

GENOTOXICIDAD DE METALES PESADOS (Hg, Zn, Cu, Pb Y Cd) ASOCIADO A EXPLOTACIONES MINERAS EN POBLADORES DE LA CUENCA DEL RÍO SAN JORGE DEL DEPARTAMENTO DE CÓRDOBA, COLOMBIA.

GENOTOXICITY STUDIES OF HEAVY METALS: Hg, Zn, Cu, Pb Y Cd RELATED TO MINING
OPERATIONS ON RESIDENTS OF SAN JORGE BASIN, DEPARTMENT OF CORDOBA,
COLOMBIA

Gloria Lucia Madrid^{1*}, Lisy del Carmen Gracia Herrera²,
José Luis Marrugo Negrete³, Iván David Urango Cardenas⁴.

¹ Universidad de Córdoba. Laboratorio de Toxicología y Gestión Ambiental. yoyita83_1@hotmail.com

² Universidad de Córdoba. Grupo de investigaciones microbiológicas y biomédicas de Córdoba. Facultad de ciencias de la salud. Cra 6 N°76-103 Montería – Córdoba. Código postal: 354 Tel/fax 7860381 ext. 147. lisygracia@hotmail.com

³ Universidad de Córdoba. Grupo de investigación en Aguas, Química Aplicada y Ambiental. Departamento de química. Cra 6 N°76-103 Montería – Córdoba. Código postal: 354 Tel/fax 7860381 ext. 147. jlmarrugon@yahoo.com

⁴ Universidad de Córdoba. Laboratorio de Toxicología y Gestión Ambiental. Cra 6 N°76-103 Montería – Córdoba. Código postal: 354 Tel/fax 7860381 ext. 147. ivaild@hotmail.com

Recibido: Agosto 17 de 2010

Aceptado: Marzo 8 de 2011

*Correspondencia del autor. 1. Universidad de Córdoba. Laboratorio de Toxicología y Gestión Ambiental. Cra 6 N°76-103 Montería – Córdoba. Código postal: 354 Tel/fax 7860381 ext. 310. Correo electrónico: yoyita83_1@hotmail.com

RESUMEN

Una de las zonas más importantes de la minería en el país, es la parte alta de la cuenca del río San Jorge en el departamento de Córdoba, en ella se encuentran explotaciones de ferroníquel, carbón y oro. Se evaluaron los efectos genotóxicos de los metales pesados (Hg, Pb, Cd, Cu y Zn) asociados a explotaciones mineras en pobladores de la cuenca del río San Jorge; se determinaron las concentraciones de los metales en sangre de 40 habitantes entre los municipios de: Buenavista (Puerto Córdoba), Montelíbano (Bocas de Uré) y Puerto Libertador (Zona Urbana y mina el Alacrán); y 10 muestras de Montería (grupo control). Se determinó la frecuencia de aparición de micronúcleos (FAM) para evaluar daño al ADN. El Hg se determinó por espectrometría de absorción atómica por vapor frío después de digestión ácida, y los otros metales (Pb, Zn, Cu y Cd) se trabajaron por voltametría redisolución anódica de adición estándar y para la FAM se utilizó la técnica de micronúcleos. Las concentraciones medias de Hg en sangre de los habitantes de Bocas de Uré (12.9 ± 1.24), Puerto Córdoba (18.08 ± 2.90) y mina el Alacrán (20.32 ± 8.45), excedieron el límite permisible ($<5.8 \mu\text{g/L}$) establecido por la EPA. Se registró daño en el ADN ($\text{FAM}=0.18\text{-}2.56$) en sangre de habitantes de la mina el Alacrán. Estos resultados sugieren que los daños genotóxicos registrados, pueden estar asociados a la actividad minera como consecuencia de la liberación de metales pesados.

PALABRAS CLAVE: metales, micronúcleos, sangre, genotóxico.

