



Título del artículo.

Avances de la evaluación de la eficiencia de trampas hidrogeoquímicas establecidas para neutralizar los metales pesados generados por los lixiviados en los jales El Fraile, en Taxco Guerrero, México.

Título del artículo en idioma Inglés.

Advances in evaluation of the efficiency of hydrogeochemical traps established to neutralize heavy metals generated by leachates found in mine tailings at El Fraile, in Taxco Guerrero, Mexico.

Autores.

Elvia Díaz Villaseñor
Oscar Talavera Mendoza
María Laura Sampedro Rosas
Jazmín A. López Díaz
Alejandro H. Ramírez Guzmán

Referencia bibliográfica:

MLA

Díaz Villaseñor, Elvia, Oscar Talavera Mendoza, María Laura Sampedro Rosas, Jazmín A. López Díaz, Alejandro H. Ramírez Guzmán. "Avances de la evaluación de la eficiencia de trampas hidrogeoquímicas establecidas para neutralizar los metales pesados generados por los lixiviados en los jales El Fraile, en Taxco, Guerrero, México". *Tlamati* 8.2 (2017): 27-36. Print.

APA

Díaz Villaseñor, E., Talavera Mendoza, O., Sampedro Rosas, M. L., López Díaz, J. A. y Ramírez Guzmán, A. H. (2017). Avances de la evaluación de la eficiencia de trampas hidrogeoquímicas establecidas para neutralizar los metales pesados generados por los lixiviados en los jales El Fraile, en Taxco, Guerrero, México. *Tlamati*, 8(2), 27-36.

ISSN: 2007-2066.

Publicado el 30 de Diciembre del 2017

© 2017 Universidad Autónoma de Guerrero

Dirección General de Posgrado e Investigación

Dirección de Investigación

TLAMATI, es una publicación semestral de la Dirección de Investigación de la Universidad Autónoma de Guerrero. El contenido de los artículos es responsabilidad exclusiva de los autores y no refleja de manera alguna el punto de vista de la Dirección de Investigación de la UAGro. Se autoriza la reproducción total o parcial de los artículos previa cita de nuestra publicación.



Avances de la evaluación de la eficiencia de trampas hidrogeoquímicas establecidas para neutralizar los metales pesados generados por los lixiviados en los jales El Fraile, en Taxco, Guerrero, México

Elvia Díaz Villaseñor^{1*}
Oscar Talavera Mendoza¹
María Laura Sampedro Rosas²
Jazmín A. López Díaz¹
Alejandro H. Ramírez Guzmán¹

¹Universidad Autónoma de Guerrero. Unidad Académica de Ciencias de la Tierra. Exhacienda San Juan Bautista s/n, Taxco el Viejo, Guerrero, México. C. P. 40323.

²Universidad Autónoma de Guerrero Unidad Académica de Desarrollo Regional. Acapulco, Gro.

*Autor de correspondencia
elviadvilla@hotmail.com

Resumen

Se presentan los avances de la evaluación la eficiencia de las trampas hidrogeoquímicas establecidas por la Compañía Industrial Minera México para neutralizar las altas concentraciones de elementos potencialmente tóxicos que se generan de los lixiviados de los jales El Fraile, municipio de Taxco, Guerrero, México. Se tomaron muestras en las entradas y salidas de cada una de las trampas hidrogeoquímicas. Se determinaron las características físico-químicas y concentración de metales en cada una de las muestras a fin de evaluar su comportamiento en diferentes épocas del año. De igual manera, se compararon las concentraciones de los parámetros medidos con los límites permisibles en la Norma Oficial Mexicana 127 SSA-1 para agua de uso y consumo humano, debido a que los habitantes del poblado de Santa Rosa utilizan los lixiviados para consumo doméstico.

Se encontró que la temperatura de las muestras corresponde a la temperatura media del lugar, los valores de pH son de muy ácidos hasta ligeramente alcalinos. La conductividad eléctrica es elevada, mientras que el Eh es indicativo de ambientes desde reductores hasta oxidantes. Las concentraciones de sulfatos son elevadas en todas las muestras y todos los muestreos, los cloruros y nitratos son muy bajos, a diferencia del Flúor que en la mayoría de las muestras sobrepasa la norma oficial para agua de consumo Humano. De igual manera se encontraron concentraciones altas de As, B, Ba, Cd, Fe, Mn y Zn. El plomo solo se encontró en dos muestras.

Palabras clave: trampas hidrogeoquímicas, lixiviados, jales

Como citar el artículo:

Díaz Villaseñor, E., Talavera Mendoza, O., Sampedro Rosas, M. L., López Díaz, J. A. y Ramírez Guzmán, A. H. (2017). Avances de la evaluación de la eficiencia de trampas hidrogeoquímicas establecidas para neutralizar los metales pesados generados por los lixiviados en los jales El Fraile, en Taxco, Guerrero. *Tlamati*, 8(2), 27-36.

Abstract

Prior evaluation about efficiency of hydrogeochemical traps established by the Industrial Minera Company México in order to neutralize high concentrations of potentially toxic elements generated from the leachates of El Fraile, municipality of Taxco, Guerrero, Mexico. Samples were taken at the entrances and exits of each of the hydrogeochemical traps. Physical-chemical characteristics and concentration of metals in each of samples were determined in order to evaluate their behavior at different times of the year. Likewise, concentrations of measured parameters were compared with permissible limits in Official Mexican Standard 127 SSA-1 for water of human using and consumption, because inhabitants of the town of Santa Rosa regularly use leachates for domestic consumption. It was found that temperature of samples corresponds to average temperature of the place, pH values varies from very acidic to slightly alkaline. Electrical conductivity is high, while Eh measure is indicative of environments from reducers to oxidants. Sulfate concentrations are high in all samples and chlorides and nitrates are very low, unlike fluoride which in most samples exceeds the official standard for human drinking water. In the same way, high concentrations of As, B, Ba, Cd, Fe, Mn and Zn were found. Lead was only found in two samples.

Keywords: hydrogeochemical traps, leachates, tailings

Introducción

Los jales El Fraile, localizados en el Distrito Minero de Taxco, al norte del Estado de Guerrero son desechos sólidos constituidos por partículas de materiales que resultan de la explotación y beneficio de depósitos minerales provenientes de la explotación de yacimientos hidrotermales de sulfuros de plomo (galena) y zinc (esfalerita) asociados con sulfuros de hierro (pirita, pirrotita y calcopirita), que se beneficiaron por el método de flotación selectiva, en la hoy inactiva planta de Beneficio de El Fraile (Martín-Romero, 2004).

