

# Generación de escenario de potencial de contaminación en el acuífero Silao-Romita, en Guanajuato

***Generation of scene of potential contamination in the aquifer Silao-Romita, in the state of Guanajuato***

Saúl Edén Córdova De la Cruz y José de Jesús Esparza Claudio

Recibido: 8 de enero de 2016

Aceptado: 5 de abril de 2016



View of Yuriria lagoon.../DEA / ARCHIVO J. LANGE / Colaborador/Getty Images

Esta investigación trata de presentar algunos escenarios potenciales de contaminación del acuífero Silao-Romita derivados de la actividad minera de la región donde, a través de los resultados del muestreo de varios depósitos y presas de *jales*, se identificó y cuantificó la presencia y concentración de elementos metálicos solubles en agua que son generados por este tipo de residuos y que muestran potencial de generación de drenaje ácido; lo anterior, representa una fuente potencial de contaminación hacia la zona de alta vulnerabilidad del acuífero. El trabajo consistió en muestrear y caracterizar cinco depósitos de residuos mineros provenientes de un total de 31 presas de *jales*. Asimismo, se determinó la zona más vulnerable del acuífero mediante los métodos DRASTIC y AVI. Los resultados sugieren la evaluación posterior mediante modelos matemáticos para determinar las rutas más probables de transporte de los elementos que son liberados por estas fuentes.

**Palabras clave:** *jales*; metales; vulnerabilidad; drenaje ácido.

## Introducción

En México existe una gran variedad de tipos de yacimientos minerales. Entre los que contienen sulfuros destacan las vetas de metales base, las de reemplazamiento en carbonatos de alta temperatura, incluyendo *skarns* (depósito formado en un ambiente de metamorfismo de contacto con roca de caja de carbonatos como calizas o margas), los vulcanogénicos y los pórfidos (roca ígnea plutónica) de cobre (González-Reyna, 1956). El procesamiento de minerales provenientes de cada tipo de yacimiento resultará en una composición mineralógica distinta de los *jales*,<sup>1</sup> lo cual influye directamente en la tasa de liberación o biodisponibilidad de los elementos en potencia tóxicos hacia el medio ambiente. Además, los residuos se ubican en distintos sitios del país con climas diversos. Esta situación plantea, primero, la necesidad de desarrollar metodologías que permitan evaluar el efecto real de los *jales* hacia el medio

<sup>1</sup> Residuos sólidos generados en las operaciones primarias de separación y concentración de minerales.

This study tries to present some potential scenarios of contamination of the aquifer Silao-Romita derived from mining activity in the region where through the results of sampling of several deposits and tailings dams, were identified and quantified the presence and concentration of metallic elements soluble in water which are generated by this type of waste and showing potential acid drainage generation; the above, represents a potential source of contamination to the high vulnerability of the aquifer area. The work consisted in sample and characterize five deposits of a total of 31 dams of tailings mining waste. Likewise, it was determined the most vulnerable area of the aquifer through the DRASTIC and AVI methods. The results suggest further evaluation by mathematical models to determine the most likely routes of transportation of items that are released by these sources.

**Key words:** pull; metals; vulnerability; acid drainage.

ambiente nacional mediante el uso de métodos de modelado accesibles en México (Clark & Salas, 2000).

La industria minera en México ha generado, por décadas, una gran cantidad de desechos y un número importante de sitios contaminados a lo largo de todo el país. Su producción se concentra en 12 entidades: Chihuahua, Michoacán de Ocampo, Zacatecas, Durango, Sonora, Coahuila de Zaragoza, Guanajuato, San Luis Potosí, Hidalgo, Sinaloa, Colima y Jalisco (Sepúlveda & Trejo, 2002).

En el caso específico de Guanajuato, Gto., entre 1548 y 1554 fue cuando, probablemente, se produjo el descubrimiento incidental de abundantes yacimientos de plata, sobre todo en las minas de San Bernabé y Rayas, lo que provocó el nacimiento del centro poblacional. A partir de entonces, el tránsito y establecimiento de buscadores de mineral se hizo constante (VILLEGAS, 2014).

En la actualidad, la minería en la entidad se encuentra en una etapa de recuperación y ocupa el

octavo lugar como productor nacional de oro y séptimo en plata (INEGI, 2015).

En estudios realizados por la Universidad de Guanajuato (Ramos Arroyo-Siebe Grabach, 2006) se menciona que en el municipio de Guanajuato se encontraron 31 depósitos de *jales* que contienen 75 millones de toneladas de residuos, los cuales ocupan un área de 81.9 hectáreas (ha); de ellos, 11 provienen del proceso de cianuración (1905-1946), de los cuales cuatro están muy erosionados; el resto (20) son presas de *jales* de flotación *bulk*,<sup>2</sup> cuyos depósitos presentan una clasificación textural de la siguiente forma: las áreas próximas a la cortina de retención tienen textura arenosa, baja capacidad de retención de humedad y están muy aireadas, mientras que las zonas distantes a la cortina tienen textura arcillosa, baja permeabilidad y baja capacidad de aireación, lo que permite la acumulación de agua en tiempos de lluvias y favorece condiciones reductoras.

Por lo anterior, uno de los principales problemas ambientales derivados del manejo y disposición de los *jales* mineros es el drenaje ácido (DA), el cual es producto de la oxidación de los minerales sulfurosos que contienen. El desarrollo de DA en los *jales* es, por lo general, muy limitado durante la operación (*jales* activos) y se desarrolla lentamente a lo largo del tiempo después de que ha cesado la acumulación en el depósito (*jales* inactivos). La formación de DA no afecta todos los depósitos y depende del contenido de minerales sulfurosos capaces de producir ácidos y carbonatos, arcillas e hidróxidos capaces de neutralizar los ácidos generados, así como de las condiciones geográficas de los sitios donde están ubicados. La peligrosidad de los elementos potencialmente tóxicos (EPT) asociados a los *jales* varía de forma amplia, aún para el mismo elemento, dependiendo de su

2 Método de beneficio dentro de la actividad minera, el cual consiste en la técnica de concentración de minerales en húmedo en la que se aprovechan las propiedades físico-químicas superficiales de las partículas para efectuar la selección. En otras palabras, se trata de un proceso de separación de materias de distinto origen que se efectúa desde sus pulpas acuosas por medio de burbujas de gas y a base de sus propiedades hidrofílicas e hidrofóbicas. Según la definición, la flotación contempla la presencia de tres fases: sólida, líquida y gaseosa. La primera está representada por las materias a separar, la segunda es el agua y la última es el aire.

movilidad. La fracción *soluble* (iones y coloides) es la que representa mayor peligro, ya que podría ser movilizada y contaminar los cuerpos de agua (superficiales y subterráneos); también se le considera como la más peligrosa debido a que puede estar fitodisponible o biodisponible (Lacalle Pareja, Fernández del Pino Navarro, González García & Romero Limón, 2000).

