

**EL LADO GRIS DE LA  
MINERÍA DEL ORO:**  
LA CONTAMINACIÓN CON MERCURIO  
EN EL NORTE DE COLOMBIA



# **EL LADO GRIS DE LA MINERÍA DEL ORO:**

LA CONTAMINACIÓN CON MERCURIO  
EN EL NORTE DE COLOMBIA

**JESÚS OLIVERO VERBEL. Ph.D.**  
**BORIS JOHNSON RESTREPO. M.Sc.**



UNIVERSIDAD DE CARTAGENA  
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACÉUTICAS  
GRUPO DE QUÍMICA AMBIENTAL Y COMPUTACIONAL



Universidad de Cartagena

Rector:  
SERGIO HERNÁNDEZ GAMARRA

Vice-rector Académico:  
GERMÁN SIERRA ANAYA

Vice-rector Administrativo  
AURELIO MARTÍNEZ VILLEGAS

Decano Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas  
PRISCILIANO MARTÍNEZ JARAMILLO

Prohibida la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio,  
sin previa autorización escrita de sus autores.

Derechos reservados. 2002  
Universidad de Cartagena:  
Jesús Olivero Verbel y Boris Johnson Restrepo.

Redacción: Boris Johnson y Jesús Olivero.  
Diseño portada: Jorge Barrios  
Diagramación Electrónica: Mila Muñoz Desales  
Fotografías de portada: Jairo Rodríguez  
Mapas: Carmen Osorio  
Editor: Jorge E. Matson E.  
Sección Publicaciones  
Editorial Universitaria

ISBN: 958 - 33 - 3885 - 0

Impresión **ALPHA** Impresores Ltda.



# Contenido

<b>Presentación</b>	xv
<b>Prologo</b>	xvii
<b>Introducción</b>	xix
<b>Capítulo 1</b>	<b>Generalidades del mercurio</b>
1.1	Introducción 21
1.2	Formas Químicas 22
1.3	Propiedades Químicas y Físicas 23
1.4	Fuentes de Contaminación Ambiental 26
1.5	Usos 28
1.6	Exposición al metilmercurio y consideraciones ambientales 28
1.7	Biogeoquímica del mercurio transporte y distribución 29
1.8	Biometilación del mercurio en el Medio ambiente 32
1.9	Bioacumulación 38
1.10	Toxicidad en los humanos 38
1.11	Diagnóstico de la intoxicación 46
<b>Capítulo 2</b>	<b>Análisis de mercurio en muestras ambientales</b>
2.1	Naturaleza de la muestra 49
2.2	Recolección y tratamiento previo de la muestra 50
2.3	Digestión de las muestras 52
2.4	Análisis del mercurio 52
2.5	Control de calidad del método 52

2.6	Tratamiento estadístico de los datos	58
2.7	Recolección de información sobre la población	59

Capítulo 3	<b>Mercurio en peces del Canal del Dique</b>	
3.1	Introducción	61
3.2	Resultados	62
3.3	Discusión	63

Capítulo 4	<b>Mercurio en peces de las ciénagas del sur de Bolívar (Grande de Achí y Simití) y Canal del Dique (Capote).</b>	
4.1	Introducción	67
4.2	Resultados	68
4.3	Discusión	71

Capítulo 5	<b>Las ciénagas del bajo Magdalena reciben el impacto de la contaminación del sur de Bolívar</b>	
5.1	Introducción	73
5.2	Resultados	78
5.3	Discusión	81

Capítulo 6	<b>Niveles de mercurio en muestras ambientales y de cabello en habitantes del sur de Sucre</b>	
6.1	Introducción	85
6.2	Resultados	87
6.3	Discusión	89

**Conclusiones**

**Recomendaciones**

**Referencias bibliográficas**

**Glosario**

## **Lista de tablas**

### **Tabla 1**

Solubilidades del mercurio y sus compuestos en g/100 mL a 25°C.

### **Tabla 2**

Cálculos estadísticos para el análisis de mercurio en una serie de muestras de pescado y el material de referencia Dorm-2.

### **Tabla 3**

Localización geográfica de las estaciones de muestreo en el bajo Magdalena.



# Lista de figuras

## **Figura 1**

Molécula de timerosal o mertiolate

## **Figura 2**

Reducción enzimática del  $\text{Hg}^{2+}$  en presencia de NADH.

## **Figura 3**

Ciclo biogeoquímico del mercurio.

## **Figura 4**

Estructura de la metilcobalamina  $\text{CH}_3\text{CoB}_{12}$

## **Figura 5**

Formación de metilmercurio por bacterias aeróbicas.

## **Figura 6**

Niveles de mercurio ( $\mu\text{g/g}$ , peso húmedo) en músculo de peces de la ciénaga Mina Santa Cruz, sur de Bolívar, (Colombia).

## **Figura 7**

Imágenes de la enfermedad de Minamata. A. Fotografías expuestas en el museo de la enfermedad Minamata en Japón. B. Sobrevivientes de la enfermedad invitados al Congreso Mundial sobre Mercurio, Minamata, 2001.

## **Figura 8**

Curva de calibración típica de un análisis de mercurio total por espectroscopía de absorción atómica usando el método de vapor frío.

## **Figura 9**

Diagrama de flujo de los procedimientos estadísticos aplicados para determinar diferencias significativas entre medias de grupos de datos.

**Figura 10**

Niveles de mercurio en músculo de cuatro especies de pescados provenientes del Canal del Dique.

**Figura 11**

Mercurio en especies de peces de ciénagas del sur de Bolívar (Grande de Achí y Simití) y del Canal del Dique (Capote).

**Figura 12**

Estaciones de muestreo en la cuenca del bajo Magdalena (sur departamento de Bolívar).

**Figura 13**

Estaciones de muestreo en el Canal del Dique.

**Figura 14**

Niveles de mercurio en peces de ciénagas del sur de Bolívar, bajo Magdalena y Canal del Dique durante la época seca.

**Figura 15**

Niveles de mercurio en peces de ciénagas del sur de Bolívar, bajo Magdalena y Canal del Dique durante la época de lluvias.

**Figura 16**

Localización del municipio de Caimito (departamento de Sucre).

**Figura 17**

Mercurio total en cabello de habitantes de Caimito (Sucre) de acuerdo con la edad. Para efectos de comparación aparece graficado el nivel máximo del valor normal y los niveles reportados para mercurio en cabello de pescadores del sur de Bolívar (Olivero *et al.*, 1996) y del río Tapajos, un afluente del Amazonas en Brasil.

**Figura 18**

Mercurio total en muestras ambientales y cabello de habitantes de Caimito (Sucre).

**Figura 19**

Valores medios de mercurio total en cabello reportados en diversos países del mundo.

# Panel de Investigadores

LA SIGUIENTE LISTA SEÑALA TODOS AQUELLOS INVESTIGADORES QUE DIRECTA O INDIRECTAMENTE HAN HECHO POSIBLE EL DESARROLLO DE LOS ESTUDIOS DESCRITOS EN ESTE TEXTO

## INVESTIGADORES PRINCIPALES

Jesús Olivero Verbel, Ph.D.

Boris Johnson Restrepo, M.Sc.

## INVESTIGADORES ASOCIADOS

Adolfo Consuegra, Esp. Química Analítica.

Ana Gutiérrez, Esp. Química Analítica.

Ángel Pérez, Q.F.

Beatriz Solano, Q.F.

Braulio Acuña, Q.F.

Claudia Mendoza, Q.F.

Eduardo Argüello, M.Sc.

Héctor Rocha, Q.F.

Isabel Acosta, Lic. Biología.

Jairo Rodríguez, Economista.

Johny Meléndez, Q.F.

José López, Esp. Química Analítica.

Rafael Olivero, Ing. de Alimentos.

Ramón Paz, Q.F.

Ricardo Vivas, Ph.D.

Roberto Hurtado, Esp. Química Analítica.

Rubén Salas, Esp. Toxicología.

Venancio Esquivia, Esp. Química Analítica.

Víctor Navas, Q.F.

Yovani Montero, Q.F.

# Agradecimientos

LOS AUTORES AGRADECEN A LAS SIGUIENTES ENTIDADES Y PERSONAS EL APOYO BRINDADO AL FORTALECIMIENTO DEL GRUPO DE QUÍMICA AMBIENTAL Y COMPUTACIONAL DE LA UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

- Universidad de Cartagena
- Gobernación de Bolívar
- CORMAGDALENA, Seccional Barranquilla
- UNESCO
- COLCIENCIAS
- Fondo FEN
- Universidad de Sucre
- Ministerio del Medio Ambiente (Japón)
- Instituto de la Enfermedad de Minamata (Japón)
- INPA
- CARDIQUE
- Pescadores y mineros de Bolívar
- Sección de Publicaciones de la Universidad de Cartagena
- Alicia Mora (Sección Publicaciones Universidad de Cartagena)

- Arturo Vásquez (Ex-consejero Departamental del Medio Ambiente)
- Carlos Martínez. q.e.p.d. (Minero del sur de Bolívar)
- Cecilia Bermúdez Sagre (Ex-directora de Cardique)
- Daniel Ariza (Ex-consejero Departamental del Medio Ambiente)
- Eulises Peñalosa (Ex-consejero Departamental del Medio Ambiente)
- Federico Ochoa Lorduy (Consejero Departamental del Medio Ambiente)
- Fredy Badrán Padauí (Universidad de Cartagena)
- Guillermo Ariza (Ex-director Cormagdalena-Barranquilla)
- Hilario Bermúdez (Cormagdalena - Seccional Barranquilla)
- Jairo Rodríguez (Economista)
- Jorge Barrios (Sección Publicaciones Universidad de Cartagena)
- Jorge E. Mattson E. (Sección Publicaciones Universidad de Cartagena)
- Jorge Mercado, biólogo q.e.p.d. (INPA)
- José Pinzón (Cardique)
- Luis Eduardo Pérez (Presidente - Fundación Ecológica del Caribe)
- Manuel Sierra Navarro (Ex-Rector Universidad de Cartagena)
- Miguel Navas Meisel (Ex-Gobernador de Bolívar)

## **Presentación**

**U**no de los aspectos prioritarios del plan de desarrollo es trazar políticas para contrarrestar y disminuir el acelerado deterioro del medio ambiente, en especial de los recursos naturales renovables y la salud de la población. La protección y uso sostenible del ambiente es nuestra responsabilidad para las generaciones futuras.

La Universidad de Cartagena es el mayor polo de desarrollo académico e investigativo del Departamento, su papel como asesor gubernamental es eje primordial en la formulación de políticas ambientales. Por lo tanto, el Departamento de Bolívar, en conjunto con Cormagdalena, ha contribuido con la financiación de proyectos de investigación liderados por la Universidad hacia el conocimiento de la problemática de la contaminación con mercurio en el sur del territorio bolivarense.

Los investigadores de la Universidad han puesto al descubierto ante la comunidad científica internacional

los aspectos más importantes de la contaminación con mercurio, originada por la explotación artesanal del oro en Colombia. Esta oportunidad nos ha permitido identificar los elementos necesarios para implementar programas tendientes al mejoramiento de las condiciones socioeconómicas de la población afectada, así como la implementación de estrategias que disminuyan la crisis ambiental presente en Bolívar.

La información científica que este documento pone en manos del lector es un claro ejemplo de la sinergia existente entre la Universidad de Cartagena y el Departamento de Bolívar, lo cual permitió conseguir importantes recursos que han sido canalizados para mejorar la capacidad de investigación y el fortalecimiento de su infraestructura. En igual forma con esta publicación esperamos aportar en el mejoramiento de la calidad de vida de la comunidad bolivarense y procurar su bienestar en el principio de la convivencia social, como base del desarrollo sostenible.

El Departamento de Bolívar, en razón a la divulgación de esta obra, quiere resaltar el empuje y la pujanza del pueblo costeño.

LUIS DANIEL VARGAS  
Gobernador  
Departamento de Bolívar

## Prólogo

**E**l mercurio es un contaminante persistente en el medio ambiente y muy tóxico en general para los seres humanos. Por este motivo genera gran preocupación en todo el mundo, hasta el punto que en algunos países su uso ha sido completamente prohibido. La entrada del mercurio al ambiente permite su acumulación en la cadena alimenticia y de esta forma llega al hombre.

La utilización del mercurio en la extracción del oro en el norte de Colombia constituye un verdadero riesgo ambiental y de salud para todos. La Universidad de Cartagena, como primer centro académico e investigativo de la Costa Caribe colombiana ha sido pionera en caracterizar la extensión de este singular problema, y desde hace varios años ha impulsado la realización de investigaciones tendientes a evaluar el impacto de la contaminación con mercurio en el Sur de Bolívar y sus zonas de influencia.

Esta publicación recopila la mayoría de los trabajos de investigación que nuestra Universidad ha desarrollado sobre el tema, liderados por el Grupo de Química Ambiental y Computacional, perteneciente a la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas.

Para la Universidad de Cartagena constituye una gran satisfacción poder entregar a la opinión pública y a las autoridades en general, este libro en el que aparecen no sólo elementos teóricos, metodológicos y técnicos, relacionados con la evaluación de la contaminación con mercurio en el sur del Departamento de Bolívar, sino importantes conclusiones y recomendaciones que deben ser acogidas, para disminuir la posibilidad de que la extracción del oro siga constituyéndose en el lado gris de la economía de nuestro Departamento y en general de la región Caribe colombiana.

SERGIO HERNÁNDEZ GAMARRA  
Rector  
Universidad de Cartagena

## **Introducción**

**L**uego de cerca de 8 años de trabajo continuo evaluando la extensión de la contaminación con mercurio en el norte de Colombia, el Grupo de Química Ambiental y Computacional de la Universidad de Cartagena ha editado este libro, como una modesta contribución al conocimiento de esta problemática que cada día parece incrementarse sin un final cercano.

El primer capítulo del libro recoge los aspectos generales, que a juicio de los autores, son de especial importancia en relación con el mercurio como contaminante ambiental de alta toxicidad. El segundo capítulo ofrece una descripción de la metodología empleada por el grupo para evaluar los niveles de este metal en muestras ambientales. Los capítulos 3 al 6 muestran los resultados de las investigaciones que al respecto hemos publicado en revistas indexadas y presentado en congresos nacionales e internacionales.

Esperamos que la lectura de este texto sea de interés a todas aquellas personas que estén involucradas directa o

indirectamente en esta problemática ambiental, constituyendo un ejercicio de reflexión hacia la responsabilidad que tenemos de ayudar a encontrar una solución, no hacia la utilización de los recursos disponibles como si fueran inagotables, sino a pensar que los que aún no han nacido tienen el mismo derecho a conocer y disfrutar aquello que estamos destruyendo.

Información adicional, comentarios y reflexiones sobre esta publicación pueden ser enviados a: [jesusolivero@yahoo.com](mailto:jesusolivero@yahoo.com) o [boris\\_johnson@yahoo.es](mailto:boris_johnson@yahoo.es)

## Capítulo Uno

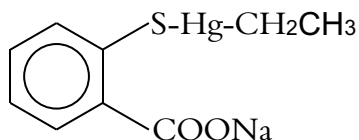
# Generalidades del Mercurio

*Boris Johnson y Jesús Olivero*

### 1.1. INTRODUCCIÓN

Uno de los metales con mayor impacto sobre los ecosistemas y que desde hace varias décadas ha sido objeto de innumerables estudios por parte de investigadores en diversas áreas es *el mercurio*. Este elemento puede aparecer en el ambiente bien sea por fenómenos naturales o por actividades humanas, lo cual ha ocasionado su acumulación y toxicidad en la biota, afectando la integridad de los ecosistemas y la salud del hombre (Falandysz, 2002; Tarras-Wahlberg *et al.*, 2001; Satoh, 2000; Shenker *et al.*, 1998).

En la actualidad el mercurio como un contaminante ambiental posee tres aspectos importantes para su estudio toxicológico: la percepción de riesgo por la exposición a miles de millones de personas a través del consumo de pescado, la emisión de vapor de mercurio a partir de las amalgamas dentales y el etilmercurio en forma timerosal (figura 1), molécula antiséptica ampliamente utilizada en vacunas (Clarkson, 2002).



**Figura 1.** Molécula de timerosal o mertiolate.

Existen muchos reportes recientes alrededor del mundo indicando que las concentraciones de mercurio en peces marinos y de agua dulce exceden los valores de salud pública internacionalmente recomendados. Además, ha sido estimado que el 95% del mercurio total en peces puede corresponder a metilmercurio ( $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ ). Esta forma química es mucho más tóxica que el mercurio elemental y las sales inorgánicas. Por otro lado la exposición a metilmercurio en humanos proviene casi exclusivamente del consumo de peces (Fitzgerald y Clarkson, 1991).

## 1.2. Formas químicas

El mercurio existe en el ambiente en varias especies químicas: mercurio elemental,  $\text{Hg}^0$  (conocido en el argot popular como azogue); mercurio

monovalente: ión mercurioso o mercurio (I),  $(\text{Hg}-\text{Hg})^{2+}$ ; mercurio divalente: ion mercúrico o mercurio (II),  $\text{Hg}^{2+}$  y las formas orgánicas. Estas últimas son compuestos organometálicos en los cuales el mercurio está unido covalentemente a uno o dos átomos de carbono para formar compuestos del tipo  $\text{RHgX}$  y  $\text{RHgR}'$ , respectivamente. Donde R y R' son grupos orgánicos, siendo algunos de los compuestos más comunes las sales de metilmercurio ( $\text{CH}_3\text{HgX}$ ), fenilmercurio ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{HgX}$ ), metoxietilmercurio ( $\text{CH}_3\text{OC}_2\text{H}_4\text{HgX}$ ) y el dimetilmercurio  $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$ . En los ejemplos anteriores son incluidos compuestos donde X es cloruro, bromuro, ioduro, nitrato o acetato. El enlace carbono-mercurio (Hg-C) de los compuestos organomercuriales no es un enlace fuerte (cerca de 60 kJ/mol), pero en cambio es más estable frente al enlace mercurio-oxígeno (Hg-O). Esto ayuda a explicar porqué los compuestos organometálicos de mercurio son estables al oxígeno y al agua y por tanto persistentes en el ambiente (Fergusson, 1990).

### 1.3. Propiedades químicas y físicas

El mercurio puede existir en varios estados físicos y químicos. Todas las formas de este elemento poseen una multitud de aplicaciones en la industria y en la agricultura, con propiedades tóxicas intrínsecas. Esto supone que cada especie química del mercurio sea estudiada por separado para valorar su riesgo ambiental o toxicológico.

El mercurio es el único elemento metálico líquido a temperatura ambiente. Posee brillo parecido a la plata y a 25 °C tiene una densidad de 13.456 g/mL. A 20 °C la presión de vapor es 0.00212 mm de Hg, de tal forma que un

recipiente abierto con mercurio metálico y expuesto en un ambiente cerrado, puede desprender suficiente vapor para saturar la atmósfera y exceder el límite máximo seguro de exposición ocupacional en un factor de 300 (WHO, 1990).

Las especies mercuriales difieren entre sí en sus solubilidades en agua. Los valores de solubilidad para algunas especies de mercurio aparecen en la Tabla 1.

Mercurio elemental <b>Hg</b>	Cloruro Mercurioso (Calomel) <b>Hg<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub></b>	Cloruro de Metilmercurio <b>CH<sub>3</sub>HgCl</b>	Cloruro Mercúrico <b>HgCl<sub>2</sub></b>
$5.6 \times 10^{-6}$	$2.0 \times 10^{-4}$	< 0.01	7.4

**Tabla 1.** Solubilidades del mercurio y sus compuestos en g/100 mL a 25°C (The Merck Index. Edición 12. 1996)

El mercurio elemental y los haluros alquilvercuriales son solubles en solventes no polares. El mercurio elemental en forma de vapor es más soluble en plasma, en sangre total y en hemoglobina que en agua destilada, donde es disuelto sólo en forma ligera. Las solubilidades de los compuestos de metilmercurio (CH<sub>3</sub>HgX) en agua varían en gran proporción y dependen de la naturaleza del anión. Si el anión es nitrato o sulfato, la tendencia del compuesto es a ser bastante iónico, es decir su comportamiento es similar al de una sal, presentando una alta solubilidad en agua. Sin embargo, los cloruros son compuestos covalentes no polares que

son más solubles en solventes orgánicos y en fluidos corporales que en el agua. En general el metilmercurio puede asociarse entre un 90-95% con los glóbulos rojos y entre un 5-10% con el plasma. Esta pequeña fracción es la que accede al cerebro generando la toxicidad en este órgano (Fergusson, 1990; WHO, 1986; WHO, 1976).

Entre las propiedades químicas más importantes que caracterizan las especies de mercurio (II) y las alquilmercúricas ( $\text{RHg}^+$ ) aparece su alta afinidad para formar enlaces covalentes con el azufre. Esta propiedad es la que explica la mayor parte de las propiedades biológicas del metal. Cuando el azufre está en forma de grupos sulfidrilo, el mercurio divalente reemplaza el átomo de hidrógeno para formar mercaptanos,  $\text{X-Hg-SR}'$  y  $\text{Hg}(\text{SR})_2$ , donde X es un grupo electronegativo y R un aminoácido como la cisteína. Los mercuriales orgánicos forman mercaptanos del tipo  $\text{RHg-SR}'$ . Inclusive en bajas concentraciones, los mercuriales pueden inactivar las enzimas, principalmente aquellas con grupos sulfidrilos, interfiriendo en el metabolismo y funciones de la célula.

Un grupo de proteínas de gran importancia en la toxicidad del mercurio son las Metalotioneínas (MTs). Estas corresponden a proteínas de bajo peso molecular presentes en alguna medida en todos los tejidos de los mamíferos y que pueden unirse a los metales pesados, particularmente mercurio y cadmio, evitando la interacción de estos elementos con otras proteínas de las células y de esta forma previniendo su toxicidad (Nordberg y Nordberg, 2000). La concentración de MT en las células es incrementada luego que estos metales inician procesos de transducción de señales bioquímicas que originan la activación de genes, con el consecuente incremento en la síntesis de estas proteínas protectoras, hecho que ha sido

reportado en muchos órganos tales como el cerebro, el riñón y los testículos, entre otros (Tandon *et al.*, 2001; Dufresne y Cyr, 1999; Yasutake *et al.*, 1998).

## **1.4. Fuentes de contaminación ambiental**

### **1.4.1. Origen natural**

La mayor fuente natural de mercurio es la desgasificación de la corteza terrestre, las emisiones de los volcanes y la evaporación desde los cuerpos de agua (Nriagu *et al.*, 1992). No obstante, gran parte del mercurio encontrado en la atmósfera y en los ecosistemas hídricos, el cual puede ser transportado a las zonas urbanas por efecto de la deposición atmosférica, proviene de actividades antropogénicas (Marins *et al.*, 2000), lo cual hace difícil valorar en forma cuantitativa la contribución relativa del mercurio de origen natural y antropogénico que son depositados en la biosfera.

