

Procesos de transporte de arsénico y metales en aguas superficiales del distrito minero de Taxco, México: Aplicación de isótopos estables

Arsenic and metals transport processes in surface waters from the mining district of Taxco, Mexico: Stable isotopes application

Azucena Dótor Almazán,¹ María Aurora Armienta Hernández,²
Flor Árcega Cabrera³ y Oscar Talavera Mendoza⁴

¹Universidad Nacional Autónoma de México. Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM, CU, 04510 D.F. México

²Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geofísica. UNAM, CU, 04510 D.F. México

³Universidad Nacional Autónoma de México. Unidad de Química Sisal, Facultad de Química. Puerto Abrigo s/n. C.P. 97356. Sisal, Yucatán, México

⁴Universidad Autónoma de Guerrero. Unidad Académica Ciencias de la Tierra. AP. 197, Taxco Guerrero 40200. México
e-mail: victoria@geofisica.unam.mx

Dótor A. A., M.A. Armienta-Hernández, F. Árcega-Cabrera, O. Talavera-Mendoza. 2014. Procesos de transporte de arsénico y metales en aguas superficiales del distrito minero de Taxco, México: Aplicación de isótopos estables. *Hidrobiológica* 24 (3): 245-256.

RESUMEN

Para entender los procesos que dominan el transporte, distribución de metales, As, y procedencia del azufre en agua superficial del distrito minero de Taxco se determinaron $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ en sulfatos disueltos y $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^2\text{H}/\text{H}$ en ríos y arroyos. Se analizaron Zn, Cd, Cu, Fe, Pb y As en cuerpos de agua cercanos a residuos del procesamiento de minerales (jales). La regresión lineal de los valores $\delta^{18}\text{O}$ y δD (secas) mostró una pendiente ($\delta\text{D} = 3.998 * \delta^{18}\text{O} - 29.02$) inferior a la Línea Meteorica Mundial (LMM, $\delta\text{D} = 8 * \delta^{18}\text{O} + 10$) indicando un proceso de evaporación. En lluvias, la pendiente ($\delta\text{D} = 6.109 * \delta^{18}\text{O} - 9.69$) se aproximó a la LMM mostrando un aporte de agua meteórica hacia los ríos. El $\delta^{34}\text{S}$ osciló entre -6.8 y $+2.2\text{‰}$ (secas), y -5 y -0.6‰ (lluvias) e indica que el azufre proviene de la oxidación y erosión de sulfuros. El análisis de agrupamiento mostró que las condiciones para ríos y arroyos (secas) son significativamente similares a los jales, pero no así en lluvias (excepto TX3). Esta similitud muestra la importancia de los cambios estacionales en los procesos de intemperismo y lavado de los jales, con su posterior transporte por escorrentía hacia los cuerpos de agua de la zona. La variación de la concentración de metales (lluvias y secas) indica dos procesos acoplados, 1) descarga con erosión y 2) dilución proporcional. La relación entre ^{18}O y ^{34}S confirma el intemperismo de los materiales de la cuenca y jales con un patrón amplio y heterogéneo en secas; en lluvias la tendencia de los resultados indica erosión y mezcla de partículas.

Palabras clave: Erosión, evaporación, jales, metales.

ABSTRACT

Water isotopic ratios $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^2\text{H}/\text{H}$ and $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ in dissolved sulfates were measured to determine sulfur provenance and dominant processes of transport, and, distribution of As and metals in surface waters in the mining district of Taxco. Zinc, Cd, Cu, Fe, Pb and As were analyzed in river and stream waters located nearby mine tailings. $\delta^{18}\text{O}$ and δD values (dry season) showed a lower slope ($\delta\text{D} = 3.998 * \delta^{18}\text{O} - 29.02$) than the Global Meteoric Water Line (GMWL, $\delta\text{D} = 8 * \delta^{18}\text{O} + 10$) indicating an evaporation process. In the rainy season, the slope ($\delta\text{D} = 6.109 * \delta^{18}\text{O} - 9.69$) approximates to

the GMWL showing an input of meteoric water to rivers. $\delta^{34}\text{S}$ values in dissolved sulfates vary from -6.8 to $+2.2\%$ (dry season) and from -5 to -0.6% (rainy season), indicating a sulfur source from sulfides oxidation and erosion. Clustering analysis showed that rivers and streams conditions are very similar to those of the tailings in the dry season, but not in the rainy season, with exception of TX3. This similitude exhibits the significance of seasonal changes in weathering and washing off processes from tailings, with further transport by runoff into surrounding water bodies. Variation in metal concentrations (dry and rainy seasons) indicates two-coupled processes: 1) discharge-erosion and 2) proportional dilution. Plot of $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^{34}\text{S}$ confirms weathering of material from the basin and tailings with a wide and heterogeneous pattern in the dry season, while in the rainy season results indicate erosion and mixing of particles.

Key words: Erosion, evaporation, metals, tailings.

INTRODUCCIÓN

Evaluar ambientalmente un área a través de la determinación del contenido de metales y metaloides potencialmente tóxicos (MMPT) es una herramienta ampliamente utilizada (Armienta *et al.*, 2003; Talavera-Mendoza *et al.*, 2006; Espinosa & Armienta, 2007; Espinosa *et al.*, 2009). No obstante, existen fenómenos físicos como la evaporación que no son evidentes a través de una caracterización geoquímica pero si a través del análisis de isótopos; por medio de ellos se pueden entender por ejemplo los procesos que controlan la introducción de metales a cuerpos de agua superficial y/o conocer el comportamiento estacional de un área (Spangenberg *et al.*, 2006; Sharp, 2007). Específicamente el análisis de isótopos estables como el ^{18}O y ^2H (D = Deuterio) ayuda a identificar fuentes de agua y procesos dominantes durante épocas estacionales en un área definida (Craig, 1961; Guay & Eastoe, 2007). La procedencia del azufre puede ser identificada determinando las relaciones $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ en sulfatos, además ayuda a exhibir procesos de oxidación o reducción en los minerales de los cuales se deriva el azufre (Ryu *et al.*, 2006; Hubbard *et al.*, 2009).

La presente investigación se llevó a cabo en la región minera de Taxco ubicada al norte del estado de Guerrero y corresponde a un antiguo distrito minero, cuya historia de extracción y explotación de minerales se remonta a la época de la Colonia (Torres-Tafuya & González-Niño, 2009). En este distrito existen dos principales ríos, Cacalotenango y Taxco, que debido a las actividades extractivas de la minería y el crecimiento demográfico, se encuentran rodeados de los residuos del procesamiento de los minerales (en México llamados jales) y asentamientos humanos. El río Cacalotenango recibe la descarga directa de lixiviados procedentes de los jales El Fraile y La Concha cercanos a su ribera (Árcega-Cabrera *et al.*, 2005; Talavera-Mendoza *et al.*, 2006; Armienta *et al.*, 2007; Árcega-Cabrera *et al.*, 2009); no obstante, el agua de este río es empleada con fines domésticos y agrícolas por la población que habita en áreas muy cercanas a su cauce (Armienta *et al.*, 2003; Talavera-Mendoza *et al.*, 2005; Armienta *et al.*, 2007; Méndez-Ramírez & Armienta-Hernández, 2012). En las cercanías del río Taxco se ubican los jales El Solar, Guerrero I y Guerrero II. Con excepción de los jales Guerrero I, el resto de los depósitos presentan un alto grado de oxidación y sus lixiviados

descargan directamente al cauce de este río, que adicionalmente recibe un volumen aproximado de $0.15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de aguas residuales crudas procedentes de la ciudad de Taxco (Méndez-Ramírez & Armienta-Hernández, 2012). Esta combinación eleva el potencial de contaminación de los metales ya que pueden formarse complejos organometálicos, facilitando la solubilidad, disponibilidad y dispersión de los metales (Rocha *et al.*, 2009).

Los ríos Taxco y Cacalotenango han sido materia de estudio por diversos autores (Armienta *et al.*, 2004; Árcega-Cabrera *et al.*, 2005; Armienta *et al.*, 2007; Árcega-Cabrera *et al.*, 2009; Méndez-Ramírez & Armienta-Hernández, 2012) con objeto de evaluar la calidad del agua y el grado de afectación de los mismos por jales mineros. Sin embargo, desde el punto de vista de la identificación de procesos geoquímicos a través de la aplicación de isótopos estables, no existen estudios desarrollados en el área. Los isótopos estables han sido empleados de manera específica y restringida, por ejemplo, para identificar el origen de los sulfuros minerales (esfalerita, pirita, galena) del Distrito minero de Taxco por Camprubí *et al.* (2006), la identificación de procedencia y acumulación de Pb en ríos del área (Árcega-Cabrera *et al.*, 2009) y estudios en lixiviados procedentes de jales mineros (Rivera-Bustos, 2009).