De acuerdo con Ritcey (1989) la inestabilidad de los minerales sulfurados en medios oxidantes, concretamente de la pirita, produce la oxidación de éstos, generando un medio ácido, el cual en presencia de agua, produce el llamado drenaje ácido de mina [DAM] que se caracteriza por tener valores de $\text{pH} < 2.0$ y Eh reductores, generalmente < 0.08 Mv así como altas concentraciones de SO_4^{-2} , Fe, Mn, Cu, Zn, As, Al, Ca, Mg, entre otros elementos. En muchos casos los depósitos de jales, contienen minerales como la calcita y otros elementos carbonatados. Estos minerales juegan un papel muy importante en los procesos de neutralización del DAM y en la retención de metales. Al respecto, la calcita presenta un alto potencial de neutralización de soluciones ácidas y es la responsable de la retención de metales en depósitos poco oxidados (Jambor y Owens, 1993). Como resultado de la neutralización del DAM es la producción de lixiviados, productos finales resultantes de un conjunto de procesos que incluyen la oxidación, solubilización, precipitación y absorción. Los lixiviados se caracterizan por presentar valores de pH casi neutros (6 a 8) y valores de Eh variables pudiendo ser reductores u oxidantes, con altas concentraciones de SO_4^{-2} . Las concentraciones de metales son mucho menores que en el DAM, pero mucho más elevadas que las concentraciones encontradas en aguas superficiales y subterráneas. Los lixiviados provenientes de jales El Fraile, son utilizados por los habitantes de las comunidades cercanas como agua de uso y consumo humano, principalmente en el secano, ante el desconocimiento de la problemática que implica utilizar el agua con altas concentraciones de elementos potencialmente

tóxicos.

En los últimos años se han realizado diversos estudios en esta región de Taxco y sus alrededores (Castro-De Dios, 2002; Flores-Mundo, 2002; Martín-Romero, 2004; Talavera, Yta, Moreno Tovar, Dótor Almazan, Flores Mundo y Duarte Gutiérrez, 2005; Díaz Villaseñor y Talavera Mendoza, 2006; Galarza-Brito, 2009) en el agua, suelo, sedimentos y plantas donde se han detectado altas concentraciones de metales tóxicos, relacionado con los desechos mineros.

Debido a lo anterior, la Compañía Industrial Minera México, se dio a la tarea de construir 3 trampas geoquímicas y un humedal, aprovechando los materiales rocosos de la región, con la finalidad de neutralizar los elementos potencialmente tóxicos generados por los jales El Fraile.

Ubicación del área de estudio

Los jales El Fraile se ubican aproximadamente a 7 km al SW de la ciudad de Taxco de Alarcón, Guerrero, y comprenden una superficie aproximada de 10 km^2 . Geográficamente, el área se encuentra entre los paralelos $18^\circ 30'$ y $18^\circ 35'$ de Latitud Norte y entre los $99^\circ 35'$ y $99^\circ 40'$ de Longitud Oeste (véase figura 1).

El acceso a los jales El Fraile es por la carretera Federal No. 95, que une la ciudad de Taxco de Alarcón con la Ciudad de Iguala, Gro. Partiendo de Taxco, unos 10 Km al Sur de la ciudad se desprende un camino empedrado transitable todo el año, que conduce a los poblados de Dolores (≈ 2 km de distancia al SE), Santa Rosa (1 km al SE), El Fraile (≈ 100 m) y Cacalotenango (≈ 3 km al NW), todos correspondientes al municipio de Taxco.

Descripción de los jales El Fraile.

Se reconocen dos depósitos de jales en esta región, denominados "Fraile I" y "Fraile II". El Fraile I mide aproximadamente 470 m de largo, 372 m de ancho con una altura promedio de 60 m y fueron depositados en una extensión de 13.2 ha. El Fraile II tienen una extensión menor (6.8 ha), con aproximadamente 470 m de largo, 170 m de ancho y un espesor promedio de 30 m. Del área total ocupada por los jales (≈ 20 ha), las 2/3 partes corresponden al "vaso" (13.4 ha) y $\approx 1/3$ parte (6.6 ha) forman el "talud".

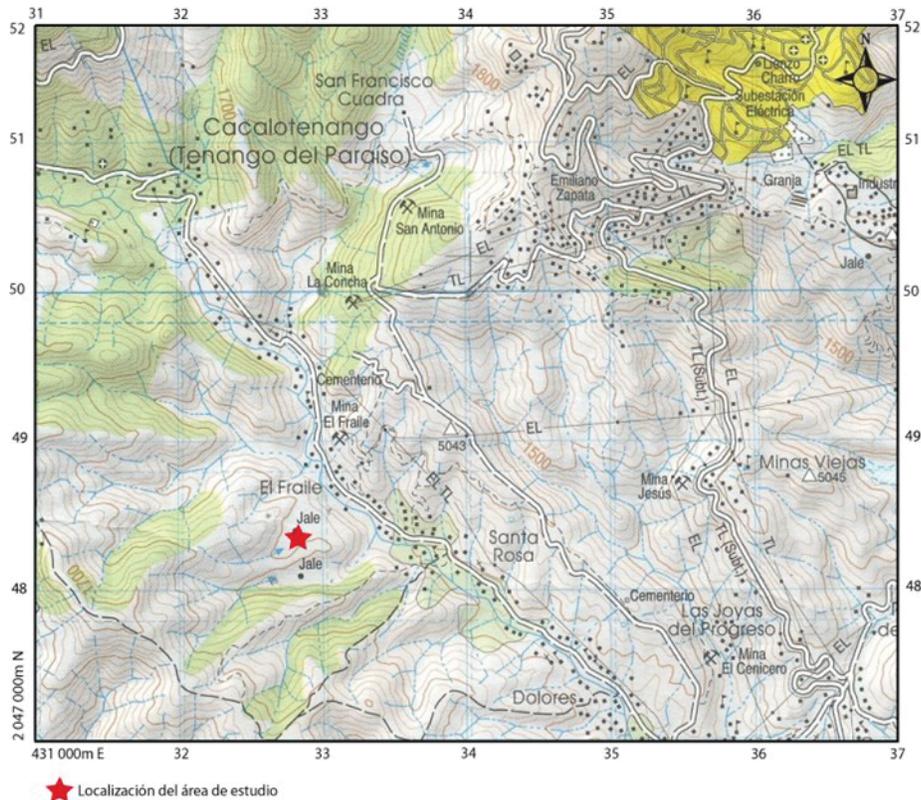


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio. Elaborado a partir de base INEGI.