### **1.4.2. Fuentes antropogénicas**

La cantidad total de mercurio liberada a la atmósfera debido a actividades antropogénicas ha sido estimada en 2.000-6.000 toneladas por año (Hanisch, 1998). La contaminación ocasionada por el hombre es realizada de muchas formas: la descargas de desechos y la emisión directa a la atmósfera en la explotación minera del metal y del oro, la quema de los combustibles fósiles representa una fuente importante de contaminación atmosférica, así como la incineración de desechos sólidos, los cuales incluyen mercurio volatilizado de baterías desechadas y durante la fundición de cobre y zinc (Fitzgerald y Clarkson, 1991). La contaminación con mercurio en las zonas tropicales, particularmente en Brasil, Colombia, Ecuador y Bolivia es originada en los

procesos de beneficio del oro, el cual es extraído mezclando la roca triturada enriquecida con el metal precioso con mercurio metálico para formar una amalgama, la cual es presionada con la mano para remover el exceso de mercurio. Este proceso ocasiona el derramamiento directo de grandes cantidades del metal en los ríos y en cuerpos de agua como ciénagas y lagunas. La amalgama mercurio-oro obtenida es quemada usualmente a campo abierto dejando libre el oro y liberando el tóxico metálico en forma de vapor directamente a la atmósfera. La mayoría de estos procesos son realizados muy cerca de las viviendas de los mineros, de tal forma que las familias respiran gran parte del vapor de mercurio volatilizado (Turizo *et al.*, 1997).

La explotación aurífera artesanal ha sido ampliamente desarrollada en la región amazónica del Brasil. De acuerdo con Malm (1998), al menos 2.000 toneladas de mercurio han sido liberadas al ambiente de este país en la presente fiebre del oro.

El sur del Departamento de Bolívar y el norte de Antioquia constituyen las zonas de mayor densidad minera en Colombia con más de 12.400 minas en explotación, involucrando a un número de personas superior a 50.000 que reciben influencia directa o indirecta de esta actividad. La producción de oro en esta área es aproximadamente de 18.8 toneladas (UPME, 2001; Ceder, 1994). La cantidad de mercurio liberado al medio ambiente no ha sido calculada con exactitud, pero ha sido estimada en cerca de 80-100 toneladas al año.

## 1.5. Usos

Uno de los usos más frecuentes del mercurio es como cátodo en la electrólisis de la solución del cloruro de sodio para producir soda cáustica y cloro gaseoso. Cantidades del orden de 10 toneladas del líquido metálico son usadas en cada planta de procesamiento. El mercurio es ampliamente empleado en la industria eléctrica (lámparas, rectificadores de arco y en las celdas de las baterías de mercurio), en instrumentos de control en el hogar y la industria (termostatos, barómetros), en laboratorios y en equipos médicos. También es usado en forma extensa en odontología para elaborar amalgamas dentales. Los compuestos de mercurio siguen siendo usados en pinturas para evitar la proliferación de hongos, y para el control de infecciones fúngicas en semillas y en plantas bulbosas. Uno de los usos del mercurio metálico, particularmente en Suramérica, que ha originado un impacto importante en el medio ambiente y en la salud de muchas poblaciones, es su utilización en los procesos de extracción del oro de manera artesanal.

## 1.6. Exposición al metilmercurio y consideraciones ambientales

A pesar de la amplia utilidad del mercurio, este elemento y todos sus compuestos son tóxicos, volátiles, persistentes en el medio ambiente y rápidamente dispersados en la atmósfera, en particular las especies de halogenuros de metilmercurio ( $\text{CH}_3\text{HgX}$ ; donde X puede ser  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$  o  $\text{I}^-$ ), las cuales corresponden a las formas más tóxicas existentes del metal.

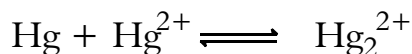
El metilmercurio en los ecosistemas es originado principalmente a partir de la metilación del mercurio inorgánico. En general, todas las formas de mercurio que entran en los sistemas acuáticos son susceptibles de convertirse en metilmercurio, el cual puede ser directamente bioacumulado por organismos acuáticos y biomagnificado a través de la cadena alimenticia. La bioacumulación es el proceso mediante el cual una sustancia química es acumulada en una especie determinada en función de la concentración del químico presente en el medio. Por su parte, la biomagnificación involucra el incremento en la concentración del químico de organismo a organismo a medida que la especie aparece en niveles ascendentes de la cadena alimenticia (Castilhos y Bidone, 2000; Castilhos *et al.*, 2001). Bajo este contexto, las especies carnívoras son colocadas en un nivel trófico superior con respecto a las especies no carnívoras. El consumo de peces contaminados con metilmercurio es la principal fuente de exposición a este metal y es considerado como una amenaza para la salud humana.

### **1.7. Biogeoquímica del mercurio, transporte y distribución**

Uno de los aspectos de mayor importancia en el ciclo biogeoquímico del mercurio es la volatilidad de este metal. En la atmósfera está ampliamente distribuido en forma de gas y partículas. Entre el 90-95% de este elemento es gaseoso, incluyendo vapor de mercurio ( $\text{Hg}^0$ ), compuestos inorgánicos (cloruros y óxidos) y alquilmercurio (principalmente  $\text{CH}_3\text{HgCl}$ ). Concentraciones típicas de mercurio gaseoso total en zonas no contaminadas son de 1.5-2.0  $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$  en la baja troposfera (Ebinghaus *et al.*,

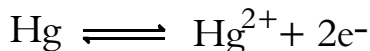
2001). Algunos autores sugieren que el  $\text{HgCl}_2$ , comúnmente conocido como “mercurio gaseoso reactivo” es la especie química que domina el flujo total de deposición atmosférica de este metal por su alta reactividad superficial y su solubilidad en agua (Sheu y Mason, 2001).

El mercurio existe en tres estados de oxidación:  $\text{Hg}^0$ ,  $\text{Hg}_2^{2+}$  y  $\text{Hg}^{2+}$ , donde  $\text{Hg}^{2+}$  es el estado de oxidación más estable del mercurio. Estas tres especies coexisten en equilibrio.

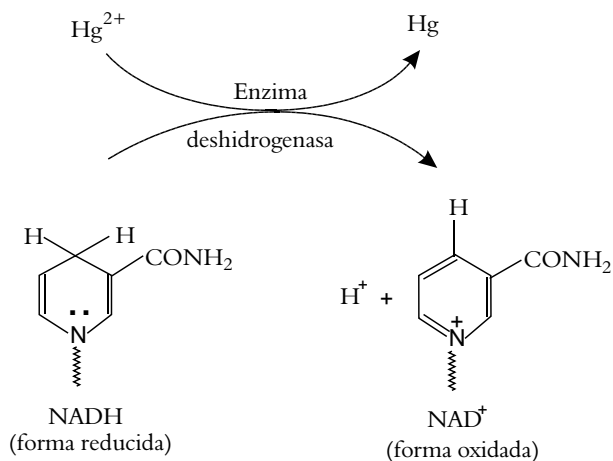


Casi todo el mercurio inorgánico disuelto en aguas oceánicas existe en forma disociada como ion  $[\text{HgCl}_4]^{2-}$ . En las fuentes de agua continentales, sin embargo, donde hay poco cloruro el mercurio puede existir como  $\text{Hg}(\text{OH})_2$ .

La interconversión en medio acuoso entre todos los estados de oxidación del mercurio requiere la presencia de microorganismos. El mercurio es emitido a la atmósfera a partir de las fuentes naturales y antropogénicas en forma de vapor elemental ( $\text{Hg}^0$ ), posteriormente precipitado por las lluvias que lo depositan en los cuerpos de agua y finalmente en el sedimento desde donde es metilado y luego bioacumulado (Downs *et al.*, 1998). Las formas más solubles de mercurio (por ejemplo  $\text{Hg}^{2+}$ ), son sintetizadas a través de la conversión de  $\text{Hg}^0$  a  $\text{Hg}^{2+}$ , reacción de oxidación que ocurre en presencia de microorganismos aeróbicos en el que participa la catalasa, una enzima importante en el ciclo del oxígeno.



Los microorganismos aeróbicos también pueden llevar a cabo la oxidación del mercurio a partir del  $\text{HgS}$  en el sedimento, oxidando el sulfuro a sulfito y luego a sulfato. El ión mercúrico ( $\text{Hg}^{2+}$ ), sin embargo, puede ser reducido en un proceso de desintoxicación por microorganismos (por ejemplo *Pseudomonas sp.*) a  $\text{Hg}^0$  en presencia de NADH (Nicotinamida Adenina Dinucleótido reducido) que se oxida a  $\text{NAD}^+$  (Nicotinamida Adenina Dinucleótido oxidado). El  $\text{NAD}^+$  es una coenzima cuya función es actuar como agente en la transferencia de átomos de hidrógeno en las reacciones de oxidación - reducción, como se indica en la figura 2.



**Figura 2.** Reducción enzimática del  $\text{Hg}^{2+}$  en presencia de NADH.

El  $\text{Hg}^0$  generado en el mecanismo de desintoxicación puede vaporizarse desde el medio acuoso y reentrar en la atmósfera. Esta volatilización de  $\text{Hg}^0$  es uno de los procesos claves en el ciclo biogeoquímico del mercurio.

Algunas bacterias emplean un segundo mecanismo de desintoxicación que convierte el  $\text{Hg}^{2+}$  bien sea en metilmercurio  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ , o en dimetilmercurio,  $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$  (Wood, 1974). El uso de estos métodos de desintoxicación por microorganismos para crear mercurio elemental y  $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$  asegura que el mercurio sea removido del medio ambiente y remitido luego a la atmósfera. Igualmente, la formación de  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$  por microorganismos puede ser considerado un paso de desintoxicación para los mismos, ya que el ion  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ , podría ser inmovilizado en el sedimento o en el suelo por adsorción a las partículas de bentonita (barro) cargadas negativamente. Este proceso asegura la remoción del  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$  en forma efectiva como un tóxico del ambiente microbiano. Los aspectos más importantes del ciclo biogeoquímico del mercurio son presentados en la figura 3.

### 1.8. Biometilación del mercurio en el medio ambiente

El cambio de la especie en forma inorgánica ( $\text{Hg}^{2+}$ ) a las formas metiladas ( $\text{CH}_3\text{Hg}^+$  y  $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$ ) es el primer paso importante en los procesos de bioacumulación. La metilación es realizada principalmente en los sedimentos de las aguas oceánicas y cuerpos de aguas continentales. Aunque en el contenido intestinal y en la mucosa de algunos peces el mercurio ha sido encontrado en su forma metilada (WHO, 1990).

Los mecanismos de síntesis de los compuestos metilados de mercurio tales como  $\text{CH}_3\text{HgCl}$  y  $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$ , han sido claramente identificados y en general pueden seguir dos rutas bioquímicas: una anaeróbica y la otra aeróbica. La primera involucra bacterias anaeróbicas, las cuales metilan el mercurio inorgánico ( $\text{Hg}^{2+}$ ) usando la metilcobalamina (figura 4),

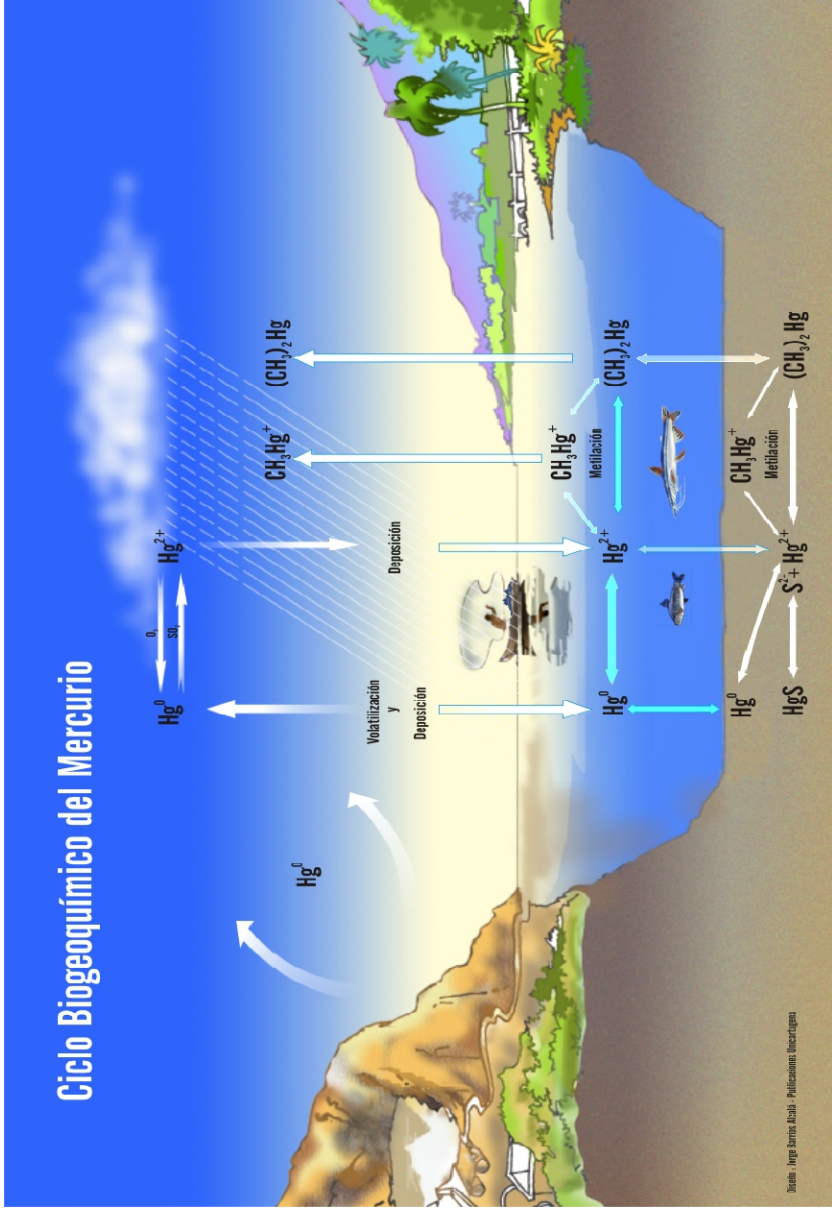
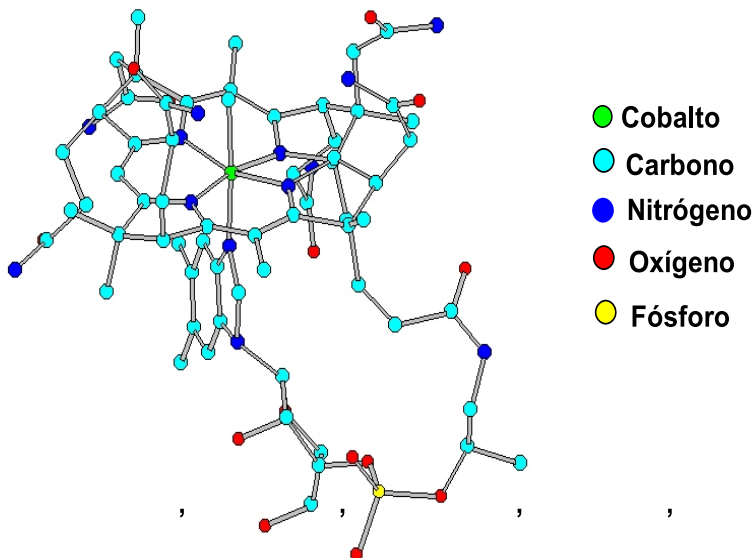


Figura 3. Ciclo Biogeoquímico del Mercurio .

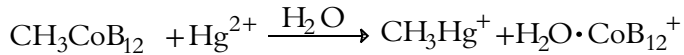
$\text{CH}_3\text{CoB}_{12}$  (un compuesto análogo a la Vitamina  $\text{B}_{12}$  o cianocobalamina), sintetizada por bacterias metanogénicas. La metilcobalamina puede también ser generada por muchas bacterias reductoras de sulfato. Entre los organismos anaerobios que metilan el mercurio pueden destacarse el *Clostridium cochlearium* (Pan-Hou y Imura, 1982) y *Desulfovibrio desulfuricans*. A pesar de que la producción de metilcobalamina depende de un catalizador enzimático, la biosíntesis de metilmercurio a partir de la reacción de  $\text{Hg}^{2+}$  con metilcobalamina transcurre en forma no enzimática.



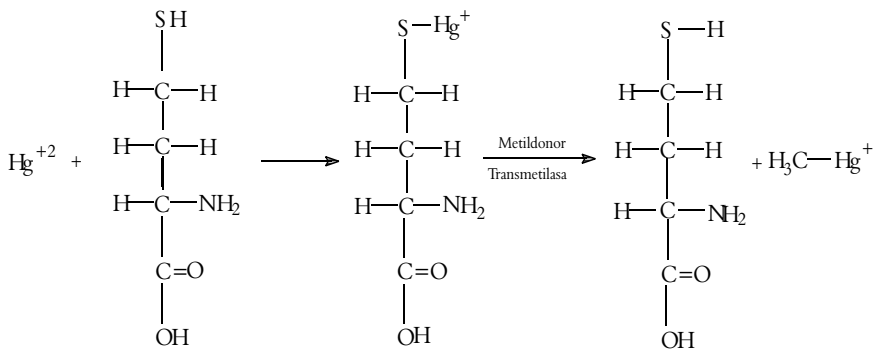
**Figura 4.** Estructura de la metilcobalamina  $\text{CH}_3\text{CoB}_{12}$

La metilcobalamina ( $\text{CH}_3\text{CoB}_{12}$ ) transfiere un metilcarbanión ( $\text{CH}_3^-$ ) al ion mercúrico ( $\text{Hg}^{2+}$ ) para generar metilmercurio ( $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ ). La

metilcobalamina también puede transferir un segundo metilcarbanión al metilmercurio para producir el dimetilmercurio,  $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$ . Sin embargo, el primer paso de metilación del  $\text{Hg}^{2+}$  es aproximadamente 6.000 veces más rápido que el segundo (Craig P, 1986).



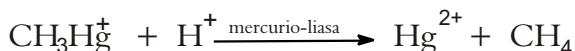
La segunda vía bioquímica involucra las bacterias aeróbicas, las cuales incluyen: *Pseudomonas spp*, *Bacillus megaterium*, *Escherichia coli* y *Enterobacter aerogenes*. Entre los hongos que metilan al mercurio por esta vía tenemos *Asperigillus niger*, *Saccharomyces cerevisiae* y *Neurospora crasa*. Estos microorganismos facilitan la formación de complejos entre el ion mercurio (II) con cisteína a través de la interacción del ion mercúrico ( $\text{Hg}^{2+}$ ) con el grupo sulfidrilo del aminoácido. Luego, usando el metilo como un grupo donador y una enzima transmetilasa, el  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$  es separado del complejo (figura 5).



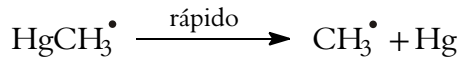
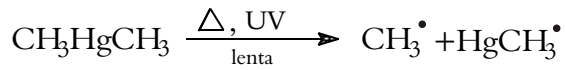
**Figura 5.** Formación de metilmercurio por bacterias aeróbicas

El complejo metilmercurio-cisteína tiene una similitud estructural a la metionina. Los mismos organismos que metilan el mercurio, también lo desmetilan por una reacción inversa a la metilación, con alguna extensión.

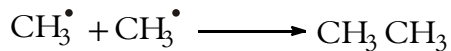
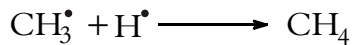
Tanto la metilación del mercurio como la desmetilación del metilmercurio pueden llevarse a cabo en la columna de agua, interfase agua-sedimento y en el sedimento (Zhang y Planas, 1994). Los microorganismos a menudo responsables de la desmetilación del metilmercurio son los mercurio resistentes como las *Pseudomonas*. Otros que participan en la desmetilación del mercurio incluyen los géneros *Escherichia* y *Staphylococcus*. El proceso general de desmetilación requiere remover el grupo metilo del mercurio a través de una enzima llamada mercurio-liasa. La mercurio-liasa cataliza el rompimiento del enlace entre el carbono y el mercurio y requiere que un exceso de agente reductor (tal como la L-cisteína) esté presente. La mercurio reductasa debe reducir el  $\text{Hg}^{2+}$  a  $\text{Hg}^0$



El dimetilmercurio puede ser sintetizado por bacterias usando la metilcobalamina y  $\text{Hg}^{2+}$  o  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ . Esta especie es insoluble en agua y es además altamente volátil, por lo que difunde en forma rápida a la atmósfera. Una vez en la atmósfera, el dimetilmercurio es fotolizado por la luz ultravioleta para dar  $\text{Hg}^0$  y radicales metilo (Craig R., 1986).



Los radicales metilo pueden unirse a un hidrógeno para producir moléculas de metano o acoplarse dos de ellos para formar una molécula de etano (Wood, 1974).



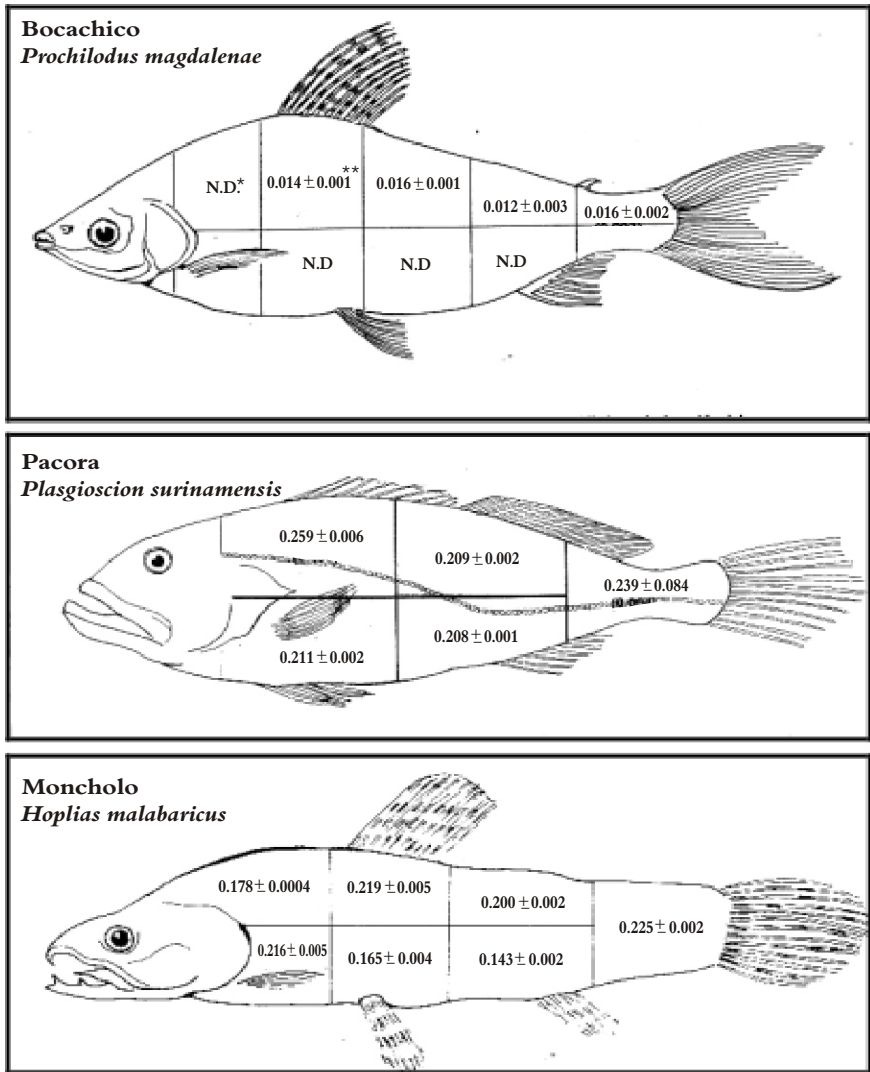
## **1.9. Bioacumulación**

Una vez el metilmercurio es liberado por los microorganismos, entra en contacto con la biota acuática a través de una rápida difusión, donde es fuertemente unido a sus proteínas. El metilmercurio es bioacumulado y biomagnificado por las especies de la cadena alimenticia. De esta forma, las especies depredadoras contienen niveles de mercurio mucho más altos que las especies no depredadoras. Los niveles de mercurio observados en varias secciones musculares de tres especies de pescados obtenidos en la Ciénaga Mina Santa Cruz, en el Sur de Bolívar, son presentados en la figura 6. Es evidente que los niveles más altos son encontrados en el músculo de especies depredadoras (Pacora y Moncholo) y que especies como el Bocachico, por ser iliófagos (fitoplanctónicos indirectos) ostentan los niveles más bajos (Olivero y Solano, 1998).

