology. *Veterinary Clinics of North America: Exotic Animal Practice* 11:261-282.
- ROSSELLI, L. & F. G. STILES. 2012. Wetland habitats of the Sabana de Bogotá highland Andean plateau and their birds. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 22:303-317.
- SMITH, P. & H. ROMERO. 2009. Efectos del crecimiento urbano del Área Metropolitana de Concepción sobre los humedales de Rocuant-Andalién, Los Batros y Lengua. *Revista de Geografía Norte Grande* 43:81-93.
- SZYMCZYK, K & K. ZALEWSKI. 2003. Copper, Zinc, Lead and Cadmium Content in Liver and Muscles of Mallards (*Anas platyrhynchos*) and other Hunting Fowl Species in Warmia and Mazury in 1999 – 2000. *Polish Journal of Environmental Studies* 12:381-386.
- TSIPOURA, N., J. BURGER, M. NEWHOUSE, C. JEITNER, M. GOCHFELD & D. MIZRAHI. 2011. Lead, mercury, cadmium, chromium, and arsenic levels in eggs, feathers, and tissues of Canada geese of the New Jersey Meadowlands. *Environmental Research* 111:775-784.
- ZHANG, W.W. & J. Z. MA. 2011. Waterbirds as bioindicators of wetland heavy metal pollution. *Procedia Environmental Sciences* 10:2769-2774.
- ZUBERO, M. B., J. J. AURREKOETXEA, J. M. IBARLUZEA, M. J. ARENAZA, M. BASTERRETXEA, C. RODRÍGUEZ & J. R. SAÉNZ. 2008. Metales Pesados (Pb, Cd, Cr y Hg) en población general adulta próxima a una planta de tratamiento de residuos urbanos de Bizkaia. *Revista Española de Salud Pública* 82:481 – 492.

Recibido: 09 de diciembre de 2012. *Aceptado:* 19 de julio de 2014.