Existen reportes de accidentes en presas de *jales* (CNA, 2002); los más importantes son los ocasionados por derrames de residuos mineros en cauces federales en el municipio de Guanajuato para las siguientes zonas:

- Mina Las Torres, Guanajuato, Gto. (1988). Ruptura de alcantarilla central de la presa Las Coronelas 1 por errores de cálculo en el diseño. Derrame de más de mil toneladas de *jal*, con un impacto sobre el arroyo Los Cedros (hasta 15 km aguas abajo).
- Mina Las Torres, Guanajuato, Gto. (1993). Derrame de 250 toneladas de *jal* por chino<sup>3</sup> mal sellado. Impacto sobre 5 km del arroyo Los Cedros.
- Santa Fe, Gto. (1996). Derrame por rotura de contrabordo en el vaso.
- Mina Bolañitos, Guanajuato, Gto. (2000). Entrada de *jal* por alcantarilla central y desbordamiento por presa de emergencia debido a la basura acumulada en la misma por falta de mantenimiento; volumen aproximado de 200 toneladas.

En términos de transporte de EPT al acuífero, destacan estudios que demuestran que este escenario sobre la migración de contaminantes que han sido arrasados a través de los escurrimientos superficiales ya es una realidad, tal es el caso del transporte y destino final del fósforo total detectado tanto en el sistema utilizado como alternativa para abastecimiento de agua potable a la ciudad de Guanajuato (conocido como pozos de Puenteillas) como en la presa La Purísima, en el municipio de Silao. Debido

3 Se desconoce el término dentro de los conceptos de construcción, por lo que se cita tal como fue reportado por la Comisión Nacional del Agua (CNA).

a la cercanía de algunos de estos pozos a la presa y al hecho de que ésta representa una recarga del acuífero, el transporte de fosfatos (originados por las descargas de aguas residuales de la zona urbana y de la actividad agrícola que llegan a la presa y ésta a su vez hacia el acuífero), es muy activo. La presencia de 1.6 mg/l de fosfatos en el agua de los pozos y la simulación del transporte de estos compuestos en el agua subterránea apoya la idea de dicha migración (Cano-Rodríguez, Gómez-Vallejo, Aguilera-Alvarado, de la Rosa & Gardea-Torresdey, 2004).

En términos de vulnerabilidad del acuífero Silao-Romita, se han realizado varios estudios utilizando diferentes métodos, entre los que destacan el DRASTIC, GOD y el AVI, donde se muestra que en la parte noroeste, cercana a la presa de La Purísima, se localiza una zona de vulnerabilidad importante, pero de dimensiones reducidas, misma que tiene vocación agrícola, la cual es influenciada en la parte media por el río Silao, situación que requiere especial atención por el uso de las aguas residuales para riego agrícola que representa una fuente continua de contaminación tanto de descargas urbanas como de otras actividades (mineras e industriales) de la región (Figuroa, Rodríguez, Sánchez & Báez, 2006).

## Objetivo

Evaluar el nivel o grado de riesgo del acuífero Silao-Romita ante la presencia de elementos metálicos solubles en agua de lluvia y potencialmente tóxicos provenientes de *jales* mineros del distrito de Guanajuato a través de la generación de escenarios de liberación de contaminantes hacia la zona de alta vulnerabilidad de la presa La Purísima como principal fuente de recarga del acuífero.

## Justificación

Los proyectos mineros son diferentes a la planeación de otras actividades industriales; estas últimas se pueden establecer en el mejor lugar posible

—desde el punto de vista ambiental—, sin embargo, una mina se ubica donde se localiza la veta del mineral a explotar y esto puede incluir comunidades, además de generar degradación ambiental por la extracción de suelo o la modificación de su constitución.

En el distrito minero de Guanajuato, las minas han causado un gran impacto ambiental, ya que no consideraron diversos parámetros, como: el paisaje, la caracterización de suelos, qué tipo de flora y fauna habitan en el lugar, si existen aguas superficiales y subterráneas, qué usos se le da al suelo y la cultura de las comunidades que residen en la zona.

En la actualidad, no se cuenta con información que determine o indique un posible escenario de avance, mecanismos de liberación y grado de afectación de la contaminación en el subsuelo y el acuífero Silao-Romita proveniente de los *jales* mineros debido, en este caso, al drenaje ácido y metales pesados o EPT que desde hace más de 400 años se han estado depositando en ríos, cañadas, barrancas y depósitos de *jales*.

Derivado de lo anterior, se justifica el plantear un estudio de evaluación del impacto de los *jales* mineros en el acuífero Silao-Romita, considerando a la presa La Purísima como posible fuente de captación de EPT de origen minero, así como el analizar algunas de las 20 presas y 11 depósitos de *jales* sin manejo adecuado del distrito minero de Guanajuato. Por consiguiente, el conocer los mecanismos de liberación de contaminantes de este tipo de pasivos permitirá evaluar posibles escenarios de riesgo donde se puedan prever las rutas de transporte y afectaciones sobre el agua subterránea que abastece al municipio de Guanajuato.

## Metodología

### a) Zona de estudio

Se localiza en la región III-Centro-Oeste del estado de Guanajuato, limita al Norte con el munic-



pio de San Felipe, al Este con Dolores Hidalgo, al Sur con Salamanca e Irapuato y al Oeste con Silao y León (101°02'00"-101°26'30" long. E y 20°48'42"-21°13'03" lat. N).

El municipio tiene como principal fuente de abastecimiento de agua el acuífero Silao-Romita, el cual está catalogado dentro del *Atlas digital del agua. México 2012* (CNA, 2012) como sobreexplotado y, de acuerdo con la delimitación propuesta por la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (CEAG, 2015), cubre parte importante de los municipios de Silao, Romita, Guanajuato e Irapuato.

## b) Selección de presas o depósitos de *jales* para el muestreo

Para identificar y seleccionar los depósitos de residuos mineros (ver imagen 1), se llevó a cabo, durante la primera etapa del estudio, una revisión bibliográfica, la interpretación de fotografía aérea (ver imagen 2) y diversos recorridos de campo, a través de los cuales se detectaron 20 presas y 11 depósitos de *jales* que se encuentran en la zona alta de la cabecera municipal (la mayoría) y en el área urbana. Con base en lo anterior, y al acceso a los sitios, se escogieron cinco presas de *jales* (ver cuadro 1).

Cuadro 1

### Depósitos para muestreo de *jales* mineros

Núm.	Depósito <sup>a</sup>	Estado actual de operación	Superficie	Altura de cortina	Método de beneficio	Coordenadas UTM	
						X	Y
1	Presa 1	En operación	22.5 ha	40 m	Flotación <i>bulk</i>	269 460	2 323 903
2	Presa 2	En abandono <sup>b</sup>	10.7 ha	10 m	Flotación <i>bulk</i>	269 585	2 324 362
3	Presa 3	En operación	3.6 ha	20 a 30 m	Flotación <i>bulk</i>	258 040	2 331 946
4	Presa 4	En operación	5.5 ha	20 y 30 m	Flotación <i>bulk</i>	266 547	2 327 643
5	Presa 5	En abandono <sup>c</sup>	2.17 ha	5 m	Sin información	264 426	2 324 787

<sup>a</sup> Se omite el nombre de las compañías mineras por motivos de confidencialidad.

<sup>b</sup> Este sitio tiene 20 años de abandono.

<sup>c</sup> Se estima un tiempo de abandono de, al menos, 50 años (Ramos-Arroyo & Siebe-Grabach, 2006); se encuentra localizada en la zona urbana del municipio, entre la carretera panorámica de Pozuelos y uno de los arroyos que es afluente del río Guanajuato que alimenta la presa La Purísima.

