

## HALLAZGO DE MERCURIO EN PECES DE LA CIÉNAGA DE AYAPEL, CÓRDOBA, COLOMBIA

### FINDING OF MERCURY IN FISH FROM THE AYAPEL MARSH, CORDOBA, COLOMBIA

José Marrugo<sup>1</sup>, Ph.D, Edineldo Lans<sup>1</sup>, M.Sc, Luis Benítez<sup>2</sup>, Ph.D.

<sup>1</sup>Universidad de Córdoba, Grupo de aguas, Química Aplicada y Ambiental, A.A. 354 Montería, Colombia. <sup>2</sup>Universidad del Valle, Departamento de Química, A.A. 25360, Cali, Colombia.

Recibido: Enero 10 de 2007; Aceptado: Junio 15 de 2007

#### RESUMEN

**Objetivo.** Determinar las concentraciones de mercurio total (Hg-T) en algunas especies de peces de la ciénaga de Ayapel (Colombia). **Materiales y métodos.** Los muestreos fueron realizados desde Julio de 2004 a Junio de 2005, incluyendo las épocas seca y lluviosa. Las muestras fueron analizadas por espectrometría de absorción atómica por vapor frío después de digestión ácida. **Resultados.** Las concentraciones más altas de Hg-T se observaron para las muestras analizadas de la especie carnívora *Ageneiosus caucanus* ( $0.504 \pm 0.103$  mg Hg kg<sup>-1</sup> peso fresco), y las menores concentraciones en la especie Iliófaga *Prochilodus magdalenae* ( $0.130 \pm 0.056$  mg Hg kg<sup>-1</sup> peso fresco). Las concentraciones más altas fueron encontradas en las muestras de la época seca. Los niveles promedio de Hg-T en las muestras de peces no excedieron el límite para consumo humano establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 0.5 mg Hg Kg<sup>-1</sup> peso fresco). **Conclusiones.** La evaluación del riesgo basado en el índice de peligrosidad sugiere que el consumo de 0.12 kg de pescado por día en la población humana (principalmente carnívoros) podría incrementar el riesgo de envenenamiento por mercurio en la población local.

**Palabras clave:** Mercurio, pescado, Ayapel, Colombia, Salud Pública.

#### ABSTRACT

**Objective.** To establish total mercury (Hg-T) concentrations in some fishes species in the Ayapel marsh (Colombia). **Materials and methods.** Sampling was conducted from July 2004 to June 2005, including both the dry and rainy seasons. Hg-T was analyzed by cold vapor atomic absorption spectroscopy after acid digestion. **Results.** The highest concentrations in Hg-T were observed for analyzed samples of the carnivorous specie *Ageneiosus caucanus* ( $0.504 \pm 0.103$  mg Hg kg<sup>-1</sup> fresh weight),

and the lowest concentrations in the Iliophagus specie *Prochilodus magdalena* ( $0.130 \pm 0.056$  mg Hg kg<sup>-1</sup> fresh wt). The highest Hg-T concentrations were found in the samples of the dry season. The Hg-T mean levels for fish samples did not exceed the human limit consumption level according to the World Health Organization (WHO, 0.5 mg Hg kg<sup>-1</sup> fresh weight). **Conclusions.** The risk assessment based on the hazard index suggested that the consumption of 0.12 kg per day of fish (mainly carnivorous) could increase the risk of mercury poisoning in the local population.

**Key words:** Mercury, fish, Ayapel, Colombia, Public Health.

## INTRODUCCIÓN

El mercurio es uno de los metales con más alto impacto sobre los ecosistemas acuáticos y ha sido estudiado durante varias décadas por la comunidad científica. Este elemento puede aparecer en el ambiente tanto por fenómenos naturales o actividad antropogénica, causando daños irreversibles tanto en la biota terrestre como acuática (1). El metilmercurio (MeHg) es la forma más tóxica del mercurio, la cual es fácilmente bioacumulada y biomagnificada en las cadenas alimenticias. El MeHg en ambientes acuáticos se forma principalmente por biometilación del mercurio depositado en los sedimentos (2- 4).

Dado que más del 90% del mercurio está presente como metilmercurio en la biota acuática (organismos bentónicos y peces) (3, 5), la principal fuente de exposición humana al metilmercurio es el consumo de pescado (6). Por esta razón, la evaluación de los niveles de mercurio representa un factor importante no solo desde el punto de vista toxicológico, sino también para la evaluación de los impactos potenciales sobre la salud pública.