El primer objetivo de esta investigación fue conocer los procesos que dominan el transporte de metales (Zn, Cd, Pb, Fe, Cu) y As en agua de los ríos Taxco y Cacalotenango durante las épocas de estiaje y lluvias mediante la determinación de relaciones isotópicas de $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ y D/H. El segundo objetivo fue conocer la procedencia del azufre derivado de sulfatos disueltos en el agua y establecer el proceso dominante (oxidación-reducción) en la formación de sulfatos secundarios en la región, empleando los valores $\delta^{34}\text{S}$ obtenidos al determinar las relaciones isotópicas de $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$.

Área de estudio. El distrito minero de Taxco se encuentra al norte del estado de Guerrero, en el municipio de Taxco de Alarcón, dentro de las coordenadas $18^{\circ}30'$ a $18^{\circ}35'$ N y $99^{\circ}35'$ a $99^{\circ}40'$ O (INEGI, 2009; CONAGUA-OCB, 2010). Los principales ríos del área son el Cacalotenango (longitud de 11.5 km) y el Taxco (longitud de 29.3 km), cuyos flujos se unen al sur de la ciudad de Taxco en el poblado de Taxco el Viejo para formar el río Iguala y/o Cocula, cuya longitud es de 75 km (Fig. 1).



Figura 1. Ubicación del área de estudio y de las muestras procedentes de los arroyos y ríos del Distrito minero de Taxco.

El área de estudio pertenece a la subregión Medio Balsas de la Región Hidrológica N° 18 y a la región administrativa IV Balsas (CONAGUA-OCB, 2010). El clima del área varía de semicálido subhúmedo a templado subhúmedo con una época de lluvias bien definida durante los meses de julio a septiembre, acentuándose en éste último mes (300 mm) y, alcanzando un promedio anual superior a los 1000 mm. La época de secas abarca de febrero (1.2 mm) a junio, siendo el mes de mayo el que registra la temperatura más cálida (Romero *et al.*, 2008). La temperatura mínima anual es de 17.3 °C y la temperatura máxima anual de 26.6 °C (OEIDRUS, 2011).

MATERIALES Y MÉTODOS

En enero de 2010 se obtuvieron muestras de agua superficial de los arroyos Xochula (JG) y El Fraile II (RF2-1 y RF2-2). El primero recibe la descarga de los jales El Solar, Guerrero I, Guerrero II y desemboca en el río Taxco; en tanto que el arroyo El Fraile II desemboca en el río Cacalotenango. Asimismo, se recolectaron muestras de agua de los ríos Taxco y Cacalotenango y aguas

abajo de la unión de ambos ríos (TX1-S a TX5-S) en mayo de 2010 (época de secas) y septiembre de 2011 (lluvias, TX1-L a TX5-L). Se determinaron *in situ* el pH y la conductividad eléctrica (CE) utilizando un potenciómetro-conductímetro Conductronic PC18 y en laboratorio en muestras sin acidificar utilizando un potenciómetro marca OAKTON serie 510. Se determinó el contenido de sulfatos y las concentraciones de metales y metaloides tóxicos (Zn, Cd, Cu, Fe, Pb y As) en todas las muestras recolectadas. Además, con la finalidad de determinar las razones isotópicas de $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, D/H, $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$, se recolectaron 125 mL de agua de los sitios TX1 a TX5 de ambos muestreos. La composición isotópica de las muestras de agua se expresa en notación delta por mil (‰) con respecto al estándar V-SMOW (Vienna-Standard Mean Ocean Water) para el $\delta^{18}\text{O}$ y δD , y respecto a los estándares de referencia internacional OGS-1 y NBS123 para $\delta^{34}\text{S}$.

Análisis de Metales. Para el análisis de metales (Zn, Cd, Cu, Fe y Pb) y As se recolectaron 0.5 L de agua en botellas de polietileno previamente lavadas con HCl al 10% y enjuagadas abundante-

mente con agua desionizada, se ajustó el pH (<2) de las muestras agregando HNO₃ concentrado (grado analítico), las muestras se preservaron en un contenedor térmico a 4 °C hasta su análisis en el laboratorio. Los metales se analizaron por Espectrometría de Absorción Atómica por Flama (FAAS, Perkin Elmer Analyst[®] 200) y el As por Generador de Hidruros Perkin Elmer MHS 15[®]. El Límite de Detección (LD) para Zn, Cd y Cu fue de 0.05 mg/L, para Fe fue de 0.3 mg/L y para Pb de 0.2 mg/L. El As tuvo un LD de 0.001 mg/L. Para el análisis de las muestras de agua y para la evaluación de la calidad del análisis se emplearon estándares monoelementales y muestras certificadas marca High Purity[®] de 1000 mg/L trazables a NIST, así mismo, se analizaron blancos de laboratorio y campo.

Análisis Isotópicos. Los análisis de ¹⁸O/¹⁶O y D/H se llevaron a cabo en el Laboratorio de Espectrometría de Masas de Isótopos Estables perteneciente al Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica (LUGIS) de la UNAM. El $\delta^{18}\text{O}$ fue determinado con un Espectrómetro Thermo Finnigan MAT 253 a través del método por equilibrio con CO₂ a 25 °C por 36 h, empleando un Gas Bench con una incertidumbre de 0.2‰. La determinación δD , se realizó empleando un Espectrómetro de Masas Finnigan Delta Plus XL con un TC/EA a 1400 °C cuya incertidumbre fue de 0.2‰.

Los sulfatos disueltos de las muestras de agua (filtradas previamente con membranas de celulosa de 0.45 μm) fueron precipitados con una solución saturada de BaCl₂ y recuperados a través de filtración con membranas de celulosa de 0.45 μm (Smuda *et al.*, 2008; Dold & Spangenberg, 2005). Posteriormente, los precipitados se secaron en una estufa a 75 °C durante 24 h. La determinación del $\delta^{34}\text{S}$ se realizó en la Universidad de Arizona, USA (Laboratory of Isotope Geochemistry, Department of Geoscience) El $\delta^{34}\text{S}$ fue medido en SO₂ gas en un espectrómetro de masas (ThermoQuest Finnigan Delta PlusXL) en relación a un flujo continuo de gas. La combustión de las muestras fue a 1030 °C con CO₂ y V₂O₅, usando un analizador elemental Costech acoplado al espectrómetro de masas. La normalización se basó en los estándares de referencia internacional OGS-1 and NBS123. La calibración fue lineal en el intervalo -10 a +30 por mil. La precisión se estimó en $\pm 0.15\%$.

Estadística. Se realizó un análisis multivariado exploratorio de agrupamiento (Árcega-Cabrera *et al.*, 2009) utilizando el método de Ward y la correlación de Pearson por ser los análisis más estrictos con respecto al grado de similitud entre los elementos de un grupo. También se realizó un análisis gráfico (proyección 3D) para identificar tendencias ambientales generales indicadas por la isotopía. Los análisis estadísticos se llevaron a cabo con el programa STATISTICA de STATSoft[®].

RESULTADOS

Arroyos. Los valores de pH determinados en el arroyo RF2-1, RF2-2 fueron de 6.98 y 8.14, únicamente en la muestra JG (arroyo Xo-

chula) el pH medido fue de 2.92. Los valores de la conductancia eléctrica (CE) fueron 4.13, 3.24 y 41.10 mS cm⁻¹ para las muestras RF2-1, RF2-2 y JG respectivamente. Los valores de pH se compararon con lo establecido en la NOM-127-SSA1-1994; únicamente la muestra JG tuvo un pH inferior al intervalo establecido por la normatividad mexicana (6.5-8.5).

Metales y As. La concentración más elevada de Zn (260 mg/L) se determinó en la muestra JG; las muestras RF2-1 y RF2-2 presentaron la menor concentración de este elemento (9.75 y 3.6 mg/L, respectivamente). El Cd y Cu fueron detectados solamente en la muestra JG con una concentración de 1.80 y 5.2 mg/L; en el resto de las muestras la concentración de estos metales fue <LD, al igual que para el Pb. El Fe en RF2-1, RF2-2 y JG, fue de 35.5, 10.0 y 158 mg/L respectivamente. El As fue detectado en los tres casos con concentraciones de 0.449 (RF2-1), 0.105 (RF2-2) y 0.140 mg/L (JG). Con excepción del Pb y el Zn (en RF2-2) las concentraciones de metales en RF2-1, RF2-2 y JG rebasan los Límites Máximos Permisibles (LMP, Zn = 5 mg/L, Cd = 0.005 mg/L, Pb = 0.03 mg/L, Fe = 0.30 mg/L, Cu = 2.0 mg/L, As = 0.025 mg/L) establecidos en la NOM-127-SSA1-1994.

