

# EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL POR METALES Y METALOIDES

## METALS AND METALLOIDS ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESMENT

Nancy Esmeralda Sánchez Duarte<sup>1</sup> y Martín Enrique Jara Marini<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Posgrado en Ciencias del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Carretera a La Victoria km 0.6, Ejido La Victoria, Hermosillo, Sonora, México CP 83 304, México.

<sup>2</sup> Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. km 0.6 Carretera a La Victoria, Ejido La Victoria, Hermosillo, Sonora, México CP 83 304, México.

### RESUMEN

Los metales y metaloides son contaminantes persistentes que se distribuyen tanto en reservorios abióticos como bióticos. Su origen en los ecosistemas puede ser natural y/o antropogénico, pero se ha documentado que las actividades humanas son las que han provocado enriquecimientos de estos elementos en los diferentes reservorios. Dependiendo de ciertas condiciones fisicoquímicas y factores biológicos, los metales y metaloides pueden manifestar diferentes grados de toxicidad en los organismos. Entonces, la acumulación y transferencia de metales en los diferentes reservorios pueden tener impactos adversos en los ecosistemas bajo determinadas condiciones, por lo que se requiere conocer el alcance de los mismos. Una herramienta apropiada para conocer el grado de impacto que causan los metales y metaloides al medio ambiente es la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), la cual a través de una serie de pasos, se identifican y se ponderan los impactos presentes en el medio ambiente.

**Palabras clave:** Actividades antropogénicas, metales y metaloides, evaluación de impacto ambiental

### ABSTRACT

Metals and metalloids are persistent pollutants that are distributed in abiotic and biotic reservoirs. In the ecosystems, these elements can proceed from natural and/or anthropogenic activities. Nevertheless, it has been documented that human activities generate the enrichment of these elements in the different reservoirs. Metals and metalloid may exhibit different degrees of toxicity in organisms depending on certain physicochemical conditions and biological factors. The accumulation and transfer of metals in different reservoirs can have adverse impact on ecosystems under certain conditions, and thus it is necessary to know the metals and metalloids impact extent. An appropriate tool to determine the degree of impact caused by metals and metalloids to the environment is the Environmental Impact Assessment (EIA), which through a series of steps, identify and weigh up environmental impacts.

**Key words:** Anthropogenic activities, metals and metalloids, environmental impact assessment

### INTRODUCCIÓN

El término metales y metaloides se refiere a un grupo de elementos presentes en la tabla periódica, que poseen una densidad mayor a 4 g/cm<sup>3</sup>. A diferencia de sustancias contaminantes como plaguicidas, hidrocarburos y plásticos, los metales y metaloides están presentes de manera natural en la corteza terrestre y algunos de ellos forman parte de los seres vivos, por lo que existen intervalos de concentraciones naturales o básicas de estos elementos en los suelos, sedimentos, aguas, atmósfera y en los organismos (Burgess *et al.*, 2013; Connell *et al.*, 2016).

Los metales y metaloides se dividen en esenciales y no esenciales, los esenciales cumplen una función biológica definida y entre ellos se encuentran el cromo, cobalto, cobre, selenio, hierro, manganeso, molibdeno, níquel, vanadio y zinc; los no esenciales son aquellos sin una función biológica definida y entre ellos están el oro, plata, mercurio, arsénico y plomo (Tchounwou *et al.*, 2012; Løkke *et al.*, 2013). Ambos grupos son potencialmente tóxicos cuando sobrepasan ciertas concentraciones en los organismos, por lo que es muy importante conocer la dinámica de estos elementos en los reservorios de los ecosistemas (Løkke *et al.*, 2013).

La Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) es una herramienta ampliamente utilizada que incluye determinar la variación en la calidad del ambiente, la intensidad y extensión del evento, el momento en el que se manifiesta, la persistencia de los contaminantes involucrados, la capacidad de recuperación de los ecosistemas, la relación causa-efecto y la aplicación de medidas correctoras (Conesa Fernández-Vitara, 1995; Oyarzún, 2008). Esta herramienta puede ser utilizada para la determinación del impacto por la acumulación y transferencias de metales y metaloides en los ecosistemas por un evento específico, ya que integra los resultados obtenidos del evento mismo con la situación del ambiente en el momento que se hace el estudio y también la ponderación del impacto (US-EPA, 2011).

### Dinámica de los metales y metaloides en los ecosistemas

A diferencia de otros contaminantes, los metales ocurren de manera natural en la corteza terrestre, formando parte tanto de reservorios abióticos como de la biota, en una

gran variedad de los minerales (Horowitz, 2008; Løkke *et al.*, 2013). Es por esto que existen intervalos de concentraciones naturales o básicas de estos elementos en los suelos, sedimentos, aguas, atmósfera y en los organismos vivos (Hodson, 2010). Sin embargo, las diferentes actividades humanas son las principales causantes de la elevación de los niveles de metales y metaloides. En los diferentes ecosistemas, estos elementos son contaminantes persistentes, ya que se bioacumulan y se transfieren eficientemente entre los diferentes reservorios y a través de las cadenas tróficas, pudiendo llegar a tener efectos adversos en la salud de los organismos (Horowitz, 2008; Connell *et al.*, 2016). A diferencia de otros contaminantes, los metales ocurren de manera natural en la corteza terrestre, formando parte tanto de reservorios abióticos como de la biota, en una gran variedad de los minerales (Connell *et al.*, 2016). Los ecosistemas terrestres se dividen en cinco compartimentos ambientales donde pueden estar presentes los metales: el aire, el agua, los suelos, los sedimentos y la biota (Csavina *et al.*, 2012; Connell *et al.*, 2016).