Ambos depósitos se encuentran sobre rocas de la formación Mexcala del Turoniano-Senoniano (Fries, 1960). Morfológicamente están dominados por partículas menores a las arenas medias. El color original de los jales es gris claro, sin embargo, actualmente la mayor parte de éstos es de coloración café amarillenta, debido a los procesos de oxidación a los que están expuestos y que forman una costra de aproximadamente de 2 a 5 cm. De igual manera, es común encontrar la formación de minerales secundarios (sulfuros) como precipitados de color blanco lechoso o amarillo.

La cima del depósito está cubierta de lutita de matriz calcárea. El talud de las dos unidades está expuesto al intemperismo y su coloración tiene tonalidades que varían entre café, amarillo y rojo. La vegetación dominante en la cima corresponde principalmente a *Acacia farnesiana* (conocido comúnmente como huizache). En cambio el vaso del depósito está parcialmente reforestado con vegetación autóctona que integra el paisaje natural.

Metodología

En el área de estudio se ubicaron cinco muestras que abastecen las trampas, las que llamaremos muestras de entrada y tres muestras de salida de las trampas hidrogeoquímicas. En cada sitio se tomaron las coordenadas UTM con un GPS marca Garmin, modelo GPSmap 60 CSx, y posteriormente se ubicaron en un mapa topográfico base Instituto Nacional de Geografía e Informática [INEGI]. Se realizaron tres muestreos (5 de noviembre 2013, 14 de enero, y 22 de marzo 2014). En cada sitio se tomaron dos alícuotas en botellas de polipropileno de alta densidad

(Nalgene), una de 1 L y otra de 0.5 L, previamente lavadas en el laboratorio con HNO₃ diluido al 10 % y agua desionizada y se ambientaron *in situ* para retirar cualquier residuo de ácido. La botella de 1 L se utilizó para la determinación de aniones. Para el análisis de cationes y metales traza se utilizó la de 0.5 L, la cual se le adicionaron 50 gotas de ácido nítrico Ultrex II, para evitar la precipitación de metales.

En cada sitio se determinaron la temperatura, pH, Eh y la conductividad eléctrica. El pH se midió con un pHmetro portátil Oakton pH/mV/°C, utilizando soluciones "buffer" de 4, 7 y 10 para su calibración. El Eh se midió con un equipo Cole-Parmer modelo waterproof ORPtestre Double Junction, calibrado con una solución Zobell con potencial redox de 231 mV, a una temperatura de 25 °C. La conductividad se midió con un conductímetro Horiba Modelo ES-14 E con estabilización y compensación automática de temperatura. Todas las muestras colectadas fueron transportadas en una hielera al laboratorio, donde se almacenaron a una temperatura menor de 10 °C hasta su análisis correspondiente.

Trabajo de Laboratorio.

Los análisis se realizaron en el Laboratorio de Geoquímica de la Unidad Académica de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de Guerrero. Se determinaron las concentraciones de alcalinidad (Carbonatos (CO₃⁼ y bicarbonatos (HCO₃⁼), por el método de titulación utilizando HCl 0.02 M, como titulante y fenolftaleína, verde de bromocresol y rojo de metilo como indicadores colorimétricos. El contenido de cloruros (Cl⁻) se cuantificó con la

Tabla 1. Parámetros físico-químicos medidos *in situ*, en las muestras de los jales El Fraile, municipio de Taxco, Guerrero (correspondiente a tres periodos de muestreo).

periodo	Primer periodo 5 de noviembre 2013				Segundo periodo 14 de enero 2014				Tercer periodo 22 de marzo 2014			
	Parámetro	T°	pH	Eh Real	Cond.	T°	pH	Eh Real	Cond.	T°	pH	Eh Real
Unidades	°C		mV	mS/cm ²	°C		mV	mS/cm ²	°C		mV	mS/cm ²
L.P.		6.5-8.5				6.5-8.5				6.5-8.5		
PT-JF-01	24	6.35	-52.8	2.6	23.3	6.46	-43.6	2.09	29.2	6.6	-167	1.40
PT-JF-02	22.6	6.6	98.55	2.34	24.1	6.92	146.2	2.27	30.7	6.7	138	2.31
PT-JF-03	23.2	6.88	117.4	2.02	22.3	7.13	167	2.18	27.1	6.81	185	2.33
PT-JF-04	25.2	6.69	-50	2.22	24.8	7.23	-56	2.64	28.5	7.11	-38.8	2.86
PT-JF-05	23.3	6.4	115.4	2.14	21	6.3	145	2.89	24.7	6.62	198	2.79
PT-JF-06	23.2	6.3	170.4	1.67	21.8	6.56	150.7	1.58	30.1	6.49	114	1.62
PT-JF-07	23.1	6.36	54.4	2.14	21.1	6.56	154.9	2.54	28.6	6.51	91.2	3.16
PT-JF-08	21.7	3.6	209.8	5.13	23.4	5.8	120.4	4.35	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.

T° = Temperatura °C = Grados Celsius pH = Potencial hidrógeno Eh = Potencial de óxido reducción
 Cond. = conductividad mV = mili Vols mS/cm² = mili Siems sobre centímetro cuadrado
 L.P. = Límite permisible en la NORMA OFICIAL MEXICANA 127 SSA-1994. N.C. = No Colectada

técnica de titulación, con AgNO₃ al 0.02 M como titulante y K₂CrO₄ al 0.41 M y fenolftaleína como indicadores colorimétricos. El Flúor (F⁻), sulfatos (SO₄²⁻) y nitratos (NO₃⁻) se determinaron con un colorímetro HACH modelo DR/890.

Las muestras acidificadas se pasaron por filtros de acetato de celulosa de 0.45 µm de tamaño de poro y se utilizaron para la determinación de metales (As, Ba, B, Cd, Fe, Li, Mn, Pb, Sr y Zn), mediante la técnica analítica de Espectroscopía de Emisión Atómica con Plasma Acoplado Inductivamente [ICP-AES] en un equipo marca Perkin-Elmer Óptima 3 300 DV. La calibración se realizó con los estándares multielementales para agua High-Purity: CWW-TM-D; CWW-TM-H; CWW-TM-A y CWW-TM-E, las muestras se analizaron por triplicado para asegurar la exactitud y la precisión del método analítico.