Ríos. El pH determinado en las muestras osciló entre 2.60 (mínimo) y 8.28 (máximo) manteniéndose prácticamente constante de la época de secas hacia la época de lluvias, exceptuando la muestra TX3 que presentó el pH más ácido (2.60) en época de secas y un valor cercano a neutro en época de lluvias (6.72). La CE fue variable para ambos periodos con valores entre 0.247 (valor mínimo) y 4.84 mS/cm (valor máximo), éste último coincide con la muestra TX3-S de pH más ácido, mientras que TX3-L tuvo una CE de 1.32 mS/cm (Tabla 1). Al comparar el pH con la NOM-127-SSA1-1994, se determinó que la muestra TX3-S se encontró fuera del intervalo de pH 6.5 a 8.5 establecido por esta norma.

Metales y As. La concentración de Zn en TX3-S y TX3-L fue de 337 y 70 mg/L, respectivamente. La concentración más baja determinada para el mismo elemento fue en la muestra TX5-S con un valor inferior al LD; para TX5-L la concentración de Zn fue de 0.300 mg/L. El Cd varió de 2.50 mg/L en TX3-S a 0.530 mg/L en TX3-L, en TX4-S osciló de concentraciones <LD a 0.060 mg/L para TX4-L. El Pb presentó las concentraciones más elevadas durante la época de secas (0.330 mg/L, en TX3-S), en época de lluvias tuvo una concentración menor al LD en todos los sitios de muestreo. La concentración de Fe varió entre <0.3 mg/L (TX5-S) y 183 mg/L (TX3-S) en época de secas y 0.44 mg/L (TX5-L) a 48 mg/L (TX3-L) en época de lluvias. El Cu (secas y lluvias) se detectó en las muestras TX3-S y TX3-L con 6.30 y 1.04 mg/L, respectivamente y en la muestra TX1-L con una concentración de 0.120 mg/L. El As se detectó en la totalidad de las muestras para ambos periodos (secas y lluvias) en las muestras TX3-S y TX3-L con 0.038 y 0.112 mg/L, respectivamente y TX4-L con 0.027 mg/L. En relación a la NOM-127-SSA1-1994, el Zn, Pb y Fe para la época de secas son los principales metales que rebasaron los LMP (Tabla 2). Durante

la época de lluvias el As, Zn y Fe superaron el LMP establecido por esta norma.

El análisis multivariado utilizando la concentración de metales y los parámetros fisicoquímicos mostró la formación de tres grupos (Fig. 2). El primer grupo estuvo integrado por TX1-L, TX2-L, TX4-L, TX5-L y S, el segundo por TX1-S, TX2-S y TX4-S, y

el tercer grupo por TX3-S y L, JG, RF1 y RF2. Este agrupamiento indica que entre las muestras obtenidas existe una diferenciación probablemente dirigida por los cambios ambientales importantes entre lluvias y secas. La excepción a esto fueron TX5 y TX3 donde no se presentó una diferencia entre sus variaciones temporales. Respecto a la variación espacial se observó que TX3 es un sitio con poca similitud con respecto a los otros sitios de ríos o arroyos, aunque similar a los jales de la zona.

Tabla 1. Parámetros físico-químicos de las muestras procedentes de los ríos.

Muestra	pH	CE (mS/cm)
Secas		
TX1-S	7.82 ± 0.04	1.606
TX2-S	7.89 ± 0.04	1.603
TX3-S	2.60 ± 0.04	4.84
TX4-S	7.90 ± 0.04	1.331
TX5-S	8.28 ± 0.04	0.736
Lluvias		
TX1-L	7.96 ± 0.04	0.69
TX2-L	8.13 ± 0.04	0.538
TX3-L	6.72 ± 0.04	1.323
TX4-L	7.85 ± 0.04	0.835
TX5-L	8.10 ± 0.04	0.247
+LMP		
NOM-127-SSA1-1994	6.5-8.5	*NE

+LMP = Límite Máximo Permissible *NE = No Especificado.
Negritas: valores que exceden el LMP.

Valores isotópicos $\delta^{18}\text{O}$, δD . Los resultados isotópicos en el agua estuvieron invariablemente empobrecidos para los dos periodos de muestreo; el $\delta^{18}\text{O}$ fluctuó entre -9.25 y -7.72‰ , durante la época de secas y -10.65 a -9.57‰ , en la época de lluvias. El δD presentó valores igualmente empobrecidos variando de -65.70 a -59.10‰ en la época de estiaje y durante el periodo de lluvias entre -74.70 y -67.50‰ (Tabla 3). La pendiente de la línea $\delta^{18}\text{O}$ vs δD para la época de secas y lluvias fue $\delta\text{D} = 3.998 * \delta^{18}\text{O} - 29.02$ y $\delta\text{D} = 6.109 * \delta^{18}\text{O} - 9.69$, con un intercepto de $\delta\text{D} = -9.75$ y $\delta\text{D} = -10.41$, respectivamente. Un mayor acercamiento a la Línea Meteorica Mundial (LMM = $\delta^{18}\text{O} * 8 + 10$, Craig (1961)) se observó en la pendiente de la línea de la época de lluvias; mientras que la pendiente de la línea en época de secas se aleja de LMM (Fig. 3).

Sulfatos y $\delta^{34}\text{S}$. En los arroyos, el contenido de sulfatos fue de 1,933 mg/L para la muestra RF2-1, de 2,369 (mg/L) en la muestra RF2-2 y en la muestra JG de 2,584 mg/L. Los ríos presentaron concentraciones de sulfatos disueltos entre 23.1 mg/L y 3,734 mg/L, concentración máxima determinada en la muestra TX3 de la época de secas (Tabla 3). El contenido de sulfato de los ríos y arroyos se comparó con la norma mexicana NOM-127-SSA1-1994, las muestras TX1-S, TX2-S, TX3-S, TX4-S y TX3-L rebasaron

Tabla 2. Concentración de metales en el agua de los ríos (mg/L).

Muestra	Zn	Cd	Pb	Fe	Cu	As
Metales (Secas)						
TX1-S	3.00 ± 0.002	<LD	0.270 ± 0.004	0.920 ± 0.020	<LD	0.016 ± 0.001
TX2-S	3.00 ± 0.002	<LD	0.300 ± 0.004	0.810 ± 0.020	<LD	0.016 ± 0.001
TX3-S	337 ± 0.002	2.50 ± 0.001	0.330 ± 0.004	183 ± 0.020	6.30 ± 0.003	0.038 ± 0.001
TX4-S	11.0 ± 0.002	<LD	0.220 ± 0.004	1.42 ± 0.020	<LD	0.012 ± 0.001
TX5-S	<LD	<LD	0.280 ± 0.004	<LD	<LD	0.011 ± 0.001
Metales (Lluvias)						
TX1-L	7.75 ± 0.002	<LD	<LD	4.72 ± 0.020	0.120 ± 0.003	0.020 ± 0.001
TX2-L	3.10 ± 0.002	<LD	<LD	2.35 ± 0.020	<LD	0.013 ± 0.001
TX3-L	70 ± 0.002	0.530 ± 0.001	<LD	48 ± 0.020	1.04 ± 0.003	0.112 ± 0.001
TX4-L	9.75 ± 0.002	0.060 ± 0.001	<LD	2.04 ± 0.020	<LD	0.027 ± 0.001
TX5-L	0.300 ± 0.002	<LD	<LD	0.440 ± 0.020	<LD	0.002 ± 0.001
LMP	5	0.005	0.03	0.3	2.0	0.025

<LD = Inferior al Límite de Detección +LMP = Límite Máximo Permissible.
Negritas = valores que exceden el LMP de la NOM-127-SSA1-1994.