ABSTRACT

One of the most important areas of mining in Colombia is the top of the San Jorge River basin in the province of Córdoba. In this area, ferro-nickel, coal and gold mine exploitation takes place. We evaluated the genotoxic effects of heavy metals: Hg, Pb, Cd, Cu and Zn associated with mining on the inhabitants of the San Jorge Basin. Heavy metal Concentrations in blood were analyzed. Forty samples from individuals living in the municipalities of Buenavista (Puerto Córdoba), Montelíbano (Bocas Ure) and Puerto Libertador (Zone Urbana and mine Alacran) were taken. As a control group, 10 samples from Montería were used. The frequency of micronuclei appearance (FMA) was analyzed to evaluate DNA damage. The Hg was determined by cold vapor atomic absorption spectrometry (CVAAS) after acid digestion. Furthermore, the other metals: Pb, Zn, Cu and Cd were analyzed with anodic stripping voltammetry (ASV) using standard addition. Concerning Bocas Ure's inhabitants, the average Hg concentrations in blood were (12.9 ± 1.24), Puerto Córdoba (8.18 ± 2.90) and Alacran mine (20.32 ± 8.45). These results exceeded the permissible limit ($<5.8 \mu\text{g} / \text{L}$) established by EPA. Moreover, inhabitants of the Scorpion mine registered damage in DNA (FMA = 0.18-2.56). These results suggest that the genotoxic damage recorded may be associated with mining as a result of the heavy metals releases.

KEY WORDS: metals, micronuclei, blood, genotoxic.

INTRODUCCIÓN

Entre los desechos mineros, los metales pesados son considerados los más peligrosos y tóxicos para la salud, debido a su persistencia en el ambiente, donde su densidad llega a ser cinco veces mayor que el agua donde son contenidos y su toxicidad es mayor en aguas suaves que en aguas duras debido a su biodisponibilidad (1). según la agencia de protección del medio ambiente (2) los metales pesados se definen como aquellos elementos que tienen una densidad mayor de $5 \mu\text{g}/\text{mL}$, generalmente son 12 los utilizados más comúnmente y descargados al ambiente como parte de una serie de residuos: cadmio (Cd), cromo (Cr), cobalto (Co), cobre (Cu), hierro (Fe), mercurio (Hg), manganeso (Mn), molibdeno (Mo), níquel (Ni), plomo (Pb), estaño (Sn) y cinc (Zn) (2).

Actualmente, en Colombia, se desconoce la cantidad exacta de sitios contaminados con metales pesados como consecuencia de la actividad minera, pero se estima que teniendo como referencia datos como los de la Unidad de Planeación Minera Energética (UPME), que indican que para el año 2001 estaban reportadas alrededor de 12.400 minas de explotación de oro en el país. De igual manera, la peligrosidad de los metales pesados es mayor que cualquier otro elemento, debido a que no son degradados o destruidos, así, una vez emitidos, pueden permanecer en el ambiente durante cientos de años y aumentar su concentración en los seres vivos en la medida que son ingeridos por otros, por lo que la inges-

ta de plantas o animales contaminados puede provocar síntomas de intoxicación (3,4)

Los contaminantes derivados de la minería que entran al medio ambiente, tienen el potencial de penetrar en las fuentes de agua de la biota o en la atmósfera en cantidades significativas, por lo tanto se generan riesgos potenciales para el medio ambiente y la salud humana (5). La contaminación resultante de la minería y los posibles efectos genotóxicos en los organismos han sido investigados utilizando bacterias (6), lombrices de tierrapeces (7), plantas (8), roedores (9) y en células humanas (10).

Los biomarcadores son pruebas para evaluar genotoxicidad y se definen como alteraciones celulares o bioquímicas de estructuras, funciones o procesos producidas por xenobióticos que pueden ser medidas en un sistema o una muestra biológica; además se deberían añadir a las mediciones anteriores, alteraciones en el comportamiento producidas por la exposición a agentes xenobióticos, por lo que, los biomarcadores se pueden agrupar de forma general en marcadores de efecto, exposición y susceptibilidad. Estos biomarcadores se han identificado y aplicado al estudio de poblaciones humanas (11). El ensayo de micronúcleos en linfocitos en sangre periférica es ampliamente utilizado en control biológico, molecular y estudios epidemiológicos, para evaluar la presencia y el grado de daño cromosómico en poblaciones humanas expuestas a agentes genotóxicos y también porque la frecuencia alta de micronúcleo ha

sidovalidado como un biomarcador de riesgo de cáncer en los seres humanos (12,13).