En Colombia, desde 1987 hasta 1997, se descargaron al ambiente 240 toneladas de mercurio (7, 8). Hay pocos estudios que describan este problema a nivel local, principalmente en lo referente a

su impacto en el ambiente acuático. Estudios realizados en otros lugares ubicados en zonas mineras de Colombia han mostrado el impacto de esta actividad sobre los ecosistemas acuáticos (8 - 10).

El objetivo del presente estudio fue evaluar las concentraciones de mercurio en peces de la ciénaga de Ayapel y establecer el riesgo potencial en la salud humana.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Área de Estudio.** La ciénaga de Ayapel está localizada en el nor-occidente de Colombia ( $8^{\circ} 17' - 8^{\circ} 24' N$  y  $75^{\circ} 4' - 75^{\circ} 9' W$ ), sobre un área aproximada de 150 km<sup>2</sup> y 25 m por encima del nivel del mar y a 25 km de la zona minera con la más alta producción de oro en el país (sur de Bolívar y noreste de Antioquia), donde el mercurio es utilizado para extraer el metal. Esta ciénaga es un ecosistema con gran importancia comercial y ecológica en el país, por ser una fuente importante de especies ícticas para consumo humano y por su localización en la zona de la Mojana considerada como una de las regiones con más alta biodiversidad en el planeta. El promedio anual de precipitación es de 2260 mm con una temperatura promedio de 27°C. La ciénaga está localizada en la cuenca del río San Jorge, con extensiva minería de níquel aguas arriba, como también

importantes explotaciones auríferas en la parte alta del río San Pedro, sobre la misma cuenca (Figura 1). Además, a 15 km aproximadamente de la parte sur-oriental está el río Cauca, que transporta residuos provenientes de la zona minera, llegando sus aguas hasta la región de la Mojana. La ciénaga recibe aguas del río Cauca a través de los caños y quebradas localizados en el costado oriental y sur-oriental (Figura 1), y algunas veces por corrientes localizadas en el costado norte (Caño Grande). Considerando las fluctuaciones en el nivel de aguas, el máximo nivel se da entre los meses de julio a noviembre y el nivel más bajo en

el mes marzo. La época seca esta comprendida entre los meses de diciembre a abril, y la época lluviosa de mayo hasta noviembre.

Las principales especies ícticas que influyen grandemente en el comercio de la región son "bocachico" (*Prochilodus magdalenae*), "bagre pintao" (*Pseudoplatystoma fasciatum*), "mojarra amarilla" (*Caquetaia kraussi*), "blanquillo" (*Sorubim cuspicaudus*), "moncholo" (*Hoplias malabaricus*), "pacora" (*Plagioscion surinamensis*), "doncella" (*Ageneiosus caucanus*) y "liseta" (*Leporinus muyscoruma*). Una parte de