La relación de metilmercurio en el tejido de los peces respecto al agua puede ser extremadamente grande, usualmente del orden de 10.000 a 100.000. Este fenómeno no obedece a procesos de partición entre el agua y los tejidos, sino a la biomagnificación a través de la cadena alimenticia. Además de la influencia del nivel trófico o de la especie, hay otros factores de importancia en la bioacumulación y biomagnificación del mercurio tales como la edad del pez, la actividad microbiológica, el contenido de materia orgánica y azufre en el sedimento, así como la salinidad, el pH y el potencial redox del cuerpo de agua (Watras *et al.*, 1998; Wade *et al.*, 1993).

## **1.10. Toxicidad en los humanos**

La toxicidad referida en esta sección hace alusión fundamentalmente a casos de exposición ocupacional o ambiental al mercurio. En este punto



**Figura 6.** Niveles de mercurio ( $\mu\text{g/g}$ , peso húmedo) en músculo de peces de la ciénaga Mina Santa Cruz, sur de Bolívar (Colombia).

\* N.D. = No Detectable. \*\* concentración media  $\pm$  error estándar de la media.

es importante aclarar que la ingestión de pequeñas cantidades de compuestos de mercurio puede ser fatal.

Desde el punto de vista toxicológico, existen tres formas de mercurio: mercurio elemental, mercurio inorgánico (sales de mercurio y óxido de mercurio) y mercurio orgánico. Cada una de estas especies químicas de mercurio posee espectros diferentes de toxicidad, aunque todas ellas tienen en común su capacidad de inducir cambios en los sistemas neuronales de los humanos.

En la exposición a mercurio elemental, o sea aquella a la que están expuestos los mineros auríferos, odontólogos, personas con amalgamas dentales y trabajadores de plantas de producción de cloro, entre otros, puede generar déficit en el desarrollo neurológico y de comportamiento (Ozuah, 2001; Tirado *et al.*, 2000), lo cual puede incluir daños sutiles en la memoria visual, atención y velocidad en las respuestas visuales, auditivas y psicomotoras (Counter *et al.*, 2002, Ellingsen *et al.*, 2001), pérdida reversible de la capacidad para distinguir colores (Cavalleri y Gobba, 1998), además de inflamaciones severas de la piel (Zimmer *et al.*, 1997; Boyd *et al.*, 2000), entre otros efectos.

La ingestión de especies de mercurio inorgánico, que incluyen las sales solubles en agua tales como el cloruro o sulfato de mercurio, ocasiona irritación del tracto gastrointestinal y daño hepático severo (Langford y Ferner, 1999), también pueden inducir la parálisis progresiva y generalizada de las extremidades (Chu *et al.*, 1998).

Los compuestos organomercúricos, especialmente el metilmercurio, son considerados sustancias mucho más tóxicos que el mercurio elemental

( $\text{Hg}^0$ ) y sus sales inorgánicas ( $\text{Hg}_2^{2+}$ ,  $\text{Hg}^{2+}$ ). Por lo anterior, a continuación aparecen algunos de los aspectos de mayor importancia relacionados con la toxicidad de este compuesto organometálico.

El enlace carbono-mercurio presente en el metilmercurio ( $\text{H}_3\text{C-Hg}^+$ ) es muy estable y la presencia del grupo alquilo confiere solubilidad lipídica permitiendo la fácil penetración por las membranas celulares. Alrededor del 90% de todo el metilmercurio presente en los alimentos es absorbido a través del tracto gastrointestinal tanto en el hombre como en los animales. Seguido de tal absorción, gran parte del compuesto presente en el plasma es acumulado por los glóbulos rojos (eritrocitos) en una relación 300 a 1. Esto permite un eficiente transporte a través de todo el organismo y una distribución uniforme en tejidos y órganos. La solubilidad y la habilidad para unirse a macromoléculas biológicas, especialmente proteínas, resulta en una larga vida media en varios organismos. En el hombre, la vida media del metilmercurio, es decir, el tiempo necesitado para eliminar el 50% del total presente en el organismo, ha sido estimada por Smith y Farris (1996) entre 51-56 días y por Smith *et al* (1994) en 44 días, mucho mayor que la vida media de las formas inorgánicas de mercurio (3-4 días).

El metilmercurio es acumulado tanto en el cerebelo como en el corteza cerebral donde es fuertemente enlazado a las proteínas a través de los grupos sulfidrilos. Uno de los grandes problemas de este agente tóxico es su alta capacidad para atravesar la barrera placentaria (Tsuchiya *et al.*, 1984; Mottet *et al.*, 1985) en forma de un conjugado de mercurio-cisteína, a través del sistema de transporte activo para aminoácidos neutros (Kajiwara *et al*, 1996). La velocidad de transporte del metilmercurio a través de la barrera placentaria es 10 veces mayor respecto al mercurio inorgánico. En

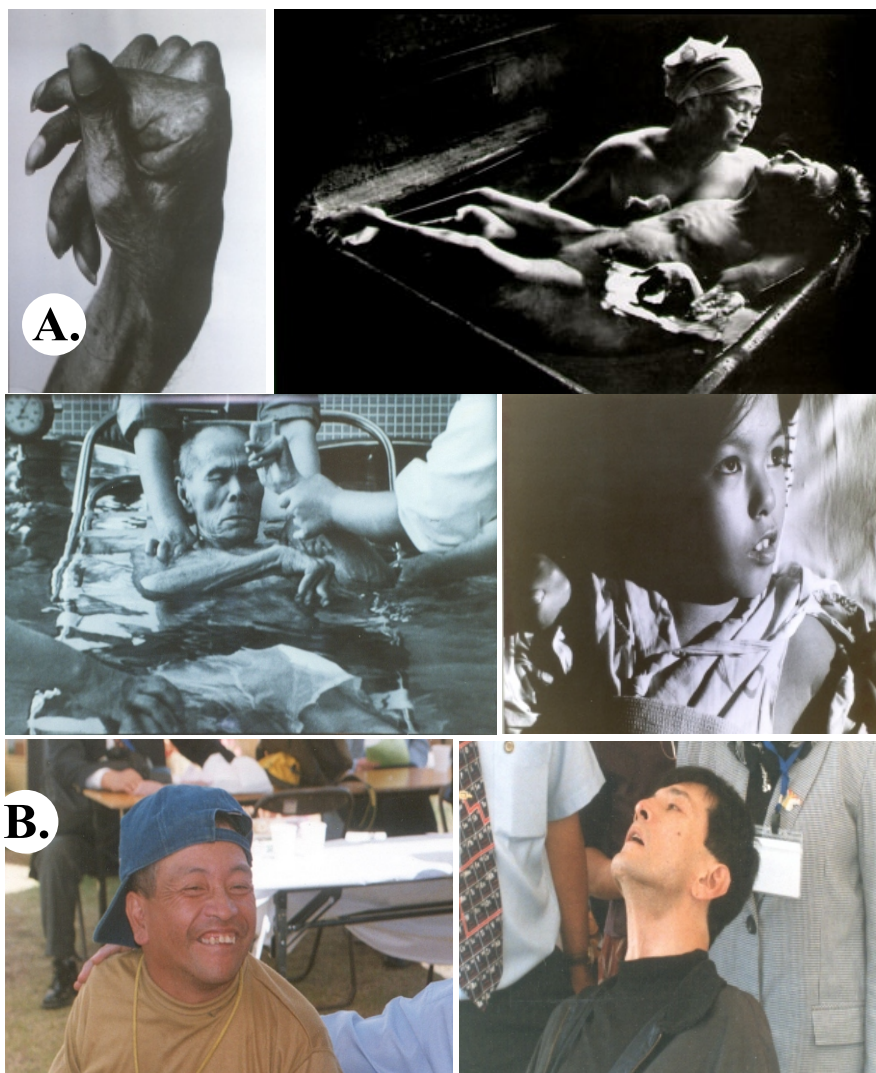
virtud de que los tejidos fetales tienen mayor afinidad para unirse al metilmercurio que los de la madre, los niveles comienzan a ser más altos en el nuevo ser que en la madre expuesta. Una vez en el feto, el metilmercurio puede penetrar la barrera hemato-encefálica para llegar al sistema nervioso central, en donde ejerce gran parte de su toxicidad.

Los efectos neurotóxicos prenatales pueden causar retardo mental y parálisis cerebral (Myers y Davidson, 1998). El desarrollo del cerebro es particularmente vulnerable al metilmercurio, de tal forma que la vida prenatal es más susceptible al daño cerebral debido al metilmercurio que la del adulto. Es de importancia anotar que aun luego de nacer, los bebés pueden estar expuestos a mercurio a través del consumo de leche materna (Byczkowski y Lipscomb, 2001).

El metilmercurio ( $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ ) es ampliamente conocido como una sustancia neurotóxica (Castoldi *et al.*, 2001). Ha sido listada por la International Program of Chemical Safety (IPCS) como una de las seis sustancias químicas más nocivas para el medio ambiente (WHO, 1990). La exposición a metilmercurio en humanos proviene casi exclusivamente del consumo de pescado y productos derivados de estos. Recientemente, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) ha definido la Dosis de Referencia, la cual corresponde a la concentración de mercurio que puede ser consumida diariamente a lo largo de la vida sin que se presente ningún efecto adverso. De acuerdo con la EPA este valor es  $0.1 \mu\text{g Hg/Kg}$  de peso corporal/día (Rice *et al.*, 2000). La intoxicación ocasionada por la ingestión de pescado con altas concentraciones de metilmercurio es caracterizada por lesiones en el sistema nervioso central y periférico. Algunas de las manifestaciones neurológicas más frecuentes

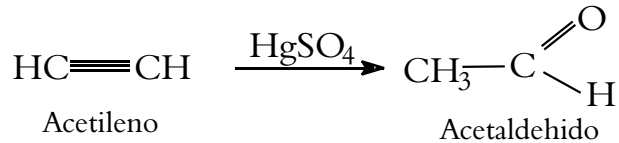
son las siguientes: inhabilidad para coordinar voluntariamente los movimientos de los músculos (ataxia), temblores anormales repetitivos en el cuerpo (tremor), percepción de sensaciones anormales de la piel tales como adormecimiento, punzaciones y quemaduras (parestesia), pérdida en el control del habla, disminución en la capacidad visual y auditiva, y parálisis cerebral, entre otros efectos (Castoldi *et al.*, 2001; Dolbec *et al.*, 2000; Lebel *et al.*, 1996; Murata *et al.*, 1999; Clarkson, 1997; Boischio y Henshel, 1996; Myers *et al.*, 1995, Marsh *et al.*, 1980). Estas manifestaciones pueden aparecer en niños de madres que han sido expuestas a metilmercurio, particularmente durante la última etapa gestacional (Grandjean *et al.*, 1999). Quizás uno de los efectos del metilmercurio que más han impactado a la humanidad ha sido su capacidad teratogénica (Leonard *et al.*, 1983; De Flora *et al.*, 1994). La teratogenicidad consiste en alteraciones del desarrollo del embrión o del feto lo cual puede generar malformaciones congénitas. Entre habitantes de Minamata (Japón) contaminados con metilmercurio fue frecuente el nacimiento de niños con microcefalia (disminución en el tamaño del cerebro), ausencia o disminución de la longitud de las extremidades, sordera y ceguera.

Esta serie de daños ocasionados por intoxicación con metilmercurio recibe el nombre de **Enfermedad de Minamata** debido a que fue la primera epidemia reportada en 1956 alrededor de la Bahía de Minamata, en el Mar de Yatsushiro en la prefectura de Kumamoto, Japón. Un registro fotográfico de algunos de los sobrevivientes de esta enfermedad, al igual que otras fotografías presentes en el Museo de la Enfermedad de Minamata son mostradas en la figura 7.



**Figura 7.** Imágenes de la enfermedad de Minamata. A. Fotografías expuestas en el Museo de la Enfermedad de Minamata en Japón. B. Sobrevivientes de la enfermedad invitados al Congreso Mundial sobre mercurio, Minamata, 2001.

En la pequeña ciudad de Minamata la compañía Chisso sintetizaba acetaldehído a partir de acetileno utilizando sulfato de mercurio (II) como catalizador, parte del cual era metilado antes de incorporarse a las aguas de la bahía.



El metilmercurio generado de esta forma, era captado rápidamente por el fitoplancton e incorporado en altas concentraciones en varias especies de la cadena alimenticia, siendo al final consumido por la población local, cuya principal fuente de alimentación eran los pescados de la bahía. Al poco tiempo, 121 personas fueron intoxicadas y 46 fallecieron (Eto, 2000; Kondo, 2000). Es importante anotar que previa a la aparición de esta enfermedad en los humanos, fue posible detectar cambios en el comportamiento de organismos tales como flotación de los peces de la bahía, movimientos involuntarios (danza) de los gatos e incapacidad de volar en aves marinas, entre otros (Japan Public Health Association, 2001; Eto *et al* 2001).

Otro incidente catastrófico de intoxicación con metilmercurio ocurrió en Iraq en 1971-1972, este país importó grandes cantidades de cereales (trigo y cebada) tratados con metilmercurio, usado como fungicida, y distribuyó el grano para la siembra. A pesar de las advertencias oficiales, el grano fue molido para obtener harina y hacer pan. En consecuencia, 6.530 víctimas fueron hospitalizadas de las cuales murieron 459 en solo dos meses, al

consumir este alimento (Greenwood, 1985). Otros incidentes han ocurrido a lo largo del río Agano en Niigata, Japón (Kondo, 1996), Pakistán, Guatemala y Ghana (Elhassani, 1982).

Además de los daños neurológicos y de la teratogenicidad, algunos autores han sugerido que la ingestión de mercurio orgánico puede estar asociada con la aparición de enfermedades cardiovasculares (Salonen *et al.*, 1995). Este amplio espectro de toxicidad del metilmercurio derivado fundamentalmente del consumo de pescado contaminado, constituye una amenaza potencial para todos los consumidores, lo cual hace necesario su permanente monitoreo ambiental.

### **1.11. Diagnóstico de la intoxicación**

La exposición al mercurio, ya sea industrial o ambiental, puede ser diagnosticada a través de análisis de laboratorio, particularmente en sangre, orina y cabello (Kales y Goldman, 2002; Wilhelm e Idel, 1996). Por lo general es considerado que el límite superior de una concentración sanguínea normal de mercurio es de 3 a 4  $\mu\text{g}/\text{dL}$ . Un valor mayor de 4  $\mu\text{g}/\text{dL}$  debe evaluarse como anormal en adultos. La distribución de mercurio total entre eritrocitos y el plasma puede indicar si el paciente ha sido intoxicado con mercurio orgánico o inorgánico, ya que el metilmercurio es concentrado en estas células, no haciéndolo así el mercurio inorgánico. La medición de mercurio total en eritrocitos permite una mejor estimación de la carga corporal de metilmercurio que la del mercurio inorgánico.

Medidas de mercurio total en orina recogida durante 24 horas, han sido utilizadas para determinar la carga corporal del metal. Los valores

normales del metal en la excreción urinaria no deben sobrepasar los 25  $\mu\text{g/L}$ . Sin embargo, la excreción de mercurio por la orina es un mal indicador de la cantidad de metilmercurio en la sangre, ya que éste se elimina principalmente con las heces (Hardman (Editor) y Limbird, 2001).

Por otro lado, el cabello humano es un excelente indicador de la intoxicación crónica con mercurio debido a que en él abundan grupos sulfidrilos y la concentración del metal es aproximadamente 300 veces mayor que la encontrada en sangre. De hecho, el crecimiento más reciente de cabello refleja una concentración bastante actual de mercurio en sangre. El cabello puede crecer 15-20 cm por año lo cual permite obtener antecedentes de exposición mediante el análisis de diferentes segmentos del mismo (Toribara, 2001). De otra parte, los niveles de mercurio en cabello también han sido correlacionados con los encontrados en órganos tales como el cerebelo, riñón y el hígado (Hac *et al.*, 2000).



## Capítulo Dos

# Análisis de Mercurio en Muestras Ambientales

*Boris Johnson, Claudia Mendoza y Jesús Olivero*

### 2.1. Naturaleza de la muestra

Las investigaciones divulgadas en este texto han sido desarrolladas empleando muestras ambientales que incluyen peces, sedimentos superficiales, macrófitas (*Eichornia crassipes*) y cabello humano.

La lista de las especies de peces y el nivel trófico al que corresponde cada una de ellas aparece a continuación:

#### **Fitoplanctónicos**

✍ *Prochilodus magdalenae* (Bocachico) - hábitos Iliófagos

✍ *Curimata mivartii* (Vizcaina)

## **Detritívoros**

- ✍ *Triportheus magdalenae* (Arenca)
- ✍ *Curimata magdalenae* (Pincho)
- ✍ *Rhamdia sebae* (Barbudo) con tendencia carnívora

## **Carnívoros**

- ✍ *Petenia kraussi* (Mojarra amarilla)
- ✍ *Pseudoplatystoma fasciatum* (Bagre pintado)
- ✍ *Sorubim lima* (Bagre blanquillo)
- ✍ *Plasgioscion surinamensis* (Pacora)
- ✍ *Hoplias malabaricus* (Moncholo)
- ✍ *Ageneiosus caucanus* (Doncella)
- ✍ *Pimelodus grosskopffi* (Comelón)
- ✍ *Leporinus muyscorum* (Capaz)
- ✍ *Saroterodom niloticum* (Mojarra lora).

## **2.2. Recolección y tratamiento previo de la muestra**

### **2.2.1. Sedimentos**

La obtención de sedimentos fue realizada empleando una draga tipo Ekman lanzada directamente desde ambos lados de una canoa o chalupa. En algunos casos la muestra fue recolectada por inmersión. Los sedimentos fueron colocados en bolsas plásticas cerrando las mismas con cuidado para evitar la presencia de burbujas de aire. Una vez rotuladas y almacenadas en hielo, las muestras fueron transportadas al laboratorio y secadas a una temperatura de 40 °C por 24 horas. El sedimento seco fue tamizado y la fracción menor a 63  $\mu\text{m}$  fue usada para el análisis (Daskalakis y O'Connor, 1995).

### **2.2.2. Peces**

La recolección de los peces fue realizada en forma conjunta con los pescadores locales, los cuales a su vez utilizaron diversas técnicas para la pesca. Por lo general, el bocachico es capturado con trasmallo y atarraya. Una forma tradicional de capturar el bagre en el sur de Sucre y Bolívar consiste en colocar una secuencia de anzuelos a lo largo de la ciénaga durante la noche y los mismos son revisados por la mañana. Una vez capturados, los especímenes fueron identificados, medidos y pesados. Luego colocados en bolsas plásticas y almacenados en hielo para su transporte al laboratorio. Las submuestras para el análisis fueron obtenidas empleando cuchillos plásticos a partir del músculo dorsal cortando aproximadamente de 5 a 20 gramos de cada espécimen, almacenándolas en frascos plásticos a una temperatura de  $-20^{\circ}\text{C}$  hasta su análisis.

### **2.2.3. Macrófitas**

Las macrófitas son plantas acuáticas que pueden o no ser flotantes. Una de las macrófitas de mayor abundancia en la cuenca del río Magdalena es la *Eichornia crassipes* (Buchón de Agua) y por ello fue la especie utilizada en los estudios. La recolección de las macrófitas fue realizada en forma manual. La parte de la planta utilizada para el análisis fue la raíz. Durante la recolección, las raíces de las plantas fueron lavadas con agua de la ciénaga varias veces antes de ser almacenadas en bolsas plásticas y transportadas al laboratorio en hielo. En el laboratorio las plantas fueron enjuagadas nuevamente con agua destilada y secadas al ambiente sobre papel absorbente antes del análisis.

#### **2.2.4. Cabello**

Las muestras de cabello fueron recolectadas de la región occipital cortando muy cerca al cuero cabelludo (Peixoto y Cernichiari, 1998), almacenadas en sobres de carta color blanco y mantenidas en un desecador hasta su análisis. En el laboratorio el cabello fue lavado con agua y detergente, luego enjuagado con agua destilada y secado al aire (Batista *et al.*, 1996).

#### **2.3. Digestión de las muestras**

En el proceso de digestión las muestras son solubilizadas y el mercurio es liberado de la matriz biológica o ambiental. Todas las muestras analizadas fueron digeridas utilizando una mezcla de ácidos nítrico y sulfúrico por un tiempo de tres horas a temperatura controlada entre 100-110 °C (Sadiq *et al.*, 1991).

#### **2.4. Análisis de mercurio**

El análisis de mercurio total fue realizado empleando espectroscopía de absorción atómica mediante la técnica de vapor frío descrita por Magos y Clarkson (1972). El método es basado en la conversión rápida de los compuestos oxidados de mercurio ( $\text{Hg}^{2+}$ ) a su forma volátil ( $\text{Hg}^0$ ) a través de la reducción con  $\text{SnCl}_2$ . El mercurio elemental formado en la mezcla es desplazado por burbujeo con aire y transportado en forma de vapor hasta la celda de absorción del equipo. La concentración del metal en la muestra es determinada empleando una curva de calibración.

#### **2.5. Control de calidad del método**

El análisis de muestras ambientales como pescado, sedimento, macrófitas y cabello implica la determinación de pequeñas concentraciones de

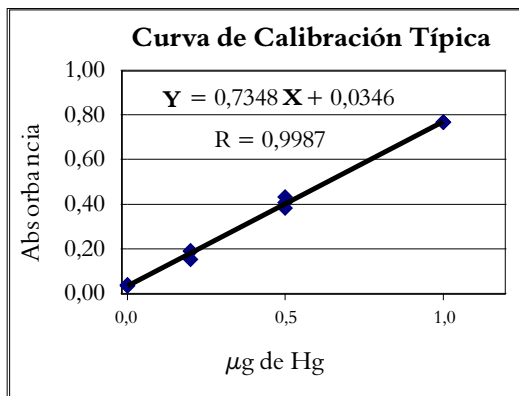
mercurio ( $\mu\text{g/g}$ ). La obtención de estos datos analíticos requiere el cumplimiento de ciertas condiciones para garantizar una alta confiabilidad de los resultados (Miller y Miller, 2000). Los criterios de control de calidad que debe poseer un procedimiento analítico son: linealidad, exactitud, precisión y límite de detección, entre los más usuales. A continuación analizaremos cada uno de ellos y su implicación en el proceso analítico.