En la cuenca del río San Jorge, específicamente en el municipio de Puerto Libertador estudios realizados por León *et al.* (14), reportaron el primer estudio de efectos genotóxico en dos especies de roedores (*Rattus rattus* y *Mus musculus*), asociados a los componentes del Carbón, demostrando que ambas especies de roedores investigadas mostraron ser sensibles indicadores de genotoxicidad ambiental causada por las actividades mineras del carbón.

El objetivo principal de este estudio fue evaluar los efectos genotóxicos de los metales pesados (Hg, Cd, Pb, Cu y Zn) en pobladores de la Cuenca del río San Jorge del departamento de Córdoba.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área y Tipo de estudio

Esta investigación fue de tipo descriptivo por conveniencia aplicando un muestreo no probabilístico de tipo intencional de corte transversal, resaltando que no se totalizó la población en general; solo es el resultado del grupo de estudio seleccionado, realizado en los municipios ubicados en la cuenca del río San Jorge del departamento de Córdoba: Puerto Libertador, Montelíbano y Buenavista.

La cuenca hidrográfica del San Jorge es la única que tiene grandes recursos de minería, como el carbón, el oro y el níquel principalmente, aunque este último el DANE, lo clasifica como una actividad Industrial (15).

Características del grupo de estudio

Para la selección del grupo de estudio se tomaron factores de exclusión los cuales fueron recogidos de una encuesta elaborada a los participantes donde se realizó un cuestionario que incluía datos detallados como edad, sexo, ocupación, estado de salud, antecedentes de cáncer, enfermedades crónicas, la exposición a rayos X, costumbres alimenticias, hábitos de fumar, tratamiento con fármacos, ingesta de bebidas alcohólicas teniendo en cuenta la frecuencia de la ingesta y algunas medidas de protección, teniendo en cuenta estos factores fueron seleccionados 40 personas expuestas entre los municipios de Buenavista (Puerto Córdoba), Montelíbano (Bocas de Uré), Puerto Libertador (Zona

urbana) y Puerto Libertador (mina el Alacrán) y 10 personas como grupo control del municipio de Montería, los cuales no se encontraban bajo tratamiento farmacológico, no presentaban exposición conocida a agentes genotóxicos incluyendo manipulación en trabajos de minería, radiación y productos químicos.

Los factores de inclusión establecidos para el grupo expuesto fueron: participación voluntaria de la persona, el promedio de edad oscilaba en un rango de 18-65 años, tener 10 años de estar viviendo en la zona, resaltando que los factores excluyentes de los grupos (expuestos y no expuestos) fueron: edad menor de 18 y mayores de 64 años, fumadores o ex-fumadores recientes, haber padecido patologías como cáncer, crónicas-degenerativas, tipo infeccioso por lo menos en un periodo de 3 meses antes de la toma de la muestra, encontrarse bajo algún tratamiento farmacológico, exposición a rayos X por lo menos 1 año antes del muestreo.

Colecta de las muestras de sangre

Al grupo expuesto y control se les tomó una muestra biológica de sangre periférica por venopunción de aproximadamente 8 mL, que se distribuyeron de la siguiente manera; 3 mL de sangre periférica en tubos vacutainer adicionados con K3EDTA para el análisis de metales y 5 mL en tubos vacutainer adicionados con heparina para la realización de la técnica de micronúcleos. Las muestras para medición de metales fueron transportadas en hielo para su conservación al laboratorio de agua de la Universidad de Córdoba y las muestras para el desarrollo de la técnica de Micronúcleos (MN), fueron trasladadas al laboratorio de Ecotoxicología de la Universidad de Cartagena en hielo y envueltas en papel periódico protegidas de la luz; su procesamiento y análisis fue de inmediato.

Tratamiento de las muestras

Análisis de metales en sangre

Cadmio, Plomo, Cinc y Cobre

Todas las muestras de la matriz sangre analizadas fueron digeridas utilizando una mezcla de ácido nítrico y peróxido de hidrógeno por un tiempo de 1 hora a temperatura controlada entre 95°C (16). Las concentraciones de metales fueron determinadas por voltametría de redisolución anódica de pulso diferencial (DPASV), utilizando un analizador de trazas Metrohm modelo 746 con VA Stand 747. Para Zn, Pb, Cu y Cd se utilizó elec

trodo de trabajo de goteo de mercurio (HMDE), electrodo auxiliar de platino (Pt) y electrodo de referencia plata cloruro de plata (Ag/AgCl). La determinación de arsénico se realizó mediante electrodo de oro de disco rotatorio como electrodo de trabajo (17).