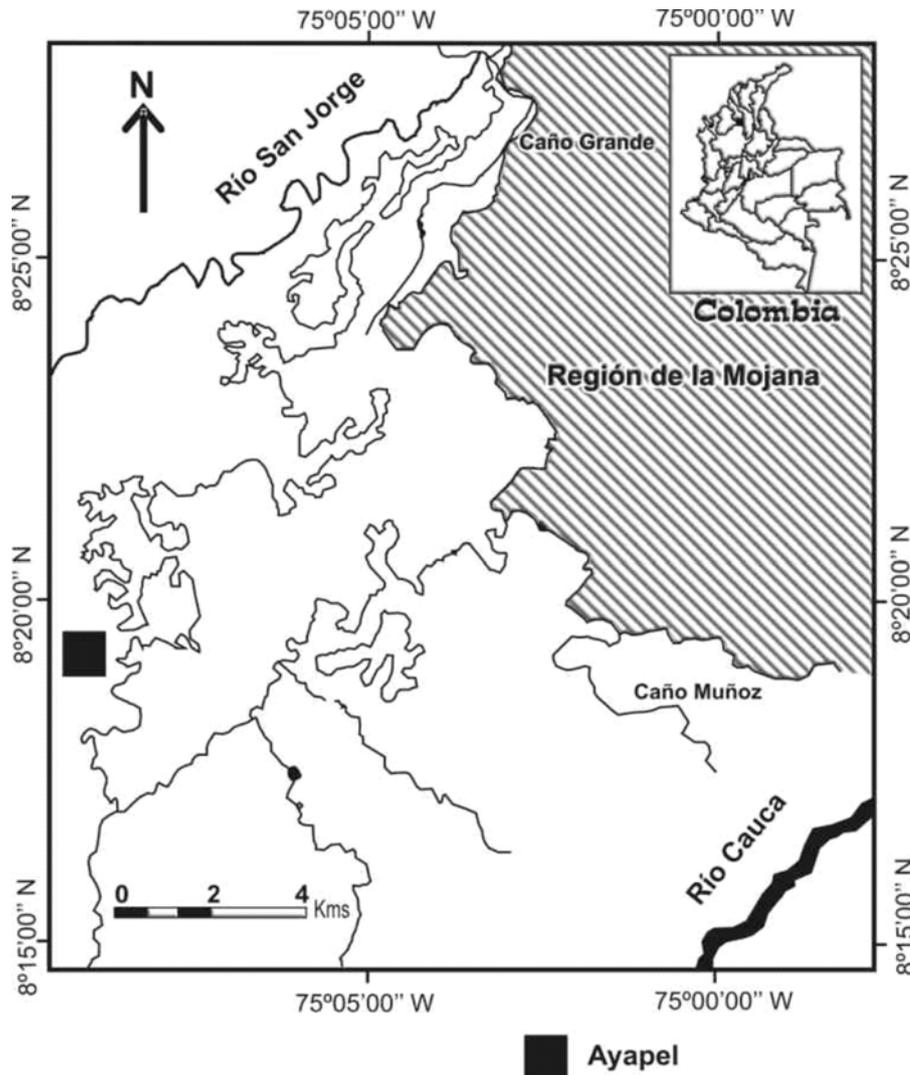


Figura 1. Localización del área de estudio

la producción pesquera es consumida en las poblaciones locales, principalmente en el municipio de Ayapel; el excedente se comercializa a otros municipios como Montelíbano, Planeta Rica, Montería, Cartagena, Medellín, Barranquilla y Bogotá.

**Recolección y tratamiento de muestras.** Se realizaron cinco muestreos en un período de un año. Cada expedición, M1, M2, M3, M4 y M5, corresponden a Julio/04, Septiembre/04, Diciembre/04, Marzo/05 y Junio/05, respectivamente. Los especímenes se recolectaron durante campañas de muestreo con pescadores locales. Las especies seleccionadas fueron las consideradas como las más importantes en la ciénaga por su abundancia. Después de medir la talla, cada pescado fue eviscerado, empacado individualmente en bolsas plásticas, etiquetado y transportado refrigerado hasta el laboratorio. Las muestras para el análisis se obtuvieron del músculo dorsal disectado con un cuchillo plástico y analizadas en fresco.

**Detección de mercurio.** Se realizó por espectroscopia de absorción atómica después de digestión ácida de la muestra extraída. Esta fue digerida con una mezcla de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ - $\text{HNO}_3$  2:1 v/v a una temperatura de 100-110°C durante 3 horas (11). El límite de detección (3 desviaciones estándar por encima del promedio de 10 soluciones blanco) fue 13.1 mg kg<sup>-1</sup>. El control de calidad del método se hizo con material certificado de referencia y muestras enriquecidas. La concentración de Hg-T encontrada en el material certificado DORM-2 (*dogfish muscle, National Research Council Canada*) fue 4.46 ± 0.25 mg kg<sup>-1</sup> (valor certificado 4.64 ± 0.26 mg Hg kg<sup>-1</sup>). El porcentaje de recuperación en muestras enriquecidas fue 95.2±4.3% (n=6). La desviación estándar relativa fue menor

del 10%. Las concentraciones de Hg-T fueron expresadas como mg Hg kg<sup>-1</sup> de peso fresco.

**Índice de perigosidad (HI).** El HI se definió como la relación del nivel de exposición de una sustancia en particular (E) a una dosis de referencia (RfD). El E para el consumo de MeHg se calculó utilizando la fórmula,  $E=CxI/W$ , donde C es la concentración promedio de MeHg de la especie en consideración; ( $C=0.90x\text{Hg-T}$ ), considerando que el 90% del Hg-T encontrado en peces es MeHg (3), I es la ingesta diaria de pescado (g/día), y W es el peso promedio de una persona adulta normal (70 kg). La EPA (*Environmental Protection Agency*) ha propuesto un RfD para MeHg de 0.1 µg/kg/día (12).