**Linealidad.** Este parámetro permite establecer la proporcionalidad entre la concentración del analito (concentración de mercurio) y la señal registrada por el equipo de absorción atómica (absorbancia). Para determinar la cantidad de mercurio en una muestra es necesario construir una curva de calibración, que consiste en preparar una serie de diluciones de un estándar en un rango específico donde los datos guardan linealidad. Para estimar la mejor relación entre la señal medida y la concentración del analito, sobre una serie de estándares es aplicado el procedimiento matemático conocido como regresión lineal. La ecuación (2-1) obtenida en la regresión lineal es de la forma:

$$Y = a + bX \quad (2.1)$$

Donde Y es la señal del detector (absorbancia) y X es la cantidad o concentración del analito. Las constantes a y b son el intercepto sobre Y y la pendiente de la recta, respectivamente. Para estimar que tan bien los puntos experimentales son ajustados a una línea recta es calculado el coeficiente de correlación, R. El parámetro R toma valores en el rango  $-1 \leq R \leq +1$ . En la práctica analítica este valor de R debe ser mayor de 0.995 (figura 8).

$\mu\text{g de Hg}$	Absorbancia
0,0	0,0345
0,0	0,0352
0,0	0,0377
0,2	0,1514
0,2	0,1905
0,2	0,1877
0,5	0,3826
0,5	0,4329
0,5	0,4078
1,0	0,7666
1,0	0,7686
1,0	0,7676



**Figura 8.** Curva de calibración típica de un análisis de mercurio total por espectroscopía de absorción atómica usando el método de vapor frío.

**Exactitud:** Este indicador de calidad evalúa la capacidad del método analítico de dar resultados lo más próximos posibles al valor verdadero. Para tal efecto es necesario analizar muestras de un material de referencia o muestras certificadas, cuyos niveles de mercurio han sido previamente determinados en un estudio interlaboratorio. Tales estándares son disponibles de diferentes fuentes. En las investigaciones descritas en este texto ha sido utilizado el material certificado liofilizado de dogfish (*Squalus acanthias*) conocido como Dorm-2, suministrado por la National Research Council del Canadá (NRC), certificado con un valor de concentración de mercurio total de  $4.60 \mu\text{g Hg/g}$  (con un error estándar medio, SEM=0.15). La concentración de mercurio obtenida al analizar el material certificado Dorm-2 fue de  $4.298 \mu\text{g Hg/g}$  (con un error estándar medio, SEM= 0.08 ). Para establecer si el valor medio determinado para el material de referencia,  $\bar{x} = 4.298 \mu\text{g Hg/g}$ , es estadísticamente

significativa con respecto al valor certificado,  $\mu = 4.600 \mu\text{g Hg/g}$ , considerado como verdadero, fue empleado el estadístico t de student, el cual es calculado mediante la ecuación 2.2 y se denomina t experimental ( $t_{\text{exp}}$ ). Este valor es comparado con el t de las tablas,  $t_{\text{tablas}}$  o  $t_{\text{crítico}}$  para n-1 grados de libertad a un nivel de significancia escogido, generalmente  $P = 0.05$ . Si  $t_{\text{exp}} < t_{\text{tablas}}$  para  $P=0.05$  y n-1 grados de libertad, significa que ambos valores no son significativamente diferentes y que el método analítico tiene la exactitud requerida.

$$t_{\text{exp}} = \frac{|\bar{x} - \mu| \sqrt{n}}{s} \quad (2.2)$$

Para el ejemplo mostrado en la tabla 2, el valor de  $t_{\text{exp}}$  fue calculado con la ecuación 2.2 de la siguiente manera:

$$t_{\text{exp}} = \frac{|4.298 - 4.600| \sqrt{3}}{0.138} = 3.796$$

El  $t_{\text{tablas}}$  ( $P=0.05$ , grados de libertad =  $n-1 = 3-1 = 2$ ) = 4.303 es mayor que el  $t_{\text{exp}} = 3.796$ , lo cual indica que el método analítico es exacto, es decir que no hay evidencia de error sistemático entre el valor certificado y el determinado mediante el método usado.

Muestra	µg Hg/g	Promedio	S	CV	SEM	$\bar{X} \pm SEM^*$
201a	0,359	0,367	0,012	3,17	0,008	0.37 ± 0.01
201b	0,376					
204a	2,116	2,297	0,256	11,16	0,181	2.30 ± 0.18
204b	2,479					
208a	1,049	1,03	0,028	2,676	0,019	1.03 ± 0.02
208b	1,010					
215a	1,442	1,401	0,058	4,119	0,041	1.40 ± 0.04
215b	1,360					
Dorm-2a	4,139	4,298	0,138	3,205	0,080	4.30 ± 0.08
Dorm2-b	4,382					
Dorm2-c	4,373					

**Tabla 2.** Cálculos estadísticos para el análisis de mercurio en una serie de muestras de pescado y el material de referencia Dorm-2.

**Precisión:** Este criterio evalúa la dispersión de las medidas alrededor de la media, la cual corresponde al grado de concordancia entre los valores de una serie de ensayos repetidos sobre una misma muestra homogénea. Este parámetro puede ser calculado empleando el coeficiente de variación (CV). Cuando la precisión del análisis presentó un coeficiente de variación (CV) mayor del 20% en muestras por duplicado, el procedimiento analítico fue repetido (Shah *et al.*, 1992, 2000). El valor de CV es calculado a partir de la ecuación 2.3, donde s es la desviación estándar y  $\bar{x}$  el promedio obtenido para cada determinación por duplicado o triplicado.

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} 100 \quad (2.3)$$

Al final los resultados son reportados como la media  $\pm$  error estándar de la media ( $\bar{x} \pm \text{SEM}$ ). Donde SEM es una medida de la discrepancia entre la media de los datos y la media poblacional verdadera (la cual no puede ser conocida sin un número infinito de datos). La SEM es calculada empleando la ecuación 2.4, para un número de datos  $n$ . En la tabla 2 aparece un ejemplo del cálculo de precisión.

$$\text{SEM} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2.4)$$

En muchos trabajos científicos existe confusión entre la desviación estándar ( $s$ ) y el error estándar de la media SEM. La  $s$  cuantifica la dispersión entre una serie de valores. En cambio el SEM establece con cuanta exactitud es conocida la media del valor real o poblacional. El SEM genera un valor más pequeño a medida que el tamaño de la muestra es mayor, simplemente porque la media de un gran número de muestras es más cercano al valor de la media poblacional. En cambio  $s$  no cambia cuando se adquiere un número apreciable de datos. Por lo tanto reportar los datos con SEM ofrece más sentido en relación con la exactitud con que ha sido determinada la media.

**El límite de detección (LD):** Este parámetro es definido como tres veces la desviación estándar del blanco. Este valor es obtenido a partir de los valores determinados para 10 soluciones en las que no está presente el mercurio pero sí todos los reactivos empleados en el proceso de digestión y análisis del mismo. En nuestros análisis el límite de detección calculado fue de  $0.015 \mu\text{g Hg/g}$ . Concentraciones de analito por debajo de este nivel no pueden ser detectadas cuantitativamente, por lo cual son consideradas

como No Detectables (ND) ya que son confundidas con la señal de ruido del instrumento (Skoog *et al.*, 2001). La ecuación 2.5 muestra la fórmula para calcular el LD, donde  $\bar{Y}_B$  es la media de los valores de la concentración de 10 blancos y  $S_B$  la desviación estándar correspondiente.

$$LD = \bar{Y}_B + 3S_B \quad (2.5)$$

## 2.6. Tratamiento estadístico de los datos

El resultado del análisis para cada muestra es presentado como la media ( $\bar{X}$ )  $\pm$  error estándar (SEM) de las determinaciones por duplicado. Para evitar la pérdida de datos en el análisis estadístico, fueron involucradas aquellas muestras que presentaron concentraciones por debajo del límite de detección utilizando un valor igual a la mitad del mismo (Batzevich, 1995).

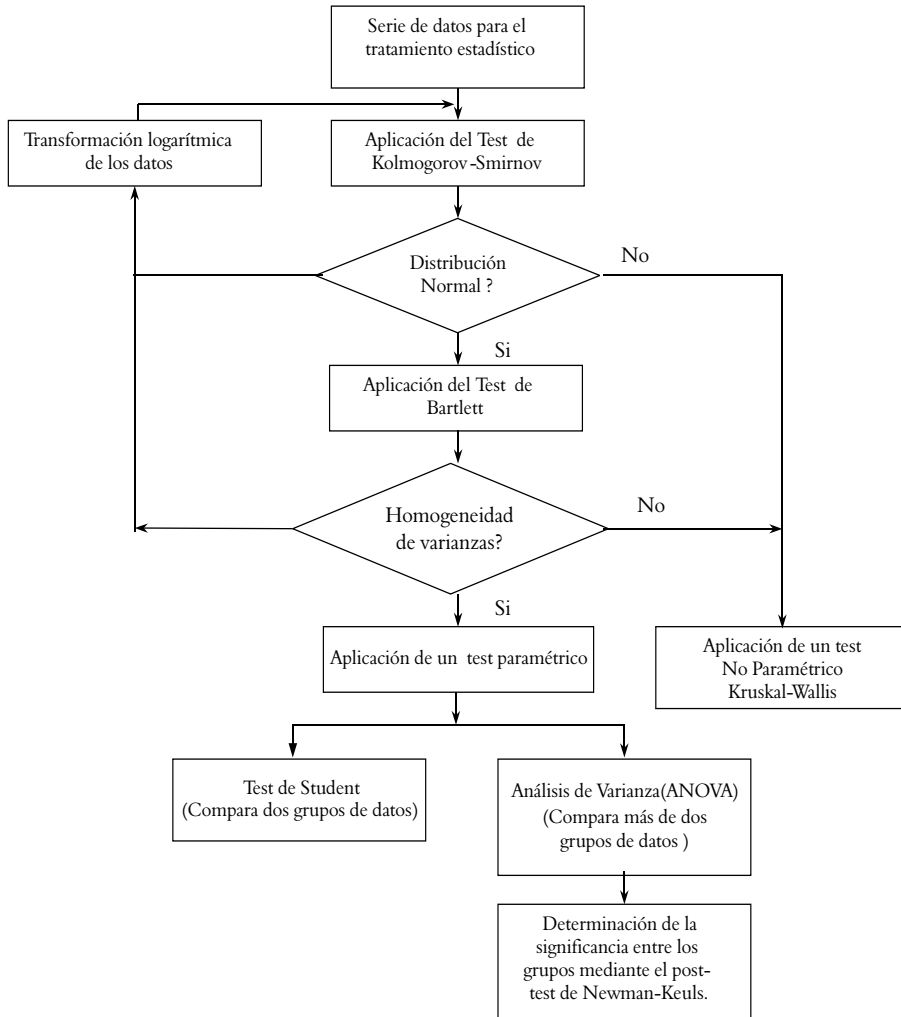
Para evaluar la existencia de diferencias significativas entre las concentraciones medias de mercurio de dos especies o estaciones de muestreo (grupos de datos) fue empleado el test de Student (t-student). De otra parte, para examinar la presencia de diferencias entre más de dos medias fue utilizado el Análisis de Varianza (ANOVA), el cual asume que los datos siguen una distribución normal y que las varianzas de las poblaciones son iguales. Por consiguiente, antes de realizar este análisis fue indispensable aplicar el test de normalidad de Kolmogorov-Smirnov y el test de homogeneidad de varianza de Bartlett. Cuando los datos no siguieron una distribución normal o no presentaron homogeneidad de varianza fue necesario ejecutar una transformación logarítmica. Si el test

de ANOVA arrojó diferencias estadísticamente significativas, fue empleado el post-test de Newman Keuls, el cual compara entre cada par de grupos de datos. En caso de no haber conseguido normalidad en la transformación de los datos fue necesario aplicar el test no paramétrico de Kruskal Wallis, el cual no presenta la restricción de normalidad, aunque es menos estricto. Este test compara la medianas entre los grupos. En el diagrama de flujo de la figura 9 aparece la secuencia lógica para establecer la presencia de diferencias estadísticamente significativas entre las medias de grupos de datos.

Para medir el grado de asociación entre dos variables fue utilizado el análisis de correlación simple. Mediante este análisis es estimado el coeficiente de correlación lineal R. Los valores de R oscilan entre -1 y +1. Entre más cercano el valor de R a -1 o 1, mayor será la corelación entre las dos variables. Para todos los análisis estadísticos el criterio de significancia fue establecido a  $P < 0.05$  (Walpole y Myers, 1992).

## **2.7. Recolección de información sobre la población**

Un cuestionario estándar fue utilizado para obtener información general sobre la comunidad de estudio empleando entrevistas personales (Kiesswetter *et al.*, 1997). Mediante este cuestionario fue posible obtener información demográfica, hábitos alimenticios, historia ocupacional, estilo de vida, educación y posibles síntomas neurológicos de intoxicación con mercurio entre los individuos de la muestra.



**Figura 9.** Diagrama de flujo de los procedimientos estadísticos aplicados para determinar diferencias significativas entre medias de grupos de datos.

## Capítulo Tres

# Mercurio en Peces del Canal del Dique

*Jesús Olivero, Víctor Navas, Angel Pérez,  
Beatriz Solano, Isabel Acosta, Eduardo Argüello,  
Rubén Salas y Boris Johnson*

### 3.1. Introducción

**E**l Canal del Dique está localizado al norte del Departamento de Bolívar ( $10^{\circ}00'-10^{\circ}23'N$  y  $74^{\circ}27'-75^{\circ}18'O$ ), aproximadamente a 300 km de distancia de la zona minera del sur de Bolívar. Este cuerpo de agua comunica al río Magdalena con la Bahía de Cartagena. Posee una longitud total de 114.5 km, una profundidad mínima de 2.5 m, un caudal aproximado de  $115 \text{ m}^3$  por segundo y descarga en la bahía 1836 toneladas métricas de sólidos suspendidos por día. La población ribereña fundamenta su sustento en la pesca y la agricultura. El objetivo de este estudio consistió en

evaluar los niveles de mercurio en peces adquiridos a lo largo del Canal del Dique, despensa pesquera y fuente de agua para gran parte del norte del Departamento de Bolívar.

### 3.2. Resultados

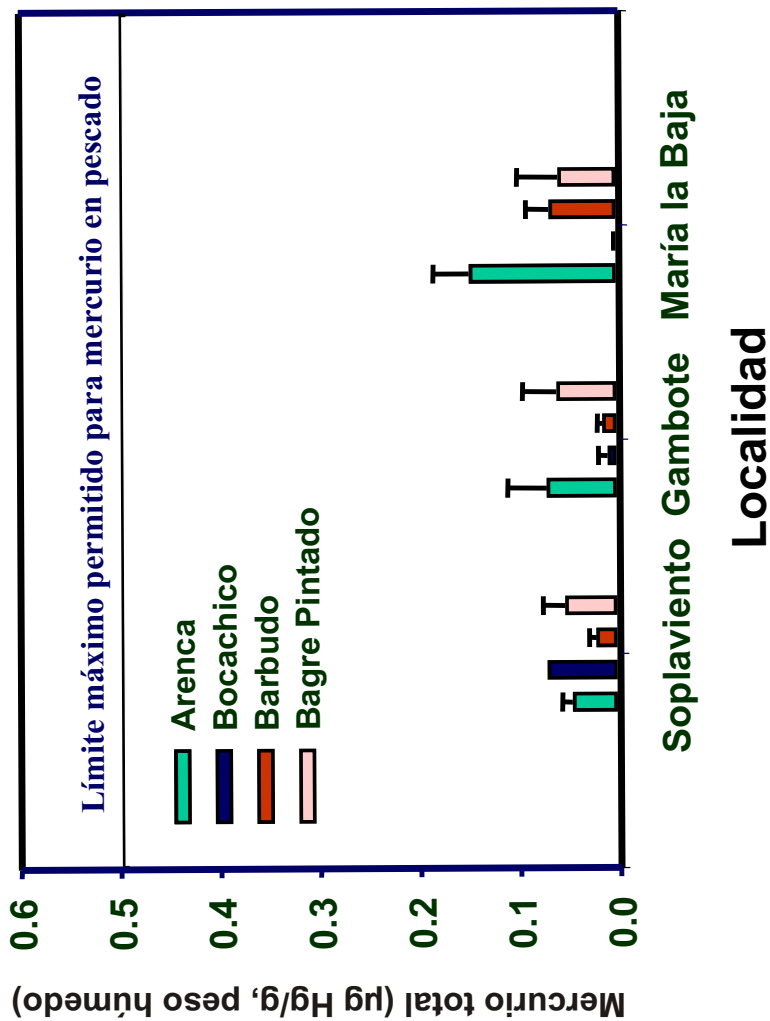
Cuatro especies de peces, bocachico, arenca, barbudo y bagre pintado fueron obtenidos directamente de los pescadores en tres localidades a lo largo del Canal del Dique: Soplaviento, Gambote y María la Baja, durante junio de 1995 y febrero de 1996.

En la figura 10 aparece la distribución de la concentración de mercurio en las especies estudiadas obtenidas para cada localidad. Las concentraciones medias de este metal en músculo aumentaron en el siguiente orden: bocachico < barbudo < bagre < arenca. Las concentraciones medias de mercurio en todas las muestras oscilaron entre 0.074 y 0.219  $\mu\text{g Hg/g}$  en peso húmedo. De acuerdo con el análisis de varianza ( $P < 0.05$ ) la concentración media de este elemento resultó ser diferente entre las especies estudiadas. En forma similar, fueron observadas diferencias estadísticas entre las concentraciones de mercurio total en músculo para arenca y barbudo capturados en María la Baja en relación con las mismas especies en otras localidades. Por su parte, el test de Newman Keuls ( $P = 0.01$ ) reveló que al comparar entre dos especies, la concentración de mercurio en músculo difiere significativamente excepto para el par bagre pintado - barbudo. El análisis de correlación no mostró asociaciones significativas entre el nivel de mercurio en músculo y la longitud de los peces pertenecientes a las diferentes especies, con excepción del barbudo ( $R = -0.401, P = 0.047, n = 25$ ).

### 3.3. Discusión

Las concentraciones de mercurio encontradas en peces del Canal de Dique fueron ostensiblemente menores a las reportadas para especies relacionadas presentes en ríos de otros países tales como el Gallego y el Cinca en España (Raldúa y Pedrocchi, 1996) y el río Tapajos en Brasil (Malm *et al.*, 1995), pero similares a las encontradas en pescados colectados en Bangladesh (Holsbeek *et al.*, 1997).

Un aspecto importante de los resultados expuestos es que las concentraciones más altas de mercurio en músculo fueron halladas en la arenca, una especie detritívora-zooplanctónica cuyo hábitat lo constituye fundamentalmente el sedimento. Aunque los mecanismos de bioacumulación de mercurio para la arenca no son conocidos, es probable que el permanente contacto con el sedimento asociado con trazas de mercurio sea una de las causas del fenómeno. De igual forma sobresale el hecho que las concentraciones de mercurio en arenca y barbudo obtenidos en María la Baja, la estación de muestreo más cercana a la bahía de Cartagena, sean más altas que las encontradas para las mismas especies en las otras localidades. Aquí es posible establecer dos hipótesis. La primera es que a diferencia de las otras ciénagas, la de María la Baja recibe mayor deposición directa de sedimentos del Canal del Dique lo cual podría incrementar la concentración de mercurio en las especies por bioacumulación. De otra parte, es factible que parte del mercurio de la Bahía de Cartagena sea transportado hasta esta ciénaga tanto por deposición atmosférica seca como húmeda durante algunas épocas del año, ocasionando la incorporación del metal en este ecosistema hídrico. Ambas hipótesis merecen un estudio detallado.



**Figura 10.** Niveles de mercurio en músculo de cuatro especies de pescados provenientes del Canal del Dique

La ausencia de correlación entre la longitud de los peces y el contenido de mercurio en músculo de los mismos ha sido reportado para varias especies (Jackson, 1991). La existencia de una correlación negativa entre las concentraciones de mercurio en tejido muscular y la longitud del barbudo puede sugerir que este metal podría afectar la capacidad metabólica, la habilidad depredadora o simplemente el apetito del pez. En cualquier caso, una nueva puerta de investigación queda abierta al respecto.

De acuerdo con Hakansson (1984), concentraciones de mercurio superiores a  $0.075 \mu\text{g Hg/g}$  en especies acuáticas pueden ser atribuidos a actividades de tipo antropogénico. Aunque las concentraciones de mercurio detectadas en la arenca superan estos niveles, no alcanzan a ser lo suficientemente altos para sobrepasar los límites internacionales vigentes de  $0.5 \mu\text{g Hg/g}$  en peces para consumo humano (WHO, 1990). No obstante, considerando que la arenca posee un peso promedio de  $94.5 \text{ g}$  ( $n=28$ ) y la concentración media de mercurio encontrada en esta especie en María la Baja fue de  $0.150 \mu\text{g Hg/g}$ , el consumo diario de tres arencas representa una ingestión total de  $297.7 \mu\text{g Hg/semana}$ , valor muy cercano al límite provisional propuesto para consumo tolerable semanal de mercurio de  $300 \mu\text{g}$  (Galal, 1993). Lo anterior supone que existe un riesgo potencial de acumulación de mercurio en personas que como mínimo consumen tres arencas por día (Olivero *et al.*, 1997). El problema no sería dramático si la arenca fuese una especie de bajo consumo en el Canal del Dique. Por el contrario, esta especie es una de las más apetecidas por la comunidad ribereña dada su abundancia y facilidad de pesca.

Otro punto sobresaliente de esta investigación fueron los bajos niveles de mercurio encontrados en el bocachico. Esta especie, la de mayor importancia comercial en Colombia, debe ser preservada para garantizar un mínimo de probabilidades de acumulación de mercurio en aquellas personas cuya única fuente de proteínas la constituyen los peces provenientes de nuestros ríos.