Los metales y metaloides presentes en suelos y en los sedimentos son considerados el depósito final de los metales y metaloides, ya que poseen componentes con muy alta afinidad a estos elementos (Horowitz, 2008; Burgess *et al.*, 2013; Peijnenburg *et al.*, 2014). La movilización de los metales puede ocurrir a partir de estos reservorios, dependiendo de las condiciones fisicoquímicas, principalmente en el medio acuático (Horowitz, 2008; Peijnenburg *et al.*, 2014; Stackelberg *et al.*, 2015). Además, en los sedimentos también ocurre la transformación de algunos de los metales como mercurio y estaño (metilación y etilación), bajo condiciones reductoras y anaeróbicas (Cappuyns *et al.*, 2002; Prego y Cobelo-García, 2003), especies químicas orgánicas que en la mayoría de los casos son más tóxicas que las formas inorgánicas (Horowitz, 2008; Stackelberg *et al.*, 2015).

Los metales y metaloides forman especies estables en los suelos y sedimentos al asociarse con la mayor parte de sus componentes, por lo que su acumulación puede llegar a ser significativa (Thums *et al.*, 2008; Burgess *et al.*, 2013). Sin embargo, la fracción ligada a las fracciones más químicamente inestables son las consideradas más disponibles a los diferentes receptores ambientales. La estimación del metal disponible, es decir, determinar los niveles a los que está ligado en cada fracción, es una parte importante en la evaluación de la exposición a estos contaminantes, así como el impacto ambiental asociado (Peña *et al.*, 2001; Stackelberg *et al.*, 2015).

Los metales y metaloides en estas fracciones pueden ser movilizados por cambios en las condiciones ambientales, como por ejemplo el pH, el potencial redox, el tamaño de partícula, la salinidad, la concentración de materia orgánica y la temperatura (Horowitz, 2008; Peijnenburg *et al.*, 2014; Stackelberg *et al.*, 2015).

Los sedimentos y los suelos como reservorios y como fuente de metales y metaloides biodisponibles juegan un rol importante en los ciclos biogeoquímicos de éstos, por lo que su estudio podría ayudar a entender su potencial tóxico. Aun-

que la concentración total de metales da un indicio del grado de contaminación, se requiere de mayor información ya que su movilidad y toxicidad depende, entre otros factores, de la forma fisicoquímica en la que están presentes (Horowitz, 2008; Peijnenburg *et al.*, 2014). Un aspecto importante a evaluar es la bio-accesibilidad de los metales y metaloides en los suelos (una medida de la fracción biodisponible, definida como la cantidad de metal movilizada desde el suelo al tracto digestivo humano que puede ser absorbida y entrar en la circulación sanguínea), que permitirá evaluar el riesgo potencial que tiene de afectar a los organismos (Oomen *et al.*, 2002; Heuscher *et al.*, 2004).

Las características texturales de los suelos y sedimentos son importantes para conocer la distribución de metales y metaloides. La mayor parte de estos elementos (>95 % de la concentración total) se asocian al material más fino de los suelos y sedimentos (< 62.5 µm), ya que tienen una mayor superficie de reacción, por lo que existe una correlación positiva entre las concentraciones de éstos y ese tamaño de partícula (Horowitz, 2008; Peijnenburg *et al.*, 2014). El empleo de elementos conservativos como normalizadores se fundamenta en que éstos tienen un flujo uniforme desde la corteza fuente hacia los suelos y sedimentos y que raramente son introducidos antropogénicamente, por lo que cambios en la proporción de sus concentraciones con respecto a los otros metales pueden indicar un enriquecimiento de los mismos (Burgess *et al.*, 2013; Peijnenburg *et al.*, 2014). Entre los más ampliamente utilizados están el aluminio, el fierro y el litio (Loring, 1991), aunque dependerá de las características mineralógicas de la zona de estudio (Sinex y Wright, 1988). Además, existen algunos índices para determinar los niveles en exceso de metales, como el factor de enriquecimiento y el índice geoacumulación, donde los niveles basales se toman de los valores determinados en la corteza terrestre (Martín y Meybeck, 1979).