Resultados

Se describen los resultados de cinco muestras de lixiviados de entrada (PT-JF-01, PT-JF-02, PT-JF-04, PT-JF-06 y PT-JF-08) y tres muestras de las salidas de las trampas hidrogeoquímicas (PT-JF-03, PT-JF-05, y PT-JF-07). Se recolectaron 23 muestras en total, ya que la muestra PT-JF-08 no fue posible recolectarla en el tercer muestreo porque escaseó el líquido.

Parámetros físico-químicos

Temperatura. En el primer periodo, la temperatura fluctuó entre 21.7 °C y 25.2 °C, en el segundo muestreo osciló entre 21 °C y 24.8 °C y, en el tercer muestreo, fue entre 24.7 °C y 30.7 °C. La temperatura presentó pequeñas variaciones, incrementándose hasta en 6 grados de diferencia en el tercer periodo de muestreo (véase tabla 1).

Potencial hidrógeno. Las variaciones de pH oscilaron entre 3.6 - 6.88, en el primer muestreo. En el segundo las fluctuaciones estuvieron entre 5.8 y 7.23, en los dos pri-

meros muestreos la muestra PT-JF08 obtuvo los valores ácidos. En el tercer muestreo los valores de pH obtenidos fueron casi neutrales (6.5 y 7.11), la muestra PT JF08 no se colectó.

Potencial de óxido reducción (Eh). Se encontraron dos muestras con valores negativos (PT-JF-04 y PT-JF-01), con -50 mV y -52.8 mV respectivamente en el primer periodo, indicativo de ambientes reductores o con poca oxigenación, las mismas muestras durante el segundo periodo tuvieron -43.6 mV y -56 mV. En el tercer muestreo los valores fueron de -38.8 mV y -167 mV. Las demás muestras tuvieron valores positivos que correspondientes a ambientes oxidantes: en el primer muestreo oscilaron entre 54.4 mV y 209.8 mV, en el segundo periodo fluctuaron entre 120.4 mV y 167 mV y finalmente en el tercer muestreo, se encontraron valores entre 91.2 mV y 198 mV (véase tabla 1).

Conductividad eléctrica. En el primer muestreo osciló entre 1.67 mS/cm² y 5.13 mS/cm². En el segundo muestreo, fluctuó entre 1.58 mS/cm² y 4.35 mS/cm². En el tercer periodo varió entre 1.40 mS/cm² y 3.16 mS/cm² (véase tabla 1).

Aniones mayores (CO₃⁻², HCO₃⁻, SO₄⁻² y Cl)

No se registraron contenidos de CO₃⁻² lo que concuerda con los valores (<8.3) de pH de las muestras.

Bicarbonatos. En el primer muestreo los HCO₃⁻ fluctuaron entre un número menor al límite de detección del método analítico (PT JF08) y 436.76 mg L⁻¹. En el segundo periodo los contenidos de bicarbonatos oscilaron entre 19.5 mg L⁻¹ y 480.7 mg L⁻¹. Durante el tercer periodo se registraron concentraciones entre 300 mg L⁻¹ y 453.84 mg L⁻¹ (véase tabla 2).

Sulfatos. La concentración de SO₄⁻² en el primer muestreo osciló entre 800 mg L⁻¹ y 4 700 mg L⁻¹. En el segundo periodo los sulfatos fluctuaron entre 760 mg L⁻¹ y 3800 mg

L⁻¹. Mientras en el tercer muestreo se registraron concentraciones entre 460 mg L⁻¹ y 2197.8 mg L⁻¹ (véase tabla 2).

Cloruros. La concentración de cloruros fue baja en todos los muestreos, en el primer muestreo osciló entre un número menor al límite de detección del método analítico (<L.D.) y 7.5 mg L⁻¹. En el segundo muestreo también fue entre <L.D. y 8.8 mg L⁻¹. En el tercer muestreo las concentraciones variaron entre 5 mg L⁻¹ y 10 mg L⁻¹ (véase tabla 2).

Cationes mayores (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ y K⁺)

Las concentraciones de calcio en el primer muestreo se encontraron entre 190 mg L⁻¹ y 414.8 mg L⁻¹. Mientras que en el segundo muestreo oscilaron entre 303.2 mg L⁻¹ y 651.5 mg L⁻¹. En el tercer muestreo las variaciones se encontraron entre 332.7 mg L⁻¹ y 444.1 mg L⁻¹ (véase tabla 3).

Magnesio. Las concentraciones de este elemento en el primer muestreo oscilaron entre 11.5 mg L⁻¹ y 143.2 mg L⁻¹. En el segundo periodo oscilaron entre 23 mg L⁻¹ y 119.7 mg L⁻¹. En el tercer muestreo las concentraciones fueron entre 22.07 mg L⁻¹ y 80.13 mg L⁻¹ (véase tabla 3).

Sodio. Las concentraciones de sodio en el primer periodo de muestreo se reportan <D.L. hasta 21.91 mg L⁻¹. En el segundo muestreo también estuvieron desde <L.D. hasta 33.38 mg L⁻¹. En el tercer muestreo fluctuó entre 11.13 mg L⁻¹ y 34.47 mg L⁻¹ (véase tabla 3).

Potasio. Las concentraciones de potasio de manera general fueron bajas, en el primer periodo de muestreo oscilaron entre 0.658 mg L⁻¹ y 37.54 mg L⁻¹. En el segundo fluctuaron entre 3 mg L⁻¹ y 20.64 mg L⁻¹. Mientras en el tercer muestreo registraron concentraciones entre 3 mg L⁻¹ y 14.39 mg L⁻¹ (véase tabla 3).

Iones menores (NO₃²⁻ y F⁻) y Error de electronegatividad

Nitratos. Las concentraciones de NO₃ en el primer muestreo varían entre 0.5 mg L⁻¹ y 6.7 mg L⁻¹. En el segundo periodo oscilaron entre 2.1 mg L⁻¹ y 7.6 mg L⁻¹. En el tercer muestreo se reportan en un intervalo entre 0.6 mg L⁻¹ y 10.5 mg L⁻¹ (véase tabla 4). Las concentraciones de NO₃-N, en todos los muestreos se reportan por debajo de 2.4 mg L⁻¹.