## Capítulo Cuatro

# Mercurio en peces de las Ciénagas del sur de Bolívar (Grande de Achí y Simití) y Canal del Dique (Capote)

*Jesús Olivero, Beatriz Solano, Isabel Acosta y Boris Johnson*

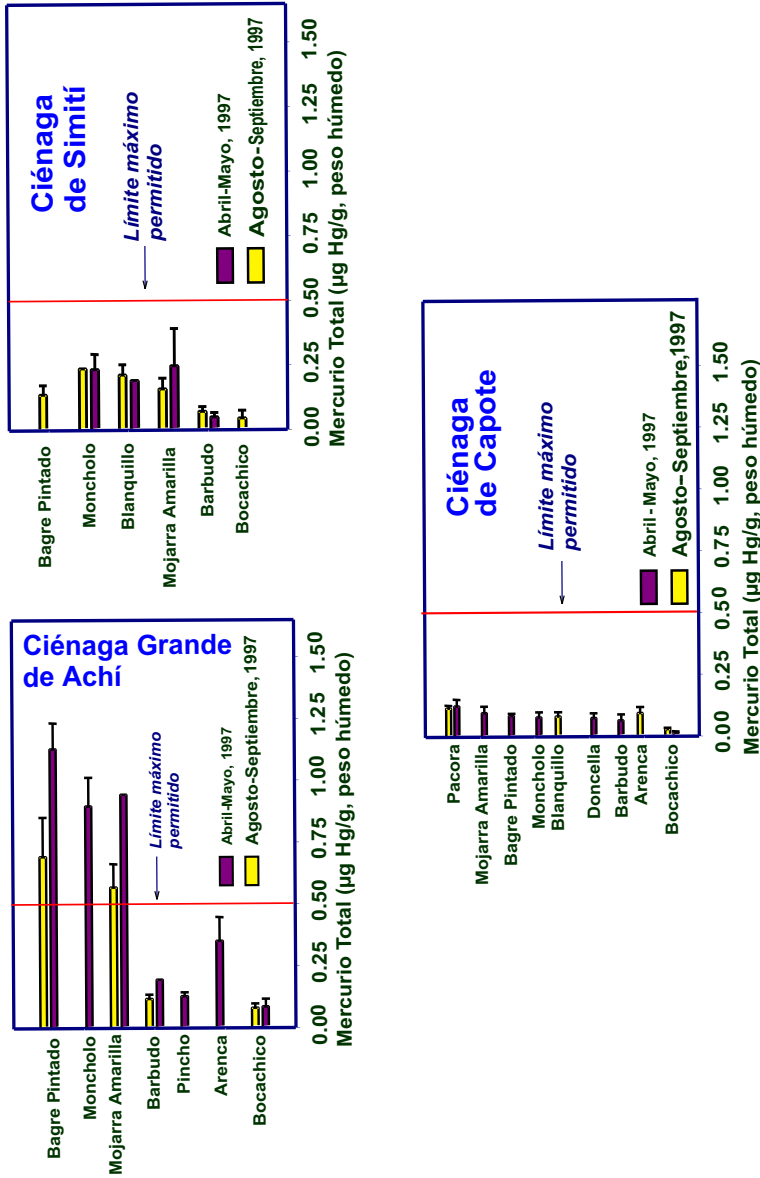
### 4.1. Introducción

La serranía de San Lucas constituye una de las reservas mineras y forestales de mayor importancia en Colombia. No obstante lo anterior, no existen políticas ni programas adecuados para garantizar su desarrollo sostenible. La serranía aporta aguas a las ciénagas que a su vez se constituyen en despensas pesqueras para toda la costa norte y gran parte del centro del país. Dos de estas ciénagas son la Grande de Achí y la de Simití. La ciénaga Grande de Achí (8°19'-

8°23' N y 74°28'-74°36' O) está ubicada en la cuenca del río Caribona, subcuenca del río Cauca. Esta zona del sur de Bolívar es una de las de mayor explotación aurífera en Colombia. En esta región, la minería del oro predominante es la de aluvión y es realizada empleando maquinaria pesada que remueve gran cantidad de material rocoso incorporándolo a los ecosistemas circundantes. La ciénaga de Simití (7°56'-8°1'N y 73°55'-73°58'O) está localizada al oriente de la serranía de San Lucas, sobre el río Magdalena. Esta ciénaga aunque no posee actividad minera en los alrededores cercanos, es alimentada por algunas quebradas que reciben vertimientos de minería en la parte alta de la serranía. Con el objeto de establecer el impacto de la exploración aurífera de la serranía de San Lucas en estas dos ciénagas fue realizado un monitoreo de los niveles de mercurio en los peces de estos cuerpos de agua. Para efectos de comparación, el estudio incluyó el análisis de muestras de la ciénaga de Capote (10°18'-10°23' N y 75°5'-75°9'O) en el municipio de Soplaviento, departamento de Bolívar, aproximadamente 300 km al norte de la zona minera del sur de Bolívar.

## **4.2. Resultados**

Las concentraciones de mercurio en varias especies de peces, recolectados entre abril-mayo y agosto de 1997, en las ciénagas en estudio aparecen en la figura 11. Las variaciones en las concentraciones de mercurio en músculo entre las diferentes especies de peces fueron más pronunciadas en la ciénaga Grande de Achí, siendo el bocachico y la doncella las especies con las concentraciones más bajas y altas, respectivamente. En este cuerpo de agua las especies mojarra amarilla, moncholo y doncella



**Figura 11.** Mercurio en especies de peces de ciénagas del Sur de Bolívar (Grande de Achi y Simití) y del Canal del Dique (Capote).

presentaron concentraciones de mercurio superiores a  $0.5 \mu\text{g Hg/g}$ , límite máximo internacionalmente aceptado en pescado para consumo humano (WHO, 1990). Análisis de varianza reveló que existen diferencias significativas ( $P < 0.001$ ) entre las concentraciones de mercurio para las especies de diferente nivel trófico. En términos estacionales sólo la doncella presentó diferencias significativas en el contenido de mercurio durante los dos períodos de muestreo.

Las especies de peces analizadas en la ciénaga Simití presentaron concentraciones de mercurio inferiores a las observadas en ciénaga Grande de Achí. No obstante, algunas especies mostraron valores promedio cercanos al límite máximo internacional permitido. En términos comparativos no se observaron diferencias estacionales en el contenido de mercurio para las especies monitoreadas ( $P = 0.228$ ), pero si hubo diferencias significativas entre el contenido de mercurio observado para los carnívoros, como el blanquillo y el moncholo, con respecto al bocachico durante el segundo período de muestreo.

Las concentraciones de mercurio más bajas para las diferentes especies fueron detectadas en la ciénaga Control, la ciénaga de Capote, en el Canal del Dique. Los valores más altos de mercurio fueron encontrados en la pacora, la cual ostentó diferencias muy significativas ( $P < 0.001$ ) en su valor promedio comparado con el bocachico.

De acuerdo con la información anterior, los niveles de mercurio incrementaron en el siguiente orden: ciénaga de Capote < ciénaga de Simití < ciénaga Grande de Achí. Esta relación está asociada en forma

directa con el impacto de la minería del oro en cada cuerpo de agua.

El análisis de correlación reveló que para el primer período de muestreo, existió una gran asociación entre el contenido de mercurio en músculo del bocachico con su longitud ( $R=0.995$ ,  $P<0.001$ ) y su peso ( $R=0.984$ ,  $P=0.002$ ).

### **4.3. Discusión**

Los datos de mercurio en las especies carnívoras presentes en la ciénaga Grande de Achí son similares a los reportados para diferentes zonas mineras de Brasil en donde la minería del oro ha generado un gran impacto ambiental (Palheta y Taylor, 1995; Nriagu *et al.*, 1992; Boshio y Henshel, 1996; Bidone *et al.*, 1997). Es de importancia resaltar que la concentración promedio de mercurio observada en el moncholo de esta ciénaga es aproximadamente 50% superior a la encontrada en la misma especie en el campo de minería aurífera de Gurupi, Brasil (Palheta y Taylor, 1995).

A pesar de que los niveles de mercurio encontrados en peces de la ciénaga Simití resultaron menores a los de la ciénaga Grande de Achí, fueron evidentes las diferencias entre las especies carnívoras y las fitoplanctónicas, lo cual sugiere que en ambas ciénagas el mercurio está siendo biomagnificado en la cadena trófica.

La alta correlación observada entre el contenido de mercurio y la longitud del bocachico podría presumir la existencia de un proceso de bioacumulación directa del metal en la ciénaga Grande de Achí en verano.

No obstante, esta premisa debe ser analizada con mayor cuidado dado que el número de muestras empleadas en el análisis fue bajo ( $n=5$ ).

En virtud de la relativamente baja concentración de mercurio observada en el bocachico para todas las ciénagas estudiadas, en particular en la ciénaga Grande de Achí, altamente contaminada, es de urgente necesidad el considerar esta especie como un verdadero patrimonio ambiental y comprometernos con su protección y explotación sostenida.

El hecho de que el bocachico y otras especies de peces de la ciénaga Grande de Achí presenten niveles relativamente bajos de mercurio, no debe significar que su consumo es totalmente inocuo a la salud de los habitantes que utilizan esta especie como fuente de proteína en la dieta. Ha sido demostrado, que aún a bajas concentraciones, el mercurio puede conducir a neurotoxicidad (Cranmer *et al.*, 1996; Lebel *et al.*, 1996, 1998). El problema aparece entonces en la fuente de alimentos para las decenas de pescadores de esta ciénaga y sus familias, las cuales están en grave riesgo de intoxicación mercurial por su posición en lo más alto de la cadena trófica. La ciénaga constituye su mayor fortaleza de vida al proveerlos de proteína, pero también puede ser el principio del fin para la comunidad.

## Capítulo Cinco

# Las ciénagas del Bajo Magdalena reciben el impacto de la contaminación del sur de Bolívar

*Boris Johnson, Jesús Olivero, Beatriz Solano, Claudia Mendoza,  
Rafael Olivero, Eduardo Argüello, Johnny Meléndez, Braulio Acuña,  
Héctor Rocha, Ricardo Vivas y Giovanni Montero*

### 5.1. Introducción

**E**l bajo Magdalena es la zona correspondiente a la llanura del Caribe, donde le tributan al río Magdalena tres subcuencas principales: río Cauca, río San Jorge y río Cesar. Está enmarcado en los departamentos de Bolívar, Sucre, Cesar, Magdalena y Atlántico, con aproximadamente 325 mil hectáreas en espejo de agua correspondientes a ciénagas y humedales

ubicados a lado y lado de la llanura aluvial del río Magdalena. En Bolívar, el bajo Magdalena comprende la franja del río localizada entre los municipios de Río Viejo y Calamar, incluyendo el Canal del Dique.

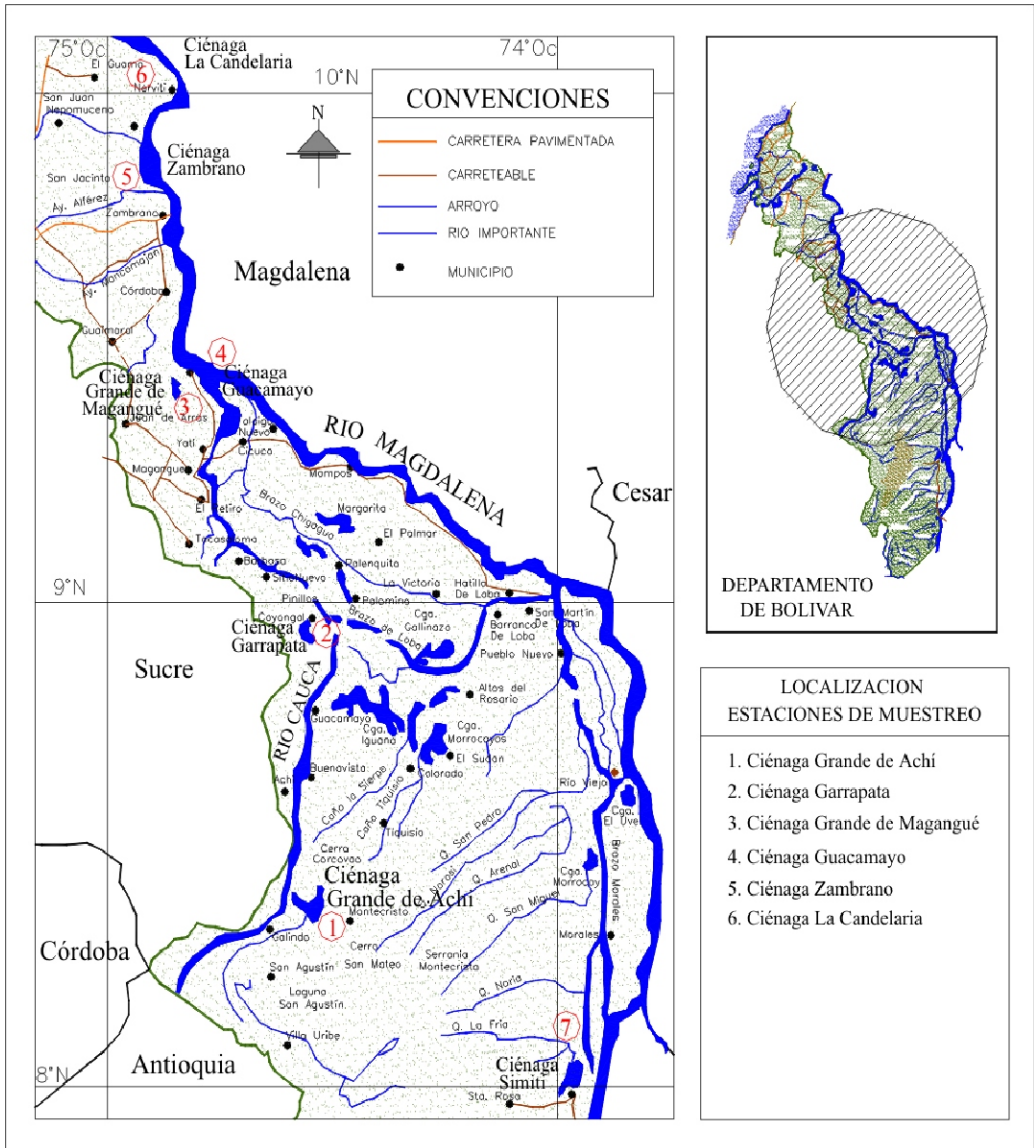
La extensiva explotación aurífera en el sur de Bolívar y la importancia del bajo Magdalena como despensa pesquera para la región Caribe colombiana, hacen necesario establecer el impacto de la minería del oro a lo largo de los cuerpos de agua por los cuales es transportada la contaminación hasta el mar. Por lo anterior, el objetivo de esta investigación consistió en determinar la extensión de la contaminación con mercurio en peces de ciénagas del sur de Bolívar, bajo Magdalena y Cauca. Las estaciones de muestreo (ciénagas) fueron escogidas teniendo en cuenta su importancia comercial y mayor diversidad de especies. Estas ciénagas sirven como cubeta de derrame de los ríos en época de invierno permitiendo el desarrollo del ciclo reproductivo de los peces.

Las estaciones de monitoreo en el departamento de Bolívar y su respectiva posición geográfica son mostradas en la tabla 3, figuras 12 y 13, respectivamente. La recolección de los peces fue realizada entre agosto de 1997 y abril de 1998, cubriendo la época de lluvias y la época seca.

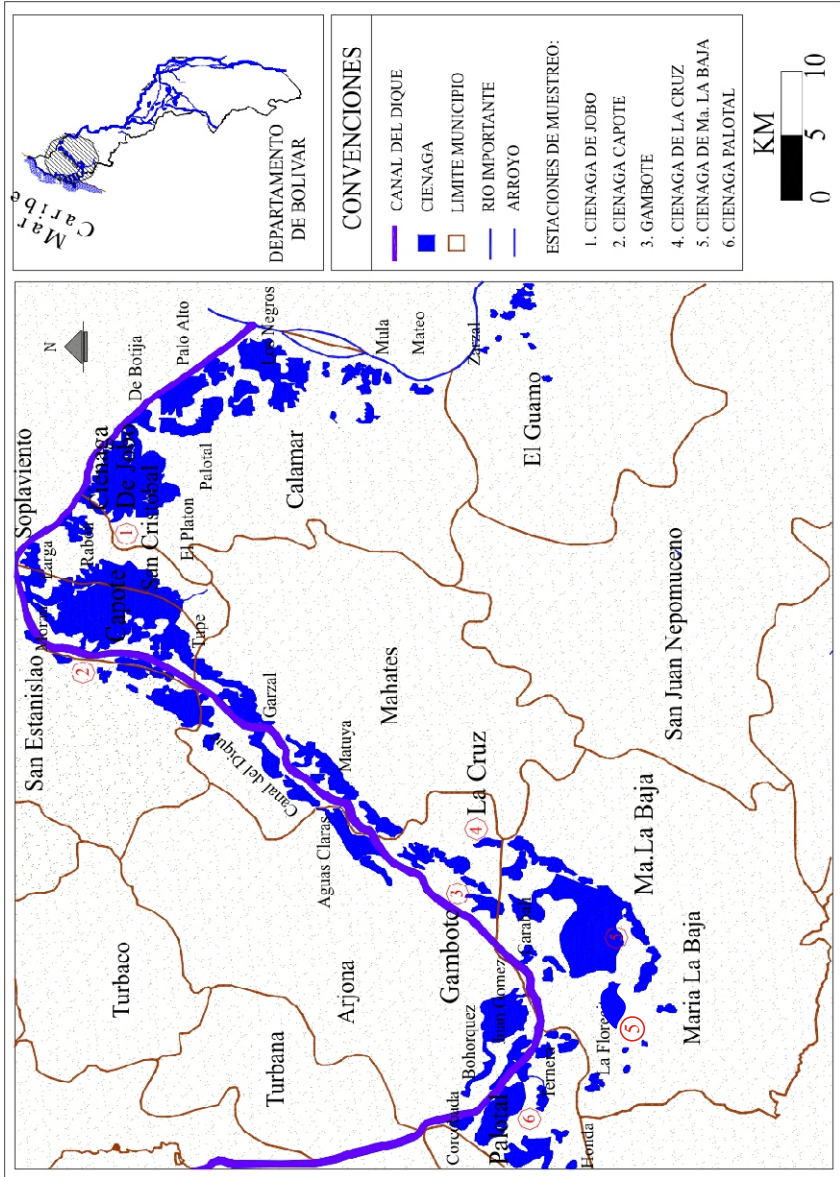
De acuerdo con registros estadísticos, en la región han sido definidos tres períodos climáticos con base en el régimen de lluvias. La época de lluvia (invierno) abarca de agosto a noviembre con una precipitación mensual superior a 120 mm. Por su parte, la época seca (verano) cubre de diciembre a abril y la pluviometría no supera los 60 mm. También existe la época de transición, la cual transcurre de mayo a julio con valores entre 60 a 120 mm y corresponde a una interfase entre la estación seca y la húmeda.

<b>Cuenca</b>	<b>Estaciones de Muestreo</b>	<b>Municipio</b>	<b>Localización Geográfica</b>
<b>Río Cauca</b>	Ciénaga Grande	Achí	Lat. 8°19' - 8°23'N - Long. 74°28' - 74°36' O
	Ciénaga Garrapata	Magangué	Lat. 8°51' - 8°52'N - Long. 74°33' - 74°34' O
	Ciénaga Grande	Magangué	Lat. 9°13' - 9°16'N - Long. 74°46' - 74°48' O
<b>Río Magdalena</b>	Ciénaga Guacamayo	Talagua Nuevo	Lat. 9°19' - 9°28'N - Long. 74°41' - 74°46' O
	Ciénaga Zambrano	Zambrano	Lat. 9°46' - 9°48'N - Long. 74°50' - 74°52' O
<b>Canal Del Dique</b>	Ciénaga la Candelaria	El Guamo	Lat. 10°03' - 9°57'N - Long. 74°49' - 74°51' O
	Ciénaga Jobo	Calamar	Lat. 10°19' - 10°22'N - Long. 74°58' - 75°05' O
	Ciénaga Capote	Soplaviento	Lat. 10°19' - 10°23'N - Long. 75°07' - 75°10' O
	Ciénaga La Cruz	Arjona	Lat. 10°07' - 10°08'N - Long. 75°20' - 75°21' O
	Ciénaga María La Baja	María La Baja	Lat. 10°03' - 10°07'N - Long. 75°20' - 75°24' O
	Ciénaga Palotal	Arjona	Lat. 10°06' - 10°08'N - Long. 75°20' - 75°42' O

**Tabla 3.** Localización geográfica de las estaciones de muestreo en el bajo Magdalena.



**Figura 12.** Estaciones de muestreo en la cuenca del bajo Magdalena (sur departamento de Bolívar).



**Figura 13.** Estaciones de muestreo en el Canal del Dique.

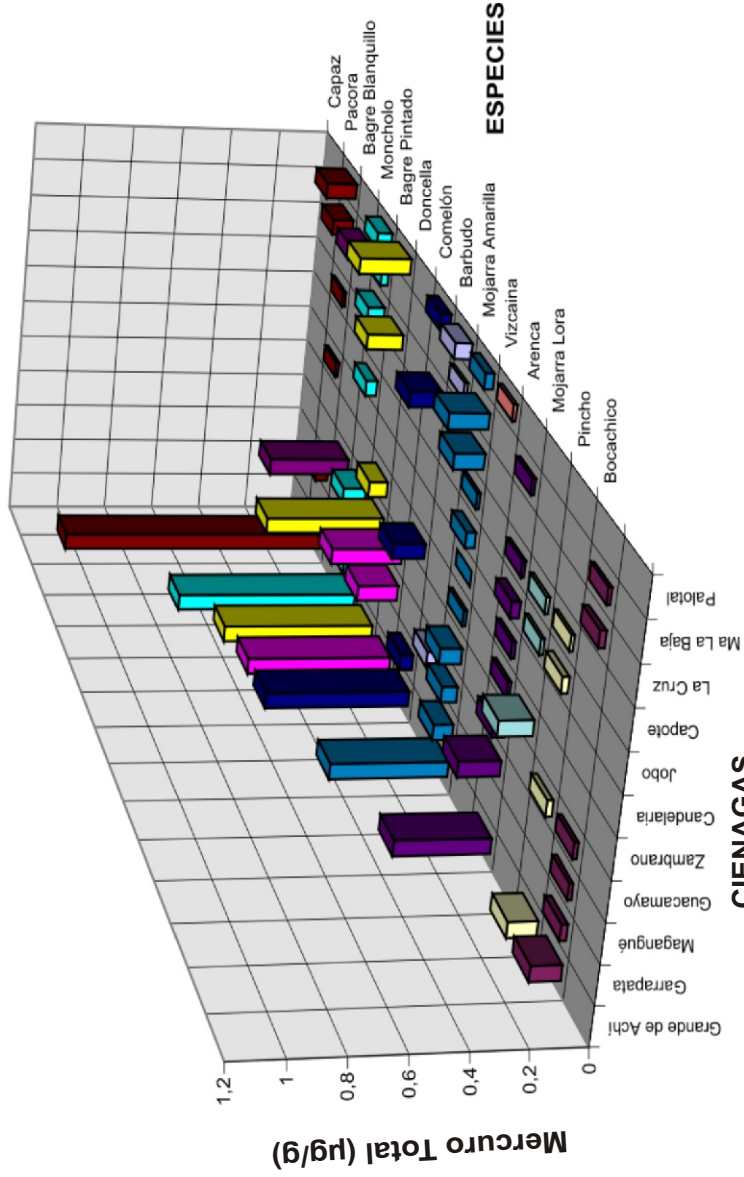
Los datos del régimen de lluvias fueron suministrados por el IDEAM para el año 1997 y 1998, teniendo en cuenta las estaciones meteorológicas más cercanas a cada ciénaga. Para este estudio fueron realizados dos muestreos: el primero en época de lluvias (agosto de 1997) y el segundo en época seca (abril de 1998).

## 5.2. Resultados

En las figuras 14 y 15 aparecen los gráficos de barras tridimensionales de las concentraciones medias de mercurio total de todas las especies analizadas en cada una de las estaciones de muestreo para las épocas lluviosa y seca, respectivamente. Las ciénagas fueron ordenadas de acuerdo con la distancia a los focos de contaminación (sur de Bolívar y norte de Antioquia). Las determinaciones de mercurio total fueron realizadas en el músculo dorsal de 606 especímenes pertenecientes a 11 géneros, las cuales difieren en su posición en la cadena alimenticia. Todas estas especies son de interés comercial y consumidas por la población local.

