



Revista Mexicana de Ciencias Geológicas

ISSN: 1026-8774

rmcg@geociencias.unam.mx

Universidad Nacional Autónoma de México  
México

Ramos Arroyo, Yann René; Prol Ledesma, Rosa María; Siebe Grabach, Christina Desireé  
Características geológicas y mineralógicas e historia de extracción del Distrito de Guanajuato,  
México. Posibles escenarios geoquímicos para los residuos mineros

Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, vol. 21, núm. 2, 2004, pp. 268-284  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Querétaro, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57221207>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

## Características geológicas y mineralógicas e historia de extracción del Distrito de Guanajuato, México. Posibles escenarios geoquímicos para los residuos mineros

**Yann René Ramos-Arroyo<sup>1,\*</sup>, Rosa María Prol-Ledesma<sup>2</sup>,  
Christina Siebe-Grabach<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geología

<sup>2</sup> Departamento de Recursos Naturales, Instituto de Geofísica

<sup>3</sup> Laboratorio de Edafología Ambiental, Instituto de Geología  
Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria,  
Delegación Coyoacán, 04510 México, D.F.

\* yannramos2004@yahoo.com.mx

### RESUMEN

*Se analizan los aspectos geológicos y los métodos de beneficio usados históricamente en el Distrito Minero de Guanajuato para plantear hipótesis respecto a las condiciones geoquímicas que pueden encontrarse en los residuos de la extracción. Se compiló información sobre las condiciones geográficas del distrito, los tipos de mena, la historia de producción, los procesos de beneficio y las toneladas de oro y plata recuperadas. Con estos datos se estiman las cantidades de residuos que puede haber dispersos y se proponen las cantidades de calcita y pirita presentes en los jales en función de la ubicación del yacimiento de procedencia.*

*Según la historia de producción, en Guanajuato se han extraído aproximadamente 95 millones de toneladas de roca mineralizada que se han beneficiado por diferentes sistemas: fundición y amalgamación de 1548 a 1905, cianuración de 1905 a la actualidad y flotación "bulk" de 1946 a la actualidad. Los elementos presentes en los jales que pueden ocasionar problemas por toxicidad son: arsénico, cadmio, cobre, plomo, selenio y zinc, además del mercurio y el cianuro que fueron agregados durante el beneficio.*

*Los contenidos de pirita y otros sulfuros en los jales deben tener una variabilidad muy alta debido a que los yacimientos son muy heterogéneos. Las concentraciones de sulfuros en los yacimientos son mayores cuando la mena se encuentra como filones y como brechas que como stockworks. En las zonas de alteración argílica hay altas concentraciones de pirita. Por otra parte, cuando la mena se encuentra oxidada tiene muy bajo contenido de sulfuros. Se observa que el contenido de sulfuros en los jales varía según su origen geológico: Veta Madre Centro profundo (Rayas) > La Sierra ≈ La Luz > Veta Madre Sur (stockwork) > Veta Madre Centro somero (oxidación).*

*El contenido de calcita en los jales, y por lo tanto su capacidad para neutralizar la acidez, depende de la concentración de este mineral en la ganga, la cual es controlada por la mineralogía de la roca encajonante y por el tipo de alteración hidrotermal predominante en cada sección del yacimiento. El único tipo de alteración hidrotermal que favorece la capacidad de neutralización de acidez es la propiltílica, la cual se encuentra muy extendida en las rocas, alcanzando más de 10 km desde el centro de la veta. Se observa que el contenido de calcita en los jales varía según el yacimiento de procedencia: La Luz > La Sierra ≈ Veta Madre Sur > Veta Madre Centro. Algunos jales del Distrito de Guanajuato pueden tener capacidad de generación de acidez, específicamente los que tienen como origen las zonas bajas de los yacimientos.*

*Palabras clave: historia de extracción, métodos de beneficio, jales, pirita, calcita, Guanajuato.*

## ABSTRACT

We describe the geological features and the extraction methods historically applied in the Guanajuato Mining District, in order to propose hypothesis about the geochemical conditions that prevail in the tailings. Information about geographical conditions of the district, ore type, production history, processing methods, and the recovered amount of gold and silver was compiled. We estimate the approximate volume of tailings and the concentration of calcite and pyrite in relation with the location on the source deposit.