Mercurio

En el proceso de digestión las muestras en sangre 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 (18). El análisis de mercurio total fue realizado empleando espectroscopia de absorción atómica mediante la técnica de vapor frío descrita por Magos y Clarkson (19). El método está basado en la conversión rápida de los compuestos oxidados de mercurio (Hg^{2+}) a su forma volátil (Hg^0) a través de la reducción con $SnCl_2$. 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.

Análisis de las muestras en sangre para la técnica de micronúcleos (MN)

Preparación de la muestra

Las muestras biológicas fueron procesadas teniendo en cuenta la técnica descrita por Holland *et al.* (20) con algunas modificaciones validadas en el laboratorio de Ecotoxicología de la Universidad de Cartagena. Estas modificaciones de la técnica se ven representadas en el cambio del material biológico y el colorante, en la técnica descrita por Holland y colaboradores (20) se utilizó como material biológico epitelio bucal y colorante de Giemsa, mientras que en esta investigación se utilizó sangre periférica y el colorante de Wright.

Se realizaron cinco (5) replicas o placas por muestra, se hicieron los extendidos de sangre periférica con una gota de aproximadamente 10 microlitros, se dejaron secar por 24 horas a temperatura ambiente, posteriormente fueron teñidas con 5mL de colorante Wright por 5 minutos, luego fueron lavadas con agua destilada varias

veces y se dejaron secar al aire libre. Finalmente se procedió a leer las placas contando el número de linfocitos presentes y los micronúcleos encontrados en cada placa por muestra. Se utilizó un Microscopio NIKON ECLIPSE 80i con objetivo de 100X.

Los criterios de Identificación de Micronúcleos (MN) se aplicaron teniendo en cuenta los criterios de Majone *et al.* (21), Carrasco *et al.* (22), Koppe (23) y Fenech *et al.* (24)

El daño al ADN se determinó teniendo en cuenta la frecuencia de aparición de micronúcleos (FAM), donde se dividió el número de linfocitos contados en cada lamina con el número de micronúcleos encontrados y finalmente se multiplico por cien (100).

Análisis estadístico

Se realizó un análisis estadístico descriptivo para los resultados de las concentraciones de metales en sangre y la frecuencia de aparición de micronúcleos, donde se presentaron los promedios y las desviaciones estándares, de la misma forma se aplicaron pruebas de Kruskal – wallis y la prueba de Dunn para ver la diferencia entre los grupos estudiados. El análisis estadístico fue realizado con el programa SPSS v 18, con un nivel de significancia de $p < 0.05$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tabla 1 muestra los resultados de las concentraciones promedio de Pb, Cu, Zn, Cd y Hg en sangre en los diferentes grupos de estudio.

De los metales estudiados solo el Hg estuvo por encima del límite permitido por la EPA (2) de 5,8µg/L. Los promedios más altos se presentaron en las poblaciones de la mina el Alacrán ($20.32 \pm 8.45\mu g/L$), Puerto Córdoba ($18.08 \pm 2.90\mu g/L$) y Bocas de Uré ($12.94 \pm 1.24\mu g/L$) sobrepasando en promedio cuatro, tres y dos veces respectivamente el límite permisible. El grupo de Puerto libertador y Montería (grupo control) no sobrepasaron la norma establecida y el promedio más bajo se encontró en el grupo control ($2.43 \pm 1.43\mu g/L$).

Tabla 1. Concentración de metales (Pb, Zn, Cd, Cu y Hg) en sangre en µg/L.