**Análisis estadístico.** El resultado del análisis para cada muestra se presenta como el promedio (±) las desviaciones estándares de las muestras analizadas por duplicado. Se utilizó ANOVA para determinar las diferencias entre más de dos promedios de muestras. En orden de establecer la asociación entre variables fue utilizado el análisis de correlación lineal de Pearson (r). El análisis estadístico fue realizado con el programa SPSS 10.5, con un nivel de significancia de  $P \geq 0.05$ .

## RESULTADOS

La tabla 1 resume los resultados obtenidos para las diferentes especies ícticas de la ciénaga de Ayapel. Seis especies que representaron el 63.7% de las muestras recolectadas, fueron carnívoras, y dos especies que correspondieron al 36.3% de las muestras, fueron no carnívoras. Los especímenes recolectados con mayor frecuencia entre las especies carnívoras fueron *Hoplias malabaricus* ("moncholo"),

**Tabla 1.** Concentraciones de Hg-T (mg kg<sup>-1</sup> peso fresco) en peces de la ciénaga de Ayapel.

Nombre Común	Nombre científico	Hábito	T-Hg		n	%
			m ± s	Rango		
Bagre pintao	<i>Pseudoplatystoma fasciatum</i>	C	0.423±0.113	0.218 – 0.581	18	9.7
Blanquillo	<i>Sorubin cuspicaudus</i>	C	0.330±0.070	0.268 – 0.435	5	2.7
Mojarra	<i>Caquetaia kraussi</i>	C	0.401±0.109	0.250 – 0.575	17	9.2
Moncholo	<i>Hoplias malabaricus</i>	C	0.315±0.110	0.123 – 0.583	35	18.9
Pacora	<i>Plagioscion surinamensis</i>	C	0.277±0.132	0.119 – 0.650	35	18.9
Doncella	<i>Ageneiosus caucanus</i>	C	0.504±0.103	0.267 – 0.602	8	4.3
<b>Subtotal</b>			<b>0.346±0.133</b>	<b>0.119 – 0.650</b>	<b>118</b>	<b>63.7</b>
Bocachico	<i>Prochilodus magdalenae</i>	NC	0.130±0.056	0.035 – 0.234	39	21.2
Liseta	<i>Leporinus muyscoruma</i>	NC	0.261±0.104	0.096 – 0.483	28	15.1
<b>Subtotal</b>			<b>0.184±0.102</b>	<b>0.035 – 0.483</b>	<b>67</b>	<b>36.3</b>
<b>Total C+NC</b>			<b>0.288±0.145</b>	<b>0.035 – 0.650</b>	<b>185</b>	<b>100</b>

C: carnívoro, NC: no-carnívoro, m: promedio, s: Desviación Estándar.

*Plagioscion surinamensis* ("pacora") y *Pseudoplatystoma fasciatum* ("bagre pintao"). Estas correspondieron al 46,6% del número total de capturas. En el grupo de no carnívoros, la especie recolectada con mayor frecuencia fue el *Prochilodus magdalenae* ("bocachico") con un 21.2% del total del número de capturas. Estas cuatro especies son las más consumidas en la región de la ciénaga de Ayapel.

Para el total de las muestras, las concentraciones de mercurio en la muestra analizada de tejido muscular tuvieron un valor promedio de 0.288±0.145 mg kg<sup>-1</sup> (n=185). Las concentraciones promedio fueron de 0.346±0.133 mg kg<sup>-1</sup> entre las especies carnívoras y de 0.184±0.102 mg kg<sup>-1</sup> entre las especies no carnívoras. Al comparar los valores, se determinó una proporción de 2:1 entre los niveles de Hg-T en las especies carnívoras y no carnívoras. Para todas las especies recolectadas, la concentración mínima de Hg-T fue encontrada en *Prochilodus* sp.

("bocachico"), una especie no carnívora (promedio: 0.130±0.056 mg kg<sup>-1</sup>), y la máxima concentración fue para una especie carnívora, *Ageneiosus caucanus* ("doncella") (0.504±0.103 mg kg<sup>-1</sup>).