According with the production history, approximately 95 million tons of mineralized rock have been extracted and processed by different methods: smelting and amalgamation (from 1548 to 1905), cyanidation (from 1905 to present), and flotation (from 1946 to present). The elements present in the tailings that may be hazardous because of their high toxicity are: As, Cd, Cu, Pb, Se, and Zn, in addition to Hg and Cyanide, which have been added during processing.

Due to the heterogeneity of the deposits, the sulfide content in the tailings is highly variable. The sulfide concentrations are higher when the ore occurs as veins and breccias than when it is contained in stockworks. In the areas with argillic alteration, pyrite is present in high concentration. When the ore is oxidized, its concentration of sulfide is very low. Therefore, the sulfide concentration in the tailings varies in accordance with the source mineralogy in the following relation: Veta Madre center, deep (Rayas) > La Sierra ≈ La Luz > Veta Madre south (stockwork) > Veta Madre center, shallow (oxidation).

The amount of calcite in the tailings, and therefore the capacity for acidity neutralization, depends on the calcite concentration in the gangue, which is controlled by the host-rock mineralogy and the predominant alteration type in each section of the deposit. The only type of alteration that favors the neutralization capacity is the propylitic alteration. This alteration type is widely spread in the deposit (farther than that 10 km from the veins). The content of calcite in the tailings varies with the location of the source deposit as follows: La Luz > La Sierra ≈ Veta Madre south > Veta Madre center. Some tailings have a high acidity generation capacity, namely those that come from the deeper section of the deposit.

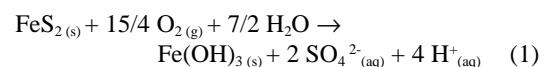
*Key words:* extraction history, processing methods, tailings, pyrite, calcite, Guanajuato.

## INTRODUCCIÓN

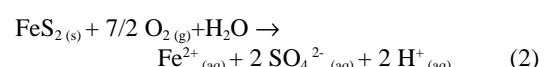
La disposición final de los residuos generados por la explotación minera ocasiona muchos problemas ambientales, entre los que se encuentran la pérdida de cobertura vegetal, la creación de estructuras poco consolidadas que son susceptibles a la erosión eólica e hidrálica, (Moore y Luoma, 1990; Salomons, 1995), la introducción al ambiente de sustancias tóxicas en los procesos de beneficio, y la generación de acidez y metales pesados al exponer a los minerales de los yacimientos a un ambiente oxidante (Moore y Luoma, 1990; Dudka y Domy, 1997; Gray, 1997; Larocque y Rasmussen, 1998).

La generación de acidez es controlada por la oxidación de pirita, que es el sulfuro que se encuentra en mayores concentraciones en las vetas (Plumlee, 1999). La oxidación es un proceso muy complejo en el que intervienen factores mineralógicos y microbiológicos, ya que según las condiciones puede ser abiótica o biótica; el agente oxidante de la oxidación abiótica es el oxígeno y el de la biótica es el ion férrico en solución (Baker y Banfield, 2003). La oxidación biótica se produce a pH < 4 y es realizada por comunidades bacterianas, siendo predominante la especie

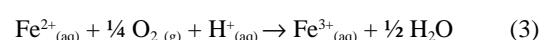
*Acidithiobacillus ferrooxidans* (Baker y Banfield, 2003). La tasa de oxidación biótica es de 1 a 5 órdenes de magnitud mayor que la abiótica (Singer y Stumm, 1970). La oxidación abiótica de la pirita, que ocurre a pH > 4.0 es favorecida por un balance adecuado de agua y oxígeno (Plumlee, 1999):



Se han identificado dos pasos para este proceso, primero ocurre la oxidación de sulfuro por oxígeno (Singer y Stumm, 1970):