Aunado a lo anterior, el conocimiento de la dinámica de metales y metaloides en la columna sedimentaria permite determinar cómo ha sido el ingreso de los mismos en los ecosistemas, antes y después del desarrollo de alguna actividad humana en particular en sus alrededores. Al determinar las velocidades de acumulación de estos elementos, se puede saber si la acumulación de éstos en los sedimentos proviene de actividades antropogénicas específicas (García-Orellana y Sanchez-Cabeza, 2012). La cronología de los registros sedimentarios, junto con las tasas de sedimentación y erosión, utilizando radionúclidos naturales de vida corta, como el <sup>210</sup>Pb, permiten realizar cronologías de aproximadamente un siglo (García-Orellana y Sánchez-Cabeza, 2012; Rigaud *et al.*, 2013). Se requiere hacer los análisis de las concentraciones de metales y metaloides en los perfiles sedimentarios fechados, que revelan la información detallada acerca de cómo han sido las tendencias y fluctuaciones temporales de la acumulación de metales y metaloides (Horowitz, 2008; Rigaud *et al.*, 2013).

En general, los primeros organismos expuestos a los metales y metaloides en las tramas tróficas son los produc-

tores primarios, por lo que representan la primera fase en la transferencia trófica de estos elementos. En las tramas tróficas terrestres, las plantas son organismos continuamente expuestos a los metales ya que la geoquímica de éstos en los suelos los hace fácilmente absorbidos por sus raíces. Debido a su longevidad, muchas de las plantas llegan a acumular altos niveles de metales aunque de manera diferencial en sus tejidos (Connell *et al.*, 2016).

Generalmente, los herbívoros consumen las hojas, semillas y frutos de las plantas, que en los procesos de las relaciones tróficas transfiere los metales y metaloides a los niveles tróficos superiores, llegando a tener acumulación significativa en los depredadores tope (Connell *et al.*, 2016). La acumulación de estos elementos puede llegar a representar riesgos para la salud de los organismos de los ecosistemas (Gall *et al.*, 2015). Entonces, los organismos pueden ser usados para determinar el grado de acumulación y transferencia de metales y metaloides a la biota desde otros reservorios. No existe un organismo ideal para los estudios de biomonitorio de estos elementos, por lo que se deben buscar los más apropiados de acuerdo a ciertos criterios, por lo que la selección del organismo se hace generalmente en función de la naturaleza del estudio y las características del ecosistema involucrado (Tchounwou *et al.*, 2012). Las plantas son buenas bioindicadoras de la exposición a metales, ya que son muy sensibles a los cambios de concentración que se generan en el ambiente y presentan respuestas características en su estructura de acuerdo a los niveles de la contaminación (Prieto-Méndez *et al.*, 2009).

Los peces son ampliamente utilizados con este propósito debido a sus características biológicas, ya que son consumidores primarios cuando son juveniles y consumidores secundarios y terciarios en etapas adultas, además de su longevidad (Løkke *et al.*, 2013).

En ecosistemas terrestres existe una gran variedad de especies de organismos que pueden ser usados como bio-monitores por exposición de metales y metaloides. Las plantas, los insectos, los invertebrados, los pequeños mamíferos y las aves son ampliamente utilizados con este propósito. Sin embargo, dado que algunos no cumplen con todos los criterios (principalmente la longevidad y la amplia distribución), se utilizan un conjunto de especies con diferentes características biológicas para que evaluar de manera más completa la exposición y acumulación de estos contaminantes (Mateos *et al.* 2008; Gall *et al.*, 2015).

### Toxicidad de metales y metaloides

Los efectos tóxicos de los metales y metaloides dependen de varios factores, tanto de las propiedades y características del elemento, como de los factores propios de los organismos. Estos elementos producen efectos diferentes efectos (observables o no) bajo ciertas condiciones en los organismos (Connell *et al.*, 2016). Los mecanismos en los que estos elementos actúan en los compartimientos de los organismos son varios, y se reconoce que muchos actúan sobre los sistemas enzimáticos de los compartimientos celulares

de los tejidos, ocasionando efectos que pueden llegar a ser letales, aún a niveles bajos (Tchounwou *et al.*, 2012; Connell *et al.*, 2016). Los metales y metaloides, con o sin función biológica, pueden llegar a producir diferentes respuestas en los organismos (las no observables, las observables y/o las letales), en función de la dosis o concentración. Un elemento esencial puede producir efectos observables y/o letales a bajas y también a altas dosis o concentraciones, dependiendo de los requerimientos propios del organismo. En cambio, un elemento no esencial tiene un intervalo tolerante de dosis o concentración por los organismos (efecto no observable), pero llegan a producir efectos observables cuando sobrepasan ciertos límites en los niveles (Connell *et al.*, 2016).