Grupos de estudio	Metal				
	Hg	Pb	Zn	Cd	Cu
Puerto Córdoba (Máximo -mínimo) n=7	22.16 – 14.48	10.06 – 25.32	429.60 – 752.40	0.64 – 1.04	166.66 – 15.20
Promedio ± d.e	18.08 ± 2.90	22.17 ± 5.75	598.14 ± 116.65	0.91 ± 0.17	192.72 ± 65.05
*Bocas de Uré (Máximo -mínimo) n=7	15.53 – 11.76	10.16 – 25.10	367.68 – 1144.80	0.56 – 1.02	78.8 – 244.28
Promedio ± d.e	12.94 ± 1.24	20.60 ± 6.17	623.60 ± 251.65	0.89 ± 0.18	136.21 ± 51.46
*Puerto Libertador (Máximo -mínimo) n=7	3.35 – 5.54	5.64 – 35.36	493.40 – 653.20	0.86 – 1.29	126.08 – 246.25
Promedio ± d.e	4.62 ± 0.78	24.49 ± 12.91	574.40 ± 60.321	1.08 ± 0.15	168.37 ± 48.23
*Mina el Alacrán (Máximo -mínimo) n=19	30.40 – 6.0	5.76 – 38.16	409.40 – 744.80	0.84 – 1.41	78.80 – 367.21
Promedio ± d.e	20.32 ± 8.45	20.30 ± 12.05	564.32 ± 112.516	1.09 ± 0.13	174.38 ± 86.14
**Montería (Máximo -mínimo) n:10	0.84 - 5.60	5.81 – 33.65	429.60 – 674.10	0.60 – 1.20	39.40 – 209.61
Promedio ± d.e	2.43 ± 1.43	24.72 ± 9.11	558.71± 94.37	0.93 ± 0.20	134.16 ± 57.02
LP	<5.8	100	7000	3	1600

n: número de muestra. LP: limite permisible (µg/L). *Grupos expuestos. **Grupo control

La tabla 2 muestra las diferencias estadísticamente significativas entre el Hg y el resto de metales (Pb, Cd, Cu y Zn) en los distintos grupos estudiados, donde el valor máximo se observa en la mina el Alacrán (30.40g/L) y el valor mínimo se reportó en el grupo control (0.84). Es posible que los valores más altos de las concentraciones

de Hg en la mina estén asociados posiblemente con dos aspectos. Por una parte la ingesta de pescado contaminado por mercurio y por otra a los vapores absorbidos vía pulmonar que se producen constantemente como parte de la actividad minera.

Tabla 2. Prueba de Dunn al 5 % para comparar concentraciones de Hg en sangre en los distintos grupos

Grupos Expuestos	n	Hg en sangre total (µg/L) Mínimo y máximo
Puerto Córdoba (Máximo -mínimo)	7	22.16 – 14.48 ^{ab}
Bocas de Uré (Máximo -mínimo)	7	15.53 – 11.76 ^b
Puerto Libertador (Máximo -mínimo)	7	3.35 – 5.54 ^c
mina el Alacrán (Máximo -mínimo)	19	30.40 – 6.0 ^a

Letras iguales indican que no hay diferencias estadísticas a un nivel de $p=0.05$ n: número de muestra.

Estos resultados coinciden con un estudio reportado en Corea en una muestra representativa en adulto donde se encontró una asociación entre los niveles altos de sangre con una elevada ingesta de pescado (25). De igual forma Gracia et al. (26) determinaron concentraciones de mercurio total (Hg-T) en cabello de los habitantes del municipio de Ayapel (Colombia) y en peces de la ciénaga de Ayapel, encontrando que la población estudiada presentó concentraciones superiores a las permitidas por la USEPA, y síntomas acordes con tales niveles, lo que presumiblemente se debe al alto consumo de pescado contaminado con el metal.

Las concentraciones elevadas de Hg en sangre, de las muestras recolectadas en Puerto Córdoba, Bocas de Uré y la mina el Alacrán, podrían estar relacionadas con la contaminación mercurial por el uso de este elemento en la explotación de oro en la cuenca del San Jorge. En este caso el Hg podría ser difundido por varias vías, ya sea por escorrentía o por la dispersión del viento generando contaminación en los tres compartimientos (agua, suelo y aire), lo cual se evidencia en estudios realizados en la cuenca del San Jorge donde reportan concentraciones

apreciables de Hg en peces en la ciénaga de Ayapel en el departamento de Córdoba (27).