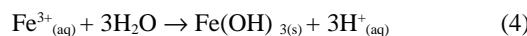


Posteriormente ocurre la oxidación de  $\text{Fe}^{2+}$  a  $\text{Fe}^{3+}$ , también por oxígeno:

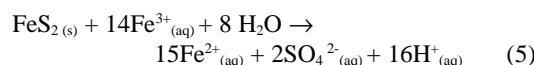


La concentración del ion oxidante férrico en solución es limitada por la formación de ferrihidrita que ocurre a pH

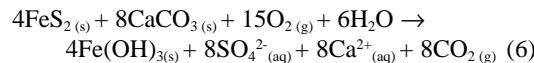
cercano a la neutralidad:



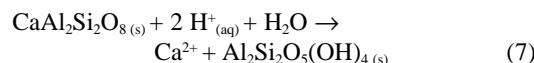
Al bajar el pH a menos de 4.0, la bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans* utiliza el ion ferroso para sus actividades metabólicas y lo oxida al estado férrico, el pH ácido favorece que permanezca en solución. El ion férrico es un oxidante más agresivo que el oxígeno y genera cuatro veces más moles de ácido (Plumlee, 1999):



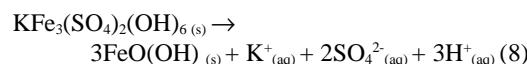
Si hay especies minerales que al disolverse aporten alcalinidad (carbonatos o algunos aluminosilicatos), las condiciones de pH permanecen de neutras a alcalinas, situación que favorece la adsorción de los metales en las superficies de óxidos de hierro presentes (Langmuir, 1997). La reacción global de oxidación de pirita y neutralización de la acidez por calcita es:



El CO<sub>2</sub> se distribuye en las especies HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> o CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> en función del pH y puede formarse yeso según las condiciones de saturación de CaSO<sub>4</sub> en solución. Los aluminosilicatos tienen menor intensidad de neutralización debido a su baja tasa de intemperismo respecto a los carbonatos, para el caso específico de anortita (Plumlee, 1999):



En la Figura 1 se esquematiza la problemática de generación de residuos para los yacimientos epitermales del Distrito de Guanajuato. La permeabilidad de las rocas encajantes condiciona la infiltración natural de agua y oxígeno en los yacimientos y se produce una oxidación natural que se extiende a profundidad. En las zonas de oxidación de los yacimientos epitermales, parte de los sulfuros se han oxidado y pueden encontrarse óxidos y sulfatos. Algunas de las fases secundarias formadas en esta zona pueden hidrolizarse al entrar en contacto con agua meteórica, liberando acidez al medio; por ejemplo, para el caso de jarosita (Dold, 1999):



Sin embargo, aunque algunos minerales de la zona de oxidación pueden liberar acidez y elementos con potencial tóxico (EPT) al interaccionar con agua, las menas de sulfuros sin oxidar tienen mayor potencial de producir drenajes ácidos (Plumlee, 1999).

En México, los métodos empleados actualmente para la recuperación de oro y plata de yacimientos epitermales, según la mineralogía de la mena, son: (i) fundición de concentrados de la flotación *bulk*, recuperando oro y plata como principales, (ii) fundición de concentrados o menas de alta ley recuperando oro y plata como subproductos, (iii) lixiviación con cianuro o tiosulfato de concentrados o menas de baja ley. Actualmente, en el Distrito de Guanajuato se aplica principalmente la flotación *bulk* y, en menor grado, la cianuración; en ambos se recupera un concentrado metálico menor al 5 % del volumen total procesado, el resto del material es depositado en presas de jales (SCMMSFG, 2002).