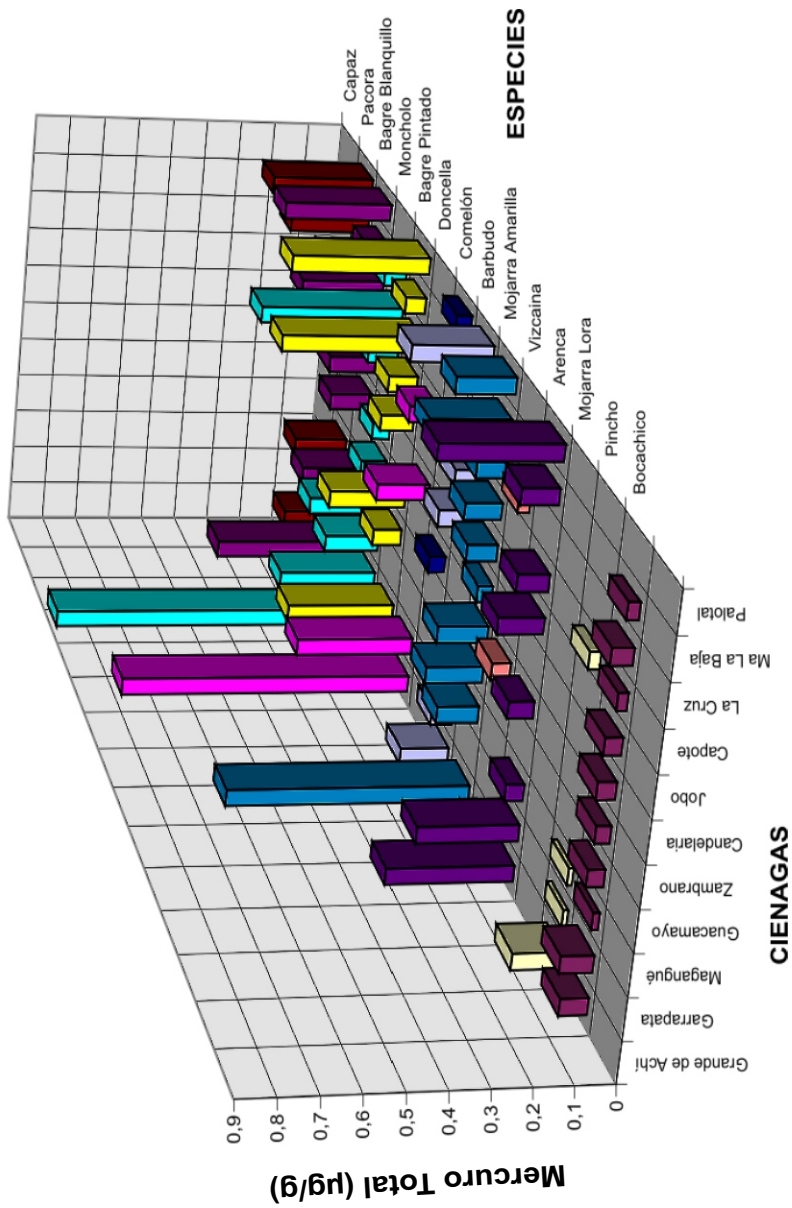
Para el bajo Magdalena, la distribución del mercurio en los peces durante las épocas de lluvia y seca depende de la posición de la especie en los niveles tróficos. Para una misma especie fueron detectadas diferencias significativas de acuerdo con el período de muestreo ( $P < 0.01$ ). Bajas concentraciones de mercurio fueron halladas en los peces fitoplanctónicos en un rango de 0.015-0.110  $\mu\text{g Hg/g}$  (promedio de 0.045  $\mu\text{g Hg/g}$ ), seguido por los peces detritívoros en un rango de 0.013-0.550  $\mu\text{g Hg/g}$  (promedio 0.12  $\mu\text{g Hg/g}$ ). Las concentraciones más altas fueron observadas en peces carnívoros en un rango de 0.030-1.060  $\mu\text{g Hg/g}$  (promedio de 0.24  $\mu\text{g Hg/g}$ ), indicando que algunas especies exceden el

# EPOCA SECA



**Figura 14.** Niveles de mercurio en peces de ciénagas del sur de Bolívar, bajo Magdalena y Canal del Dique durante la época seca.

# EPOCA DE LLUVIA



**Figura 15.** Niveles de mercurio en peces de ciénagas del sur de Bolívar, bajo Magdalena y Canal del Dique durante la época de lluvias

límite internacionalmente aceptado como seguro para ser consumidos por el hombre ( $0.5 \mu\text{g Hg/g}$ ; WHO, 1990). Las concentraciones medias de mercurio en las especies pertenecientes a diferentes niveles tróficos en la ciénaga Grande de Achí muestran diferencias estadísticas significativas marcadas tanto en época de verano como en época de invierno ( $P < 0.001$ ).

### **5.3. Discusión**

El incremento en las concentraciones de mercurio al aumentar el nivel trófico de las especies analizadas sugiere la presencia del fenómeno de biomagnificación en las ciénagas Grande de Achí, Garrapata, Palotal y la Cruz, aunque en menor grado en las otras ciénagas. Las especies con mayor capacidad de acumulación de mercurio son las carnívoras tales como moncholo, doncella, mojarra amarilla, pacora, bagre blanquillo y bagre pintado. El consumo diario de estas especies debe ser minimizado para disminuir el riesgo de intoxicación mercurial. Por su parte, el bocachico y el pincho fueron las especies que mostraron las concentraciones más bajas de mercurio total en cada una de las estaciones de muestreo lo cual se encuentra en concordancia con los hábitos alimenticios de estos pescados, como son fitoplanctónico y detritívoro, respectivamente.

Los valores más altos de mercurio en peces fueron detectados en la ciénaga Grande de Achí y Garrapata, cerca de la población de Montecristo. En esta zona, la explotación artesanal del oro es intensa, en particular en la cuenca del río Caribona. Allí la minería del oro es predominantemente de aluvión y es realizada con maquinaria pesada aportando en forma directa cantidades considerables de mercurio a los ecosistemas circundantes. Los

niveles altos de mercurio encontrados en la ciénaga Grande de Achí habían sido observados en una muestra anterior (Olivero *et al.*, 1998), el cual ha sido discutido en el capítulo 3. Esto evidencia la persistencia de la contaminación en esta ciénaga.

El muestreo realizado a principios de abril corresponde prácticamente al final de la época seca. En este período de tiempo sucede la migración de los peces conocida como bajanza, en la cual las primeras lluvias permiten que el río vierta sus aguas a la ciénaga con alevinos y peces pequeños. El esfuerzo pesquero en las ciénagas en la época de verano es grande y los peces no alcanzan sus máximas tallas. Lo anterior, sumado a la poca disponibilidad de sólidos suspendidos en las aguas, puede explicar el porqué los niveles de mercurio en peces durante la época de lluvias es mayor que en la seca.

Un aspecto de capital importancia en la minería artesanal del oro no es sólo el impacto producido por la liberación de mercurio a los ecosistemas y su posible acumulación en los seres vivos, sino también la disposición directa de cianuro que causa un ataque letal inmediato a la biota reduciendo en forma considerable la diversidad biológica (Tarras-Wahlberg *et al.*, 2001). De la misma manera, la incorporación masiva de sedimentos en las ciénagas puede secarlas rápidamente causando la extinción por desaparición del hábitat.

Las concentraciones relativamente altas de mercurio encontradas en peces recolectados en las ciénagas río abajo a la zona minera, puede tener su origen no sólo en el transporte acuático de mercurio asociado con los sedimentos y la materia orgánica, sino en la deposición atmosférica del

mercurio generada durante el proceso de extracción artesanal del oro en las zonas mineras del sur de Bolívar y norte de Antioquia.

Las ciénagas de Palotal y la Cruz ubicadas en el Canal del Dique presentan valores relativamente altos aunque están bastante alejadas del foco de contaminación de la explotación minera como fue señalado anteriormente. Esto hace pensar que muy posiblemente debe existir otra fuente de contaminación de mercurio cercano a estos cuerpos de agua. Una hipótesis razonable y que ya fue discutida en el capítulo 3 está asociada con la deposición atmosférica de mercurio proveniente de la bahía de Cartagena, en particular de los sedimentos altamente contaminados con mercurio proveniente de la extinta planta de Alcalis de Colombia (Alonso *et al.*, 2000), forma volátil de este metal dispuesta como residuo durante el funcionamiento de esta industria varios años atrás.



## Capítulo Seis

# Niveles de Mercurio en muestras ambientales y de cabello en habitantes del sur de Sucre

*Jesús Olivero, Boris Johnson, Claudia Mendoza, Rafael Olivero, Roberto Hurtado, Ramón Paz, Ana Gutiérrez y Adolfo Consuegra*

### 6.1. Introducción

**E**l análisis de mercurio en cabello de personas y en muestras ambientales, particularmente en el pescado, ayuda a establecer los riesgos de intoxicación mercurial a la que está expuesta la población (WHO, 1990). El objetivo de este trabajo fue determinar la concentración de mercurio total en cabello de habitantes de Caimito (Sucre) y de los peces, sedimentos y macrófitas presentes en los cuerpos de agua que rodean este municipio (8°46'-8°48'-N y 75°6'-75°8'O), sobre la cuenca del río San Jorge, en el sur del

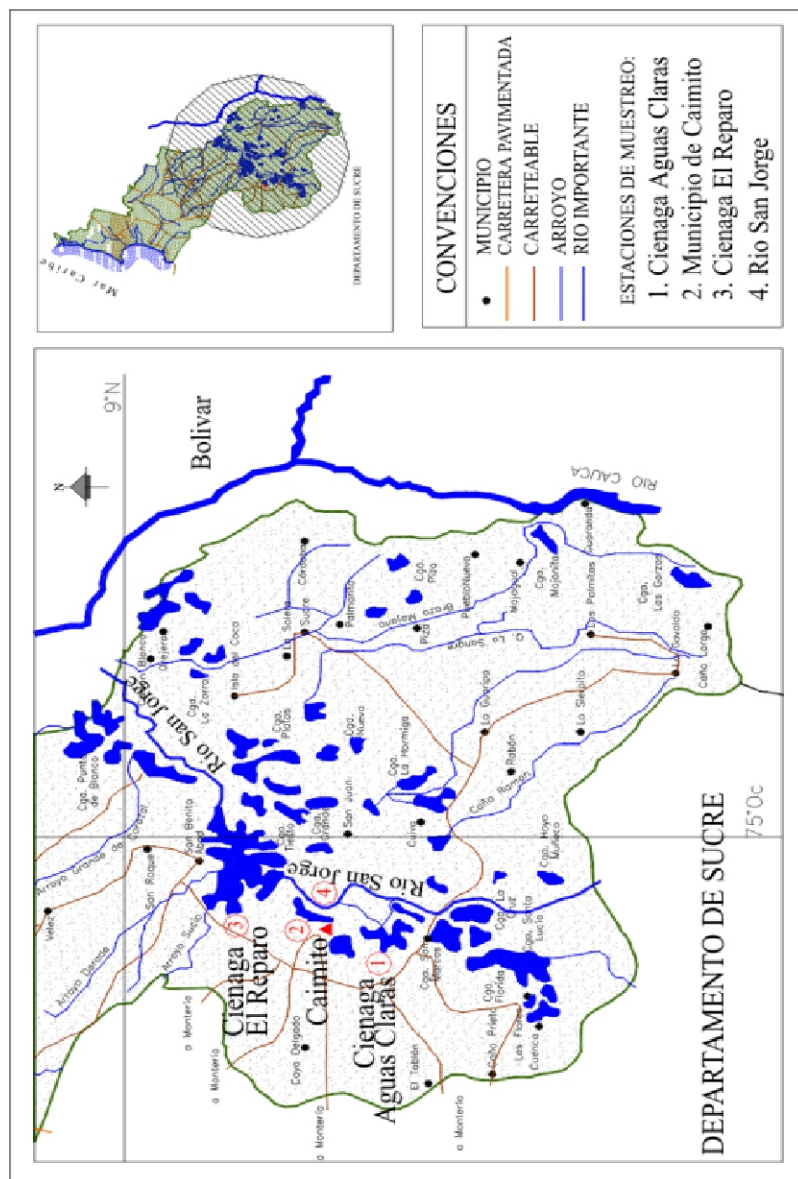
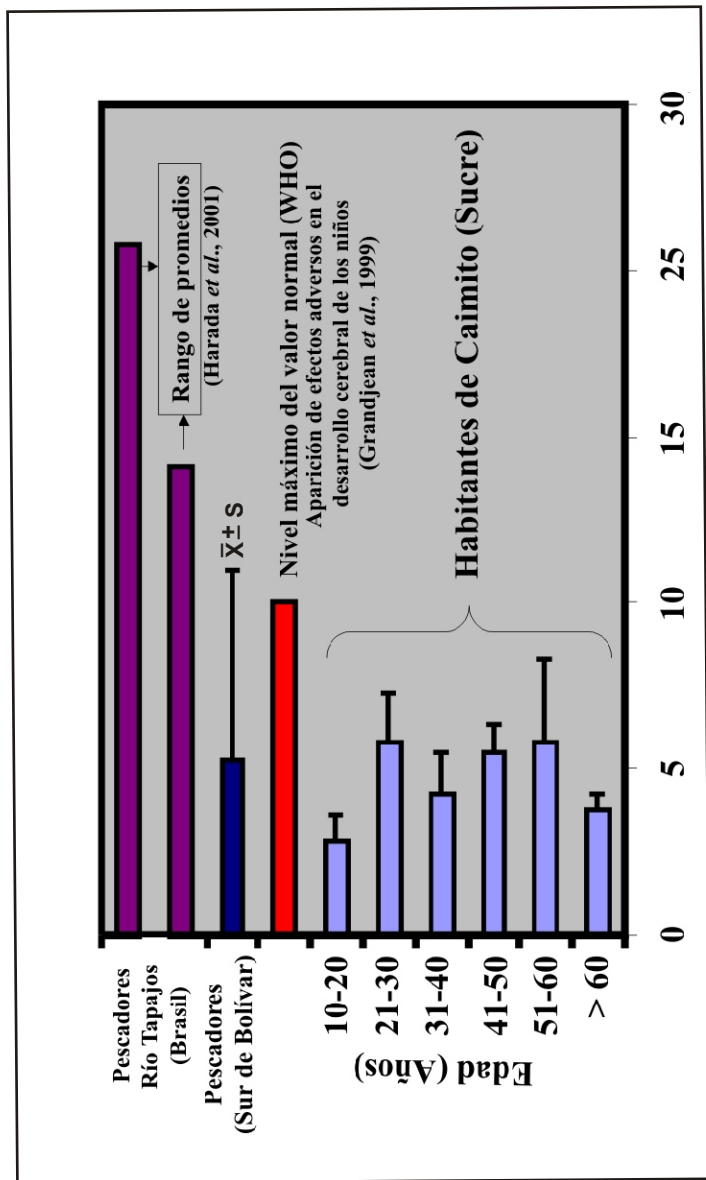


Figura 16. Localización del municipio de Caimito (departamento de Sucre).

departamento de Sucre (Figura 16), durante mayo de 1999 a septiembre de 2000. Caimito está ubicado aproximadamente 50 km al occidente de la zona de minería aurífera del sur de Bolívar, siendo sus principales actividades económicas la pesca y la agricultura. El cabello fue recolectado de 94 personas con edades comprendidas entre 15 y 65 años (promedio  $37.3 \pm 14.9$  años). Las muestras ambientales analizadas fueron recolectadas en tres cuerpos de agua aledaños al casco urbano de la población como son: las ciénagas de Aguas Claras y El Reparó, y el río San Jorge.

## 6.2. Resultados

Las concentraciones de mercurio en cabello de 94 habitantes de Caimito, en su mayoría familias de pescadores aparecen agrupados de acuerdo con la edad en la figura 17. Los niveles de mercurio en cabello de pescadores del sur de Bolívar y del Brasil son presentados con fines comparativos. La concentración promedio de mercurio para los habitantes de Caimito fue de  $4.91 \pm 0.55 \mu\text{g/g}$ . El análisis de Varianza ( $P > 0.05$ ) no reveló diferencias significativas entre las concentraciones de mercurio de acuerdo con los rangos de edad. En forma similar, tampoco fueron observadas diferencias estadísticas ( $P = 0.70$ ) al agrupar las muestras por sexo. La concentración de mercurio en cabello para 56 personas de sexo masculino presentó un promedio de  $4.31 \pm 0.42 \mu\text{g Hg/g}$  y una mediana de  $3.10 \mu\text{g Hg/g}$ . Por su parte, para 38 personas del sexo femenino el promedio de mercurio en cabello fue de  $5.78 \pm 1.21 \mu\text{g Hg/g}$  y una mediana de  $3.74 \mu\text{g Hg/g}$ . La mayoría de los datos para el total de personas monitoreadas osciló



**Figure 17.** Mercurio total en cabello de habitantes de Caimito (Sucre) de acuerdo con la edad. Para efectos de comparación aparece graficado el nivel máximo del valor normal y los niveles reportados para mercurio en cabello de pescadores del sur de Bolívar (Olivero *et al.*, 1996) y del río Tapajos, un afluyente del Amazonas en Brasil.

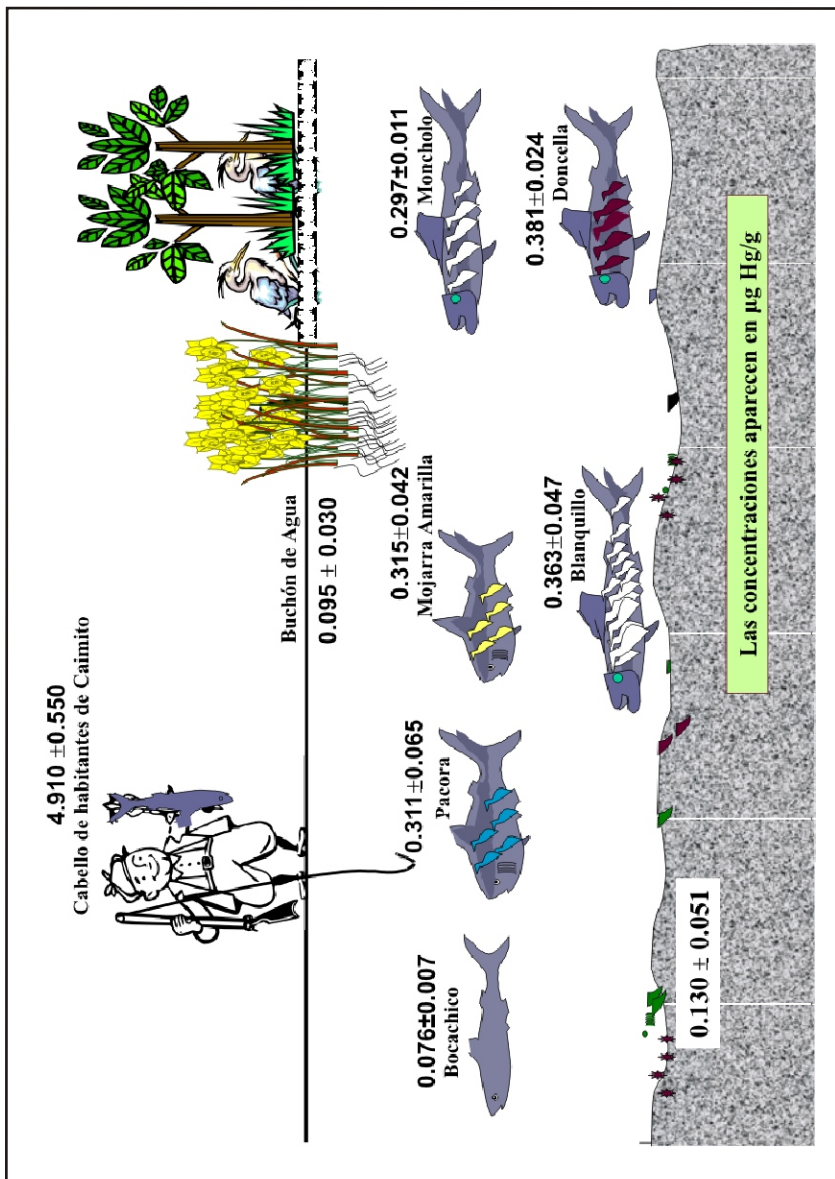
entre 0.5 y 10  $\mu\text{g Hg/g}$ . Una persona presentó una concentración de mercurio en cabello de 340  $\mu\text{g Hg/g}$  y fue excluida del análisis estadístico.

El contenido de mercurio en cabello correlacionó leve pero en forma positiva y significativa con la frecuencia en el consumo de pescado ( $R=0.20$ ,  $P=0.05$ ). No se observaron correlaciones significativas entre el contenido de mercurio en cabello y la edad ( $R=-0.02$ ,  $P=0.79$ ). Uno de los aspectos más interesantes de este estudio fue la correlación observada entre la concentración de mercurio en cabello con la aparición de tos ( $R=0.27$ ,  $P=0.01$ ), inestabilidad emocional ( $R=0.23$ ,  $P=0.03$ ), y en menor proporción con dolor de estómago ( $R=0.18$ ,  $P=0.08$ ).

Los niveles de mercurio en muestras ambientales son presentados en la figura 18. Las concentraciones de mercurio en sedimentos son bajas y similares a las del buchón de agua. Aunque resulta evidente que las especies de peces carnívoras tales como el moncholo, el bagre pintado, la doncella, la pacora y la mojarra amarilla presentan niveles superiores a los encontrados en el bocachico, en promedio estas concentraciones están por debajo de 0.5  $\mu\text{g/g}$ , lo cual significa que aunque existe biomagnificación de mercurio en la cadena trófica, estas especies pueden ser consumidas por la población. No obstante, es recomendable sugerir el consumo de bocachico y restringir el de las especies carnívoras de tal forma que el riesgo de intoxicación mercurial pueda ser minimizado.

### 6.3. Discusión

Existe un conjunto de evidencias que nos han llevado a concluir que los ecosistemas del sur de Bolívar están siendo contaminados con mercurio



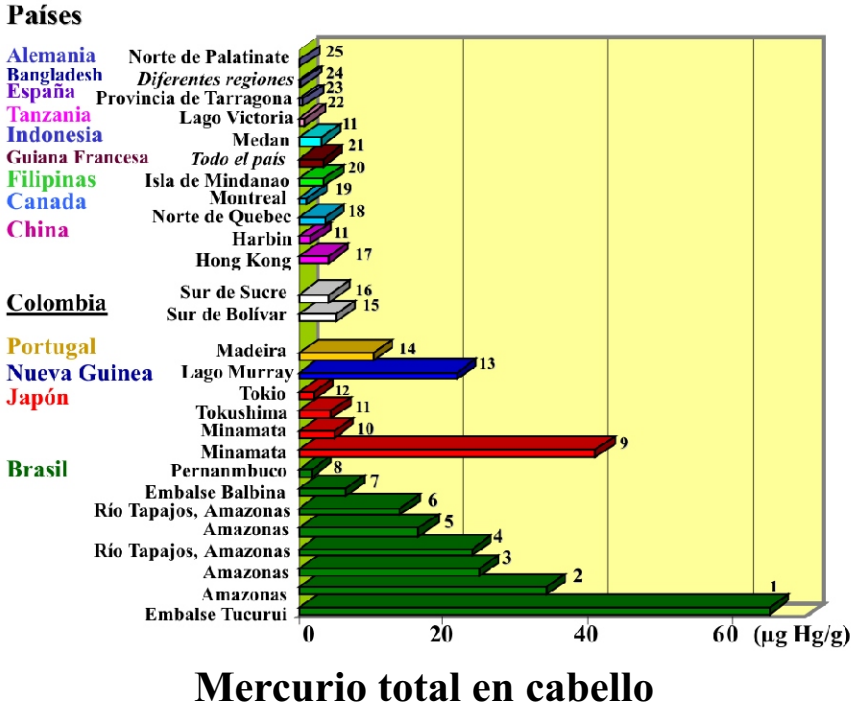
**Figure 18.** Mercurio total en muestras ambientales y cabello de habitantes de Caimito (Sucre).

proveniente de la minería del oro (Olivero *et al.*, 1997, 1995; Olivero y Solano, 1998). Resulta de gran interés el determinar si esta contaminación es “local” o si por el contrario tiende a expandirse hacia otras regiones periféricas. El estudio de la contaminación mercurial en Caimito (Sucre), resulta de gran relevancia por cuanto la cuenca del río San Jorge se encuentra muy cercana pero hidrológicamente separada de la zona minera del sur de Bolívar. Por lo anterior, Caimito representa un punto importante para evaluar el impacto de la minería del oro del sur de Bolívar en un área aledaña, asumiendo que puede recibir influencia indirecta de la explotación artesanal del oro por deposición atmosférica de mercurio. Aunque existe una actividad minera reconocida en la parte alta de la cuenca del río San Jorge, en particular la extracción de ferro-niquel, son casi nulos los reportes de la utilización de mercurio en la misma.