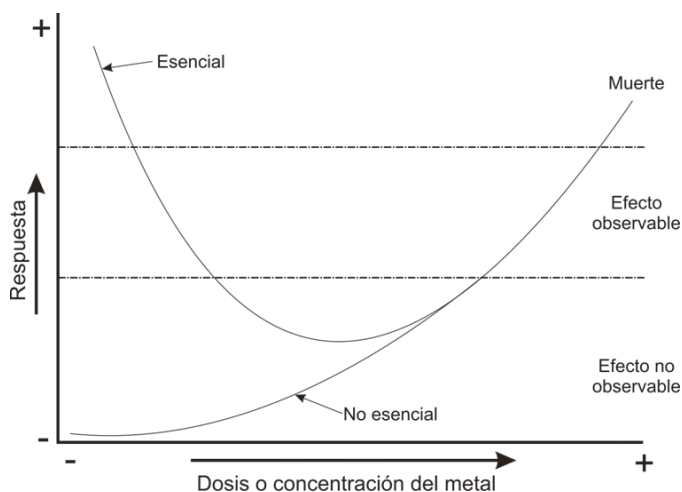
Un efecto tóxico de una sustancia o elemento es aquél que produce cualquier alteración de las funciones del organismo por la exposición a la misma, y puede ser a diferentes escalas, desde el nivel molecular hasta la comunidad (Stackelberg *et al.*, 2015). La manifestación de la toxicidad en los organismos depende de factores como la especificidad y forma del metal, el nivel y el período de exposición, y de la dinámica y cinética que sigue el elemento en el organismo (Gall *et al.*, 2015; Meyer *et al.*, 2015). Además, de los factores fisicoquímicos como el pH, la temperatura y la salinidad (Tchounwou *et al.*, 2012; Burgess *et al.*, 2013); y biológicos como la susceptibilidad de cada organismo y/o tejido, los hábitos alimenticios, el sexo, la talla y la edad (Tchounwou *et al.*, 2012; Meyer *et al.*, 2015).

Los metales y metaloides acumulados en los organismos pueden ser clasificados en dos categorías: el metal metabólicamente disponible y el metal que no está disponible para funciones metabólicas esenciales y/o de efecto adverso. Los efectos tóxicos se manifiestan entonces, cuando se rebasan la capacidad del organismo para atrapar en forma inerte a estos elementos y/o eliminarlos eficientemente. Estos efectos pueden ser subletales y eventualmente letales, lo que puede ocurrir en cualquier etapa del patrón de acumulación (Di Toro *et al.*, 2001).

Los organismos tienen tres posibles vías de incorporación de metales y metaloides: por la respiración, por la difusión dérmica y por el alimento. Así mismo, tienen seis posibles vías de eliminación de estos elementos: por la respiración, por la difusión dérmica, la excreción en heces y orina, la conversión metabólica, las pérdidas por reproducción y la respiración, y la dilución por crecimiento. Esta conceptualización simple asume que la cantidad retenida por un organismo es función de un balance entre la ingesta, la eliminación y el crecimiento del mismo (Thakali *et al.*, 2006; Connell *et al.*, 2016). Estas vías de incorporación y eliminación implican diferentes mecanismos fisiológicos para que los metales y metaloides sean incorporados a los organismos y después distribuidos a los diferentes tejidos. Estos mecanismos permiten la absorción y transporte de una gran variedad de moléculas e iones, incluidos los metales, desde el exterior al interior de las células (Løkke *et al.*, 2013; Connell *et al.*, 2016).

Algunos organismos han desarrollado mecanismos fisiológicos específicos de tolerancia a ciertos niveles de estos

elementos sin experimentar efectos letales, dependiendo de la concentración y del tiempo de exposición, y de si son o no esenciales para el metabolismo (Figura 1). Esta tolerancia es conferida por mecanismos fisiológicos específicos que permiten su regulación y por ende el funcionamiento normal del organismo aunque las concentraciones de los compuestos potencialmente tóxicos sean altas (Thakali *et al.*, 2006; Connell *et al.*, 2016). Así, la toxicidad de un metal (esencial o no) en un organismo se manifiesta cuando se rebasan ciertos niveles, que los mecanismos fisiológicos no pueden regular, y los efectos dependerán de factores tanto fisicoquímicos como fisiológicos (Di Toro *et al.*, 2001; Connell *et al.*, 2016).



**Figura 1.** Respuestas biológicas a diferentes dosis de metales y metaloides (Adaptado de Connell *et al.*, 1999).

**Figure 1.** Biologic responses to different doses of metals and metalloids (from Connell *et al.*, 1999).

Existen varias clasificaciones de los efectos de los contaminantes. Su clasificación en función del tiempo de exposición a un elemento tóxico es: a) crónicos, que son aquellos que duran entre el 10% y el 100% del tiempo de vida del organismo; b) sub-crónicos, que son aquellos que son de corta duración (<10% del tiempo de vida del organismo); y c) agudos, que son aquellos cuyo tiempo de exposición es corto (un día o menos), o bien, que ocurren en un solo evento pero a muy altas concentraciones (Peña *et al.*, 2001; Connell *et al.*, 2016). El efecto tóxico de un contaminante puede ser desde una escala molecular hasta una escala de la comunidad (Løkke *et al.*, 2013; Connell *et al.*, 2016); en diversos trabajos se han reportado efectos adversos en los organismos, que van desde problemas de crecimiento hasta mortandad de las especies (Tabla 1).