Los métodos de construcción de jales que se han aplicado en México son: (i) depósito de materiales sólidos en aguas profundas aisladas de la presencia de oxígeno, para zonas costeras, y (ii) depósito subáreo de lodos, donde se drena el agua y se retienen los materiales sólidos; este último tiene las variantes de descarga por adelgazamiento central, de aguas abajo y aguas arriba (CNA, 2000). El método subáreo consiste en la construcción de una cortina de retención de sólidos con clastos gruesos para que el agua drene libremente; los clastos en algunos casos son material de baja ley con alteración argílica y pueden contener cantidades altas de pirita. Los lodos residuales de la extracción, que tienen de 30 a 35 % de sólidos en suspensión (Robertson, 1994) son vaciados en las presas de jales.

En zonas con topografía abrupta, como es el caso de Guanajuato, se utiliza el método aguas arriba con el fin de optimizar la relación de volumen de residuos depositados con el área de la cuenca de captación (AIMMGM, 1993). En el método aguas abajo, los taludes se van construyendo gradiente abajo del primer depósito realizado. El método de descarga por adelgazamiento central se utiliza en zonas planas, contruyendo una barrera perimetral de materiales

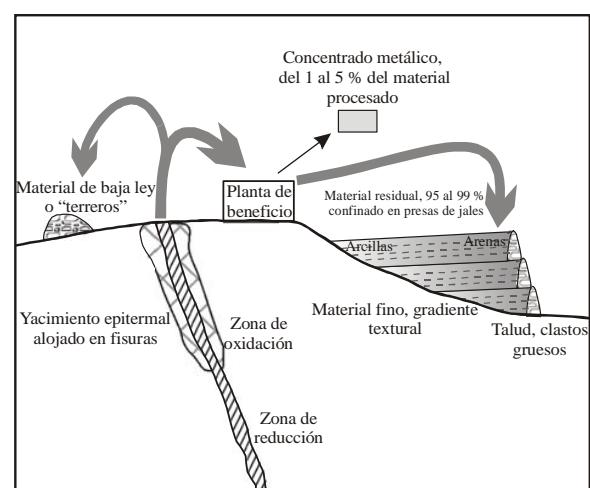


Figura 1. Esquema de la explotación de los yacimientos epitermales y la generación de residuos en el Distrito de Guanajuato.

gruesos, y descargando los lodos en el centro.

El principal factor que controla la problemática ambiental que existe en las áreas mineralizadas, tanto antes de las actividades mineras como durante la extracción y el procesamiento, es la mineralogía del yacimiento (Plumlee y Nash, 1995). Otros factores importantes son los métodos de minado, el beneficio y el clima.

Los yacimientos de un tipo determinado con características geológicas similares deben producir un impacto al ambiente parecido (Plumlee *et al.* 1995). Este impacto puede ser establecido y cuantificado compilando las características geológicas y mineralógicas de los yacimientos, y sobre todo generando información de los procesos que controlan la liberación de acidez y EPT en los sitios de interés.

Específicamente, el impacto ambiental de los yacimientos epitermales en México se deriva de los tamaños tan grandes [mayores a 50 millones de toneladas (Mt), tanto en Zacatecas como en Guanajuato (Gross, 1975) y Pachuca (Plumlee *et al.*, 1995)]. La intensa explotación de estos yacimientos ha alterado la superficie, cubriendo con residuos el suelo y la vegetación en áreas extensas de estos distritos. Debido a que los depósitos de residuos no presentan una cubierta en su superficie pueden ser susceptibles a la erosión hídrica y eólica. Por ejemplo, Castro-Larragoitia *et al.* (1997) reportan que debido a la falta de cobertura vegetal en un depósito de jales en Santa María de La Paz, San Luis Potosí, México, los residuos se han dispersado contaminando los suelos y los cuerpos de agua en una zona de 100 kilómetros cuadrados.

En el Distrito de Guanajuato la historia de la extracción está bien documentada y se han realizado muchos esfuerzos para describir la geología y mineralogía de los yacimientos. En esta revisión se plantean los posibles escenarios que existen en los depósitos de jales que hay en Guanajuato, se estiman los volúmenes de residuos desde los datos de producción y se sugieren hipótesis respecto a las concentraciones de pirita y calcita según el origen geológico.