Las concentraciones de mercurio encontradas en los habitantes de Caimito son similares a las reportadas para personas del sur de Bolívar pero mayores a las obtenidas en la ciudad de Cartagena, 300 kilómetros al norte de la zona minera del sur de Bolívar (Olivero *et al.*, 1995). Con el objeto de comparar los niveles de mercurio encontrados en los habitantes de Caimito con los reportados en otros lugares del mundo, la figura 19 muestra las concentraciones de mercurio en cabello publicados para grupos de personas de diferentes países. Por ejemplo, en Brasil, en donde la minería del oro también es artesanal, los reportes de mercurio en cabello registran niveles mucho más elevados que los encontrados en Caimito, los cuales son similares a los detectados en pescadores que viven en sitios de moderada o baja contaminación.

De acuerdo con la figura 19, los niveles más elevados han sido recientemente reportados para estudios en Brasil, en donde la minería del oro es extensiva (Malm, 1998). Otros países con altos niveles de contaminación de mercurio son: Japón, Nueva Guinea y Portugal. Es importante aclarar que niveles altos de mercurio en cabello no sólo dependen de la frecuencia de consumo de pescado, sino también de las concentraciones relativamente moderadas del metal que tengan los peces, para que su acumulación en el hombre pueda tener efecto.

La correlación positiva observada entre inestabilidad emocional y la concentración de mercurio en cabello puede estar asociada con las diferentes patologías neurológicas relacionadas con intoxicación mercurial. No obstante, es preciso realizar evaluaciones neurosicológicas de mayor rigurosidad para evaluar en detalle esta observación. Uno de los aspectos más sobresalientes encontrados en este estudio fue la correlación detectada entre el contenido de mercurio en cabello y la frecuencia de tos y malestares estomacales. Es conocido que estos son signos clínicos frecuentes asociados con parásitos intestinales, en particular infecciones por *Ascaris* (Hlaing *et al.*, 1990). Lo anterior supone que la presencia de parásitos intestinales en la población podría estar incrementando la absorción de mercurio a través del intestino, muy probablemente por la generación de laceraciones o perforaciones en la pared del mismo que facilitarían la absorción. Las infecciones por *Ascaris* son muy comunes entre la población ribereña, en particular entre pescadores, quienes consumen agua directamente de la ciénaga o del río, las cuales a su vez reciben la disposición final de los residuos líquidos y sólidos de los



**Figura 19. Valores medios de mercurio total en cabello reportados en diversos países del mundo**

**\* Citas bibliográficas.** 1. Leino y Lodenius, 1995; 2. Barbosa *et al.*, 1997; 3. Malm *et al.*, 1995; 4. Lebel *et al.*, 1998; 5. Akagi *et al.*, 1994; 6. Harada *et al.*, 2001; 7. Kehrig *et al.*, 1998; 8. Nilson *et al.*, 2001; 9. Akagi *et al.*, 1998; 10. Harada *et al.*, 1998; 11. Feng *et al.*, 1998; 12. Nakagawa, 1995; 13. Abe *et al.*, 1995; 14. Renzoni *et al.*, 1998; 15. Olivero *et al.*, 1995; 16. Olivero *et al.*, 2002; 17. Dickman y Leung, 1998., Dickman *et al.*, 1998; 18. Muckle *et al.*, 2001; 19. Kosatsky *et al.*, 1999; 20. Appleton *et al.*, 1999; 21. Cordier *et al.*, 1998; 22. Ikingura y Akagi, 1996; 23. Batista *et al.*, 1996; 24. Holsbeek *et al.*, 1996; 25. Gebel *et al.*, 1998.

municipios aledaños. En la literatura, esta es la primera vez que se reporta una posible asociación entre parásitos intestinales y acumulación de mercurio en humanos.

Los resultados de análisis de mercurio en muestras de Caimito revelan que los niveles de este metal aumentan en el orden: sedimentos  $\approx$  buchón de agua < peces fitoplanctónicos < peces carnívoros < humanos. Este resulta un importante ejemplo de bioacumulación mercurial de las plantas acuáticas sobre el metal depositado en el sedimento y biodisponible en el agua, seguido de biomagnificación del elemento entre especies hasta alcanzar valores máximos en el hombre. Aunque el bocachico es el pescado de mayor consumo en Caimito, también es cierto que en algunas ocasiones los pescadores deben recurrir a cualquier especie de pescado para poder satisfacer la demanda de proteína de sus familias. En este momento, la incorporación de mercurio a través de la dieta es mayor y también los riesgos asociados.

.  
. .  
. .  
. .  
. .  
. .

## Conclusiones

- Las tecnologías obsoletas empleadas en la explotación del oro en el sur de Bolívar están contaminando los ecosistemas acuáticos con mercurio con el consecuente deterioro de la calidad de uno de los principales recursos pesqueros de la región Caribe colombiana.
- Las ciénagas Grande de Achí y Garrapata en el sur de Bolívar y Palotal en el Canal del Dique, son las que poseen las concentraciones más altas de mercurio total para la mayoría de las especies analizadas, siendo en especial **La ciénaga Grande de Achí la más contaminada** con cuatro especies superando los límites máximos de concentración de mercurio en músculo, establecidos por la Organización Mundial de la Salud como seguros para consumo humano.
- Entre las 14 especies de peces estudiadas, el bagre pintado, el moncholo, el bagre blanquillo, la doncella, la arenca, la mojarra amarilla y la pacora son las especies que presentan los valores más altos de mercurio total en músculo.

- El bocachico resulta ser la especie más segura manteniendo siempre niveles por debajo del límite internacionalmente aceptado como seguro para consumo humano.
- Los niveles de mercurio en personas de la cuenca del río San Jorge son similares a los encontrados en personas que habitan en la zona minera del sur de Bolívar y están asociados con la frecuencia en el consumo de pescado.

## Recomendaciones

- En poblaciones cuya dieta principal son los peces capturados en los espejos de agua del sur de Bolívar, los niveles de metilmercurio en cabello de mujeres con capacidad de tener hijos debe ser monitoreada. Si los resultados de estas actividades de monitoreo indican una excesiva exposición al metilmercurio, deben tomarse medidas para evitar la misma durante el embarazo ya que podría traer efectos teratogénicos y neurológicos al feto.
- La realización de campañas educativas tendientes a mejorar las condiciones tecnológicas de extracción del oro deben masificarse y debe existir un compromiso gubernamental para reemplazar las precarias y obsoletas tecnologías existentes.
- El ingreso por regalías de la minería del oro debe incluir los gastos de descontaminación y recuperación de ecosistemas, los cuales podrían ser mayores que los ingresos “aparentes” aportados por esta industria.
- Los habitantes del sur de Bolívar y en general de la costa Caribe colombiana deben evitar al máximo el consumo de especies de peces carnívoras.
- La protección del bocachico garantizará el atraso en la aparición de la enfermedad de Minanata en Colombia.



## Referencias Bibliográficas

Abe, T., Ohtsuka, R., Hongo, T., Suzuki, T., Tohyama, C., Nakano, C., Akagi, H., y Akimichi, T. (1995). High hair and urinary mercury levels of fish eaters in the nonpolluted environment of Papua New Guinea. *Arch. Environ. Health*. **50(5):367-373**.

Akagi, H., Grandjean, P., Takizawa, Y., y Weihe, P. (1998). Methylmercury dose estimation from umbilical cord concentrations in patients with Minamata disease. *Environ. Res. Section A*. **77(2):98-103**.

Akagi, H., Kinjo, Y., Branches, F., Malm, O., Harada, M., Pfeiffer, W., y Kato H. (1994). Methylmercury pollution in Tapajos river basin, Amazon. *Environ. Sci*. **3:25-32**.

Alonso, D., Pineda, P., Olivero, J., González, H., Campos, N. (2000). Mercury levels in muscle of two fish species and sediments from the Cartagena Bay and the Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. *Environ. Pollution*. **109:157-163**.

- Appleton, J.D., Williams, T.M., Breward, N., Apostol, A., Miguel, J., y Miranda, C. (1999). Mercury contamination associated with artisanal gold mining on the island of Mindanao, the Philippines. *Sci. Total Environ.* **228(2-3):95-109.**
- Barbosa, A., Garcia, A., y Souza, J. (1997). Mercury contamination in hair of riverine populations of Apiacas reserve in the Brazilian Amazon. *Water, Air and Soil Poll.* **97:1-8.**
- Batista, J., Schuhmacher, M., Domingo, J.L., y Corbella, J. (1996). Mercury in hair for a child population from Tarragona Province, Spain. *Sci. Total Environ.* **193(2):143-148.**
- Batzevich, V. (1995). Hair trace element analysis in human ecology studies. *Sci. Total Environ.* **164:89-98.**
- Bidone, E., Castilhos, Z., Cid de Souza, T., y Lacerda, L. (1997). Fish contamination and human exposure to mercury in the Tapajos River Basin, Pará State, Amazon, Brazil: A screening approach. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* **59:194-201.**
- Boischio, A.A., y Henshel, D.S. (1996). Risk assessment of mercury exposure through fish consumption by the riverside in the madeira basin, Amazon, 1991. *Neurotoxicology.* **17(1):169-175.**
- Boyd, A.S., Seger, D., Vannucci, S., Langley, M., Abraham, J.L., y King, L.E. Jr. (2000). Mercury exposure and cutaneous disease. *J. Am. Acad. Dermatol.* **43(1 Pt 1):81-90.**
- Byczkowski, J.Z., y Lipscomb, J.C. (2001). Physiologically based pharmacokinetic modeling of the lactational transfer of methylmercury. *Risk Anal.* **21(5):869-882.**
- Castilhos, Z.C., Bidone, E.D., y Hartz, S.M. (2001). Bioaccumulation of mercury by Tucunare (*Cichla ocellaris*) from Tapajos River region, Brazilian Amazon: a field dose-response approach. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* **66(5):631-637.**

- Castilhos, Z.C., y Bidone, E.D. (2000). Hg biomagnification in the ichthyofauna of the Tapajos River Region, Amazonia, Brazil. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* **64(5):693-700.**
- Castoldi, A.F., Coccini, T., Ceccatelli, S., y Manzo, L. (2001). Neurotoxicity and molecular effects of methylmercury. *Brain Res. Bull.* **55(2):197-203.**
- Cavalleri, A., y Gobba, F. (1998). Reversible color vision loss in occupationally exposure to metallic mercury. *Environ. Res. Section A.* **77(2):173-177.**
- Ceder (Centro de Estudios de Desarrollo Regional). 1994. Plan de Desarrollo Minero del Sur de Bolívar. Universidad de Cartagena.
- Chu, C.C., Huang, C.C., Ryu, S.J, y Wu, T.N. (1998). Chronic inorganic mercury induced peripheral neuropathy. *Acta Neurol. Scand.* **98(6):461-465.**
- Clarkson, T.W. (2002). The three modern faces of mercury. *Environ. Health Perspect.* **110(Suppl 1):11-23.**
- Clarkson, T.W. (1997). The toxicology of mercury. *Crit. Rev. Clin. Lab. Sci.* **34(4):369-403.**
- Cordier, S., Grasmick, C., Paquier-Passelaigue, M., Mandereau, L., Weber, J.P., y Jouan, M. (1998). Mercury exposure in French Guiana: Levels and determinants. *Arch. Environ. Health.* **53(4):299-303.**
- Counter, S.A., Buchanan, L.H., Ortega, F., y Laurell, G. (2002). Elevated blood mercury and neuro-otological observations in children of the Ecuadorian gold mines. *J. Toxicol. Environ. Health A.* **65(2):149-163.**

- Craig, P.J. (1986). Occurrence and pathways of organometallic compounds in the environment general considerations. En Organometallic compounds in the environment, principles and reactions. Longman group limited. Harlow (Inglaterra).
- Craig, R.G. (1986). Biocompatibility of mercury derivatives. *Dent. Mater.* **2(3):91-96.**
- Cranmer, M., Gilbert, S., y Cranmer, J. (1996). Neurotoxicity of mercury indicators and effects of low-level exposure: overview. *Neurotoxicology.* **17:9-14.**
- Daskalakis, K., y O'Connor, T. (1995). Normalization and elemental sediment contamination in the coastal United States. *Environ. Sci. Technol.* **29:470-477.**
- De Flora, S., Bennicelli, C., y Bagnasco, M. (1994). Genotoxicity of mercury compounds. A Review. *Mutat. Res.* **317:57-59.**
- Dickman, M.D., y Leung, K.M. (1998). Mercury and organochlorine exposure from fish consumption in Hong Kong. *Chemosphere.* **37(5):991-1015.**
- Dickman, M.D, Leung, C.K, y Leong, M.K. (1998). Hong Kong male subfertility links to mercury in human hair and fish. *Sci. Total Environ.* **214:165-174**
- Dolbec, J., Mergler, D., Sousa Passos, C.J., Sousa de Morais, S., y Lebel, J. (2000). Methylmercury exposure affects motor performance of a riverine population of the Tapajos river, Brazilian Amazon. *Int. Arch. Occup. Environ. Health.* **73(3):195-203.**
- Downs, S., Macleod, C., y Lester, J. (1998). Mercury in precipitation and its relation to bioaccumulation in fish: A literature review. *Water, Air, and Soil Pollut.* **108:149-187.**

- Dufresne, J., y Cyr, D.G. (1999). Effects of short-term methylmercury exposure on metallothionein mRNA levels in the testis and epididymis of the rat. *J. Androl.* **20(6):769-778.**
- Ebinghaus, R., Kock, H.H., y Schmolke, S.R. (2001). Measurements of atmospheric mercury with high time resolution: recent applications in environmental research and monitoring. *Fresenius J. Anal. Chem.* **371(6):806-815.**
- Elhassani, S.B. (1982). The many faces of methylmercury poisoning. *J. Toxicol. Clin. Toxicol.* **19(8):875-906.**
- Ellingsen, D.G., Bast-Pettersen, R., Efskind, J., y Thomassen, Y. (2001). Neuropsychological effects of low mercury vapor exposure in chloralkali workers. *Neurotoxicology.* **22(2):249-258.**
- Eto, K., Yasutake, A., Nakano, A., Akagi, H., Tukunaga, H., y Kojima, T. (2001). Reappraisal of the Historic 1959 Cat Experiment in Minamata by the Chisso Factory. *Tohoku J. Exp. Med.* **194(4):197-203.**
- Eto, K. (2000). Minamata disease. *Neuropathology.* **20:Suppl:S14-19.**
- Falandysz, J. (2002). Mercury in mushrooms and soil of the Tarnobrzaska Plain, south-eastern Poland. *J. Environ. Sci. Health Part A Tox. Hazard Subst. Environ. Eng.* **37(3):343-352.**
- Feng, Q., Suzuki, Y., y Hisashige, A. (1998). Hair mercury levels of residents in China, Indonesia, and Japan. *Arch. Environ. Health.* **53(1):36-43.**
- Fergusson, J.E. (1990). *The Heavy Elements: Chemistry, environmental impact and health effects.* Primera Edición. Pergamon Press. New York.

- Fitzgerald, W.F., y Clarkson, T.W. (1991). Mercury and monomethylmercury: present and future concerns. *Environ. Health Perspect.* **96**:P159-66.
- Galal, H. (1993). Dietary intake, levels in food and estimated intake of lead, cadmium and mercury. *Food Addit. Contam.* **10**:115-128.
- Gebel, T., Behmke, C., y Dunkelberg, H. (1998). Influence of a geogenic exposure to mercury, arsenic and antimony on the body burden a biomonitoring study. *Zentbl. Hyg. Umweltmed.* **201(1)**:103-120.
- Grandjean, P., Budtz-Jorgensen, E., White, R.F., Jorgensen, P.J., Weihe, P., Debes, F., y Keiding, N. (1999). Methylmercury exposure biomarkers as indicators of neurotoxicity in children aged 7 years. *Am. J. Epidemiol.* **150(3)**:301-305.
- Greenwood, M. R. (1985). Methylmercury poisoning in Iraq. An epidemiological study of the 1971-1972 outbreak. *J. Appl. Toxicol.* **5(3)**:148-159.
- Hac, E., Krzyzanowski, M., y Krechniak, J. (2000). Total mercury in human renal cortex, liver, cerebellum and hair. *Sci. Total Environ.* **248(1)**:37-43.
- Hakanson L. (1984). Metals in fish and sediment from the river Kolbocsoan water system, Sweden. *Arch. Hidrobiol.* **101**: 373-400.
- Hanisch, C. (1998). Where is mercury deposition coming from *Environ. Sci. Tech.* **32(7)**:176 A-179A.
- Harada, M., Nakanishi, J., Yasoda, E., Pinheiro, M.C., Oikawa, T., de Assis Guimaraes, G., da Silva Cardoso, B., Kizaki, T., y Ohno, H. (2001). Mercury pollution in the Tapajos River basin, Amazon: mercury level of head hair and health effects. *Environ. Int.* **27(4)**:285-290.

- Harada, M., Nakanishi, J., Konuma, S., Ohno, K., Kimura, T., Yamaguchi, H., Tsuruta, K., Kizaki, T., Ookawara, T., y Ohno, H. (1998). The present mercury contents of scalp hair and clinical symptoms in inhabitants of the Minamata area. *Environ. Res. Section A*. **77(2):160-164.**
- Hardman, J. G. (Editor), Limbird, L. E. (2001). Goodman & Gilman's The Pharmacological Basis of Therapeutics. 10th Edition. McGraw-Hill Professional. New York.
- Hlaing, T., Saw, T., y Kyin, M. (1990). Control of ascariasis through age-targeted chemotherapy; impact of 6-monthly chemotherapeutic regimens. *Bull. World Health Organ.* **68:747-53.**
- Holsbeek, L., Das, H.K., y Joiris, C.R. (1996). Mercury in human hair and relation to fish consumption in Bangladesh. *Sci. Total Environ.* **186(3):181-188.**
- Holsbeek, L., Das, H.K., y Joiris, C.R. (1997). Mercury speciation and accumulation in Bangladesh freshwater and anadromous fish. *Sci. Total Environ.* **198(3):201-210.**
- Ikingura, J.R., y Akagi, H. (1996). Monitoring of fish and human exposure to mercury due to gold mining in the Lake Victoria goldfields, Tanzania. *Sci. Total Environ.* **191(1-2):59-68.**
- Jackson, T. (1991). Biological and environmental control of mercury accumulation by fish in lakes and reservoirs of Northern Manitoba, Canada. *Can. J. Fish Aquat. Sci.* **48:2449-2470.**
- Japan Public Health Association (2001). Preventive Measures against Environmental Mercury Pollution and its Health Effects. Minamata.

- Kajiwara, Y., Yasutake, A., Adachi, T., y Hirayama K. (1996). Methylmercury transport across the placenta via neutral amino acid carrier. *Arch. Toxicol.* **70(5):310-314.**
- Kales, S.N., y Goldman, R.H. (2002). Mercury exposure: current concepts, controversies, and a clinic's experience. *J. Occup. Environ. Med.* **44(2):143-154.**
- Kehrig, H., Malm, O., Akagi, H., Guimaraes, J., y Torres, J. (1998). Methylmercury in fish and hair samples from the Balbina Reservoir, Brazilian Amazon. *Environ. Res. Section A.* **77(2): 84-90.**
- Kiesswetter, E., Sietmann, B., y Seeber, A. (1997). Standardization of a questionnaire for neurotoxic symptoms. *Environ. Res.* **73:73-80.**
- Kondo K. (2000). Congenital Minamata disease: warnings from Japan's experience. *J. Child Neurol.* **15(7):458-464.**
- Kondo K. (1996). Incidence of Minamata disease in communities along the Agano river, Niigata, Japan--patterns of the exposure and official diagnosis of patients. *Nippon Eiseigaku Zasshi.* **51(2):599-611.**
- Kosatsky, T., Przybysz, R., Shatenstein, B., Weber, J.P., y Armstrong, B. (1999) Contaminant exposure in Montrealers of Asian origin fishing the St. Lawrence River: Exploratory assessment. *Environ. Res. Section A.* **80(2 Pt 2):S159-S165.**
- Langford, N., y Ferner, R. (1999). Toxicity of mercury. *J. Hum. Hypertens.* **13(10):651-656.**
- Lebel, J., Mergler, D., Branches, F., Lucotte, M., Amorin, M., Larribe, F., y Dolbec, J. (1998). Neurotoxic effects of low-level methylmercury contamination in the Amazonian basin. *Environ. Res. Section A.* **79(1):20-32.**

- Lebel, J., Mergler, D., Lucotte, M., Amorin, M., Dolbec, J., Miranda, D., Arantes, G., Rheault, I., y Pichet, P. (1996). Evidence of early nervous system dysfunction in Amazonian populations exposed to low-levels of methyl mercury. *Neurotoxicology*. **17:157-168**.
- Leino, T., y Lodenius, M. (1995). Human hair mercury levels in Tucuruí area, State of Para, Brazil. *Sci. Total. Environ.* **175:119-125**.
- Leonard, A., Jacquet, P., y Lauwerys, R.R. (1983). Mutagenicity and teratogenicity of mercury compounds. *Mutat. Res.* **114(1):1-18**.
- Magos, L., y Clarkson, T. (1972). Atomic absorption determination of total, inorganic and organic mercury in blood. *J. Assoc. Offic. Anal. Chem.* **55:966-971**.
- Malm, O., Branches, F., Akagi, H., Castro, M., Pfeiffer, W., Harada, M., Bastos, W., y Kato, H. (1995). Mercury and methylmercury in fish and human hair from the Tapajos river basin, Brazil. *Sci. Total Environ.* **175(2):141-150**.
- Malm, O. (1998). Gold mining as a source of mercury exposure in the Brazilian Amazon. *Environ. Res. Section A*. **77(2):73-78**
- Marins, R.V., de Andrade, J.B., Pereira, P.A., Paiva, E.C., y Paraquetti, H.H. (2000). Sampling techniques for the assessment of anthropogenic vapour and particulate mercury in the Brazilian Amazon atmosphere. *J. Environ. Monit.* **2(4):325-328**.
- Marsh, D.O., Myers, G.J., Clarkson, T.W., Amin-Zaki, L., Tikriti, S., y Majeed, M.A. (1980). Fetal methylmercury poisoning: clinical and toxicological data on 29 cases. *Ann. Neurol.* **7(4):348-453**.
- Miller J. N. y Miller J. C. 2000. Statistics and chemometrics for analytical chemistry. Fourth Edition. Prentice Hall, London.