Imagen 1

### Depósito de residuos mineros



Imagen 2

### Delimitación de la presa de *jales* 5



## Toma de muestras

Se siguieron dos procedimientos de muestreo en la presa dependiendo de los permisos otorgados por las compañías mineras: 1) directamente de la descarga; 2) en la presa. Los procedimientos para cada uno se describen a continuación:

### *Muestreo directo de la descarga líquida y de sólidos de la presa de jales 1<sup>4</sup> (en operación)*

La muestra de agua se tomó del tubo de descarga (ver imagen 3); se llenó un garrafón de plástico de 20 litros (l); ésta se mezcló de forma vigorosa para obtener muestras de 1 l que se colocaron en frascos individuales para obtener los parámetros de campo.

De los sólidos, se obtuvo una muestra compuesta, para lo cual se procedió a determinar cinco puntos de muestreo alrededor de la misma; lo que se obtuvo en cada una se homogeneizó en campo por el método de cuarteo con el fin de obtener

<sup>4</sup> Derivado de las dimensiones de la presa de *jales* se identificaron dos zonas: una donde se ubican los *jales* más antiguos (intemperizados) y otra, donde se descargan los recientes (líquidos); por lo anterior, se decidió tomar muestras de ambas, para compararlas con base en la NOM-141-SEMARNAT-2003 y NOM-052-SEMARNAT-2005, para determinar su potencial de generación de drenaje ácido y contenido de metales pesados, respectivamente.

## Imagen 4

### Toma de muestra en la parte oriente de la presa de *jales* 2



## Imagen 3

### Descarga en la presa de *jales* 1



2 kilogramos (kg) de muestra final para los análisis químicos y fisicoquímicos.

### *Muestreo de sólidos de la presa de jales 2 (en abandono)*

Se recolectaron tres muestras en diferentes partes de la presa y a 1 metro (m) de profundidad (ver imagen 4); el método de homogeneización fue el



Imagen 5

### Toma de muestra de la parte central del vaso de la presa



de cuarteo y se recuperaron 2 kg para los análisis correspondientes. Cabe mencionar que este sitio está cubierto en la parte superior con una capa de tepetate.

### Muestreo en la presa de jales 3

Se llevó a cabo bajo el mismo criterio: se determinaron seis puntos para obtener una muestra representativa de los residuos, esto debido a que en algunos sitios, al momento de hacer la excavación,

Imagen 6

### Diferentes capas de *jal* en la presa



se observó que el *jal* presentaba varias capas debido a que el material encajonante o mena de los minerales es distinta (ver imágenes 5 y 6).

### Muestreo en la presa de jales 4

Como no se obtuvo acceso a la presa, sólo se tomó la muestra de forma directa de la planta de beneficio. Ante esta circunstancia, se procedió a llenar un garrafón de 20 l, el cual se llevó al laboratorio para los análisis físico-químicos.

Imagen 7

### Toma de muestra



Imagen 8

### Coloración del *jal*



## Muestreo en la presa de jales 5

Se colectaron cuatro muestras en distintos puntos de la presa y a diferentes profundidades para, después, realizar el método del cuarteo para la homogeneización y obtención de 2 kg de residuo (ver imagen 7). Durante el muestreo se observó que el residuo presentaba una coloración naranja a rojiza, lo cual indica la presencia de fierro (Fe) proveniente de la pirita, misma que ha sido reportada (Ramos Arroyo-Siebe Grabach, 2006) y, a su vez, es un indicador potencial de generación de drenaje ácido o de liberación de EPT (ver imagen 8). Por lo anterior, se decidió tomar una muestra del agua del arroyo que cruza el depósito con el fin de verificar si hay presencia de ácido o algún elemento potencialmente tóxico.

El cuadro 2 resume el tipo de muestra tomada para cada una de las presas.

Cuadro 2

### Tipo de muestras

Núm.	Depósito <sup>a</sup>	Estatus	Toma de muestra		
			Presa	Descarga	Otro
1	Presa 1	En operación	x	x	
2	Presa 2	En abandono	x		
3	Presa 3	En operación	x		
4	Presa 4	En operación	x		
5	Presa 5	En abandono	x		x <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Se omite el nombre de la compañía minera por motivos de confidencialidad.

### Análisis de muestras

La metodología utilizada es la mencionada en la NOM-141-SEMARNAT-2003 para la caracterización de *jales* mineros:

- Prueba de extracción de constituyentes tóxicos, la cual tiene el propósito de caracterizar

la peligrosidad de los *jales* por su toxicidad mediante la extracción de metales y metaloides en *jales* con agua en equilibrio con CO<sub>2</sub>; del extracto obtenido se cuantifican los metales y metaloides regulados en la NOM-052-SEMARNAT-1993 a través del método *Espectroscopía de emisión atómica inductivamente acoplada a plasma*.

- Evaluación del potencial de generación de ácido prueba estática, que tiene el propósito de caracterizar la peligrosidad de los *jales* por su reactividad. Consiste en definir el balance entre los minerales generadores en potencia de ácido y aquéllos potencialmente consumidores para determinar la capacidad neutralizante neta de los constituyentes del *jal*, bajo la base de la *Prueba de balance ácido-base para jales que contienen sulfuros de metales*.

Otros análisis realizados fueron los siguientes: pH, conductividad eléctrica y análisis mineralógico por espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDX, por sus siglas en inglés: *Energy Dispersive X Ray*).

## c) Análisis de vulnerabilidad

### Vulnerabilidad intrínseca

La zonificación relativa de vulnerabilidad se obtuvo con apoyo de los estudios realizados por la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (Universidad Iberoamericana de León, 1999) y otros proyectos realizados en el acuífero de interés (Silao-Romita). En cuanto a los métodos utilizados en la zona se encuentran el DRASTIC y el AVI:

- DRASTIC (Aller & Bennet, 1987). La construcción del índice se basó en la determinación de siete parámetros hidrogeológicos a los que se les dieron dos valoraciones para su ponderación: un peso relativo (5 a 1) según fuera más o menos importante en su contribución a la contaminación y una escala (1 a 10) según el menor o mayor impacto sobre la vulnerabilidad.



El índice de vulnerabilidad se obtiene como el resultado de sumar los productos de los diferentes parámetros por su índice de ponderación:

$$\text{índice de vulnerabilidad} = DrDw + RrRw + ArAw + SrSw + TrTw + IrIw + CrCw$$

donde  $r$  es el valor obtenido para cada parámetro y  $w$ , el índice de ponderación.

- AVI. Es uno de los métodos más sencillos, fáciles y rápidos para cuantificar la vulnerabilidad, tan sólo utiliza la conductividad hidráulica y el espesor de las capas de diferente material que se encuentran sobre el nivel del agua (Báez Vázquez, 2001).

Es un índice para cuantificar la vulnerabilidad de un acuífero por medio de la resistencia hidráulica ( $C$ ) al flujo vertical del agua al pasar por los diferentes materiales sobre el acuífero (Van Stempvoort, Ewert & Wassenaar, 1992).

$$C = . [bi / Ki] \text{ para las capas } 1,2,3,\dots,i$$

donde:

$bi$  = espesor de cada capa sobre el acuífero.

$Ki$  = conductividad hidráulica de cada capa.

$C$  = resistencia hidráulica total (inverso de la conductividad hidráulica; tiene dimensiones de tiempo) indica el tiempo aproximado de flujo por unidad de gradiente de carga, que atraviesa el agua hacia abajo al pasar por varias capas de sedimentos, por encima del acuífero. A mayor  $C$ , menor vulnerabilidad.