## CARACTERÍSTICAS FISIOGRÁFICAS DEL DISTRITO DE GUANAJUATO

El Distrito Minero de Guanajuato se localiza a 360 km al noroeste de la ciudad de México entre los 21°05' y 21°00' de latitud Norte y 101°20' y 101°10' de longitud Oeste. La mayor parte de las minas del distrito se localizan dentro de la subcuenca del río Guanajuato, que tiene una extensión de 103,255 ha y pertenece a la cuenca del río Lerma (Figura 2). La región tiene una topografía muy abrupta, variando en altura de 2,800 m snm en la Sierra de Guanajuato a 1,900 m snm, 15 km al SW en el valle donde comienza el Bajío y se encuentra el acuífero local.

El clima presenta un zonamiento acorde con la topografía, de tal manera que las zonas más altas reciben mayor precipitación y además tienen mayor densidad de

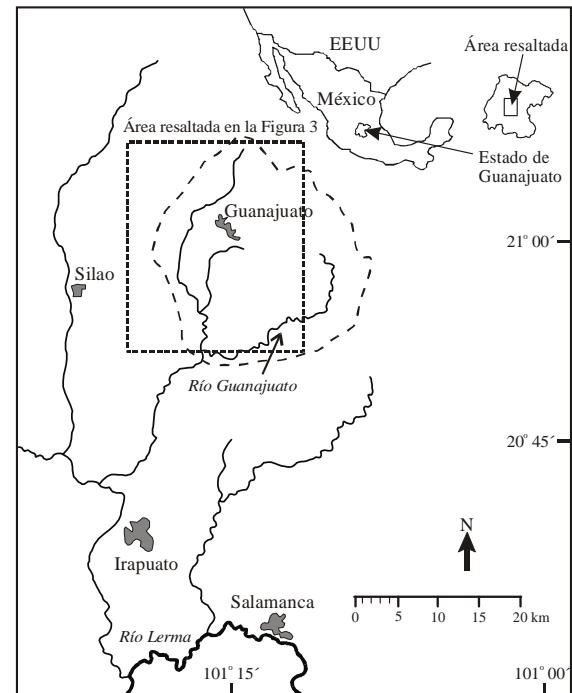


Figura 2. Ubicación de la zona del Distrito Minero de Guanajuato e hidrología.

vegetación, funcionando como centros de condensación y concentración de humedad. La temperatura media anual es del orden de 18.7°C, oscilando entre los extremos de 5 y 35°C con un promedio de 77 días con lluvia al año. Datos referentes a las lluvias de los últimos 100 años muestran una precipitación promedio de 670.7 mm con una desviación estándar de 173.25; el valor mínimo de precipitación se presentó en 1961 con 280.3 mm y el máximo se observó en 1971 con 1,253 mm. La evaporación anual promedio es de 2,000 mm. La humedad relativa promedio es del 66 %. La velocidad media de los vientos es de 2.9 m por segundo con una dirección dominante de suroeste y oeste (datos del archivo meteorológico local).

## GEOLOGÍA

El distrito forma parte del cinturón de mineralización plata-plomo-zinc que corre paralelo al flanco este de la Sierra Madre Occidental (Clark *et al.*, 1982). En la Figura 3 se distinguen las unidades litológicas que afloran en la superficie así como las fallas y las principales minas.

Tonalita Cerro Pelón (Jtcp). Conjunto de rocas masivas cristalinas leucocráticas, cortado por numerosos diques doleríticos. A esta unidad se le ha asignado una edad entre el Jurásico Tardío y el Cretácico (Martínez-Reyes, 1992).