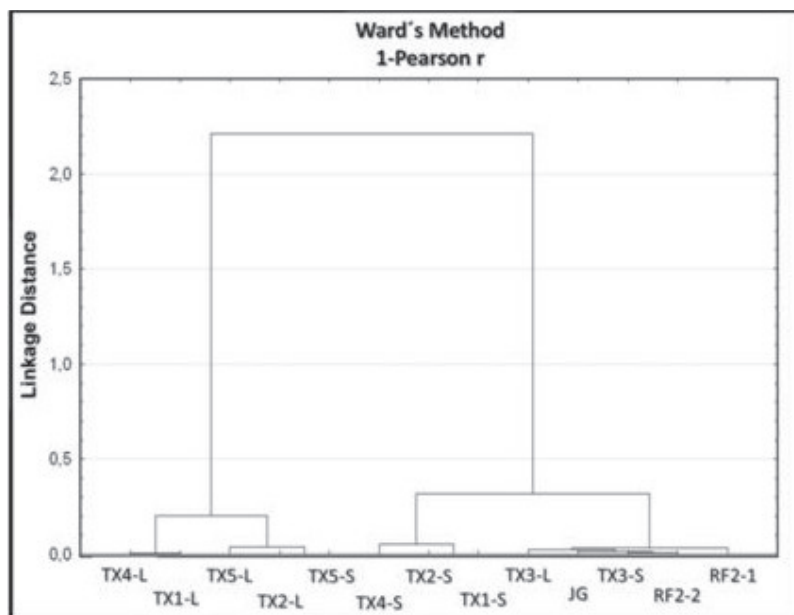


Figura 2. El análisis multivariado exhibe la separación de las muestras en tres grupos: a) agrupa a TX1-L, TX2-L, TX4-L, TX5-L y TX5-S; b) incluye a TX1-S, TX2-S, TX4-S y c) TX3-S, TX3-L, JG, RF2-1 y RF2-2.

Tabla 3. Resultados isotópicos en agua de los ríos Taxco y Cacalotenango.

Muestra	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)	SO_4^{2-}	$\delta^{34}\text{S}$ (‰)
Secas				
TX1-S	-7.79	-60.9	536	-1.1
TX2-S	-7.72	-60.2	529	-1
TX3-S	-7.87	-59.1	3734	-6.8
TX4-S	-9.25	-65.7	651	-1.2
TX5-S	-8.69	-64.4	126	2.2
Lluvias				
TX1-L	-9.81	-70.5	189	-2.9
TX2-L	-10.02	-71.3	94	-2.3
TX3-L	-9.57	-67.5	771	-5.4
TX4-L	-10.15	-71.1	256	-3.7
TX5-L	-10.65	-74.7	23.1	-0.6

NOTA: Los resultados se expresan con respecto al V-SMOW (Vienna-Standard Mean Ocean Water), para el $\delta^{18}\text{O}$ y δD , el $\delta^{34}\text{S}$ se expresa con respecto a los estándares de referencia internacional OGS-1 y NBS123. En el caso del $\delta^{34}\text{S}$ se incluye la concentración de sulfatos en mg/L. LMP para sulfatos NOM-127-SSA1-1994 = 400 mg/L; en negrita se indican los valores que lo superan.

el LMP (400 mg/L) establecido por la Legislación Mexicana para el contenido de sulfatos en el agua. El valor $\delta^{34}\text{S}$ de los sulfatos disueltos presentó valores empobrecidos de -5.4 a -0.6‰ en época de lluvias y en época de secas el valor $\delta^{34}\text{S}$ varió de -6.8 a $+2.2\text{‰}$ (Tabla 3). Los datos isotópicos de $\delta^{34}\text{S}$ fueron graficados contra el

$\delta^{18}\text{O}$ y el comportamiento de las muestras se puede observar en la Figura 4. La Figura 6 muestra la distribución en 3D de los valores $\delta^{34}\text{S}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ vs δD en la que se observa que durante la época de secas existe una mayor tendencia de las muestras hacia el $\delta^{34}\text{S}$, por el contrario, en época de lluvias esta tendencia se aleja del $\delta^{34}\text{S}$, acercándose hacia el $\delta^{18}\text{O}$, δD .

DISCUSIÓN

Arroyos. Con excepción de JG (pH 2.92), RF2-1 y RF2-2 presentan un pH de neutro a ligeramente alcalino, lo cual puede estar asociado con la presencia de minerales como la calcita reportada por Talavera-Mendoza *et al.* (2005) en los jales del distrito. Las mayores concentraciones de metales (Zn, Cd, Fe y Cu) se presentaron en el arroyo Xochula (JG) que desemboca en el río Taxco. Este arroyo recibe la descarga directa de los lixiviados de los jales Guerrero que se forman cuando el agua meteórica interactúa con este depósito y acarrea en forma de escorrentías superficiales metales como el Zn, Cu, Fe, Pb derivados de la esfalerita, calcopirita, pirita, magnetita y galena descritos en la zona por Talavera-Mendoza *et al.* (2005) y Romero *et al.* (2007). Méndez-Ramírez y Armienta-Hernández (2012) señalan que el Cu en el arroyo Xochula (JG) está asociado a la calcopirita y que su forma disuelta está favorecida por la ausencia de materia orgánica en este arroyo. Espinosa y Armienta (2007) mencionan que, en sedimentos del mismo arroyo, el Zn se encuentran asociado a la fase de carbonatos, por lo que la presencia de este metal en el agua se puede explicar a través de la disolución de los mismos, puesto que el pH obtenido en esta muestra fue 2.92, y los carbonatos no

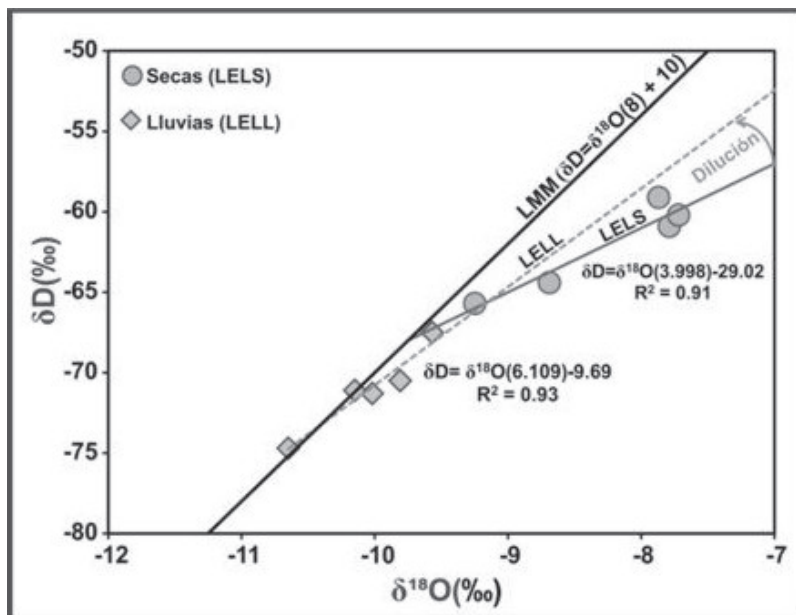


Figura 3. Líneas de Evaporación Local para las épocas de secas (LELS) y lluvias (LELL) del distrito minero de Taxco con respecto a la Línea Meteorológica Mundial (LMM).

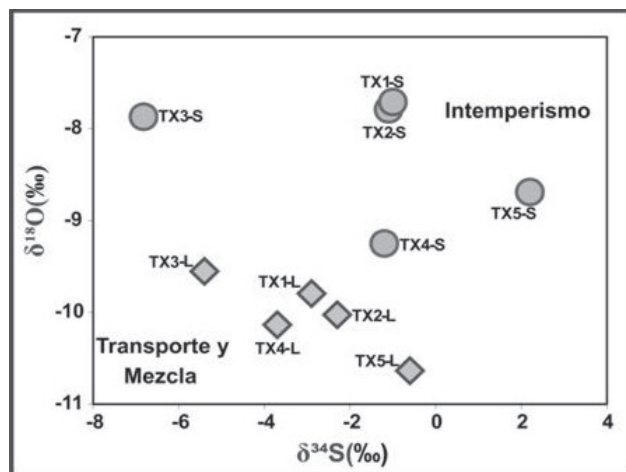


Figura 4. Comparación de los valores $\delta^{34}\text{S}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ de secas y lluvias en el distrito minero de Taxco.

ocurren a un pH <4.5 (Libes, 2009). En el caso del plomo, señalan que se asocia a las fases de oxihidróxidos de Fe/Mn y residual de los sedimentos lo que limita su movilidad, manifestándose en concentraciones no detectables en el agua. Elevadas concentraciones de As se presentan en RF2-2 y se deben a que este metaloide se encuentra asociado a sulfosales de plata y pirita, identificados en los jales El Fraile, que al oxidarse liberan el As incorporándolo al agua en los lixiviados o escorrentías superficiales (Romero *et al.*, 2007). El bajo contenido de metales en la muestra RF2-1 puede deberse a que en el lecho del arroyo El Fraile II existen precipitados de oxihidróxidos de Fe, conocidos por su capacidad de re-

tener metales (Hölstrom & Hölander, 2001), lo que resulta en bajas concentraciones de los mismos en el agua del arroyo.