## Resultados

### a) Análisis de muestras

#### pH en presas de jales

El cuadro 3 muestra los resultados de este análisis, donde destaca que el pH de la presa de *jales* 5 fue ligeramente ácido, el cual fue confirmado con la prueba de drenaje ácido, como lo marca la norma.

Cuadro 3

### Resultados de pH de residuos mineros

Muestra	Sitio	pH
1	Muestra líquida presa 1 (en operación)	7.32
2	Muestra compuesta presa 1 (en operación)	7.73
3	Muestra compuesta presa 2 (en abandono)	7.86
4	Muestra compuesta presa 3 (en operación)	8.32
5	Muestra líquida presa de <i>jales</i> 4 (en operación)	7.62
6	Muestra compuesta presa 5 (en abandono)	4.50

### Pruebas químicas en descargas

Los resultados de los análisis químicos de las descargas de las presas 1, 2 y 4 mostraron que los residuos depositados en ellas no presentan acidez respecto a lo indicado por la NOM-141-SEMARNAT-2003, es decir, el potencial de neutralización (PN)/potencial de acidez (PA) > 1.2. Los *jales* no son potenciales generadores de drenaje ácido; con respecto al pH, éste es casi neutro, la conductividad electrolítica baja y alto contenido de sólidos suspendidos totales, lo cual puede ser interpretado como normal o común dado el método de beneficio de estas minas (ver cuadro 4).

### b) Concentración de metales

Los resultados del cuadro 5 fueron comparados con los límites máximos permisibles de la NOM-52-SEMARNAT-2005 con el fin de poder determinar si los *jales* mineros pueden ser considerados como residuos peligrosos.

Como se observa en el cuadro 5, al comparar la concentración de metales entre los sitios de estudio se encontró que están dentro de los límites permisibles marcados por la NOM-052-SEMARNAT-2005, por lo que, bajo sus criterios, se consideran como no peligrosos. Las muestras de *jales* en general no mostraron peligrosidad por concentración de metales; caso contrario se observa en la descarga en la presa 1, donde se rebasaron los límites en concentración de plomo, cromo y arsénico, lo cual fue importante analizar en la *Prueba balance-ácido-base* (ABA, por sus siglas en inglés).

Cuadro 4

## Resultados de parámetros fisicoquímicos de la descarga

Prueba	Método empleado	Presa 1		Presa 4	
		Resultados	Unidades	Resultados	Unidades
pH	NMX-AA-008	7.32	---	7.62	---
Conductividad electrolítica	MNX-AA-093	205	mS/m	340	mS/M
Sólidos disueltos totales	NMX-AA-034	16 900	mg/l	23 968	mg/l
Sólidos suspendidos	MNX-AA-034	210 300	mg/l	94 000	mg/l
Cianuros	MNX-AA-058	< 0.0075	mg/l	< 0.0075	mg/l
Demanda química de oxígeno (DQO)	NMX-AA-030	3 214	mg/l	1 894	mg/l

Cuadro 5

## Resultados de concentración de metales de la descarga en mg/l

Prueba	Método empleado	Presa 1	Presa 1 (en oper.)	Presa 2 (fuera de oper.)	Presa 3 (en oper.)	Presa 4 (en oper.)	Presa 5 (en abandono)	Límites máx. permisibles
Plata	EPA 6010B <sup>a</sup>	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.0523	< 0.052	5.0
Aluminio		4 716	0.82	2.44	< 0.11	830.25	0.22	
Arsénico		8.68	< 0.09	< 0.09	< 0.09	2.47	< 0.024	
Bario		12.99	0.16	< 0.16	< 0.16	2.02	0.13	100.0
Berilio		0.36	< 0.003	< 0.003	< 0.003	0.61	< 0.003	
Calcio		4 072	19.07	10.65	14.3	15.60	6.38	
Cadmio		0.74	< 0.004	< 0.004	< 0.004	0.28	< 0.002	1.0
Cobalto		2.02	0.06	< 0.004	< 0.004	0.44	< 0.0019	
Cromo		11.79	0.1	0.001	< 0.01	4.93	0.01	5.0
Cobre		5.99	0.29	0.29	0.29	1.77	0.03	
Fierro		3 754	0.57	1.80	0.44	1 112.0	0.28	
Potasio		12 464	35.22	35.22	11.69	133.14	< 0.22	
Magnesio		1 141.2	2.29	2.29	2.01	849.38	0.44	
Manganeso		127.82	0.42	0.42	0.39	116.39	< 0.0012	
Molibdeno		0.45	< 0.004	< 0.004	< 0.004	0.06	0.07	
Sodio		253.2	2.56	2.56	1.90	25.48	0.86	
Níquel		3.23	< 0.02	< 0.02	< 0.02	1.28	< 0.008	
Plomo		5.36	< 0.16	< 0.16	< 0.01	1.14	0.19	5.0
Antimonio		< 1.96	< 20	< 20	0.41	0.24	< 0.07	
Selenio		< 1.44	< 0.14	< 0.14	< 0.14	0.16	0.01	1.0
Talio	< 0.08	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.0042	0.01		
Vanadio	< 0.03	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.0017	-		
Zinc	12.28	0.13	0.13	< 0.13	3.13			
Estaño	3.39							
Mercurio	0.06	0.001	0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.008	0.2	

<sup>a</sup> EPA 6010B 1996. Determinación de As, Ba, Cd, Cr, Ag, Pb y Se, por Espectrometría de emisión con plasma inductivamente acoplado.

### c) Pruebas ácido-base

El análisis de las muestras se realizó con base en la norma NOM-141-SEMARNAT-2003 para la determinación del PN; se hicieron reaccionar los *jales* con ácido clorhídrico (HCl) a ebullición, lo cual sobreestima la capacidad de neutralización de éstos bajo condiciones ambientales, ya que el HCl caliente logra disolver carbonatos poco reactivos, como el de hierro ( $\text{FeCO}_3$ ), que en condiciones ambientales no participan en el proceso de neutralización. Los resultados mostraron que las presas 3 y 2 (ésta sin operación) son las de mayor potencial de neutralización de 98.74 y 98.19 kg  $\text{CaCO}_3/\text{t}$ , respectivamente; caso contrario se observa en la muestra de la presa 5, la cual mostró un valor de 6.7 kg  $\text{CaCO}_3/\text{t}$ .

Para calcular el PA, se utilizó la prueba ABA, la cual sobreestima la capacidad de generar ácido de los *jales*, pues no todos los compuestos que contienen azufre pueden formar ácido sulfúrico. Los resultados indican que las muestras de las descargas de la mina hacia la presa 4 y la de la presa 1 tienen mayor potencial de generación de acidez con valores de 13.98 y 13.59 kg  $\text{CaCO}_3/\text{t}$ , respectivamente; por el contrario, la presa 3 apenas alcanzó un valor de 0.016 kg  $\text{CaCO}_3/\text{t}$ , lo cual se puede interpretar, de acuerdo con el criterio de la norma, que los *jales* mineros presentes en esta investigación no son generadores de drenaje ácido, como se muestra en el cuadro 6.