La tabla 3 muestra un análisis descriptivo de la frecuencia de aparición de micronúcleos en los grupos de estudio. Se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre el grupo de la mina con respecto a los otros grupos. Lo que evidencia que el grupo vulnerable del estudio fue el de la mina el Alacrán, donde se reportó un intervalo entre 1- 8 micronúcleos, obteniéndose una FAM mínima de 0.18 y máxima de 2.56. Los resultados de FAM en sangre posiblemente están relacionados con el Hg. Al respecto, hay reportes de estudio como el de Crespo et al. (28) donde se demuestra por primera vez, la capacidad neurotóxica del MeHg al provocar genotoxicidad en células de origen cerebral con niveles relativamente bajos de exposición. El análisis estadístico mostró índices y porcentajes de micronúcleos significativamente más altos ($P<0.05$) en células tratadas con metilmercurio. Otros estudios en humanos sugieren que la ingesta de metilmercurio puede causar aberraciones cromosómicas e intercambio de cromátidas hermanas (ICH) (29).

Tabla 3. Prueba de Dunn al 5% para comparar la frecuencia de aparición de micronúcleos en los diferentes grupos de estudio

	Grupos de estudio	(Mínimo-máximo)	Promedio $\pm$ d.e
FAM%	*Puerto Córdoba		
	*n:7	0 ^b	
	*Bocas de Uré		
	n:7	0 ^b	
	*Puerto Libertador		
	n:7	0 ^b	
	*Mina el Alacrán		0.56 $\pm$ 0.69
	n:19	0.18 - 2.56 ^a	
	**Montería		
	n:10	0 ^b	

Letras iguales indican que no hay diferencias estadísticas a un nivel de $p=0.05$ n: número de muestra. *Grupos expuestos. **Grupo control.

A pesar de que el Hg fue el único que presento resultados por encima de los límites permisibles y posiblemente este influyendo en la aparición de micronúcleos, es importante comparar los otros metales analizados en el estudio con reportes que expliquen el por qué no se está dando una asociación entre ellos. De esta manera, Saleth *et al.* (30) en Kuwait, reportaron niveles sanguíneos anormales de Zn, Cu y Cd asociados al daño del ADN a través de la técnica de micronúcleos; presentando diferencias estadísticamente significativas en la frecuencia de aparición de micronúcleos entre el grupo expuesto, que para este caso fueron personas con cáncer de seno, con respecto al grupo control conformado por personas completamente sanas con $p < 0.05$. Al realizar la comparación entre los niveles de sangre de los pacientes control con los de este estudio, se observó que estos están por debajo de los reportados por Saleth. Lo cual permitiría deducir que ninguno de estos tres metales está ejerciendo influencia en la aparición de micronúcleos encontrados, debido a que los niveles en sangre son consecuentes con los del grupo control reportados por Saleth. Estos resultados de las concentraciones en sangre son complementarios para el caso del Cu y Zn, no siendo clasificables como carcinogénicos (31).

Así mismo al comparar las concentraciones de plomo en sangre encontradas en esta investigación con otros estudios puede pensarse que posiblemente este metal no está afectando la frecuencia de aparición de micronúcleos. Chen *et al.* (32), evaluaron el efecto genotóxico

en trabajadores expuestos a plomo utilizando el test de micronúcleos realizado en sangre periférica, alcanzando diferencias estadísticas significativas entre el grupo expuesto y control ($p < 0.01$). Estos autores exponen datos muy similares de sangre entre los individuos controles ($20 \pm 3 \mu\text{g/L}$) de su estudio con los grupos de exposición de esta investigación ($20.30 \pm 12.05 \mu\text{g/L}$), lo cual sería una evidencia de que el grupo expuesto del presente trabajo no presenta problemas de toxicidad por plomo en sangre.

Por otra parte, Basuet al.(33) realizaron un estudio en cuatro poblados pertenecientes al distrito de Parganas (Gaighata, Habra, Deganga, Baduria), al oeste de Bengala India, con el objetivo de evaluar y comparar las frecuencias de micronúcleos en distintos tipos celulares de personas residentes con problemas de hidroarsenicismo. Se tomaron muestras de linfocitos de sangre periférica para medir la frecuencia de micronúcleos en ambos grupos, reportando en linfocitos 9.34 MN/1000 células en los expuestos y 1.66 MN/1000 células en los testigos. De esta manera concluyeron que se presentan diferencias estadísticamente significativas entre los individuos expuestos al agua con altos niveles de arsénico presentando éstos mayor frecuencia de micronúcleos que los del grupo testigo. Así, al comparar la frecuencia de aparición de micronúcleos asociados al arsénico en el presente estudio, con los datos reportados por Basu en el 2004, podría inferirse que la frecuencia de aparición de micronúcleos no está asociada al consumo de

agua contaminada por arsénico, ya que los valores encontrados en este trabajo se encuentran muy por debajo, con un valor máximo de arsénico en agua de 5.52 µg/L, lo cual no es comparable con el grupo testigo del estudio reportado por Basu.