Ríos. En las muestras de los ríos Taxco y Cacalotenango el pH se mantuvo de neutro a ligeramente alcalino para ambas épocas estacionales, a excepción de la muestra TX3 cuyo pH fue ácido (2.60) en época de secas, consecuencia de la oxidación de los sulfuros contenidos en los jales Guerrero. Durante la época de lluvias el pH de esta muestra se eleva (6.72), producto de un proceso de dilución por el aumento en el caudal del arroyo Xochula en este periodo y por el aporte de minerales neutralizadores (calcita, dolomita), identificados por Méndez-Ramírez y Armienta-Hernández (2012) en los sedimentos de este punto.

El aumento considerable del caudal del río Taxco y de sus efluentes (arroyo Xochula), durante la época de lluvias, ocasiona que la concentración de los metales disminuya durante este periodo; mientras que durante la época de secas la disminución del caudal del río Taxco, de $36.4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (lluvias) a $2.6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en secas (Arcega-Cabrera *et al.*, 2009), provoca la reducción en la velocidad del flujo y la concentración de metales por evaporación. Isotópicamente, este fenómeno fue confirmado por la desviación en la pendiente de la línea de evaporación local en época de secas —LELS— respecto de la LMM (Fig. 3). De igual manera, el proceso de dilución en los ríos se confirmó al acercarse la pendiente de la línea de evaporación local en época de lluvias a la correspondiente de la LMM (Fig. 3). El Cu fue detectado en el periodo de lluvias en el río Taxco (TX1-L), pero no fue detectado en su unión con el río Cacalotenango (TX2-L), lo cual está asociado a un posible transporte físico de partículas muy finas conteniendo Cu que

sedimentan al disminuir el flujo, lo que impide que se introduzcan al río Taxco en este punto (Arcega-Cabrera *et al.*, 2009; Méndez-Ramírez & Armienta-Hernández, 2012). Asimismo el Cu en el punto de unión de ambos ríos, está asociado a la fracción residual de los sedimentos de acuerdo con Armienta *et al.* (2007), lo que lo hace poco soluble. El Cd, sin embargo, no fue detectado en TX1-L y TX2-L. Bajas concentraciones de Cu y Cd en rocas ($<43 \text{ mg kg}^{-1}$, $<4 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente) y suelos (Cu $<73 \text{ mg kg}^{-1}$, Cd $<9 \text{ mg kg}^{-1}$) se han determinado para el área (no se incluyen los resultados en este estudio). Talavera-Mendoza *et al.* (2005) menciona que la calcopirita, sulfuro que contiene Cu en su estructura, es poco abundante en los distintos depósitos de jales, por otro lado, estos mismos autores y Romero *et al.* (2007) señalan que el Cd se asocia al Zn (esfalerita) en cantidades traza por lo que el aporte de Cu y Cd de la cuenca, jales y sulfuros minerales hacia los ríos es poco significativo, diluyéndose a concentraciones no detectables al momento de distribuirse hacia los cuerpos de agua. De acuerdo al análisis multivariado (agrupamiento de metales y parámetros fisicoquímicos), la separación de las muestras en dos grupos se asocia a la generación de procesos similares que controlan la liberación de metales que dependen de la época estacional con la mayor concentración de metales en época de secas (Fig. 2), confirmando que las condiciones en este periodo para ríos y arroyos son significativamente similares a las de los jales, pero no así en lluvias (con excepción de TX3). Dicha similitud muestra la importancia de los cambios estacionales en los procesos de intemperismo y lavado de los componentes de los jales en lluvias (Van Griethuysen *et al.*, 2005), con su posterior transporte por escorrentía hacia los cuerpos de agua de la zona. La variación de la concentración de metales entre lluvias y secas puede estar indicando dos procesos acoplados: 1) descarga con erosión (Bradley, 1984; Bradley & Cox, 1986; Bradley & Cox 1987) y 2) dilución proporcional (Salomons, 1995). La descarga con erosión se comprueba si se encuentra una mayor concentración cuando hay un incremento en los procesos erosivos, asociados a la lixiviación de los materiales poco consolidados (jales, sedimentos, suelos) presentes en la cuenca. La dilución proporcional la observamos cuando hay una disminución en la concentración en presencia de un incremento del flujo y requiere que haya una baja erosión y lixiviación de los materiales. La descarga con erosión la observamos para el Zn, Fe y As, mientras que la dilución proporcional se observa para el Pb. En el caso del Cd y Cu, su comportamiento puede ser el reflejo de ambos procesos.

Las muestras TX3-S y TX3-L (Xochula) fueron las que presentaron sistemáticamente elevadas concentraciones de metales (Tabla 2). El tercer grupo observado en el análisis multivariado (Fig. 2) indica que TX3-S y TX3-L se asocian con los arroyos cercanos a los jales y evidencia que corresponde a un sitio con procesos diferentes al resto de las muestras de la región y coincide con su ubicación cercana al arroyo Xochula (tributario del río Taxco), cuyo cauce y riberas están en contacto directo con

el horizonte inferior de los jales Guerrero (depósito más antiguo y oxidado). Esta asociación hacia los arroyos cercanos a los jales (RF2-1, RF2-2, JG) se refleja en un valor $\delta^{34}\text{S}$ empobrecido (-6.8 y -5.4%), indicativo de que la fuente de azufre se asocia hacia los sulfuros (Seal, 2006) presentes, en este caso, en los jales. El principal aporte de metales hacia el arroyo Xochula es a través del lavado-erosión de los jales Guerrero durante la época de lluvias y su intemperismo en secas. Además de la oxidación de los sulfuros durante la época de secas que se refleja en el pH ácido (2.60); en la época de lluvias el aumento en el caudal del arroyo produce una disminución en la concentración de metales, además de la neutralización de las aguas ácidas, debido al aporte de minerales como la calcita y dolomita procedentes de las calizas que afloran en el área (Talavera-Mendoza *et al.*, 2005; Méndez-Ramírez & Armienta-Hernández, 2012). Este proceso se evidencia al aumentar el pH a casi neutro (6.72) en esta época. Los sulfuros que aportan metales hacia este punto son pirita, calcopirita y esfalerita, abundantes en este depósito de acuerdo con Talavera-Mendoza *et al.* (2005).

En el punto de muestreo (TX4-S y TX4-L), el agua obtenida proviene del interior de la mina La Concha como resultado de la inundación de la misma debido al cese de actividades. La presencia de Zn y Pb en época de secas, Cd, Fe y As en lluvias refleja los procesos de transporte para ambos periodos de muestreo; el caudal del agua en este punto se mantiene constante lo que sugiere una probable erosión de sulfuros minerales.

El contenido de metales (TX5-S y TX5-L) obtenido en el río Cacalotenango (Fig. 1), se debe a una importante disminución en el flujo del río en el periodo de secas lo que provoca la sedimentación de las partículas y evita su transporte a lo largo del cauce. Armienta *et al.* (2007) señala que el As, Fe y Cu se asocian a las fracciones residuales de los sedimentos, lo que contribuye a evitar su introducción al agua de este río. Sin embargo, menciona que el Pb y Zn se asocian a la fase de carbonatos que ante un cambio en el pH del agua pueden disolverse y liberar estos metales. No obstante nuestros resultados indican que existe además un fenómeno físico importante que contribuye al aporte de dichos elementos vía el lavado de la cuenca y transporte de los sedimentos en la época de lluvias; comportamiento comparable al observado por Arcega-Cabrera *et al.* (2009) para la misma zona. La presencia de Fe y Zn está relacionada con el intemperismo de los jales El Fraille I y II, La Concha, así como de la cuenca y la introducción del material intemperizado al caudal del río en época de lluvias, elevando su concentración; durante la época de secas, por el contrario, el aporte de estos elementos se limita al intemperismo de los depósitos de jales que en conjunto con la disminución del flujo del río y los arroyos efluentes evita su transporte, lo que se manifiesta en menores concentraciones de estos metales. Un comportamiento inverso se observa para As y Pb, en secas las condiciones ambientales de mayor temperatura, escasa precipitación y menor humedad resultan en una disminución importante

en el tirante de agua, lo que genera que la concentración de As y Pb se incremente. El Cd y Cu en ambos periodos tuvieron concentraciones no detectables confirmando nuevamente que su aporte, por el lavado de los jales y la cuenca, hacia ríos y arroyos es poco significativo.