Cuadro 6

#### Resultados de prueba ABA para sitios muestreados en el distrito minero de Guanajuato

Muestra	Potencial de neutralización (PN) kg $\text{CaCO}_3/\text{t}$	Potencial de acidez (PA) kg $\text{CaCO}_3/\text{t}$	Drenaje ácido PN/PA
Presa 1 (descarga)	83.19	13.59	6.12
Presa 1 (en operación)	94.23	2.4	39.26
Presa 2 (en abandono)	98.19	1.53	64
Presa 3 (en operación)	98.74	0.016	6 171
Presa 4 (en operación)	93.91	13.98	6.71
Presa 5 (en abandono)	6.7	0.5	13.4

Un punto que llama la atención en esta fase del trabajo es el pH de 4.5 en la presa 5, ya que, según la norma, no ocurriría un potencial de generación de drenaje ácido. Esto condujo a que se planteara este sitio como posible fuente de contaminación, por lo cual es necesario estimar la concentración total de metales, así como determinar las especies minerales presentes, con el fin de valorar la mineralogía y plantear un escenario de posible riesgo para el acuífero de Silao-Romita.

### d) Identificación mineralógica por difracción de rayos X

En la muestra de la presa 5 de Pozuelos (dado que los sulfuros<sup>5</sup> pueden ser liberados bajo procesos de oxidación y generar drenaje ácido o liberar EPT al ambiente), la determinación de difracción de rayos X se aplicó en el material tomado a distintas profundidades.

Los resultados reportados en las gráficas 1 y 2 muestran que la parte superficial de la presa 5 (imagen 9) está compuesta por cuarzo ( $\text{Qz-SiO}_2$ ), cuprita ( $\text{Cup-Cu}_2\text{O}$ ) y óxido de zinc ( $\text{Oz-ZnO}$ ), lo que descarta la presencia de sulfuros, lo cual resulta lógico debido al *intemperismo* al que están expuestos, provocando su oxidación y arrastre por la lluvia. Al comparar la muestra compuesta tomada a 1 m de profundidad (imagen 10), ésta presenta un contenido mineralógico de cuarzo (Qz), pirita ( $\text{FeS}_2$ ), arseniato de plomo-AP ( $\text{PbAs}_2\text{O}_6$ ) y calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), lo que indica la presencia de sulfuros de hierro en la pirita, situación que se esperaba por el tipo de yacimientos del distrito minero de Guanajuato del que provienen estos residuos.

### e) Especiación química

Una vez identificada la presencia de sulfuros, se muestreó de nuevo el sitio de interés para determi-

<sup>5</sup> De acuerdo con las características del distrito minero de Guanajuato y su origen epitermal, se supuso la presencia de metales en forma de sulfuros, además del tiempo de abandono (más de 50 años) y a los métodos de beneficio cuando éstos no eran muy eficientes.



Imagen 9

### Presas de *jales* 5



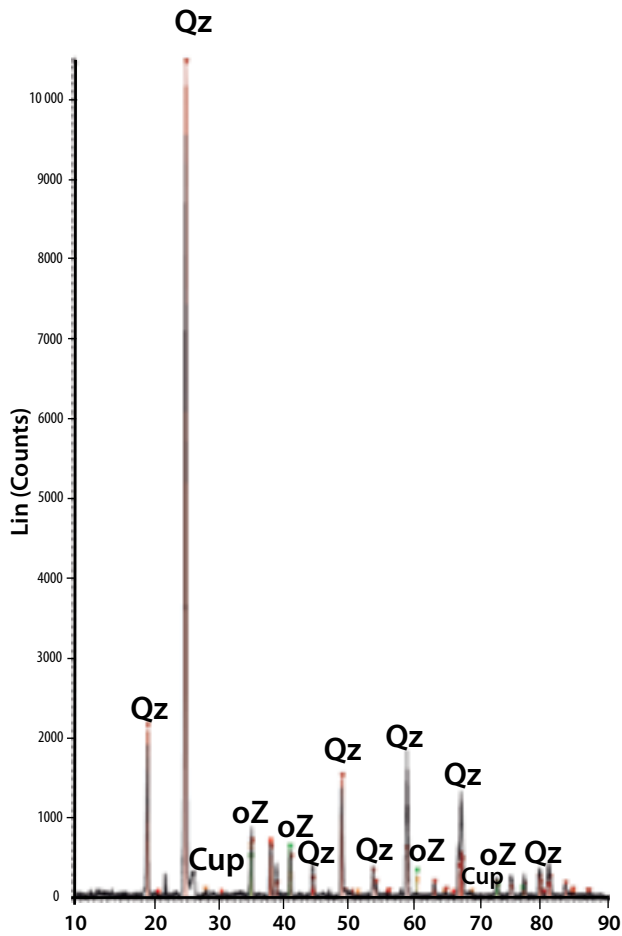
Imagen 10

### Perforación para toma de muestra a 1 m de profundidad



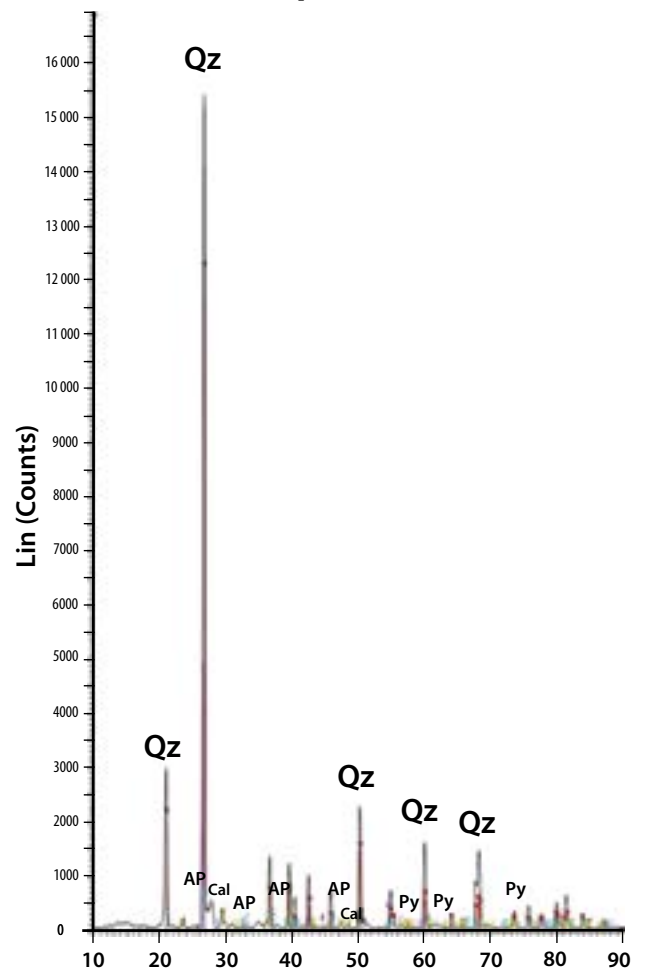
Gráfica 1

### Difractograma de *jales* 5 en muestra superficial



Gráfica 2

### Difractograma de *jales* 5 en muestra a 1 m de profundidad



nar el contenido total de EPT y determinar las especies químicas presentes en la presa 5 para valorar el potencial de contaminación del lugar.

El cuadro 7 muestra el resultado del análisis del contenido total de metales en la presa 5.

El contenido de metales muestra la presencia de alta concentración de fierro, situación que corrobora o incrementa la posibilidad de que se encuentre en su forma mineral de pirita como fuente de azufre y principal generador de drenaje ácido. Otro punto a resaltar es la presencia en concentraciones significativas de otros elementos potencialmente tóxicos, como el arsénico y plomo, además de altos contenidos en aluminio, calcio, zinc, magnesio y cobre, los cuales también fueron detectados en distintas fases minerales en las pruebas de difracción de rayos X.