Se encontraron diferencias estadísticamente significativas al comparar los resultados de Hg-T entre especies carnívoras vs. las especies no carnívoras (ANOVA; P=0.000). Sin embargo, no se encontraron diferencias estadísticas en los niveles de Hg-T entre especies carnívoras o entre especies no carnívoras (p>0.05). Para la misma especie, se encontraron diferencias estadísticas en los niveles de Hg-T entre la época seca y lluviosa (p. ej: "pacora", P=0.000; bagre pintao, P=0.010; blanquillo, P=0.017; liseta, P=0.000). En la tabla 2 se muestran los coeficientes de correlación (r) entre las concentraciones de Hg-T la longitud del pez y su correspondiente valor P, para las diferentes especies evaluadas.

**Tabla 2.** Coeficiente de correlación de Pearson (r) entre los niveles de Hg-T ( $\text{mg kg}^{-1}$  peso fresco) y longitud (cm) para las especies ícticas de la ciénaga de Ayapel.

Especie	Época lluviosa			Época seca			Ambas épocas	
	r	P	n	r	P	n	r	P
Bagre pintao	0.45	0.120	13	0.75	0.140	5	0.54	0.020
Blanquillo	0.20	0.850	3	1.00	0.000	2	-0.56	0.320
Mojarra	0.64	0.040	10	0.79	0.036	7	0.13	0.620
Moncholo	0.21	0.400	19	0.38	0.150	16	0.04	0.800
Pacora	0.54	0.015	20	0.86	0.000	15	0.74	0.000
Doncella	1.00	0.000	2	0.84	0.034	6	0.64	0.090
Bocachico	0.38	0.060	23	0.12	0.650	16	0.29	0.074
Liseta	0.47	0.060	16	0.41	0.180	12	0.03	0.890
<b>Total</b>	<b>0.42</b>	<b>0.041</b>	<b>106</b>	<b>0.39</b>	<b>0.021</b>	<b>79</b>	<b>0.32</b>	<b>0.000</b>

P: significancia. n: número de individuos.

En la tabla 3 se muestran los valores de HI (12) calculados para una ingesta diaria de pescado de 120 g/día, utilizando los

valores promedio de la concentración de Hg-T encontrada para cada especie colectada en la ciénaga de Ayapel.

**Tabla 3.** Valores de Índice de Peligrosidad para efectos no carcinogénicos del Hg-T basado en una ingesta de pescado de 120 g/día.

Especie	Intervalo de T-Hg ( $\text{mg kg}^{-1}$ peso fresco)	Intervalo del índice de peligrosidad (HI)
Bocachico (NC)	0.035 – 0.234	0.54 – 3.61
Liseta (NC)	0.096 – 0.483	1.48 – 7.45
Pacora (C)	0.119 – 0.650	1.84 – 10.0
Moncholo (C)	0.123 – 0.583	1.90 – 9.00
Blanquillo (C)	0.268 – 0.435	4.13 – 6.71
Mojarra Amarilla (C)	0.250 – 0.575	3.86 – 8.87
Bagre pintao (C)	0.218 – 0.581	3.36 – 8.96
Doncella (C)	0.267 – 0.602	4.12 – 9.30

NC: especie no carnívora; C: especie carnívora.

## DISCUSIÓN

Las concentraciones más altas de Hg-T en peces fueron encontradas en época seca, probablemente debido a la mayor biodisponibilidad que puede darse por las altas temperaturas en dichas temporadas o debido a que el metal se concentra más cuando el nivel del agua disminuye (efecto de evaporación). Pocos estudios han relacionado el contenido de Hg en peces con la estación. En el trópico, las precipitaciones y la variabilidad hidrológica consecuentemente podrían

cambiar la disponibilidad del Hg para los peces. Zapata (13) reportó la variación estacional en el contenido de mercurio en peces en ríos bolivianos. El promedio de las concentraciones de Hg-T fue  $0.580 \text{ mg kg}^{-1}$  en época lluviosa y  $0.800 \text{ mg kg}^{-1}$  en época seca. Previamente Hylander et al (14) reportaron la variación estacional de Hg-T en peces en el Alto Pantanal, Brasil. El promedio de las concentraciones fue  $0.202 \text{ mg kg}^{-1}$  en época de lluvias y  $0.410 \text{ mg kg}^{-1}$  en época seca. Zapata (13) y Hylander et al (14) plantearon que las variaciones estacionales encontradas

en los niveles de Hg en las especies ícticas fueron debido principalmente a las mayores actividades mineras durante el verano, la disminución de los volúmenes de agua y el cambio de hábitos alimenticios durante la época seca.