CONCLUSIONES

Las concentraciones de metales (Pb, Cd, Zn y Cu) en sangre total de los diferentes grupos de estudio no sobrepasaron el límite aceptado a nivel internacional excepto el Hg que sobrepasó el límite permisible a nivel internacional para los grupos de la mina el Alacrán (Puerto Libertador), Puerto Córdoba (Buenavista) y Bo-

cas de Uré (Montelíbano). Estas concentraciones pueden estar asociadas a la ingesta de pescado contaminado por mercurio y por los vapores de este metal absorbidos en los procesos de extracción del oro. La frecuencia de aparición de micronúcleos en la mina el Alacrán (Puerto Libertador) puede estar asociada a múltiples factores, como la excesiva contaminación crónica que presenta los pobladores de la mina a través de los vapores inhalados de mercurio, la ingesta de pescado contaminados con el mismo, la presencia del cadmio en el agua u otros factores. El grupo más vulnerable del estudio fue la mina el Alacrán (Puerto Libertador), donde se puede inferir que hay una contaminación mercurial crónica y es de gran interés un monitoreo ambiental a esta zona.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Córdoba por su apoyo financiero, a la universidad de Cartagena por su apoyo científico y a la todas las personas que participaron en la ejecución del proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

1. Camacho M, Gamboa J, Biodisponibilidad de metales en agua salobre (3UPS) y su efecto tóxico en el langostino *Macrobrachium rosenbergii*. RETEL 2003; 11:2-11.
2. EPA. Environmental Protection Agency. Safe water standards. NPDR: U.S.A. 1997: disponible en URL: <http://www.epa.gov>.
3. Manahan S. Toxicological chemistry and biochemistry, 3.Ed. Boca Raton, CRC Press LLC.; 2003.
4. Berkowitz B., Dror I., Yaron B, Contaminant Geochemistry. Springer-Verlag. Berlin 2008; 1:412.
5. Managing coal combustion residues in mines, Committee on Mine Placement of Coal Combustion Wastes, National Research Council, ISBN: 0-309-65889-6, 2006. p. 300.
6. Kleinjans J, Janssen Y, Van Agen B, Hageman G, Schreurs J, Genotoxicity of Coal Fly Ash, Assessed In Vitro in *Salmonella typhimurium* and human lymphocytes, and in vivo in an occupationally exposed population. Mutat. Res. 1989; 224: 127-134.
7. Pandrangi R, Petras M, Ralph S, Vrzoc M, Alkaline single cell gel (comet) assay and genotoxicity monitoring using bulheads and carp. Environ. Mol. Mutagen. 1995; 26:345-356.
8. Naidoo G, Chirkoot D, The effects of coal dust on photosynthetic performance of mangrove *Avicennia marina* in Richards Bay, South Africa. Environ. Pollut. 2004; 127:359-366.
9. Da Silva J, De Freitas T, Heuser V, Marinho J, Erdtmann B, Genotoxicity biomonitoring in coal regions using wild rodent *Ctenomys torquatus* by Comet Assay and Micronucleus Test. Environ. Mol. Mutagen. 2000; 35: 270-278.
10. Whong W, Long R, Ames R, Ong T, Role of Nitrosation in the mutagenic activity of coal dusts: a postulation for gastric carcinogenesis in coal miners, Environ. Res. 1983; 32: 298-304.
11. Kendall R, Anderson T, Robert J, Baker R, Bens C, Carr J, et al. Ecotoxicology, En: Casarett and Doull's Toxicology. The basic Science of Poisons, 6. Ed. Nueva McGraw-Hill.; 2001.
12. Fenech M, Micronucleus frequency in human lymphocytes is related to plasma vitamin B12 and homocysteine. Mutat Res 1999; 428:299-304.
13. Bonassi S, Znaor A, Ceppi M, Lando C, Chang WP, Holland N, et al. An increased micronucleus frequency in peripheral blood lymphocytes predicts the risk of cancer in humans. Carcinogenesis 2007; 28:625-31.