### Impacto ambiental

La Evaluación del Impacto Ambiental (EIA) se define como la identificación y evaluación de los posibles impactos (efectos adversos) de una actividad humana determinada o un evento específico, en relación a la movilización de los contaminantes en los componentes ambientales (US-EPA,

**Tabla 1.** Algunos efectos en los organismos por la exposición a metales y metaloides<sup>1</sup>.

**Table 1.** Some effects in organisms by exposure to metals and metalloids<sup>1</sup>.

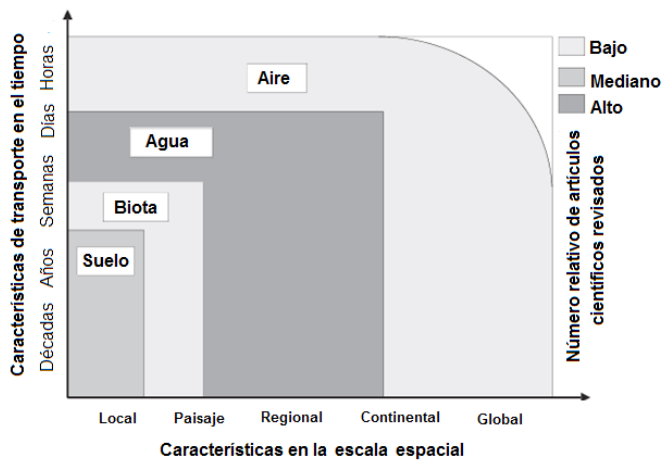
Elemento	Efectos adversos en los organismos
Pb <sup>2+</sup> , Pb <sup>4+</sup>	Inhibición del sistema reproductivo. Inhibición de la fotosíntesis. Neurotoxicidad.
Cd <sup>2+</sup>	Inhibición de la actividad enzimática. Reducción de la reproducción y el desarrollo. Disfunción nerviosa y/o respiratoria.
As <sup>3+</sup> , As <sup>5+</sup>	Reducción en las tasas de reproducción y de desarrollo. Neurotoxicidad. Mortandad masiva en larvas a 5 mg/L.
Al <sup>3+</sup>	Decoloración de la piel. Inhibición del crecimiento y desarrollo de plantas. Neurotoxicidad.
Cu <sup>+</sup> , Cu <sup>2+</sup>	Disminución de la actividad enzimática. Reducción en las tasas de reproducción. Inhibición del sistema nervioso central
Cr <sup>3+</sup> , Cr <sup>6+</sup>	Decoloración de tejidos. Reducción de las tasas de reproducción. Inhibición respiratoria.
Zn <sup>2+</sup>	Inhibición del crecimiento y desarrollo de plantas. Inhibición del sistema reproductivo. Alteración de la osmoregulación.
Mg <sup>2+</sup>	Inhibición de los sistemas enzimáticos. Disminución de la movilidad. Alteración de la osmoregulación.

(Paéz-Osuna, 2005; Jezierska *et al.*, 2009; Hodson, 2010; Zhang *et al.*, 2010; Majid y Ghotbi, 2012; Santos-Jallath *et al.*, 2012).

2011). Es necesario plantear un programa de monitoreo ambiental que permita identificar el comportamiento de los contaminantes (por ejemplo metales y metaloides) en los ecosistemas, así como las alternativas de solución en caso de que los valores acumulados de éstos excedan los límites internacionales establecidos (Oyarzún, 2008; US-EPA, 2011).

Para llevar a cabo la EIA, se debe de iniciar con el análisis de la información para conocer los antecedentes de la situación del ecosistema de estudio y con la delimitación del área geográfica de acuerdo al sitio afectado (SEMARNAT, 2006; Arboleda, 2008; Oyarzún, 2008). También se requiere recabar información sobre las características hidrológicas, geológicas, físicas y químicas de las zonas afectadas para estimar la posible movilidad de los metales entre los diferentes compartimientos, con lo que se podrá determinar un posible impacto en la población (Peña *et al.*, 2001; Shao *et al.*, 2014).

Después, se debe identificar cuáles son los compartimientos ambientales que pudieron verse afectados lo que conllevará a identificar las variables que se pueden estudiar para determinar el impacto (Arboleda, 2008; Oyarzún, 2008; Shao *et al.*, 2014). En la Figura 2 se presentan los reservorios que pueden verse afectados por la contaminación en los ecosistemas y las velocidades de diseminación que pueden tener. El estudio de estos reservorios permite identificar los



**Figura 2.** Reservorios terrestres de los contaminantes con sus respectivas escalas y velocidades de transporte (adecuada de Csavina *et al.*, 2012).  
**Figure 2.** Terrestrial reservoirs of contaminants with their scales and transport rates (from Csavina *et al.*, 2012).

cambios que se presenten en el medio y brindarán información de la dinámica de los metales (Arboleda, 2008; Shao *et al.*, 2014). Sin embargo, también se debe considerar un área o sitio de referencia, es decir un área o sitio con características similares y que no está expuesto a los impactos que están siendo evaluados, con el que se comparen las variables analizadas (US-EPA, 2011).