Diorita La Palma (Kdlp). Consiste de diversas facies cristalinas de rocas de composición principalmente diorítica,

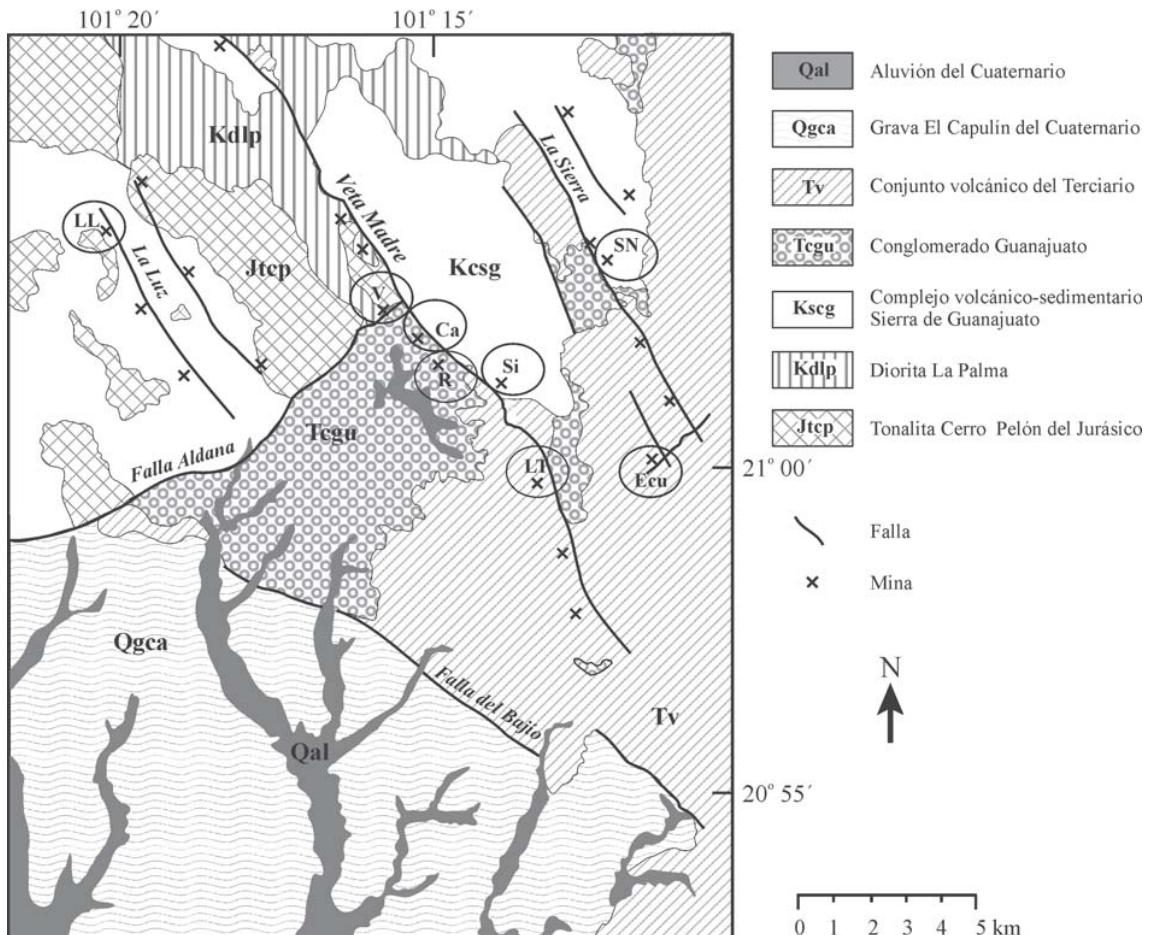


Figura 3. Bosquejo geológico del Distrito Minero de Guanajuato. Las principales minas del distrito están encerradas en un óvalo: LL: La Luz; V: La Valenciana; Ca: Cata; R: Rayas; Si: Sirena; LT: Las Torres; SN: San Nicolás; Ecu: El Cubo.

granítica y gároica, que están cortadas por numerosos diques granofídicos, doleríticos y basálticos; su edad es del Cretácico Temprano (Martínez-Reyes, 1992).