14. León G, Pérez L, Linares J, Hartmann A, Quintana M, Genotoxic effects in wild rodents (*Rattus rattus* and *Mus musculus*) in an open coal mining area. *Mut Res* 2007; 630: 42-49.
15. INGEOMINAS. Instituto de Investigación e Información geocientífica, Minero-Ambiental. Diagnóstico Ambiental de la Cuenca Hidrográfica del Río San Jorge Capítulo 9: Recursos Mineros. 2005; 87 p.
16. Dauwe T, Bervoets L, Pinxten R, Blust R, Eensa M, Variation of heavy metals within and among feathers of birds of prey: effects of molt and external contamination. *Environmental Pollution* 2003; 124:429-436.
17. Salaün P, Planer-Friedrich B, Van den Berg C, Inorganic arsenic speciation in water and seawater by anodic stripping voltammetry with a gold microelectrode. *Analytica Chimica* 2007; 585: 312-322.
18. 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.
19. Magos L, Clarkson T, The assessment of the contribution of hair to methyl mercury excretion. *Toxicology Letters* 2008; 182:48-49.
20. Holland N, Bolognesi C, Kirsch-Volders M, Bonassi S, Zeiger E, Knasmueller S, et al. The micronucleus assay in human buccal cells as a tool for biomonitoring DNA damage: The HUMN project perspective on current status and knowledge gaps. *Mutation Research* 2008; 659:93-108.
21. Majone F, Brunetti R, Gola I, Levis A, Persistence of micronuclei in the marine mussel, *Mytilus galloprovincialis*, after treatment with Mitomycin C. *Mutat. Res.* 1987; 191:157-161.
22. Carrasco K, Tibury L, Myers M, Assessment of the piscine micronucleus test as an in situ biological indicator of chemical effects. *Canadian journal of fisheries and aquatic sciences* 1990; 11(47): 2123-2136.
23. Koope C, A comparison between mouse and fish micronucleus test using cyclophosphamide, mitomycin C and various pesticides. *Mutat. Res.* 2002; 518: 145-150.
24. Fenech M, Chang W, Kirsch M, Holland N, Bonassi S, Zeiger E, Human project: detail description of the scoring criteria for the cytokinesis block micronucleus assay using isolated human lymphocyte cultures. *Mutation Research* 2003; 584: 65-75.
25. Kim B, Lee N, Blood total mercury and fish consumption in the Korean general population in KNHANES III, 2005. *Science of the Total Environment* 2010; 408:4841-4847.
26. Gracia L, Marrugo J, Alvis E, Contaminación por mercurio en humanos y peces en el municipio de Ayapel, Córdoba, Colombia, 2009. *Salud Pública* 2010; 28(2): 118-124.
27. Marrugo J, Lans E, Benítez L, Hallazgo de mercurio en peces de la ciénaga de Ayapel, Córdoba, Colombia. *Rev. MVZ Córdoba* 2007; 12(1): 878-886.
28. Crespo M, Lima A, Herculano A, Rodríguez R, Martín J, Methylmercury genotoxicity: A novel effect in human cell lines of the central nervous system. *Environ. Int* 2007; 33:141-146.
29. Franchi E, Loprieno G, Ballardin M, Petrozzi L, Migliore L, Cytogenetic monitoring of fishermen with environmental mercury exposure. *Mutat. Res* 1994; 320:23-29.
30. Saleh F, Behbehani A, Asfar S, Khan I, Ibrahim G, Abnormal Blood Levels of Trace Elements and Metals, DNA Damage, and Breast Cancer in the State of Kuwait. *Biol Trace Elem Res* 2010; DOI 10.1007/s12011-010-8724-z
31. ATSDR. Agency for Toxic Substances and Disease Registry Toxicological profile for copper. Department of Health and Human Services, Public Health Service :E. U. A. 2004: disponible en URL: http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts132.pdf.
32. Chen Z, Lou J, Chen S, Zheng W, Wu W, Jin L, Deng H, *et al*. Evaluating the genotoxic effects of workers exposed to lead using micronucleus assay, comet assay and TCR gene mutation test. *Toxicology* 2006; 223:219-226.
33. Basu A, Mahata J, Gupta S, Genetic toxicology of a paradoxical human carcinogen, arsenic: a review. *Mut Res* 2004; 488: 171-194.