Los contenidos de Fluoruro en el primer muestreo oscilaron entre 1.7 mg L⁻¹ y 5.6 L⁻¹. Mientras que, en el segundo muestreo se encontraron en un intervalo entre 1.0 mg L⁻¹ y 2.5 mg L⁻¹. El tercer muestreo las concentraciones de fluoruros oscilaron entre 1.0 mg L⁻¹ y 2.3 mg L⁻¹ (véase tabla 4).

Error de electronegatividad. Al calcular el error de electronegatividad se observó un gran desbalance en las cargas negativas (aniones), lo cual puede deberse principalmente por las elevadas concentraciones de sulfatos en la mayoría de las muestras. Así tenemos que en el primer periodo errores entre 17.5% y -49.1 %. En el segundo muestreo el error oscila entre -44 % y 0.2 %. El tercer periodo de muestreo fluctuó entre un -34 % y un 1.5 % (véase tabla 4).

Clasificación de las aguas de acuerdo con el diagrama de Piper

Para determinar la familia geoquímica a la que pertenecen las muestras, se graficaron los datos de aniones y cationes en el diagrama de Piper. La gráfica de las concentraciones de los cationes, ubican a las muestras en la zona seis, que corresponde a las aguas cálcicas. Al graficar los

Tabla 2. Resultados de los aniones mayores en las muestras de los jales El Fraile, municipio de Taxco (correspondiente a tres periodos de muestreo).

Parámetro Unidades	Primer muestreo			Segundo muestreo			Tercer muestreo		
	HCO ₃	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
L.D.	20	1	1	20	1	1	20	1	1
L.P.		400	250		400	250		400	250
Muestra									
PT-JF-01	436.76	1400	5.63	480.7	1140	3.8	453.84	460	5
PT-JF-02	375.8	1240	6.3	358.7	1332	7.5	358.68	1365.3	5.8
PT-JF-03	370.9	1220	7.5	339.2	1365.3	2.5	356.24	1525	5.8
PT-JF-04	400.2	1300	5	368.4	1831.5	6.3	363.56	1964.7	10
PT-JF-05	324.5	1360	6.3	259.2	1831.5	5	300.12	1964.7	5
PT-JF-06	344	800	5.6	380.6	760	3.8	380.64	599.4	5.8
PT-JF-07	395.3	1360	7.5	424.6	1598.4	8.8	453.84	2197.8	7.5
PT-JF-08	<LD	4 700	<LD	19.5	3800	<LD	N.C.	N.C.	N.C.

L.D. = Límite de detección del método analítico

L.P. = Límite permisible en la Norma Oficial Mexicana 127 SSA1-1994

N.C. = No se colectó la muestra

Tabla 3. Resultados de cationes mayores cuantificados en las muestras de los jales El Fraile, municipio de Taxco, Guerrero. (correspondiente a tres periodos de muestreo).

Parámetro	Primer muestreo				Segundo muestreo				Tercer muestreo			
	Ca	Na	K	Mg	Ca	Na	K	Mg	Ca	Na	K	Mg
Unidades	en mg L ⁻¹											
L.D.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
L.P.	200				200				200			
PT-JF-01	337	8.09	14.9	84.9	262	8	10.9	83.9	184.7	11.13	7	50.31
PT-JF-02	332.5	15.1	3.14	44.8	430	20.9	5	59	418.2	22.04	5	49.5
PT-JF-03	341.6	16.7	3.45	48.7	418	21	6	60.6	418.6	26.25	7	49.85
PT-JF-04	361.7	21.9	5.2	56	531	33.4	11.1	88.7	444.1	34.47	13.64	67.27
PT-JF-05	315	18	3.6	51.2	652	29.4	8.96	106	431.7	29.78	14.39	69.95
PT-JF-06	190	8.52	0.66	11.5	353	27.5	3	23	332.7	22.61	3	22.07
PT-JF-07	273.8	10.8	3.06	62.1	303	15.7	5.35	81.1	371.9	20.93	10.13	80.13
PT-JF-08	414.8	<LD	37.5	143	412	<LD	20.6	119.7	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.

L.D. = Límite de detección del método analítico

L.P. = Límite permisible en la Norma Oficial Mexicana 127 SSA-1994

N.C. = No se colectó la muestra

aniones las muestras caen en la zona nueve de las aguas sulfatadas. Únicamente la muestra PT-JF-08 se ubica en la zona uno que corresponde a las aguas magnésicas, por lo tanto, esta muestra pertenece a la familia sulfatada-magnésica, el resto de las muestras corresponden a las aguas sulfatadas-cálcicas. En los tres muestreos se observó el mismo comportamiento.

Elementos potencialmente tóxicos

Se midieron las concentraciones de 10 elementos po-

tencialmente tóxicos, entre ellos tenemos el Arsénico que en el primer muestreo se encontró entre <L.D. y 2.455 mg L⁻¹. En el segundo muestreo entre <L.D. y 0.681 mg L⁻¹. De igual manera en el tercer muestreo tuvo un intervalo entre <L.D. y 2.11 (véase tabla 5)

El Boro en el primer muestreo tuvo concentraciones entre 0.028 mg L⁻¹ y 0.274 mg L⁻¹. En el segundo muestreo el intervalo fue entre 0.608 mg L⁻¹ y 1.378 mg L⁻¹. En el tercer muestreo el boro se encontró entre 0.138 mg L⁻¹ y 0.349 mg L⁻¹.

Tabla 4. Concentración de aniones menores y error de electronegatividad calculado en muestras de los jales El Fraile (correspondiente a 3 periodos de muestreo).

Periodo	Primer Periodo				Segundo Periodo				Tercer Periodo			
	NO ₃	NO ₃ -N	F	E.E.	NO ₃	NO ₃ -N	F	E.E.	NO ₃	NO ₃ -N	F	E.E.
Unidades												
L.P.	0.5	0.1	0.1	%	0.5	0.1	0	%	0.5	0.1	0.1	%
L.D.	10	1.5			10	2			10	1.5		
PT-JF-01	0.5	0.1	3	-20	6	1.4	2	-21	6.6	1.5	2.3	-10
PT-JF-02	1.6	0.4	1.9	-21	2.1	0.5	1	-11	0.6	2.4	1.3	-14
PT-JF-03	2.3	0.5	1.7	-18	2.2	0.5	1	-12	3.7	0.8	1.3	-18
PT-JF-04	5.9	1.3	2.1	-18	3.5	0.8	2	-11	4.6	1	1.9	-23
PT-JF-05	6.7	1.5	2.1	-23	6.9	1.6	2	0.2	11	2.4	2	-23
PT-JF-06	4.6	1	1.8	-35	4.2	0.9	1	-3	3.4	0.8	1	1.5
PT-JF-07	3.1	0.7	2.4	-29	7.6	1.7	2	-28	10	2.3	2.2	-34
PT-JF-08	2.3	0.5	5.6	-49	2.8	0.6	3	-44	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.