Complejo volcánico-sedimentario Sierra de Guanajuato, CVSG, (Kcsg). Este complejo del Cretácico Temprano agrupa diversas facies volcánicas y sedimentarias marinas que alcanzan aproximadamente 600 m de espesor. Está compuesto por pizarras negras carbonáceas además de calcáreas, interestratificadas con areniscas, caliza y flujos de lava de composición andesítica a basáltica; todos se presentan débilmente metamorfizados a filitas y mármol y alterados por hidrotermalismo. Con el nombre de formación Esperanza se conoce a un miembro de este complejo que constituye la única unidad compuesta por calizas en la zona.

Conglomerado Guanajuato (Tcgu). Formación de origen continental del Eoceno Medio que descansa discordantemente sobre el CVSG y tiene un grosor mínimo de 1,500 m (Gross, 1975). Consiste en un conglomerado mal clasificado con intercalaciones de arenisca, de estratificación delgada a gruesa; en la base están presentes

arenitas volcánicas y lavas andesíticas. Cerca de zonas fracturadas presenta alteración propilítica y color verde por la presencia de clorita (Mango, 1992).

Conjunto volcánico del Terciario (Tv). Se agrupa con esta denominación a una secuencia volcánica del Eoceno tardío-Oligoceno, compuesta por las siguientes unidades:

*Formación Loseros (Tol).* Arenita volcánica verde cuando está cloritizada o violeta si se encuentra oxidada; de 10 a 52 m de grosor (promedio 30 m), formada en condiciones lacustres (Randall-Roberts *et al.*, 1994).

*Riolita La Bufa (Trbu).* Flujos piroclásticos de 360 m de espesor y una edad por K-Ar de  $37 \pm 3$  Ma (Gross, 1975). Debido a que esta roca es muy quebradiza, durante el fallamiento y posterior paso de fluidos mineralizantes se formaron yacimientos tipo *stockwork*, sobre todo en la estructura de la Veta Madre (Mango, 1992).

*Arenisca Calderones (Taca).* Con 200 a 250 m de grosor, sobreyace discordantemente a la Riolita La Bufa. Se trata de una unidad volcánica verdosa, debido a cloritización, que incluye depósitos de lahar y una

megabrecha compuesta de fragmentos de hasta 10 m de diámetro de las rocas mesozoicas y del Conglomerado Guanajuato (Randall-Roberts *et al.*, 1994).

**Andesita El Cedro (Tace).** Flujos de lava andesítica y tobas de composición dacítica a andesítica; presenta un espesor de 250 a 640 m (Randall-Roberts *et al.*, 1994).

**Riolita Chichíndaro (Trch).** Secuencia de domos y flujos de lava interestratificados con brechas y tobas volcánicas pobremente clasificadas, se aprecian texturas porfiríticas fluidales. Tiene una edad estimada por K–Ar de  $32 \pm 1$  Ma (Gross, 1975). En algunas zonas a esta unidad se le conoce como intrusivo Peregrina (Tmp), inclusive existe en las zonas bajas de las minas de Rayas y Sirena un pórfito de monzonita el cual puede ser la base de esta unidad (Mango, 1992).

**Basalto El Cubilete (Qbcu).** Representa las últimas manifestaciones volcánicas en la región y consiste de basalto de olivino y andesita de augita con textura traquítica; se aprecia en los cerros El Gigante, el más alto de la región con 2,960 m snm, y El Cubilete (Randall-Roberts *et al.*, 1994).

**Grava El Capulín (Qgca).** Aflora en las partes bajas del Sur del distrito, y está compuesto por material coluvial de arena tobácea y conglomerado (Martínez-Reyes, 1992).

**Aluvión del Cuaternario (Qal).** Esta unidad, junto con la anterior, conforma estructuras donde se encuentra el acuífero local.