Las concentraciones de Hg-T en especies ícticas de la ciénaga de Ayapel son indudablemente altas. Del número total de muestras analizadas (185), 24 especímenes (todos carnívoros) representando el 13.0% de las muestras, presentaron valores por encima de este límite. Para proteger la población vulnerable, incluyendo mujeres embarazadas, los menores de 15 años, y los consumidores frecuentes, la OMS ha recomendado un límite máximo permisible de Hg en peces de 0.2 mg kg<sup>-1</sup> para esos grupos (6). Las concentraciones de Hg-T encontradas en algunas especies carnívoras y no carnívoras (liseta) fueron mayores a 0.2 mg kg<sup>-1</sup>. Las concentraciones encontradas son similares o superiores a las reportadas en otras zonas sometidas a la contaminación con mercurio en Colombia (9). El consumo frecuente de especies carnívoras representa un riesgo mayor en la salud humana en comparación con el consumo de las no-carnívoras, aunque algunos individuos de éstas últimas también pueden presentar altos niveles de Hg-T que son peligrosos para la salud humana.

En un estudio (10) realizado en las ciénagas del municipio de Caimito (región de la Mojana, Colombia) en 1999, se encontraron altos niveles de mercurio en "doncella" (0.230-0.540 mg kg<sup>-1</sup>), "blanquillo" (0.200 - 0.510 mg kg<sup>-1</sup>) y "mojarra amarilla" (0.020-0.560 mg kg<sup>-1</sup>). Olivero y Solano (8) reportaron valores similares a los encontrados en este estudio para moncholo y pacora en la ciénaga de la mina Santa Cruz (sur de Bolívar). Aunque los resultados encontrados en este estudio fueron

inferiores a los reportados para ecosistemas impactados por la minería de oro en Brasil (15 - 17), el consumo de estas especies debe ser mínimo.

En este trabajo, las mejores correlaciones entre las concentraciones de Hg-T y la longitud estándar se obtuvieron para tres especies ícticas. Las correlaciones llegaron a ser más significativas cuando se consideraron las diferentes especies por estaciones. Por ejemplo, para los 15 especímenes de la especie *Plagioscion surinamensis* ("pacora") capturados en la época seca, el coeficiente de correlación fue 0.86 (P=0.000). Al comparar los datos de todas las especies, se observó una correlación positiva entre la concentración y la longitud de los peces (r=0.32, P=0.000). Usualmente los especímenes más viejos presentan niveles de Hg más elevados que los jóvenes como consecuencia de un mayor tiempo de exposición (17, 18). Las correlaciones positivas entre las concentraciones de Hg-T y la longitud encontradas en este estudio describen bien el panorama general (Tabla 2), con mayor acumulación de mercurio en los peces más grandes que en los pequeños, lo que evidencia un claro proceso de bioacumulación en éstas especies.

El consumo de pescado contaminado con mercurio puede representar un riesgo para la salud humana. Aunque de acuerdo con los estándares internacionales solamente "bocachico" y "liseta" serían aptos para el consumo humano (Niveles Hg-T <0.5 mg kg<sup>-1</sup> establecidos por la Organización Mundial de la Salud (6)). Un consumo frecuente de carne de todas las especies analizadas en el presente trabajo podría representar un riesgo para la salud humana. La evaluación del riesgo de los efectos no carcinogénicos se ha caracterizado usualmente por el índice de peligrosidad (Hazard Index, HI) (12).

La RfD se interpretó como la concentración de un químico seguro de ingerir diariamente por un tiempo de vida determinado, este es particularmente adecuado para la protección de mujeres embarazadas debido al riesgo de daño neurológico al feto causado por el MeHg. Cuando el HI excede la unidad, el consumo de pescado puede originar potenciales efectos negativos sobre la salud.

Los resultados del cálculo del HI sugieren que hay un riesgo potencial para la salud humana debido a las concentraciones de Hg-T en peces, y sobre todo, por la alta ingesta de pescado por parte de la población local. En este estudio la mayoría de los HI excedió la unidad, lo cual puede conllevar a potenciales efectos negativos sobre la salud humana.