E.E. = Error de electronegatividad

L.D. = Límite de detección del método analítico

L.P. = Límite permisible en la Norma Oficial Mexicana 127 SSA-1994

N.C. = No se colectó la muestra

Tabla 5. Resultados de la concentración de arsénico, boro, bario, cadmio y hierro en muestras de lixiviados de los jales El Fraile en el municipio de Taxco, Guerrero (correspondiente a tres periodos de muestreo).

Elemento unidades	Primer Periodo					Segundo Periodo					Tercer periodo				
	As	B	Ba	Cd	Fe	As	B	Ba	Cd	Fe	As	B	Ba	Cd	Fe
L.D.	0.01	0.03	0.025	0.005	0.025	0.01	0.03	0.025	0.005	0.025	0.01	0.03	0.025	0.005	0.025
L.P.	0.05		0.7	0.005	0.3	0.05		0.7	0.005	0.3	0.05		0.7	0.005	0.3
MUESTRA															
PT-JF-01	2.455	0.171	0.202	0.044	9.207	0.681	0.703	0.155	0.041	5.633	1.671	0.211	0.228	0.078	5.773
PT-JF-02	0.018	0.15	0.14	<LD	0.167	0.01	0.937	0.209	<LD	0.136	<LD	0.299	0.112	<LD	0.084
PT-JF-03	<LD	0.164	0.173	<LD	0.041	<LD	0.892	0.238	<LD	0.033	<LD	0.332	0.104	<LD	0.03
PT-JF-04	0.445	0.125	0.271	0.008	1.692	0.388	1.238	0.623	0.027	3.064	2.11	0.249	0.06	0.091	12
PT-JF-05	0.017	0.109	0.181	<LD	<LD	0.031	1.378	0.885	0.005	0.03	0.029	0.349	0.09	<LD	0.04
PT-JF-06	0.015	0.028	0.154	0.016	0.056	<LD	1.033	0.713	0.023	0.181	<LD	0.138	0.11	0.019	0.026
PT-JF-07	0.052	0.089	0.197	0.017	0.486	<LD	0.747	0.202	0.014	0.358	0.01	0.282	0.101	0.011	0.032
PT-JF-08	0.117	0.274	0.164	0.357	57.64	0.112	0.608	0.191	0.281	51.71	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.

L.D. = Límite de detección del método analítico

L.P. = Límite permisible en la Norma Oficial Mexicana 127 SSA-1994

N.C. = No se colectó la muestra

El Bario en el primer muestreo osciló entre 0.14 mg L⁻¹ y 0.561 mg L⁻¹. Mientras que en el segundo muestreo tuvo un intervalo entre 0.155 mg L⁻¹ y 0.885 mg L⁻¹. En el tercer muestreo fluctuó entre 0.06 mg L⁻¹ y 0.228 mg L⁻¹.

Las concentraciones de Cadmio en el primer muestreo oscilaron entre <L.D. y 0.357 mg L⁻¹. En el segundo muestreo se encontraron entre <L.D. y 0.281 mg L⁻¹. En tercer muestreo se reportan entre <L.D. y 0.091 mg L⁻¹. En los tres muestreos el cadmio no se detectó en 3 muestras.

El Hierro. Este elemento tuvo un intervalo muy variable, en el primer muestreo se detectó desde <L.D. hasta 54.64 mg L⁻¹. En el segundo se tuvieron concentraciones desde 0.03 mg L⁻¹ hasta 51.71 mg L⁻¹. En el tercer muestreo

las concentraciones oscilaron entre 0.026 mg L⁻¹ y 12 mg L⁻¹ (véase tabla 5).

También se midieron las concentraciones del Litio, este elemento no se detectó en las muestras PT JF 06 en ninguno de los tres muestreos. Las demás muestras en el primer muestreo oscilaron entre 0.045 mg L⁻¹ y 0.295 mg L⁻¹. De igual manera en el segundo muestreo las concentraciones variaron entre 0.27 mg L⁻¹ y 0.691 mg L⁻¹. En el tercer muestreo las concentraciones se reportan entre 0.043 mg L⁻¹ y 0.208 mg L⁻¹ (véase tabla 6).

Con respecto al Manganeseo se encontraron concentraciones variables, en el primer muestreo oscilaron entre 0.037 mg L⁻¹ y 30 mg L⁻¹. En el segundo muestreo entre

Tabla 6. Resultados de la concentración de litio, manganeso, Plomo, estroncio y zinc en muestras de lixiviados de los jales El Fraile en el municipio de Taxco, Guerrero (correspondiente a tres periodos de muestreo).

Elemento unidades	Primer Periodo					Segundo Periodo					Tercer periodo				
	Li	Mn	Pb	Sr	Zn	Li	Mn	Pb	Sr	Zn	Li	Mn	Pb	Sr	Zn
L.D.	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
L.P.		0.15	0.025		5		0.15	0.025		5		0.15	0.025		5
Muestras															
PT-JF-01	0.134	0.812	0.619	0.883	1.786	0.131	0.609	0.047	0.784	1.672	0.077	0.44	0.353	0.61	1.579
PT-JF-02	0.027	0.147	<LD	0.814	0.22	0.045	0.234	<LD	1.134	0.725	0.043	0.139	<LD	1.041	0.347
PT-JF-03	0.031	0.037	<LD	0.853	0.301	0.06	0.113	<LD	1.268	0.857	0.062	<LD	<LD	1.14	0.478
PT-JF-04	0.05	0.497	<LD	0.857	0.794	0.137	0.991	<LD	1.386	2.419	0.177	1.249	<LD	1.256	3.333
PT-JF-05	0.035	0.081	<LD	0.681	0.81	0.108	<LD	<LD	1.356	3.112	0.169	<LD	<LD	1.18	1.291
PT-JF-06	<LD	0.27	<LD	0.351	0.975	<LD	0.136	<LD	0.801	1.691	<LD	0.044	<LD	0.764	0.824
PT-JF-07	0.055	0.614	<LD	0.626	1.85	0.087	0.276	<LD	0.764	2.079	0.208	0.413	<LD	1.182	1.668
PT-JF-08	0.691	30	<LD	2.122	48.19	0.295	16.87	0.03	1.719	32.37	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.