- Mottet, N.K., Shaw, C.M., y Burbacher, T.M. (1985). Health risks from increases in methylmercury exposure. *Environ. Health Perspect.* **63**:133-140.
- Muckle, G., Ayotte, P., Dewailly, E.E., Jacobson, S.W., y Jacobson, J.L. (2001). Prenatal exposure of the northern Quebec Inuit infants to environmental contaminants. *Environ. Health Perspect.* **109**(12):1291-1299.
- Murata, K., Weihe, P., Araki, S., Budtz-Jorgensen, E., y Grandjean, P. (1999). Evoked potentials in Faroese children prenatally exposed to methylmercury. *Neurotoxicol. Teratol.* **21**:471-472.
- Myers G.J., y Davidson, P.W. (1998). Prenatal methylmercury exposure and children: neurologic, developmental, and behavioral research. *Environ. Health Perspect.* **106**(Suppl 3):841-847.
- Myers, G.J., Davidson, P.W, Cox, C., Shamlaye, C., Tanner, M., Choisy, O., Sloane-Reeves, J., Marsh, D., Cernichiari, E., y Choi, A. (1995). Neurodevelopmental outcomes of Seychellois children sixty-six months after in utero exposure to methylmercury from a maternal fish diet: pilot study. *Neurotoxicology.* **16**:639-652.
- Nakagawa, R. (1995). Concentration of mercury in hair of diseased people in Japan. *Chemosphere.* **30**(1):135-140.
- Nilson, S.A. Jr., Costa, M., y Akagi, H. (2001). Total and methylmercury levels of a coastal human population and of fish from the Brazilian northeast. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* **8**(4):280-284.
- Nordberg, M., y Nordberg, G.F. (2000). Toxicological aspects of metallothionein. *Cell. Mol. Biol. (Noisy-le-grand).* **46**(2):451-463
- Nriagu, J.O., Pfeiffer, W.C., Malm, O., Magalhaes de Souza, C.M., y Mierle, G. (1992). Mercury pollution in Brazil. *Nature.* **356**(6368):389.

- Olivero, J., Johnson, B., y Arguello, E. (2002). Human exposure to mercury due to fish consumption in San Jorge river basin, Colombia (South America). *Sci. Total Environ.* **289**(1-3):41-47.
- Olivero, J., y Solano, B. (1998). Mercury in environmental samples from a waterbody contaminated by gold mining in Colombia, South America. *Sci. Total Environ.* **217**(1-2):83-89.
- Olivero, J., Navas, V., Perez, A., Solano, B., Acosta, I., Arguello, E., y Salas, R. (1997). Mercury levels in muscle of some fish species from the Dique Channel, Columbia. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* **58**(6):865-870.
- Olivero, J., Mendoza, C., and Mestre, J. (1995). Hair mercury levels in people from the gold mining zone in Columbia. *Rev. Saude Publica.* **29**(5):376-379.
- Ozuah, P.O. (2001). Folk use of elemental mercury: a potential hazard for children *J. Natl. Med. Assoc.* **93**(9):320-322.
- Palheta, D., y Taylor, A. (1995). Mercury in environmental and biological samples from a gold mining area in the Amazon region of Brazil. *Sci. Total Environ.* **168**:63-69.
- Pan-Hou, H.S., y Imura, N. (1982). Involvement of mercury methylation in microbial mercury detoxication. *Arch. Microbiol.* **131**(2):176-177.
- Peixoto, A y Cernichiari, E. (1998). Longitudinal hair mercury concentration in riverside mothers along the upper Madeira river (Brazil). *Environ. Res. Section A.* **77**:79:83.
- Raldúa, D., y Pedrocchi, C. (1996). Mercury contamination in three species of freshwater fishes from the lower Gallego and Cinca rivers, Spain. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* **57**:597-602.

- Renzoni, A., Zino, F., y Franchi, E. (1998). Mercury levels along the food chain and risk for exposed populations. *Environ. Res. Section A*. **77(2):68-72**.
- Rice, G., Swartout, J., Mahaffey, K., y Schoeny, R. (2000). Derivation of U.S. EPA's oral Reference Dose (RfD) for methylmercury. *Drug Chem. Toxicol.* **23(1):41-54**.
- Sadiq, M., Zaidi, T., y Al-Mohana, H. (1991). Sample weight and digestion temperature as critical factors in mercury determination in fish. *Bull Environ. Contam. Toxicol.* **47:335-341**.
- Shah, V. P., Mida, K.K. , Dighe, S. (1992). Analytical Methods validation: bioavailability, bioequivalence pharmacokinetics studies. *J. Pharm. Sci.* **81:3,309**.
- Shah, V. P., Mida, K.K., Findlay, J. W. (2000). Analytical Bioanalytical Methods validation: *Pharm. Res.* **17:12,1551-1557**.
- Salonen, J.T., Seppanen, K., Nyyssonen, K., Korpela, H., Kauhanen, J., Kantola, M., Tuomilehto, J., Esterbauer, H., Tatzber, F., y Salonen, R. (1995). Intake of mercury from fish, lipid peroxidation and the risk of myocardial infarction and coronary, cardiovascular, and any death in Eastern Finnish men. *Circulation.* **91(3):645-655**.
- Salonen, J.T., Seppanen, K., Nyyssonen, K., Korpela, H., Kauhanen, J., Kantola, M., Tuomilehto, J., Esterbauer, H., Tatzber, F., y Salonen, R. (1995). Intake of mercury from fish, lipid peroxidation and the risk of myocardial infarction and coronary, cardiovascular, and any death in Eastern Finnish men. *Circulation.* **91(3):645-655**.

- Satoh, H. (2000). Occupational and environmental toxicology of mercury and its compounds. *Ind. Health*. **38**:153-64.
- Shenker, B.J., Guo, T.L., y Shapiro, I.M. (1998). Low-level methylmercury exposure causes human T-cells to undergo apoptosis: evidence of mitochondrial dysfunction. *Environ. Res.* **77**(2):149-159.
- Sheu, G.R., y Mason, R.P. (2001). An examination of methods for the measurements of reactive gaseous mercury in the atmosphere. *Environ. Sci. Technol.* **35**(6):1209-1216.
- Skoog, D. A., west, D. M., Holler, J. J. , Crouch, S. R. (2001). Química Analítica. 7 ed. McGraw-Hill. Mexico.
- Smith, J.C., y Farris, F.F. (1996). Methyl mercury pharmacokinetics in man: a reevaluation. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* **137**(2):245-252.
- Smith, J.C., Allen, P.V., Turner, M.D., Most, B., Fisher, H.L, y Hall L.L. (1994). The kinetics of intravenously administered methyl mercury in man. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* **128**(2):251-256.
- Tandon, S.K., Singh, S., Prasad, S., y Mathur, N. (2001). Hepatic and renal metallothionein induction by an oral equimolar dose of zinc, cadmium or mercury in mice. *Food Chem. Toxicol.* **39**(6):571-7
- Tarras-Wahlberg, N.H., Flachier, A., Lane, S.N., y Sangfors, O. (2001). Environmental impacts and metal exposure of aquatic ecosystems in rivers contaminated by small scale gold mining: the Puyango River basin, southern Ecuador. *Sci. Total. Environ.* **278**(1-3):239-261.
- The Index Merck. (1996). Encyclopedia of Chemicals, Drugs and Biologicals. 12 ed. Merck Reserch Laboratories Division of Merck & Co, Inc. N.J. (USA).

- Tirado, V., Garcia, M.A., Moreno, J., Galeano, L.M., Lopera, F., y Franco A. (2000). Pneuropsychological disorders after occupational exposure to mercury vapors in El Bagre (Antioquia, Colombia). *Rev. Neurol.* **31(8):712-716.**
- Toribara, T.Y. (2001). Analysis of single hair by XRF discloses mercury intake. *Hum. Exp. Toxicol.* **20(4):185-188.**
- Tsuchiya, H., Mitani, K., Kodama, K., y Nakata, T. (1984). Placental transfer of heavy metals in normal pregnant Japanese women. *Arch. Environ. Health.* **39(1):11-17.**
- Turizo, A., Vargas, A., Jiménez, M., Villamil, M., Restrepo, A., Gonzalez, J., Chavez, J., Rincón, C., Cardoza, G. (1997). Plan de manejo ambiental regional para la pequeña minería de oro de aluvión y filón en el Sur del Departamento de Bolívar. Corporación Autónoma Regional del Sur de Bolívar(C.S.B.). Cartagena.
- UPME (Unidad de Planeación Minera Energética). 2001. Estadísticas minero energéticas. Edición No. 13. Bogotá
- Wade, M.J., Davis, B.K., Carlisle, J.S., Klein, A.K., y Valoppi, L.M. (1993). Environmental transformation of toxic metals. *Occup. Med.* **8(3):574-601.**
- Walpole, R., y Myers, R.H. (1992). Probabilidad y Estadística. Cuarta Edición. McGraw-Hill. Interamericana de México S.A. México.
- Watras, C.J., Back, R.C., Halvorsen, S., Hudson, R.J., Morrison, K.A., y Wentz, S.P. (1998). Bioaccumulation of mercury in pelagic freshwater food webs. *Sci. Total Environ.* **219(2-3):183-208.**
- WHO. (1990). Environmental Health Criteria 101 (IPCS). Methylmercury. World Health Organization. Geneva.
- WHO. (1986). Environmental Health Criteria 86 (IPCS). Mercury-Environmental Aspects. World Health Organization. Geneva.

- WHO. (1976). Environmental Health Criteria 1:Mercury. Organization program on chemical safety. World Health Organization. Geneva.
- Wilhelm, M., e Idel, H. (1996). Hair analysis in environmental medicine. *Zentralbl. Hyg. Umweltmed.* **198(6):485-501.**
- Wood, J. (1974). Biological cycles for toxic elements in the environment. *Science (Wash. D.C).* **183:1049-1052.**
- Yasutake, A., Nakano, A., y Hirayama, K. (1998). Induction by mercury compounds of brain metallothionein in rats: Hg<sup>0</sup> exposure induces long-lived brain metallothionein. *Arch. Toxicol.* **72(4):187-191.**
- Zhang, L., y Planas, D. (1994). Biotic and abiotic mercury methylation and demethylation in sediments. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* **52:691-698.**
- Zimmer , J., Grange, F., Straub, P., Haegy, J.M., y Guillaume, J.C. (1997). Mercury erythema after accidental exposure to mercury vapor. *Ann. Med. Interne (Paris).* **148(4):317-320.**



## Glosario

**Abiótico:** Sistema o proceso caracterizado por la ausencia de vida o incompatible con la vida. En toxicología se refiere a los procesos físicos (por ejemplo, calor, luz solar) o químicos (hidrólisis) capaces de modificar las estructuras químicas. Así, la transformación abiótica es un proceso por el cual una sustancia química en el ambiente es modificada por mecanismos no biológicos.

**Acidez:** Es la medida de la cantidad de **ácido** ( $H^+$ ) que hay en una solución. Una medida de la capacidad de neutralizar las **bases**.

**Acido:** Toda sustancia que en disolución acuosa produce iones hidrónios ( $H_3O^+$ ).

**Alcalinidad:** Es la medida de la cantidad de **base** ( $OH^-$ ,  $HCO_3^-$ ,  $CO_3^{2-}$ ) que hay en una solución. Una medida de la capacidad de neutralizar los **ácidos**.

**Aleación:** Una sustancia compuesta por la mezcla de dos o más metales al fundirlos.

**Amalgama:** Aleación de mercurio con otro metal.

**Antropogénico:** Realizado por el hombre.

**Atmósfera:** Masa de aire que rodea a la tierra. Su altura es de 200 a 300 Km.

**Base:** Toda sustancia que al combinarse con un **ácido** forma una sal. Molécula que en solución acuosa libera iones hidróxido (OH<sup>-</sup>).

**Bioacumulación:** Aumento progresivo en la cantidad de un producto químico en un organismo o parte de él. Aparece cuando la tasa de absorción excede la capacidad del organismo para eliminar la sustancia.

**Biocida:** Término aplicado a los productos químicos utilizados para destruir organismos vivos que también interfieren o amenazan la salud y las actividades humanas.

**Bioconcentración:** Es un proceso de **bioacumulación** por el cual una sustancia química se hace más concentrada en un organismo con respecto al ambiente en el que se encuentra. Aunque el proceso es el mismo tanto para sustancias naturales o sintéticas, el término **bioconcentración** usualmente es referido a químicos que no son sintetizados por los organismos (Xenobióticos).

**Ciclo biogeoquímico:** Procesos naturales que reciclan nutrientes en varias formas químicas involucrando el ambiente **abiótico** (sin vida) y los organismos vivientes.

**Biomagnificación:** Término general aplicado a la secuencia de procesos en un ecosistema mediante el cual las concentraciones de un compuesto químico aumentan de acuerdo con la posición de la especie en la cadena alimenticia. Estos procesos ocurren a través de una serie de relaciones predatoras-depredadoras en donde los humanos suelen estar al final de la cadena trófica.

**Biosfera:** Espacio del planeta donde existe vida.

**Biota:** Organismos vivos de una región en particular.

**Cadena alimenticia:** El traslado de energía y nutrientes de un grupo alimentador a otro que comienza con los productores primarios (plantas - algas) y termina con los consumidores (carnívoros).

**Cadena trófica:** Cadena alimenticia

**Catalizador:** Una sustancia o agente la cual altera la velocidad de la reacción pero no cambia durante el proceso. Una enzima es un ejemplo de un catalizador biológico.

**Clorofila:** Uno de los pigmentos presentes en las células de las plantas las cuales son esenciales en la utilización de energía solar en la **fotosíntesis**.

**Combustión:** Reacción química en la cual un material orgánico es combinado con oxígeno, acompañado por liberación de calor.

**Combustibles fósiles:** Cualquier material orgánico combustible de origen natural derivados de los **fósiles** tales como petróleo, carbón o gas natural.

**Compuesto orgánico:** Compuesto que contiene carbono.

**Conductibilidad:** Capacidad de conducir calor, electricidad y sonido.

**Contaminación:** Presencia indeseada de materia o energía que puede causar efectos en el medio ambiente.

**Desgasificación:** Liberación de gases.

**Dosis de referencia:** Corresponde a la concentración de un compuesto tóxico que puede ser consumida diariamente a lo largo de la vida, sin que se presente ningún efecto adverso. Para el **mercurio**, de acuerdo con la EPA, este valor es  $0.1 \mu\text{g Hg/Kg}$  de peso corporal/día.

**Ductibilidad:** Capacidad de algunos materiales para ser transformados en hilos.

**Ecosistema:** Un ecosistema ecológico, unidad natural de componentes **bióticos** y **abióticos**, los cuales interactúan para formar un sistema estable en la cual hay intercambio cíclico de materiales llevándose a cabo entre unidades vivas y no vivas, como en un balanceado acuario, un gran lago o un bosque.

**Elemento:** Una forma de materia que no puede ser convertida en otra más simple. Los elementos están constituidos por átomos de un mismo número atómico. Los átomos existen en la naturaleza como sólidos, líquidos o gases.

**Exposición:** Contacto con una sustancia química por **ingestión**, inhalación, o por tacto (tal como la piel o los ojos). La exposición puede ser durante un período de tiempo corto (aguda) o largo (crónica)

**Insecticida:** Una sustancia química especialmente usada para matar o prevenir el crecimiento de insectos.

**Ingestión:** Ingerido (tal como comido o bebido). Una ruta de **exposición** a una sustancia química. Después de la **ingestión**, las sustancias pueden ser absorbidas por la mucosa intestinal hacia el torrente sanguíneo y distribuidas a través del cuerpo.

**Emisión:** Es el acto de liberar o emanar.

**Enfermedad de Minamata:** Enfermedad neurológica identificada por primera vez en Minamata, Japón como resultado de la intoxicación por **metilmercurio**.

**Evaporación:** Es el proceso mediante el cual una sustancia pasa del estado líquido al gaseoso.

**Fitoplancton:** Plancton vegetal.

**Flora:** Vida vegetal de un área o localidad.

**Fósil:** Cualquier remanente, impresión o traza de un animal o planta de un período geológico. El término es generalmente restringido a las partes a las cuales han sido petrificadas o convertidas en piedras.

**Fotólisis:** Descomposición de una molécula por la acción de la luz.

**Fotoquímica:** Rama de la química que estudia las reacciones que se realizan mediante la acción de la luz.

**Fotosíntesis:** Es la reacción básica por la cual la luz o la energía radiante es asimilada por la **clorofila** de las plantas y convertida en energía química almacenada en las moléculas de carbohidratos.

**Fungicida:** Producto químico usado para la destrucción de los **hongos**.

**Hidróxido:** Un compuesto formado por la unión entre un ion metálico con uno o más grupos hidroxilos ( $\text{OH}^-$ ), por ejemplo el hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ).

**Inhalación:** Respirar. Una ruta de exposición a una sustancia química. Durante la inhalación, la sustancia puede ser depositada en los pulmones, luego entran en la sangre.

**Inorgánico:** Referente a lo mineral, incluyendo todo el material que no es animal o vegetal. Este término también es aplicado a cualquier compuesto químico que no contenga carbono.

**Ion:** Es un átomo o un grupo de átomos cargados eléctricamente formados por la pérdida o ganancia de uno o más electrones. Los cationes son iones positivos, los cuales son creados por la pérdida de electrones. Los aniones son iones negativos formados por la ganancia de electrones.

**Intoxicación:** Conjunto de manifestaciones en un organismo ocasionadas por la **exposición** a un agente **tóxico** que interfiere con las funciones celulares normales. Las intoxicaciones presentan cuadros clínicos muy diversos, dependiendo del tipo de tóxico, de la vía de ingreso en el organismo o de su metabolismo y eliminación. Puede ser **aguda** o **crónica** según la cantidad de tóxico y el tiempo de exposición.

**Intoxicación aguda:** Intoxicación cuyos efectos son observados dentro de un corto período de tiempo (de 24 a 96 horas) luego de la exposición al mismo.

**Intoxicación crónica:** Intoxicación cuyos efectos son observados luego de un período de tiempo largo (usualmente mayor a una semana).

**Kilogramo:** Una unidad básica de medida de la masa; abreviado, kg.

**Maleabilidad:** Capacidad de algunos materiales para ser convertidos en láminas.

**Mercurio (Hg):** Es un metal color plateado, comúnmente llamado azogue. El término se refiere a las diferentes formas químicas que se pueden tener incluyendo metilmercurio, mercurio elemental, mercurio (I) y mercurio(II).

**Mercurio (I), Hg(I):** "ion mercurio uno" o ion mercurioso, posee una carga positiva de uno.

**Mercurio (II), Hg(II):** "ion mercurio dos" o ion mercúrico, posee una carga positiva de dos. Este es soluble en agua y se asocia con partículas, la deposición de mercurio (II) es relativamente rápida. Las fuentes de combustión pueden emitir tanto mercurio elemental como mercurio (II). El mercurio (II) puede ser producido en la atmósfera por la oxidación de mercurio elemental mediante reacción fotolítica con el ozono o con otros oxidantes.

**Mercurio elemental (Hg<sup>0</sup>):** También como "mercurio cero" o mercurio metálico. Esta es la forma elemental de mercurio, comúnmente conocido como azogue. El **mercurio elemental** puede ser volatilizado a la atmósfera constituyendo más del 90% de la especie presente en el aire. El mercurio elemental no es adsorbido por partículas y no es muy soluble en agua, este es removido de la atmósfera muy lentamente con una vida media de aproximadamente un año.

**Metilmercurio (CH<sub>3</sub>HgX):** **Compuesto orgánico** formado a partir de **mercurio metálico** o del **mercurio (II)** por la acción de microorganismos. Es un compuesto que penetra en el cerebro y constituye un potente neurotóxico. El anión X<sup>-</sup> puede ser nitrato, sulfato, cloruro, bromuro o yoduro, entre otros.

**Metal:** Cualquier clase de sustancia elemental, como oro, plata o cobre, los cuales son cristalinos en estado sólido y son caracterizados por su

**opacidad, ductibilidad, conductividad** y producción de brillo cuando son frotados. Estos elementos tienden a perder electrones y por consiguiente a formar cationes o iones positivos.

**Metales pesados:** Cualquier metal con densidad de 5 o mayor, los cuales son caracterizados por presentar alta toxicidad en los organismos, entre estos tenemos: mercurio, plomo y cadmio.

**mg/kg:** Miligramo por kilogramo =  $\mu\text{g/g}$ . **microgramo** por gramo.

**Microgramo ( $\mu\text{g}$ ):** Una millonésima de gramo.

**Miligramo (mg):** Una milésima de gramo.

**Mineral:** Un mineral o roca puede contener un metal, el cual puede ser recuperado en su estado natural.

**Molécula:** La parte más pequeña de un compuesto que conserva sus propiedades. Las moléculas están formadas por conjuntos de dos o más átomos enlazados químicamente.

**Natural:** Producido o existente en la naturaleza. Que no es artificial o manufacturado.

**Neurotóxico:** Cualquier sustancia que es capaz de destruir o afectar adversamente los tejidos nerviosos.

**Oxidación:** Pérdida de electrones de una sustancia que se manifiesta con un incremento en el estado de oxidación de un elemento.

**Parálisis:** Pérdida de la sensibilidad o de la función muscular usualmente debido a un trastorno o lesión en el sistema nervioso.

**Plancton:** Término colectivo para la amplia variedad de organismos vegetales y animales, a menudo de tamaño microscópico que flotan o derivan en el mar o en el agua dulce; el **plancton** representa el nivel básico de muchas relaciones alimentarias.

**Partes por millón (ppm):** Es una forma común de expresar las concentración de una sustancia en los análisis de aguas. Una ppm es igual a

una unidad de medida por un millón de unidades de la misma. Una ppm es igual a un miligramo por litro o un **microgramo** por mililitro. También se puede expresar que un ppm es igual a un **miligramo** por kilogramo o un microgramo por gramo.

**pH:** Es una medida numérica de la **acidez**, o actividad del ion hidrógeno, utilizada para expresar la acidez o alcalinidad; pH neutro es 7.0, valores por de bajo de 7.0 son **ácidos**, y por encima de 7.0 son **básicos**.

**Pez carnívoro:** Pez depredador.

**Pez depredador:** Pez que vive matando y comiendo otros peces.

**Prenatal:** Antes de nacer.

**Reducción:** Reacción química en la cual uno o más electrones son ganados por una sustancia que se reduce. La adición de átomos de hidrógeno o la pérdida de átomos de oxígeno.

**Ruta de exposición:** Vía por la cual una persona entra en contacto con una sustancia química. Por ejemplo, inhalación, **ingestión** o a través de la piel.

**Sal:** Sustancia que resulta de la reacción entre un **ácido** y una **base**.

**Salinidad:** Concentración de sal disuelta en agua.

**Sedimento:** Depósito natural en el fondo del mar, ríos o lagos.

**Solvente:** Un líquido en la cual una sustancia es disuelta.

**Teratogénico:** Capaz de interferir con el desarrollo del feto de tal forma que los niños nacen con malformaciones o deficiencias funcionales.

**Tóxico:** Cualquier molécula que puede causar un efecto adverso sobre la salud en general y el comportamiento o reproducción de cualquier organismo a dosis y condiciones específicas, alterando el funcionamiento de los órganos y tejidos.

**Toxicidad:** Capacidad para generar un efecto adverso en un organismo, en relación con la cantidad o dosis de sustancia administrada o absorbida, la vía de administración y su distribución en el tiempo (dosis única o repetidas), tipo y severidad del daño, tiempo necesario para producir éste, la naturaleza del organismo afectado y condiciones ambientales.

**Umbral:** Límite más bajo al cual cierto fenómeno puede ocurrir.

**Vida media:** Es el tiempo que toma cualquier compuesto para que su concentración en un sistema u organismo disminuya en un 50%.

**Volatilización:** Pérdida de una sustancia a través de la evaporación o sublimación.

**Zooplankton:** **Plancton** animal.