Valores isotópicos $\delta^{18}\text{O}$ y δD . De acuerdo al comportamiento isotópico observado en las muestras de agua (Fig. 3), el alejamiento de la pendiente ($\delta\text{D} = 3.998 * \delta^{18}\text{O} - 29.02$, $r = 0.91$) con respecto a la LMM ($\delta\text{D} = 8 * \delta^{18}\text{O} + 10$) propuesta por Craig (1961), durante la época de secas, indica un marcado proceso de evaporación el cual se ve incentivado por la baja presencia de precipitación (1.2 mm) durante los meses de febrero a finales de junio, siendo el periodo más seco el mes de mayo, con una temperatura superior a los 30 °C (Romero *et al.*, 2007, 2008). Este comportamiento se presenta cuando la humedad relativa del área es inferior al 25%, produciendo una pendiente ~ 4 (Gonfiantini, 1986; Clark & Fritz, 1997) que corresponde a la línea de evaporación local (LELS) para el periodo de secas. Sin embargo, durante la época de lluvias (septiembre) la tendencia fue un aumento en la pendiente ($\delta\text{D} = 6.109 * \delta^{18}\text{O} - 9.69$, $r = 0.93$) logrando un acercamiento hacia la LMM, lo que indica que el principal aporte de agua hacia los ríos de la región es a través de la precipitación y que la evaporación del área sigue siendo un proceso presente pero en menor proporción. De acuerdo con Clark y Fritz (1997), este comportamiento ocurre cuando la humedad relativa supera el 75%, lo que corresponde a una segunda línea de evaporación local relativa a la época de lluvias (LELL). Las pendientes obtenidas se encuentran en el intervalo indicado por Coplen *et al.* (2000) y Clark y Fritz (1997), quienes mencionan que pendientes inferiores (entre 3 y 6) a la de la LMM, se deben a cambios en la humedad relativa, temperatura y variaciones estacionales. En este caso, indican adicionalmente procesos de evaporación y dilución en las estaciones de secas y lluvias respectivamente, que se reflejan en la elevada concentración de metales, para la época de secas, mientras que en la época de lluvias las concentraciones decrecen significativamente alcanzando en algunos casos concentraciones no detectables.

Sulfatos y $\delta^{34}\text{S}$. El alto contenido de sulfatos (>1000 mg/L) en el agua de los arroyos indica que el proceso de oxidación (posiblemente de sulfuros como la pirita, calcopirita, esfalerita, galena, arsenopirita) se lleva a cabo en el Distrito. En los ríos, al igual que en los arroyos, los sulfatos superan el LMP (400 mg/L) de la NOM-127-SSA1-1994 sugiriendo, nuevamente, que existe un proceso de oxidación de sulfuros que da origen a los sulfatos secundarios y refleja en ambos casos la interacción del agua meteórica con los depósitos de jales, principales proveedores de sulfatos hacia los cuerpos de agua. Los resultados de los valores $\delta^{34}\text{S}$ confirman el proceso de oxidación en el distrito y que la generación de sulfatos secundarios está asociada a los sulfuros minerales (Dold & Spangenberg, 2005; Butler, 2007; Smuda *et al.*, 2008).

Los valores $\delta^{34}\text{S}$ del azufre de los sulfatos de las muestras de agua fueron isotópicamente ligeros (δ negativos) para la época de lluvias, exceptuando a TX5-S con un $\delta^{34}\text{S}$ isotópicamente enriquecido (+2.2‰). La comparación de los resultados isotópicos de este estudio con los valores $\delta^{34}\text{S}$ reportados por Camprubí *et al.* (2006) para sulfuros primarios: pirita de vetas (-4.0‰ a +0.9‰), pirita de mantos (+0.1‰ a +5.9‰), esfalerita de vetas (+0.0‰ a +3.2‰) y de -4.3‰ a -0.7‰, esfalerita de mantos (+1.5‰ a +3.2‰) y de -4.1‰ a -0.9‰) y galena de vetas (-5.5‰ a -1.4‰), correspondientes a las principales estructuras que hospedan la mineralización del Distrito minero de Taxco, confirman que el azufre de los sulfatos disueltos proviene de la oxidación de los sulfuros primarios del Distrito y coinciden mayormente con el intervalo de valores $\delta^{34}\text{S}$ de la esfalerita (vetas y mantos) y pirita (vetas y mantos) y en menor grado con el intervalo de la galena (Fig. 5), reforzado por las elevadas concentraciones de sulfatos disueltos en el agua.

El contenido de sulfatos en la muestra TX3-S fue el más elevado y correspondió con un valor $\delta^{34}\text{S} = -6.8‰$, cifra que no se encuentra dentro de los valores isotópicos reportados para los sulfuros primarios del Distrito. La literatura reporta distintos intervalos isotópicos para la pirita como sulfuro: Rollinson (1993) para pirita clásica señala tres intervalos: +12 a +16‰, +3 a -3‰, -10 a -17‰. Clark y Fritz (1997) para el mismo sulfuro valores $\delta^{34}\text{S}$ de -20 a 0‰. Seal (2006) indica valores dentro de un amplio intervalo (-50‰ a +16‰) para $\delta^{34}\text{S}$ de pirita sedimentaria. Smuda *et al.* (2008) reporta valores de oxidación para sulfuros primarios de -6.7 a +1.7‰, que coinciden con lo obtenido en este estudio para la muestra TX3-S. En el periodo de lluvias TX3-L, tuvo un valor $\delta^{34}\text{S}$ de -5.40 ‰, el cual coincide con el intervalo isotópico reportado para la galena de vetas (-5.5 a -1.4). De acuerdo a lo anterior, el azufre de los sulfatos de TX3 (S y L) proviene del intemperismo y oxidación de sulfuros primarios durante la época de secas, explicando el valor de -6.8‰, y durante la época de lluvias existe un aporte de azufre asociado a la galena; la Figura 5 indica que esta muestra se agrupa con los arroyos cercanos a los jales, lo que refuerza la hipótesis de que su valor $\delta^{34}\text{S}$ empobrecido es producto del intemperismo-oxidación y la erosión de sulfuros primarios (galena) presentes en estos depósitos.

El análisis de la relación isotópica $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ en los sulfatos disueltos, evidencia el aporte de sulfatos vía oxidación y de sulfuros minerales hacia los ríos, además de un proceso de intemperismo de la cuenca en época de secas y la erosión y mezcla de partículas conteniendo sulfatos y sulfuros a través de escorrentías superficiales durante la época de lluvias. Isotópicamente, este fenómeno se pudo definir al comparar el $\delta^{34}\text{S}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ (Fig. 4), ya que las muestras de agua correspondientes al periodo de secas tienen una distribución más amplia y heterogénea indicando un proceso de intemperismo de la cuenca, mientras que las muestras del periodo de lluvias coexisten en un patrón más definido, indicando el

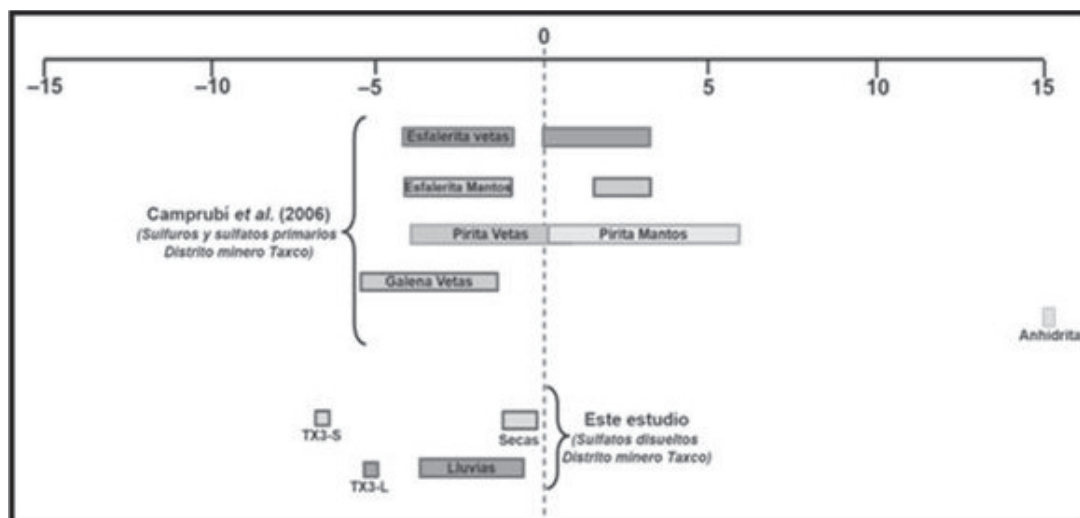


Figura 5. Distribución isotópica de los valores $\delta^{34}\text{S}$ en sulfatos disueltos del Distrito minero de Taxco y de los sulfuros reportados por Camprubí et al., (2006), para su comparación.