Con base en lo anterior y las características de los *jales* presentes en la presa de Pozuelos, se puede determinar que las fracciones que interesan para los minerales (fierro, cobre, zinc, plomo), posiblemente asociados a sulfuros y generadores de drenaje ácido y liberación de elementos tóxicos, son metales intercambiables y metales unidos a sulfuros (ver gráfica 3).

Cuadro 7

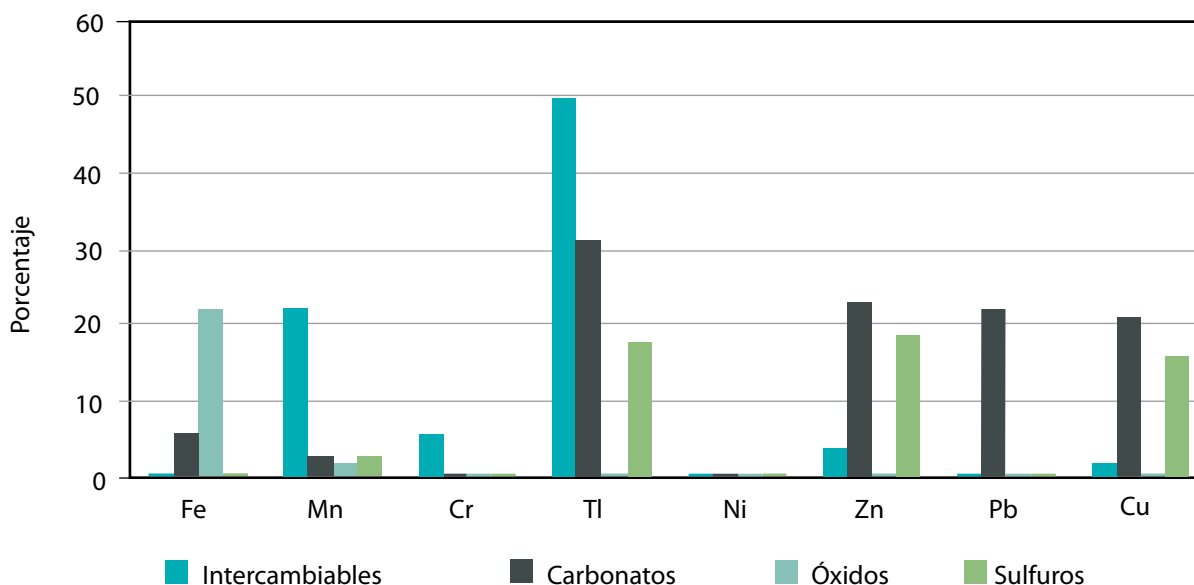
**Concentración total de metales presentes en la muestra tomada de la presa 5**

Prueba	Método empleado	Resultados	Unidades
Plata	EPA 6010B	5.95	mg/kg
Aluminio		282.99	
Arsénico		16.10	
Bario		19.10	
Berilio		0.09	
Calcio		163.15	
Cadmio		0.47	
Cobalto		0.30	
Cromo		8.29	
Cobre		11.97	
Fierro		4 209.61	
Potasio		10.82	
Magnesio		58.55	
Manganeso		0.06	
Molibdeno		3.22	
Sodio		9.75	
Plomo		53.39	
Antimonio		1.85	
Selenio		3.90	
Talio		4.14	
Vanadio	14.98		
Zinc	29.85		
Mercurio	0.18		

Los resultados marcan que 2% del fierro presente en la muestra está en la fracción intercambiable, al igual que la pirita en la de sulfuros. En el caso del

Gráfica 3

**Especies presentes de los minerales más abundantes en la presa de Pozuelos**



zinc, éste se encuentra en 4% como intercambiable y 19% como sulfuro o esfalerita; el cobre presenta 2.5% en fracción intercambiable y 17% como sulfuro o calcopirita; por último, el plomo está en 2% en fracción intercambiable al igual que en forma de sulfuro.

## f) Vulnerabilidad intrínseca

La zona más crítica se localizó al poniente de la presa La Purísima, que se encuentra al sur del municipio (ver imagen 11), de manera más específica a la altura de las comunidades Santa Teresa y Las Pachonas.

Los índices DRASTIC van desde 170 a 190, que indican una alta vulnerabilidad debido a las características del sitio, ya que presentan materiales de granulometría, como conglomerados, los cuales muestran altos valores de conductividad; estos

aspectos predominaron sobre uno de los factores más determinantes, que es la profundidad del nivel piezométrico.

Con respecto al método AVI, el cual sólo consideró dos parámetros (el espesor y la conductividad hidráulica de las capas que se encuentran sobre el acuífero o nivel freático), se desarrolló considerando el estudio de GUYSA, SA de CV (1998) para obtener la representación gráfica de las zonas delimitadas con líneas de igual índice AVI. El mapa obtenido para esta investigación muestra que, de acuerdo con las características antes mencionadas para estimar este índice, el municipio de Guanajuato presenta una vulnerabilidad gradual que va de media a alta, presentando dos áreas críticas (vulnerabilidad alta), una en la parte norponiente cercana al Cerro del Cubilete y otra en la zona sur, cerca de la presa La Purísima (imagen 12), el resto del municipio presenta una tendencia de vulnerabilidad media con tiempos de transición de 20 a 50 días.