L.D. = Límite de detección del método analítico

L.P. = Límite permisible en la Norma Oficial Mexicana 127 SSA-1994

N.C. = No se colectó la muestra

Tabla 7. Comparación de los resultados obtenidos en los jales El Fraile Guerrero, con los límites permisibles en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (modificada en el 2000).

Elemento	Límite permisible	Intervalo de las muestras	Muestras fuera de la Norma Periodo 1	Intervalo de las muestras	Muestras fuera de la Norma Periodo 2	Intervalo de las muestras	Muestras fuera de la Norma Periodo 3
pH	6.5-8.5	3.6 – 7.67	5	5.8 - 7.47	0	6.49 - 7.45	0
Unidades	en mgL ⁻¹	en mgL ⁻¹		en mgL ⁻¹		en mgL ⁻¹	
Cloruros	250	0 – 7.5	0	0 - 8.8	0	5 - 14.2	0
Sulfatos	400	102 – 4700	8	205 - 3800	8	460 - 1964.7	8
Na	200	0 – 34.05	0	0 - 33.4	0	11.13 - 34.47	0
Flúor	1.5	0.4 – 5.6	8	0.6 - 2.5	5	0.8 - 2.3	4
NO₃-N	10	0.1 – 1.5	0	0.5 - 1.7	0	0.3 - 2.4	0
As	0.05	<L.D - 2.455	4	<L.D - 0.681	3	<L.D - 2.11	2
Ba	0.7	0.14 - 0.561	0	0.155 - 0.885	2	0.06 - 0.228	0
Cd	0.005	<L.D - 0.357	5	<L.D - 0.281	5	<L.D - 0.091	4
Fe	0.3	<L.D - 57.64	4	0.03 - 51.71	3	0.026 - 12	2
Mn	0.15	0.037 - 2.122	5	0.013 - 16.87	5	<L.D - 1.249	3
Pb	0.025	<L.D - 0.619	1	<L.D - 0.047	2	<L.D - 0.353	1
Zn	5	0.22- 48.19	1	0.725 - 32.37	1	0.347 - 3.333	0

L.D. fuera del límite de detección del método analítico

<L.D. y 16.87mg L⁻¹. En el tercer muestreo las variaciones fueron entre 0.044 mg L⁻¹ y 1.249 mg L⁻¹ (véase tabla 6).

El Plomo se detectó solamente en la muestra PT JF 01 en los tres muestreos con 0.619 mg L⁻¹, 0.047 mg L⁻¹ y 0.353 mg L⁻¹, respectivamente. De igual manera se detectó en la muestra PT JF 08 solo en el segundo muestreo con 0.03 mg L⁻¹ (véase tabla 6).

Referente al Estroncio, en el primer muestreo osciló entre 0.351 mg L⁻¹ y 2.122 mg L⁻¹ (muestra PT JF 08). De igual manera, en el segundo periodo el intervalo fluctuó entre 0.754 mg L⁻¹ y 1.719 mg L⁻¹. En el tercer muestreo las concentraciones oscilaron entre 0.61 mg L⁻¹ y 1.256 mg L⁻¹ (véase tabla 6).

Por último, tenemos las concentraciones del Zinc, donde se detectó que en los tres periodos de muestreo las concentraciones mínimas fueron de la muestra PT JF 02 con 0.22 mg L⁻¹, 0.725 mg L⁻¹ y 0.347 mg L⁻¹ respectivamente. Las concentraciones más elevadas de los dos primeros muestreos corresponden a la muestra PT JF 08 con 48.19 mg L⁻¹ y 32.37 mg L⁻¹. En el tercer muestreo la mayor concentración se detectó en la muestra PT JF 04, con 3.333 mg L⁻¹.

Comparación de los resultados obtenidos en los lixiviados de los jales El Fraile, Guerrero con la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1-1994).

La problemática de la escasez del agua de consumo humano en las zonas rurales de nuestro país obliga a los habitantes de las comunidades a utilizar el recurso de donde lo puedan obtener, muchas veces sin detenerse a conocer sus características físico químicas. En las comunidades

de El Fraile y Santa Rosa, en el municipio de Taxco, Gro., utilizan los lixiviados que provienen de los jales para realizar muchas de sus actividades domésticas, como lavar la ropa y los trastos de cocina, bañarse, y en ocasiones para cocinar sus alimentos. Es común ver varias mangueras instaladas directamente desde los lixiviados hasta tanques de almacenamiento de diferentes casas de la comunidad, ya que prácticamente todo el año se está originando “agua transparente” en diferentes puntos de los jales. Ante esto, se consideró pertinente realizar una comparación de la calidad de los lixiviados con los límites permisibles en la NOM-127 SSA1-1994 (modificada en el año 2000).

En la Tabla 7 se muestran los elementos que se compararon y el número de muestras que se encuentran fuera de la norma. Se encontró que con respecto al pH, en el primer periodo cinco muestras. En el segundo periodo 3 muestras y en el tercer muestreo solo la muestra PT JF-06, estuvieron fuera del límite permisible de la NOM-127 SSA1-1994.

En lo que corresponde a los cloruros, sodio y nitratos, todas las muestras se encuentran dentro del límite permisible para agua de uso y consumo humano.

Con respecto a los sulfatos en los dos primeros muestreos todas las muestras se encuentran fuera del límite permisible (400 mg L⁻¹) en varias órdenes de magnitud.

El flúor tiene un límite permisible de 1.5 mg L⁻¹ en el primer muestreo todas las muestras de lixiviados estuvieron fuera de la norma, en el segundo muestreo 5 muestras, mientras que en el tercer periodo 4 muestras estuvieron fuera de la Norma Oficial Mexicana.

El límite permisible del arsénico es de 0.05 mg L⁻¹. En las muestras estudiadas se encontró que en el primer perio-

do 4 muestras están por arriba de la Norma Oficial Mexicana. Mientras que en segundo muestreo se detectaron 3 muestras fuera del límite permisible, mientras que en el tercer muestreo solamente 2 muestras.

Por otro lado, con respecto al elemento bario, únicamente se encontraron dos muestras fuera del límite permisible en el segundo muestreo.

Con respecto al Cd, 5 muestras estuvieron fuera del límite permisible (0.005 mg L^{-1}) en los dos primeros muestreos. En el tercer muestreo 4 muestras estuvieron fuera del límite permisible para agua de uso y consumo humano.