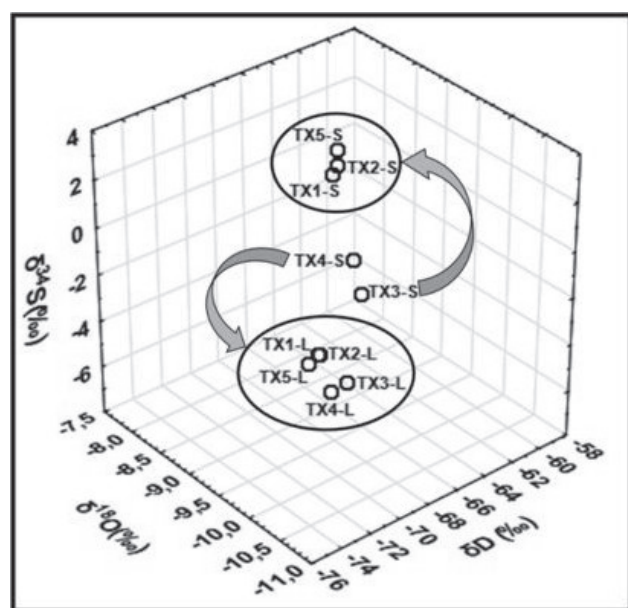


Figura 6. Análisis gráfico 3D. Se comparan los valores δD vs $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^{34}\text{S}$.

transporte de partículas y su mezcla. Las muestras TX3-S y TX4-S, se separaron del resto del grupo lo que sugiere que están influenciadas de distinta manera por los procesos descritos; para definir de una mejor manera estos procesos se realizó el análisis gráfico 3D (Fig. 6), el cual refuerza nuestra hipótesis de los procesos de intemperismo (secas), erosión y mezcla (lluvias) al observarse la separación en dos grupos: el primero de ellos conformado por las muestras del periodo de secas cuyos valores $\delta^{18}\text{O}$ y δD , más alejados de la LMM (evaporación), exhiben su cercanía con el $\delta^{34}\text{S}$ de los sulfatos indicando una mayor exposición de los jales (ricos

en sulfatos y sulfuros), rocas, sedimentos y suelos a condiciones de altas temperaturas ($>30\text{ }^\circ\text{C}$), mínima precipitación y baja humedad que los hacen susceptibles a intemperizarse; mientras que el segundo grupo constituido por las muestras del periodo de lluvias con valores $\delta^{18}\text{O}$ y δD cercanos a la LMM (dilución), se alejan del $\delta^{34}\text{S}$ de los sulfatos indicando un mayor aporte de agua, la erosión de partículas y su mezcla asociado al aumento en el volumen de agua en el cauce de los ríos en esta época del año. Las muestras TX3-S y TX4-S se ubicaron en la parte media del gráfico como se observó en la comparación de los valores $\delta^{18}\text{O}$ vs δD . En el caso de TX3-S, su separación del grupo de muestras de la época de secas, se debe a su valor $\delta^{34}\text{S}$ (-6.8) que es isotópicamente más ligero con respecto a la totalidad de las muestras lo que ocasiona que se desplace hacia la parte inferior del gráfico pero cercana a las muestras de esta época. Este comportamiento indica que se encuentra expuesta de igual manera al proceso de evaporación que el resto de las muestras de secas y su valor $\delta^{34}\text{S}$ empobrecido posiblemente se debe a una mayor interacción con el lecho rocoso del arroyo. La muestra TX4-S, proviene del aumento del nivel freático de un socavón inactivo de la mina La Concha, y su asociación con las muestras de la época de lluvias, indica que el proceso de evaporación que se presenta en época de secas no la influencia de igual manera que a las muestras de este periodo, es decir, al ser un agua no expuesta superficialmente el proceso de evaporación la afecta de manera similar a las muestras de la época de lluvias lo que se refleja en su asociación hacia este grupo (Fig. 4).

Los metales y As analizados superaron los límites para agua potable entre 3 a 600 veces lo marcado por la normatividad mexicana para ambos periodos de muestreo; el aumento o disminución en la concentración de los mismos en general varía estacionalmente asociado a los cambios en el caudal (aumento en lluvias

y disminución en secas) de los ríos y arroyos. Con el análisis multivariado se pudo identificar la similitud entre las muestras de los jales y los arroyos cercanos, exhibiendo que los metales y As en las muestras JG y TX3-S y TX3-L provienen de los jales Guerrero. A nivel de cuenca la introducción de metales hacia los ríos Taxco y Cacalotenango es, de igual manera, estacional.

Los valores isotópicos $\delta^{18}\text{O}$ y δD confirmaron los procesos de evaporación en la época de secas y dilución en época de lluvias. El análisis isotópico de los sulfatos disueltos ($\delta^{34}\text{S}$), fue determinante para exhibir que la fuente de azufre en estos proviene de la oxidación de los sulfuros primarios del Distrito minero de Taxco (pirita, esfalerita, galena). La relación en 3D del $\delta^{34}\text{S}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ vs δD confirmó los procesos de intemperismo, erosión de material particulado (de los jales y de la cuenca), y su mezcla evidenciado por los valores $\delta^{34}\text{S}$ vs $\delta^{18}\text{O}$. Los isótopos de azufre se revelaron como un instrumento poderoso en la identificación de los procesos relacionados con el aporte y distribución de los metales y As hacia los cuerpos de agua. De esta manera la aplicación de los isótopos estables se constituye como un fuerte elemento en la identificación de procesos ambientales en zonas contaminadas por residuos mineros.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a A. Aguayo, O. Cruz y N. Cenicerros por su valiosa contribución en el trabajo de laboratorio. A.D.A agradece al CONACyT por la beca doctoral otorgada para la realización de esta investigación. Los autores agradecen a los revisores anónimos sus valiosos comentarios para mejorar este artículo.