Imagen 11  
**Índice DRASTIC para el municipio de Guanajuato**

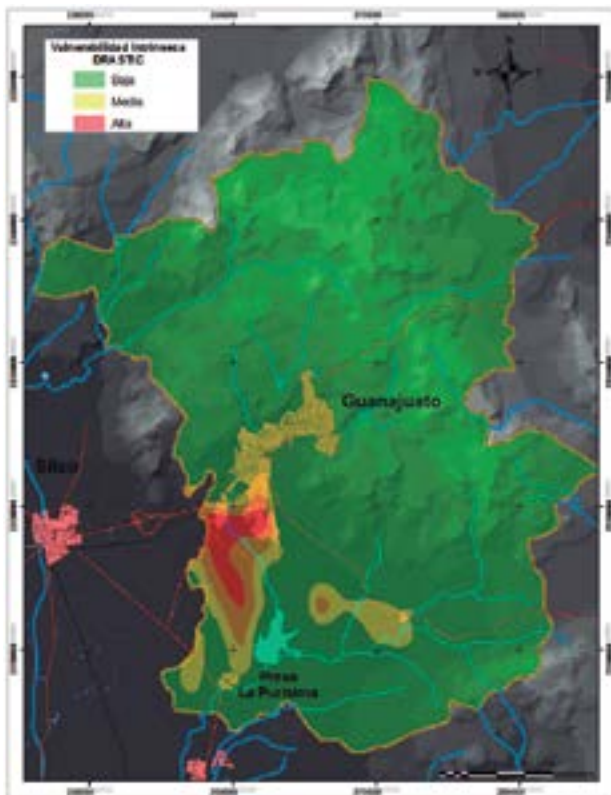


Imagen 12  
**Índice AVI para el municipio de Guanajuato**

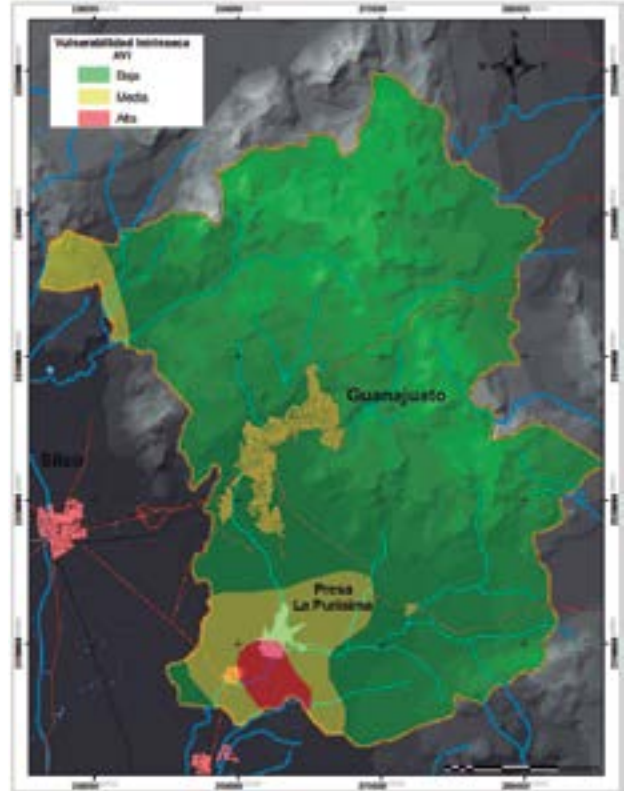
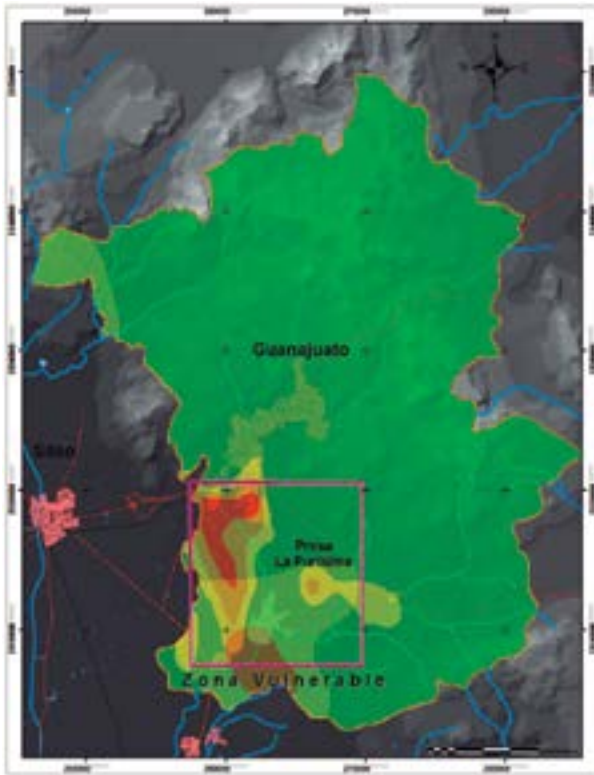




Imagen 13

### Zona de alta vulnerabilidad intrínseca



### g) Selección del sitio para evaluación de escenario

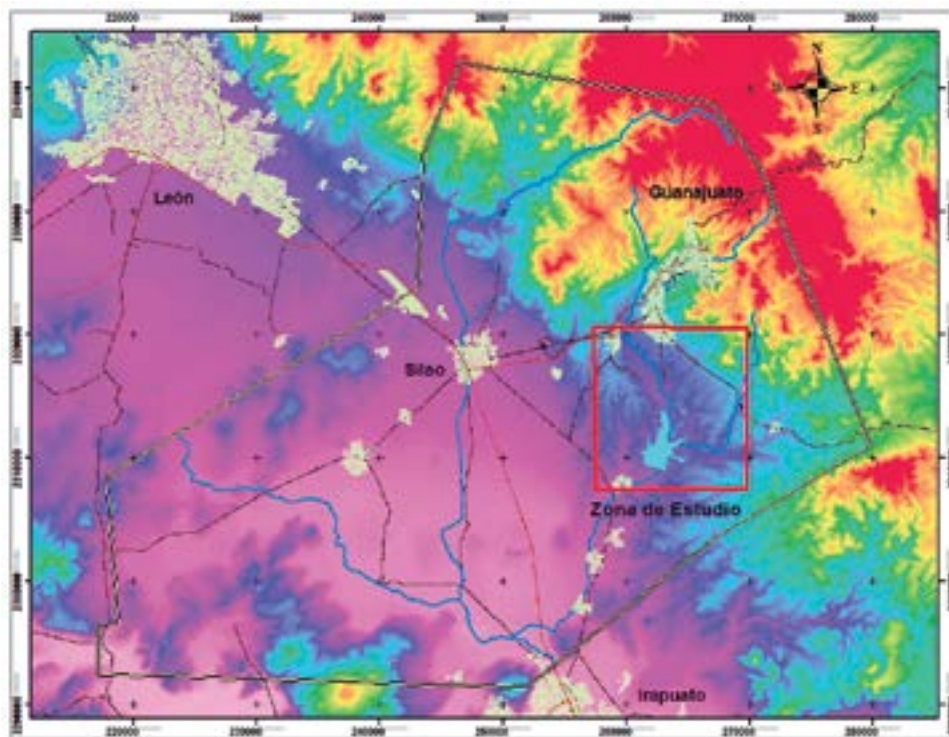
De acuerdo con los métodos DRASTIC, AVI y al flujo del río Guanajuato como principal medio de transporte de la fuente contaminante (presa de *jales 5*), el sitio se localizó al oriente del acuífero Silao-Romita, en la zona de influencia de la presa La Purísima, con una cobertura de 16 500 hectáreas (imágenes 13 y 14).

### h) Generación de escenario

Una vez determinado el sitio, el escenario planteado utilizó los resultados físico-químicos de las muestras de la presa de *jales 5*, donde la prueba ABA indicó que este depósito no presenta capacidad de generación de drenaje ácido, pues su PN y PA (13.4) está por encima de 1.2, sin embargo, el pH del residuo fue de 4.5 (ligeramente ácido), lo que contrapone la información de la ABA.