Olivero et al (9) reportaron niveles de Hg-T en cabello de los pobladores del municipio de Caimito (región de la

Mojana) asociado con el consumo de pescado, las concentraciones de Hg en peces fueron similares a las encontradas en el presente estudio. Aunque la carne de pescado es la principal fuente de exposición al MeHg, se considera como la única fuente de proteínas de muchas poblaciones en la región, por esta razón el pescado no puede ser prohibido en la dieta de las comunidades ribereñas.

En conclusión, los resultados de HI presentados deben promover estudios más intensivos de salud ambiental por parte del gobierno local y nacional.

### Agradecimientos

Los autores agradecen a la Corporación Autónoma de los Valles del Sinú y San Jorge por su soporte financiero para esta investigación a través del convenio interinstitucional CVS-Universidad de Córdoba 011-2004.

## REFERENCIAS

1. Uryu Y, Malm O, Payne I, Cleary D. Mercury contamination of fish and its implications for other wildlife of the Tapajòs Basin, Brazilian Amazon. *Conservation Biol* 2001; 15 (2): 438-446.
2. WHO. Environmental Health Criteria Mercury, Environmental Aspects, World Health Organization. Geneva; 1989; 86.
3. Morel F, Kraepiel A, Amyot M. The Chemical cycle and bioaccumulation of mercury. *Annu Rev Ecol Syst* 1998; 29: 543-566.
4. Ullrich S, Tanton T, Abdrashitova S. Mercury in the Aquatic Environment: A review of factors affecting methylation. *Critical Rev Environ Sci Technol* 2001; 31 (3): 241-293.
5. Lacerda L, Bidone E, Guimaraes A, Pfeiffer W. Mercury concentrations in fish from the Itacaiúnas-Parauapebas river system, Carajás region, Amazon. *Ann Acad Bras Ci* 1994; 66(3).
6. WHO. Methylmercury in environmental health criteria 101. World Health Organization. Geneva; 1990; 19.
7. Malm, O. Gold mining as a source of mercury exposure in the Brazilian Amazon. *Environ Res Section A* 1998; 77 (2): 73-78.

8. Olivero J, Solano B. Mercury in environmental samples from a waterbody contaminated by gold mining in Colombia, South America. *Sci Total Environ* 1998; 217: 83-89.
9. Olivero J, Jhonson B, Arguello E. Human exposure to mercury due to fish consumption in San Jorge river basin, Colombia (South America). *Sci Total Environ* 2002; 289: 41- 47.
10. Olivero J, Johnson B, Mendoza C, Paz R, Olivero R. Mercury in the aquatic environment of The Village of Caimito at The Mojana Region, North of Colombia. *Water Air Soil Pollut* 2004; 159: 409-420.
11. Sadiq M, Zaidi T, Al-Mohana M. Sample weight and digestion temperature as critical factors in mercury determination in fish. *Bull Environ Contam Toxicol* 1991; 47: 335-341.
12. USEPA. Risk Assessment Guidance For Superfund Washington, 1989; vol 1: Chapter 6, 54.
13. Zapata J. Environmental impacts study of gold mining in the Madeira river Bolivian-Brazilian border. In: Environmental mercury pollution and its health effects in Amazon river basin. Natl. Inst. Minamata Disease and Inst Biophysics of the Univ Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1994; 23-24.
14. Hylander L, Pinto F, Guimaraes J, Meili M, Oliveira L, Castro E. Fish mercury concentrations in the Alto Pantanal, Brazil: influence of season and water parameters. *Sci Total Environ* 2000; 261: 9-20.
15. Barbosa A, de Souza J, Dórea J, Jardim W, Fadini P. Mercury biomagnification in a tropical black water, Rio Negro, Brazil. *Arch Environ Contam Toxicol* 2003; 45: 235-246.
16. Malm O. Follow up of mercury in fish, human air and urine in Madeira and Tapajos basins, Amazon Brazil. *Water Air Soil Pollut* 1997; 97: 45-51.
17. Dixon R, Jones B. Mercury concentrations in stomach contents and muscle of five fish species from the north east coast of England. *Mar Pollut Bull* 1994; 28: 741-745.
18. Joiris C, Ali I, Hoisbeek L, Bossicart M, Tapia G. Total and Organic mercury in Barents sea pelagic fish. *Bull Environ Contam Toxicol* 1995; 55: 674-681.