REFERENCIAS

- ARCEGA-CABRERA, F., S. E. CASTILLO-BLUM & M. A. ARMIENTA, M. A. 2005. Kinetic Study of the Release of Lead in a Mine-Impacted Tropical River. *Bull. Environmental Contamination and Toxicology* 75: 523-529.
- ARCEGA-CABRERA, F., M. A. ARMIENTA, L. W. DAESSLÉ, S. E. CASTILLO-BLUM, O. TALAVERA & A. DÓTOR. 2009. Variations of Pb in a mine-impacted tropical river, Taxco, Mexico: Use of geochemical, isotopic and statistical tools. *Applied Geochemistry* 24: 162-171.
- ARMIENTA, M. A., O. TALAVERA, O. MORTON & M. BARRERA. 2003. Geochemistry of Metals from Mine Tailings in Taxco, Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 71: 387-393.
- ARMIENTA, M. A., O. TALAVERA, G. VILLASEÑOR, E. ESPINOSA, I. PÉREZ-MARTÍNEZ, O. CRUZ, N. CENICEROS & A. AGUAYO. 2004. Environmental behaviour of metals from tailings in shallow rivers: Taxco, central Mexico. *Applied Earth Science: Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section B*. 113:B76-B82.
- ARMIENTA, M. A., A. DÓTOR, F. E. ARCEGA-CABRERA, O. TALAVERA, A. AGUAYO, N. CENICEROS & O. CRUZ. 2007. Assessing water-sediment processes for metals in rivers polluted by mining to predict environmental impacts in developing countries. In: Webb, B & D. De Boer (Eds.). *Water Quality and Sediment Behaviour of the Future: Predictions for the 21st century*. Vol. 314. IAHS Pub, pp. 155-162.
- BRADLEY, S. B. 1984. Flood effects on the transport of heavy metals. *International Journal of Environmental Studies* 22: 225-230
- BRADLEY, S. B. & J. J. COX. 1986. Heavy metals in the Hamps and Manifold valleys, North Staffordshire UK: distribution in flood plain soils. *Science of the Total Environment* 50: 103-128
- BRADLEY, S. B. & J. J. COX. 1987. Heavy metals in the Hamps and Manifold valleys, North Staffordshire UK: partitioning of metals in flood plain soils. *Science of the Total Environment* 65: 135-153
- BUTLER, T. W. 2007. Isotope geochemistry of drainage from an acid mine impaired watershed, Oakland, California. *Applied Geochemistry* 22: 1416-1426.
- CAMPUBÍ, A., E. GONZÁLEZ-PARTIDA & E. TORRES-TAFOLLA. 2006. Fluid inclusion and stable isotope study of the Cobre-Babilonia polymetallic epithermal vein system, Taxco district, Guerrero, Mexico. *Journal of Geochemical Exploration* 89: 33-38.
- CLARK, I. & P. FRITZ. 1997. *Environmental isotopes in hydrogeology*. Lewis Publisher, Boca Raton. pp. 35-61.
- CRAIG, H. 1961. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133: 1702-1703.
- COPLIN, T. B., A. L. HERCZEG & C. BARNES. 2000. Isotope engineering-using stable isotopes of the water molecule to solve practical problems. In: P. Cook & L. Herczeg (Eds.). *Environmental tracers in subsurface hydrology*. Second printing. Kluwer Academic Publishers, USA, pp. 79-110.
- DOLD, B. & J. SPANGENBER. 2005. Sulfur Speciation and Stable Isotope Trends of Water-Soluble Sulfates in Mine Tailings Profiles. *Environmental Science and Technology* 39: 5650-5656.
- ESPINOSA, E. & M. A. ARMIENTA. 2007. Mobility and fractionation of Fe, Pb and Zn in river sediment from a silver and base-metals mining area: Taxco, Mexico. *Journal of Environmental Science and Health Part A*. 42: 1391-1401.
- ESPINOSA, E., ARMIENTA, M. A., CRUZ, O., AGUAYO, A. & CENICEROS, N. 2009. Geochemical distribution of arsenic, cadmium, lead and zinc in river sediments affected by tailings in Zimapán, a historical polymetallic mining zone of México. *Environmental Geology* 58: 1467-1477.
- GONFIANTINI, R. 1986. Environmental isotopes in lake studies. In: Fritz, P. & J. Ch. Fontes (Eds.). *Handbook of environmental isotope geochemistry. Vol. 2. The terrestrial environment*. B. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, pp. 113-168.
- GUAY, B. E. & EASTOE, C. J. 2007. Tracking groundwater sources with environmental isotopes. *Southwest Hydrology* 6 (4): 18-19.
- HOLMSTROM, H., & B. OHLANDER. 2001. Layers rich in Fe- and Mn oxyhydroxides formed at the tailings-pond water interface, a possible trap for

- trace metals in flooded mine tailings. *Journal of Geochemical Exploration* 74: 189-203.
- HUBBARD, C. G., S. BLACK & M. L. COLEMAN. 2009. Aqueous geochemistry and oxygen isotope compositions of acid mine drainage from the Rio Tinto, SW Spain, highlight inconsistencies in current models. *Chemical Geology* 265: 321-334
- INEGI (INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA). 2009. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Taxco de Alarcón, Guerrero. Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México. Clave geoestadística 12055.
- LIBES, S. M. 2009. *Introduction to marine biogeochemistry*. Second Edition. Elsevier, USA. 910 p.
- MÉNDEZ-RAMÍREZ, M. & M. A. ARMIENTA. 2012. Distribución de Fe, Zn, Pb, Cu, Cd y As originada por residuos mineros y aguas residuales en un transecto del río Taxco en Guerrero, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 29: 450-462.
- OEIDRUS (OFICINA ESTATAL DE INFORMACIÓN PARA EL DESARROLLO RURAL SUSTENTABLE). 2011. Área de sistemas de información geográfica y sensores remotos, Atlas del estado de Guerrero. Disponible en línea en: <http://campoguerrero.gob.mx/publica/> (consultado el 15 octubre 2011).
- CONAGUA-OCB (COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA-ORGANISMO DE CUENCA BALSAS). 2010. Estadísticas del agua en la cuenca del río Balsas. Disponible en línea en: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/EstadisticasdelAguaenlacuencadelRioBalsas,2010.pdf> (consultado el 11 octubre 2011).
- RIVERA-BUSTOS, R. 2009. Hidrogeoquímica e isótopos estables (^2H , ^{18}O , ^{34}S) de los lixiviados de los jales del fraile, Taxco de Alarcón, Guerrero. Tesis de Licenciatura (Geología), Unidad Académica de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Guerrero, Taxco, México. 68 p.
- ROLLINSON H. R. 1993. *Using geochemical data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. Longman, UK. 352 p.
- ROMERO, F. M., M. A. ARMIENTA, M. E. GUTIÉRREZ & G. VILLASEÑOR. 2008. Factores geológicos y climáticos que determinan la peligrosidad y el impacto ambiental de jales mineros. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 24 (2): 43-54.
- ROMERO, F. M., M. A. ARMIENTA & G. GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ. 2007. Solid-phase control on the mobility of potentially toxic elements in an abandoned Lead/Zinc mine tailings impoundment, Taxco, Mexico. *Applied Geochemistry* 22: 109-127.
- ROCHA, J. C., A. ROSA HENRIQUE & A. CARDOSO ALVES. 2009. *Introdução á química ambiental*. 2ª Ed. Bookman, Editora. Porto Alegre, RS. Brasil.
- RYU, J., R. A. ZIERENBERG, R. A. DAHLGREN, & S. GAO. 2006. Sulfur biogeochemistry and isotopic fractionation in shallow groundwater and sediments of Owens Dry Lake, California. *Chemical Geology* 229: 257-272.
- SALOMONS, W. 1995. Environmental impact of metals derived from mining activities: processes, predictions, prevention. *Journal of Geochemical Exploration* 52: 5-23
- SSA (SECRETARÍA DE SALUD AMBIENTAL). 1994. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. NOM-127-SSA1-1994. Diario Oficial de la Federación, México. 49-55.
- SEAL II, R. R. 2006. Sulfur isotope geochemistry of sulfide minerals. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 61: 633-677.
- SHARP, Z. 2007. *Principles of stables isotope geochemistry*. Pearson Prentice Hall, USA. 344 p.
- SMUDA, J., B. DOLD, J. E. SPANGENBERG & H. R. PFEIFER. 2008. Geochemistry and stable isotopes composition of fresh alkaline porphyry copper tailings: Implications on sources and mobility of elements during transport and early stages of deposition. *Chemical Geology* 256: 62-76.
- SPANGENBERG, J. E., B. DOLD, M. L. VOGT & H. R. PFEIFER. 2006. Stable isotope composition of waters from porphyry copper mine tailings in different climatic environments, Chile. *Goldschmidt Conference* (Abst.) A606.
- TALAVERA-MENDOZA, O., M. YTA, R. MORENO TOVAR, A. DÓTOR ALMAZÁN, N. FLORES MUNDO & C. DUARTE GUTIÉRREZ. 2005. Mineralogy and geochemistry of sulfide-bearing tailings from silver mines in the Taxco, Mexico area to evaluate their potential environmental impact. *Geofísica Internacional* 44 (1): 49-64.
- TALAVERA MENDOZA, O., M. A. ARMIENTA HERNÁNDEZ, J. GARCÍA-ABUNDIS, & N. FLORES-MUNDO. 2006. Geochemistry of leachates from the El Fraile sulfide tailings piles in Taxco, Guerrero, southern Mexico. *Environmental Geochemistry and Health* 28: 243-255.
- TORRES-TAFOYA, E., & A. GONZALEZ-NIÑO. 2009. Mineralización de Pb-Zn en mantos alojados en la Caliza Morelos del distrito de Taxco, Guerrero. In: Clark Kenneth, F., G. A. Salas-Pizá & R. Cubillas-Estrada (Eds.). *Geología económica de México*. Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, A.C., pp. 642-649.
- VAN GRIETHUYSEN, C. M. LUITWIELER, J. JOZIASSE & A. A. KOELMANS. 2005. Temporal variations of trace metal geochemistry in flood plain lake sediment subject to dynamic hydrological conditions. *Environmental Pollution* 137 (2): 281-294.

Recibido: 28 de agosto de 2012.

Aceptado: 31 de octubre 2013.