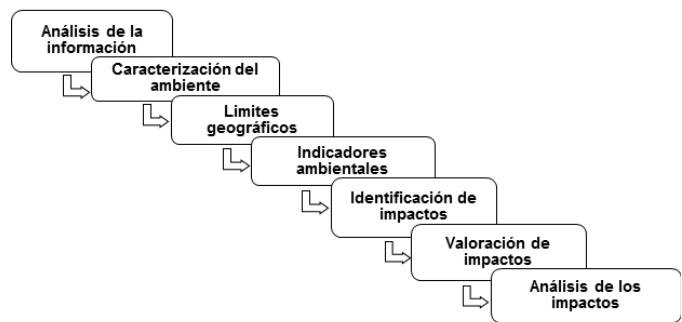
Los sedimentos superficiales de la zona afectada proporcionarán información sobre la acumulación de los metales y su grado de bio-disponibilidad (Thums *et al.*, 2008; Peijnenburg *et al.*, 2014). El estudio de la columna sedimentaria de la zona afectada brindará información sobre la acumulación histórica de metales en las mismas y establecer si la acumulación proviene o no de una actividad humana específica o varias (García-Orellana y Sánchez-Cabeza, 2012; Rigaud *et al.*, 2013). Al considerar especies de organismos bio-monitores con diferentes hábitos y de diferentes niveles tróficos, se conocerá la dinámica de acumulación y de los potenciales de transferencia en las tramas tróficas (SEMARNAT, 2006; Gallardo-Martínez *et al.*, 2013).

Para la identificación de los impactos se debe considerar los impactos directos, indirectos y acumulativos (US-EPA, 2011). De acuerdo a Canter (1999), se pueden utilizar diversas herramientas, dependiendo de la magnitud del proyecto, los recursos con los que se cuente y del proceso a evaluar. Un método económico y relativamente sencillo es el propuesto por Leopold *et al.* (1971), el cual consiste en relacionar las variables ambientales en el eje vertical, las cuales se encuentran agrupadas por las características físicas, químicas y ecológicas; y en el eje horizontal, las actividades que se llevan a cabo.

El método Battelle-Columbus para la valoración de impacto por metales y metaloides también utiliza matrices las cuales mediante la interacción de filas y columnas, representan de forma numérica si hay incidencia de la causa sobre el factor, para después obtener una valoración ponderada de acuerdo a escalas arbitrarias. Además, tiene una facilidad

para relacionar los parámetros con casos como derrame de jales mineros; sin embargo, este método requiere de hacer unas adecuaciones en los parámetros, ya que se debe de considerar al tipo de acontecimiento y el medio receptor (Coria, 2008).

Para el análisis, se deben de tener en cuenta los valores asignados a los índices de ponderación, que permitan un estimado de la situación ambiental del sitio (Coria, 2008). Con la valoración de los posibles impactos al ecosistema y a la población, se podrán priorizar las acciones emergentes en los sitios más afectados y proyectar un plan de restauración y/o remediación a corto, mediano y/o largo plazo de las zonas afectadas (Oyarzún, 2008; SEMARNAT, 2006; US-EPA, 2011). Siendo entonces los objetivos del estudio de impacto ambiental detectar, identificar y evaluar los impactos de un determinado proceso y proponer medidas para mitigar los impactos (Coria 2008). En la Figura 3 se presenta un esquema resumido del proceso de la EIA.



**Figura 3.** Resumen del proceso de la Evaluación del Impacto Ambiental (SEMARNAT, 2006, Arboleda, 2008; Oyarzún, 2008).  
**Figure 3.** Summary of the Environmental Impact Assessment process (SEMARNAT, 2006, Arboleda, 2008; Oyarzún, 2008).

## CONCLUSIONES

Los metales y metaloides son contaminantes persistentes que se distribuyen en reservorios abióticos y la biota. Se han documentado diferentes efectos adversos al medio ambiente a causa de la contaminación con estos elementos; uno de los principales es la disminución de la biodiversidad por la limitación en el desarrollo de organismos, en su reproducción y por lo tanto en el tamaño de las comunidades. También se han documentado afectaciones del paisaje, por la contaminación del agua, del aire, los suelos y los sedimentos. A través de la Evaluación del Impacto Ambiental se puede identificar y evaluar los posibles impactos (efectos adversos) de una actividad humana determinada o un evento específico, en relación a la movilización de los metales y metaloides en los componentes ambientales. Es necesario considerar un programa de monitoreo ambiental que permita identificar el comportamiento de metales y metaloides en los ecosistemas, así como las alternativas de solución en caso de que los valores acumulados de éstos excedan los límites internacionales establecidos. Se debe de identificar y ponderar la magnitud del impacto de éstos en relación a

la actividad humana determinada o evento específico, para así tomar las medidas necesarias de mitigación de efectos, reducción de efectos/riesgos o la prevención de impactos adversos futuros.