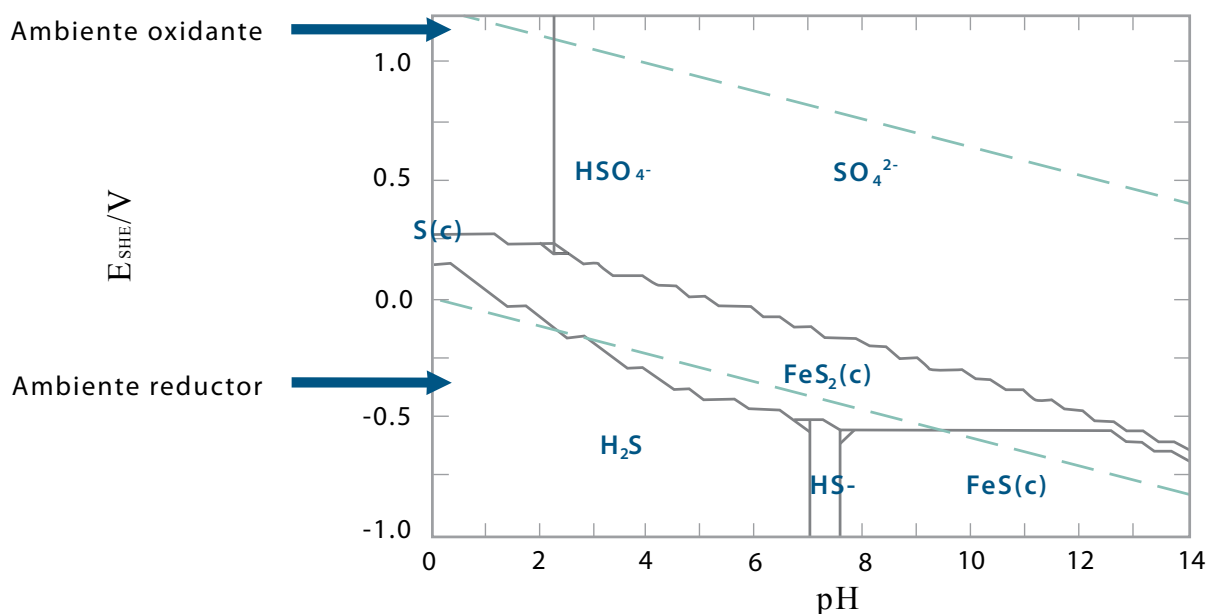
Imagen 14

### Zona para evaluación de escenario



Gráfica 4

### Diagrama Pourbaix del sistema pirita para Eh-pH



No obstante, otro mecanismo de liberación de contaminantes o de formación de drenaje ácido es por medio de la actividad microbológica propia del sitio donde, en el caso del distrito minero de Guanajuato, se ha reportado la presencia y actividad de *Thiobacillus ferrooxidans* (Camarena Pozos, 2009), cuya acción biológica descompone los sulfuros, libera metales y acidifica el agua, pues su fuente de energía proviene de la oxidación de los compuestos de azufre, el cual es reducido junto con el ion ferroso.

La gráfica 4 muestra qué parte del residuo encontrado en la presa de *jales* 5 está en condiciones de generar drenaje ácido pues, de acuerdo con el pH (4.5) y las condiciones del sitio (como la vegetación sobre el depósito, es decir, presencia de materia orgánica), se favorecerá un ambiente reductor mucho más factible en temporada de lluvias.

#### i) Estimación de residuos mineros

Calculada la cantidad de residuos en el depósito y con base en la información de la caracterización del *jal* (concentración, fracción intercambiable y de sulfuros de hierro en las muestras), se hizo una

aproximación en el contenido de pirita con potencial de generación de drenaje ácido y de liberación de EPT de aproximadamente 2 640 toneladas.

### Conclusiones

De los sitios muestreados, y de acuerdo con la norma NOM-052-SEMARNAT-2005, tanto sus descargas como residuos depositados en las presas de *jales* no están liberando elementos potencialmente tóxicos al ambiente, dados los resultados de los análisis realizados; sin embargo, se destacan las descargas de la presa 1, la cual sobrepasa los límites máximos permisibles en arsénico, cromo y plomo, que se deberá verificar de manera más puntual en términos espaciales y temporales para establecer los escenarios de los posibles mecanismos de liberación o de transporte de sus contaminantes en el sitio, mismos que se analizaron para la presa 5 y que se mencionan en la segunda parte del presente artículo. Por otro lado, y de acuerdo con los resultados de los análisis realizados, la mayoría de las presas de *jales* en operación no están en condiciones favorables de formación de drenaje ácido ni de liberación de metales potencialmente tóxicos.

### Estimación del volumen de *jales* en la presa de Pozuelos

Zona	Área (m <sup>2</sup> )	Alto (m)	Volumen sección (m <sup>3</sup> )	% de la sección	Volumen estimado (m <sup>3</sup> )
1	4 416.4	6	37 485.3	35	13 119.8
2	7 491.8	11	93 570.7	65	51 463.9
3	4 242.5	4	14 602.2	100	14 602.2

Es de interés para el presente estudio que los *jales* antiguos (caso de la presa 5 ubicada en Pozuelos), donde los métodos de beneficio de la compañía minera que los depositó en su tiempo no eran tan eficientes como los actuales, se estimaron con al menos 50 años de abandono y se encuentran en una etapa de liberación al ambiente de elementos potencialmente tóxicos a través de diversos metales (como aluminio, arsénico, calcio, fierro, magnesio, plomo y zinc) y de drenaje ácido (pH 4.5) por actividad microbiológica propia del sitio.

Por lo tanto, es importante evaluar, mediante modelos matemáticos o *software* especializado (como *ModFlow*), el grado de riesgo que pudiera provocar este tipo de fuente contaminante hacia el acuífero Silao-Romita, principal fuente de suministro de agua para varios municipios del estado de Guanajuato, problema que se debe atender en un corto plazo por parte de la autoridad (ver cuadro 8).

## Fuentes

Aller, L., & T. Benne. *DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings*. Junio de 1987. Recuperado el 7 de enero de 2016 de US Environmental Protection Agency: [http://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/20007KU4.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=1986+Thru+1990&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&\(DE\)](http://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/20007KU4.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=1986+Thru+1990&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&(DE)).

Báez Vázquez, A. *Validación de mapas de vulnerabilidad en medios urbanos*. Toluca, México, Instituto de Geofísica-Universidad Nacional Autónoma de México, 2001.

Camarena Pozos, D. A. *Reducción microbiológica de Hg+2 en suelos asociados a la actividad minera*. Tesis de maestría. Irapuato, Guanajuato, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN), 2009.

CEAG, A. B. *Cotas de Guanajuato*. Noviembre del 2015. Recuperado el 1 de abril de 2016 en: <http://cotas-guanajuato.blogspot.mx/p/zona-centro.html>.

Comisión Nacional del Agua. *Incidentes importantes de presas de jales reportados por la Comisión Nacional del Agua (CNA) como emergencias atendidas debidas a derrames de residuos mineros*. México, CNA, 2002.

GUYSA, SA de CV. *Estudio hidrogeológico y modelo matemático del acuífero del Valle de León, México*. Informe técnico elaborado para CEAG, 1998.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). *Estadística de la industria minerometalúrgica mensual*. 22 de diciembre de 2015. Recuperado el 5 de enero de 2016 en: [http://www.inegi.org.mx/saladeprensa/notasinformativas/2015/ind\\_miner/ind\\_miner2015\\_12.pdf](http://www.inegi.org.mx/saladeprensa/notasinformativas/2015/ind_miner/ind_miner2015_12.pdf)

Lawrence, R. W. e Y. Wang. *Determination of neutralization potential in the prediction of acid rock drainage: Fourth International Conference on acid rock drainage*. Vancouver, BC, Canada, 1997.

Ramos Arroyo-Siebe Grabach, C. D. "Estrategia para identificar *jales* con potencial de riesgo ambiental en un distrito minero: estudio de caso en el Distrito de Guanajuato, México", en: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 2006.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). "NOM-141-SEMARNAT-2003. Que establece el procedimiento para caracterizar los *jales* así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y pos-operación de presas de *jales*", en: *Diario Oficial de la Federación*. México, DF, 17 de septiembre de 2003.

\_\_\_\_\_. "NOM-052-SEMARNAT-2005. Que establece las características de los residuos peligrosos y el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso", en: *Diario Oficial de la Federación*. México, DF, 23 de junio de 2006.

Universidad Iberoamericana de León. *Estructuración de mapas temáticos de índices de vulnerabilidad de las aguas subterráneas de las subcuencas de los ríos Turbio y Guanajuato, Gto.* Guanajuato, México, Comisión Estatal del Agua de Guanajuato, 1999.