El Fe tiene como límite permisible 0.3 mg L^{-1} , referente a este elemento se encontró que 4 lixiviados estuvieron fuera de ese parámetro de comparación, en los dos primeros muestreos, mientras que en el tercero solamente la muestra PT JF 01, se encontró fuera del límite permisible para agua de uso y consumo humano.

El Mn tiene un límite permisible es 0.15 mg L^{-1} , se encontró que 5 muestras están fuera de ese parámetro en el primero y segundo muestreo. En el tercero, sólo 3 muestras estuvieron fuera de la NOM 127 SSA-1.

El plomo también se encuentra regulado por la norma NOM 127 SSA1-1994, con 0.025 mg L^{-1} , referente a este elemento la muestra PT JF01 se encontró por arriba del límite permisible en los tres muestreos y la muestra PT JF08 solo en el segundo muestreo.

Por último, el Zinc, tiene como límite permisible de 5.0 mg L^{-1} , aunque este elemento está presente en todas las muestras, solamente la muestra PT JF08 en los dos primeros muestreos se encontró fuera del límite permisible para agua de uso y consumo humano.

Conclusiones

Se observó a los lixiviados disminuyendo conforme se acentuaba el periodo de mayor sequía. La temperatura de las muestras concuerda con la temperatura promedio anual para la zona, lo que es indicativo de agua de que son aguas someras de reciente infiltración.

El pH de los lixiviados osciló entre ácidos y neutros. El Eh varía entre ambientes oxidantes y reductores. La conductividad de las muestras fue elevada en comparación con aguas someras sin contaminación.

Respecto a los iones mayores, los contenidos de SO_4^{2-} rebasaron el límite permisible por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 en todas las muestras. De los iones menores sobresalen los contenidos de F con valores cercanos o por encima del límite permisible en la Norma Oficial Mexicana. En estos dos elementos las concentraciones se incrementan al final el periodo de lluvias.

La muestra PT-JF-08 pertenece a las aguas Sulfatadas-Magnésicas y el resto de las muestras a las aguas Sulfatadas-Cálcicas.

Con respecto a los elementos potencialmente tóxicos se encontró que las concentraciones son variables y globalmente se incrementan conforme se acentúa el periodo de sequía.

Discusión

El depósito de jales El Fraile proviene de la explotación de yacimientos hidrotermales de sulfuros de plomo (galena) y zinc (esfalerita) asociados con sulfuros de hierro (pirita), que han estado expuestos al intemperismo por

muchos años y que han desarrollado una dura costra de oxidación de aproximadamente 2 a 5 cm, compuesta de óxidos de color café amarillento y precipitados de color blanco lechoso o amarillo (sulfatos). Estos depósitos originan lixividos en la mayor parte del año, que son utilizados por los habitantes de la comunidad de Santa Rosa como agua de consumo humano.

Los análisis realizados en 3 periodos de muestreo expresan que la temperatura se incrementa de manera general para el tercer periodo de muestreo, lo que concuerda con la temperatura promedio del área de estudio y evidencia que las muestras son aguas someras de reciente infiltración.

Los valores de Eh van desde ambientes reductores en 2 muestras de lixiviados que corresponden a entrada de las trampas, hasta ambientes oxidantes registrados en las demás muestras. Estos ambientes son característicos en lixividos de jales mineros.

Los valores de conductividad son relativamente elevados, lo que evidencia los contenidos de sólidos disueltos, principalmente sulfatos en todas las muestras.

Los valores elevados de sulfatos se deben a que en el periodo de lluvias empiezan a formarse minerales derivados de los procesos de oxidación de la pirita principalmente, los cuales se van disolviéndose a medida que se acentúa el periodo de lluvias.

Los elementos potencialmente tóxicos se incrementan cuando se retiran las lluvias y escasea el lixivido, aumentando las concentraciones de estos elementos.

Referencias

- Castro-De Dios, M. (2002). *Caracterización Químico-Mineralógica de los sedimentos de los Ríos de Taxco y Cacalotenango, en la Región Minera de Taxco, Gro., Como una guía para evaluar los mecanismos de Dispersión de Desechos Mineros*. Tesis de licenciatura. Escuela Regional Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Guerrero, Taxco el Viejo, Gro. 74 pp.
- Díaz Villaseñor, E. y Talavera Mendoza, O. (2006). Transferencia de metales entre suelo y plantas de maíz (*Zea mays* L.) sembradas en una parcela afectada por jales mineros, en la región de Taxco, Guerrero. *V Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra. Puebla, Puebla*. 20.
- Flores-Mundo, N. (2002). *Caracterización Químico-Mineralógica de los jales el Fraile, Taxco de Alarcón Guerrero*. Tesis de licenciatura. Unidad Académica de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Guerrero. Taxco el Viejo, Gro.
- Fries, C. (1960). *Geología del Estado de Morelos y parte adyacentes de México y Guerrero, Región Central Meridional de México, boletín 60*, México D.F., 236 pp.
- Galarza-Brito, Z. (2009). *Especiación química de Elementos Potencialmente Tóxicos en los Jales El Fraile en Santa Rosa, Municipio de Taxco, Guerrero*. Tesis de Licenciatura. Unidad Académica de Ciencias Agropecuarias y ambientales. Universidad Autónoma de Guerrero. Iguala de la Independencia Gro.
- Jambor, J. L., y Owens, D. R. (1993). Mineralogy of the tailing impoundment at the former edge of Sudbury Structure, Ontario, Canada, Canada Centre for Mineral and Energy Technology [CANMET] Div. Rep. MSL93-4 (CF). Department of Emergency and Mine Research.
- Martin-Romero, F. (2004). *Procesos geoquímicos que con-*

- trolan la movilidad de metales y metaloides en jales de sulfuros metálicos "El Fraile", Taxco, Guerrero.* Tesis de doctorado. Universidad Autónoma de México.
- Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. (1994). *Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que se debe someterse el agua para su potabilización*". Secretaría de Salud. Obtenido de: www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/127ssa14.html
- Ritcey, G. M. (1989). *Mining management problems and solutions in the minion industry*. Edit. Elsevier. 970 pp.
- Talavera, Mendoza, O., Yta, M., Moreno Tovar, R., Dótor Almazan, A., Flores Mundo, N. Duarte Gutiérrez, C. (2005), Mineralogy and geochemistry of sulfide-bearing tailings from silver mines in Taxco, México are to evaluate their potential environmental impact. *Geofísica Internacional*. 1, 49-64.