## REFERENCIAS

- Arboleda, J. (2008). Manual de evaluación de impacto ambiental de proyectos, obras o actividades. [En línea]. Disponible en: <https://drive.google.com/file/d/0B6UCI2SwptvPMGE1OWZmNzgtZjVmMC00ZDU1LTlhMmUtNDU0MmFmODdkNDRI/view> [Fecha de acceso: 2 de octubre 2015].
- Burgess, R.M., Berry, W.J., Mount, D.R. y Di Toro, D.M. (2013). Mechanistic sediment quality guidelines based on contaminant bioavailability: equilibrium partitioning sediment benchmarks. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 32(1):102-114.
- Canter, L. (1999). Environmental Impact Assessment. [En línea]. Disponible en: <ftp://ftp.energia.bme.hu/pub/hullgazd/Environmental%20Engineers'%20Handbook/Ch02.pdf> [Fecha de acceso: 9 de octubre 2015].
- Cappuyns, V., Swennen, R., y De Nil, K. (2002). Heavy metals and arsenic in alluvial sediments of the Grote Beek river: contribution of natural and antropogenic sources. *Aardkundige Mededelingen*. 12:227-230.
- Csavina, J., Field, J., Taylor, M. P., Gao, S., Landázuri, A., Betterton, E.A. y Sáez, A. (2012). A review on the importance of metals and metalloids in atmospheric dust and aerosol from mining operations. *Science of the Total Environment*. 433:58-73.
- Conesa Fernández-Vítora V. 1995. Guía metodológica para la Evaluación del Impacto Ambiental. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid. P. 177.
- Connell, D.W., Yub Q.J. y Verma V. (2016). Influence of exposure time on toxicity. An overview. *Toxicology*. 355-356:49-53.
- Coria I. (2008). El estudio de impacto ambiental: Características y metodologías. *Invenio*. 11(20):125-135.
- Di Toro, DM., Allen, HE., Bergman, HL., Meyer, J., Paquin, PR. y Santore, RC. (2001). Biotic ligand model of the acute toxicity of metals. 1. Technical basis. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 20(10):2383-2396.
- Gall, J.E., Boyd, R.S. y Rajakaruna N. (2015). Transfer of heavy metals through terrestrial food webs: a review. *Environmental Monitoring Assessment*. 187:201. DOI 10.1007/s10661-015-4436-3.
- Gallardo-Martínez, D., Cabrera-Díaz, L., Bruguera-Amaran, N. y Madrazo-Escalona, F. (2013). Evaluación de impactos ambientales provocados por la actividad minera en la localidad de Santa Lucía, Pinar del Río. *Revista Científica Avances*. 15(1):94:108.
- García-Orellana, J. y Sánchez-Cabeza, J.A. (2012). El <sup>210</sup>Pb como trazador de procesos ambientales. En Radiocronología de sedimentos costeros utilizando <sup>210</sup>Pb: Modelos, Validación y Aplicaciones. Sánchez-Cabeza, J., Díaz-Asencio, M., y Ruiz-Fernández, A. (Eds.). *Organismo Internacional de Energía Atómica*. Viena, Suiza. p. 118.
- Heuscher, S; Brandt, C.C. y Jardine, P.M. (2004). SBAT: A Tool for Estimating Metal Bioaccessibility in Soils. Technical Report. Environmental Sciences Division. Oak Ridge National Laboratory. U.S. Department of Energy. p. 74.
- Hodson, M.E. (2010). Effects of Heavy Metals and Metalloids on Soil Organisms. En Heavy Metals in Soils Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability. B.J. Alloway (Ed.). pp. 141-160. Springer, New York, USA.
- Horowitz, A.J. (2008). Contaminated Sediments: Inorganic Constituents. En Encyclopedia of Hydrological Sciences, Anderson M.G.(Ed.). Wiley Interscience, published on-line at <http://mrw.interscience.wiley.com/emrw/9780470848944/ehs/article/hsa317/current/html>, DOI: 10.1002/0470848944.hsa317. 27 pp.
- Jeziarska, B., Lugowska, K. y Witeska, M. (2009). The effects of heavy metals on embryonic development of fish (a review). *Fish Physiology and Biochemistry*. 35:625-640.
- Leopold, L.B., Clarke, F.E., Hanshaw, B.B. y Balsley J.R. (1971). A Procedure for evaluating environmental impact. U.S. Geological Survey, Circular 645. Washington, D.C.
- Løkkea, H., Ragas, A.M.J. y Holmstrup M. (2013). Tools and perspectives for assessing chemical mixtures and multiple stressors. *Toxicology*. 313:73-82.
- Loring D.H. (1991). Normalization of heavy-metal data from estuarine and coastal sediments. *ICES Journal of Marine Science*. 48:101-115.
- Majid, S. y Ghotbi, A. (2012). Accumulation of copper and other heavy metals by plants growing on Sarcheshmeh copper mining area, Iran. *Journal of Geochemical Exploration*. 123:25-32.
- Martin J.M. y Meybeck M. (1979). Elemental mass-balance of material carried by major world rivers. *Marine Chemistry*. 7:173-206.
- Mateos, S., Daza, P., Domínguez, I., Cárdenas, J. y Cortés F. (2008). Genotoxicity detected in wild mice living in a highly polluted wetland area in south western Spain. *Environmental Pollution*. 153:590-593.
- Meyer, J.S., Farley, K.J. y Garman E.Y.R. (2015). Metal mixtures modeling evaluation project: 1. Background. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 34(4):726.740.
- Oomen, A.G., Hack, A., Minekus, M., Zeijdner, E., Cornelis, C., Schoeters, G., Verstraete, W., Van De Wiele, T., Wragg, J., Rompelberg, C., Sips, A. y Van Wijnen, J. (2002). Comparison of five in vitro digestion models to study the bioaccessibility of soil contaminants. *Environmental Science and Technology*. 36:3326-3334.
- Oyarzún, M. (2008). Evaluación de Impactos Ambientales. [En línea]. Disponible en: [http://www.aulados.net/Temas\\_ambientales/EIA/EIA\\_Jorge\\_Oyarzun.pdf](http://www.aulados.net/Temas_ambientales/EIA/EIA_Jorge_Oyarzun.pdf) [Fecha de acceso: 2 de octubre 2015].
- Paéz-Osuna, F. (2005). Efectos de los metales en organismos acuáticos. En Golfo de México, Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias. A.V. Botello, J. Rendón-von Osten, G. Gold-Bouchot, C. Agráz-Hernández (Eds.). Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto Nacional de Ecología. México. p. 696.
- Peijnenburg, W.J.G.M., Teasdale, P.R., Reible, D., Mondon, J., Bennett, W.W. y Campbell P.G.C. (2014). Passive sampling methods for contaminated sediments: state of the science for metals. *Integrated Environmental Assessment and Management*. 10(2):179-196.
- Peña, C., Carter, D. y Ayala, F. (2001). Toxicología ambiental, evaluación de riesgos y restauración ambiental. [En línea]. Disponible en: <http://superfund.pharmacy.arizona.edu/toxamb/> [Fecha de acceso: 10 de Enero 2015].

- Prego, R. y Cobelo-García, A. (2003). Twentieth century overview of heavy metals in the Galician rias (NW Iberian Peninsula). *Environmental Pollution*. 121:425-452.
- Prieto-Méndez, J., González-Ramírez, C.A., Román-Gutiérrez, A.D. y Prieto-García, F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 10(1):29-44.
- Rigaud, S., Puigcorbé, V., Cámara-Mor, P., Casacuberta, N., Roca-Martí, M., García-Orellana, J., R. Benitez-Nelson, C., Masqué, P. y Church T. (2013). A methods assessment and recommendations for improving calculations and reducing uncertainties in the determination of  $^{210}\text{Po}$  and  $^{210}\text{Pb}$  activities in seawater. *Limnology and Oceanography Methods*. 11:561-571.
- Santos-Jallath, J., Castro-Rodríguez, A., Huezco-Casillas, J., y Torres-Bustillos, J. (2012). Arsenic and heavy metals in native plants at tailings impoundments in Queretaro, Mexico. *Physics and Chemistry of the Earth*. 37-39:10-17.
- SEMARNAT. 2006. Guía técnica para orientar la elaboración de estudios de evaluación de riesgo ambiental de sitios contaminados. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas. México DF. p. 339.
- Shao, X., Huang, B., Zhao, Y., Sun, W., Gu, Z. y Qian, W. (2014). Impacts of human activities and sampling strategies on soil heavy metal distribution in a rapidly developing region of China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 104:1-8.
- Sinex, S.A. y Wright, D.A. (1988). Distribution of trace metals in the sediments and biota of Chesapeake Bay. *Marine Pollution Bulletin*. 19(9):425-431.
- Stackelberg, K.V., Guzy, E., Chu, T. y Henn B.C. (2015). Exposure to mixtures of metals and neurodevelopmental outcomes: A multidisciplinary review using an adverse outcome pathway framework. *Risk Analysis*. 35(6):971:1016.
- Tchounwou, P.B., Yedjou, C.G., Patlolla, A.K. y Sutton D.J. 2012. Heavy metal toxicity and the environment. En *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology*. Volume 3: Environmental Toxicology. A. Luch (Ed.). Springer. Berlin, Germany. p. 574.
- Thakali, S., Allen, H., Di Toro, D., Ponizovsky, A., Rooney, C., Zhao, F. y McGrath, S. (2006). A Terrestrial Biotic Ligand Model. 1. Development and Application to Cu and Ni Toxicities to Barley Root Elongation in Soils. *Environmental Science Technology*. 40(22):7085-7093.
- Thums, C.R., Farago, M.E. y Thornton, I. (2008). Bioavailability of trace metals in brownfield soils in an urban area in the UK. *Environmental Geochemistry and Health*. 30: 549-563.
- US-EPA. (2011). EIA Technical Review Guideline: Non-Metal and Metal Mining. United States Environmental Protection Agency. CAFTA DR and US Country EIA and Mining Experts. EPA/315R11002.
- Zhang, H., Cui, B., Xiao, R. y Zhao H. (2010). Heavy metals in water, soils and plants in riparian wetlands in the Pearl River Estuary, South China. *Procedia Environmental Sciences*. 2:1344-1354.