La estructura del distrito es muy compleja, encontrándose rocas cretácicas deformadas y metamorfizadas, fallas normales cenozoicas, y una posible caldera relacionada con el volcanismo del Terciario (Randall-Roberts *et al.*, 1994). Las principales fallas tienen rumbo NW con longitudes de uno a más de 30 km, como la Veta Madre, y se extienden a profundidad más de 1,000 m (Gross, 1975); en estas estructuras están alojados los yacimientos epitermales. También se presenta otro sistema de fallas de dirección NE. La mineralización de oro ocurre predominantemente en las fallas de la parte E del distrito. Existen también estructuras circulares que varían de 1 a 8 km de diámetro (Vassallo *et al.*, 1996).

## YACIMIENTOS MINERALES

En la zona que abarca al Distrito de Guanajuato existieron tres épocas metalogenéticas: en el Cretácico, el Paleoceno y el Oligoceno (Randall-Roberts *et al.*, 1994). Durante el Cretácico se formaron cuerpos tabulares de sulfuros masivos hospedados en rocas Mesozoicas del CVSG (Randall-Roberts *et al.*, 1994). En la zona norte del distrito se han localizado dos cuerpos de sulfuros masivos que representan 1 Mt, con leyes de 80 % de FeS<sub>2</sub>, 3 ppm de Ag, 0.2 ppm de Au, 16 ppm de Sn y 0.2 % de Zn (Miranda-Gasca, 2000).

En el Paleoceno se emplazó un batolito granítico hacia el oeste del distrito. Tanto en el intrusivo como en el halo

de alteración se formaron yacimientos de tungsteno, selenio, bismuto, cobre, plata, plomo y zinc e incluso se detectaron trazas de minerales radioactivos en algunos cuerpos pegmatíticos (Martínez-Reyes *et al.*, 1995).

La época más importante de mineralización fue en el Oligoceno y estuvo asociada a la actividad volcánica del Terciario atribuida a procesos de subducción. La mayoría de los yacimientos minerales que se encuentran en la Sierra Madre Occidental se emplazaron en vetas epitermales llenando fisuras (Clark *et al.*, 1982). El Distrito Minero de Guanajuato se considera un sistema epitermal clásico de baja sulfuración (Heald *et al.*, 1987).

Las minas están alojadas en tres sistemas de vetas con tendencia NW: La Luz, Veta Madre y La Sierra. La totalidad de los materiales alojados en las vetas tiene una ley promedio de 0.1 g/t de Au y 10 g/t de Ag (Gross, 1975) y menos del 20 % del volumen de los minerales puede encontrarse en concentraciones económicas, es decir con más de 1 g/t de Au y más de 100 g/t de Ag en estructuras de clavos o bolsas de mineral (Mango, 1992).

Los tres sistemas de vetas presentan un zonamiento vertical en la mineralogía, el cual fue clasificado en 1975 por Gross en función de la altura en que se encuentran y los denominó yacimientos superior (de 2,250 a 2,550 m snm), bajo (de 1,800 a 2,350 m snm) y profundo (de 1,650 a 1,800 m snm). En los tres sistemas existen los mismos minerales de mena y ganga pero en proporciones diferentes (Petruk y Owens, 1974).

La mena se presenta como filones llenando fisuras en zonas de bonanza, como brechas y como *stockworks* (Wandke y Martínez, 1928; Randall-Roberts *et al.*, 1994). Los filones y los *stockworks* pueden considerarse extremos de una misma serie (Mango, 1992). Los filones son los rellenos de fisuras tabulares con contactos agudos y poco reemplazamiento de las rocas encajonantes, presentan texturas de intercrecimiento y bandeamiento (Randall-Roberts *et al.*, 1994). La mena se encuentra en el contacto entre las rocas encajonantes como capas delgadas entre material de ganga; en la Veta Madre pueden encontrarse tres zonas de capas de mineralogía de mena o bonanzas separadas por capas estériles de cuarzo y calcita (Antúnez, 1964).

En las brechas, la mineralización ocurre como vetas bandeadas rodeando a los clastos de las rocas brechadas y alteradas. Éstas se encuentran principalmente en los yacimientos bajo y profundo a 2,250–1,650 m snm (Mango, 1992). Los *stockworks* se formaron en rocas que por sus propiedades físicas se quebraron durante el fallamiento (Riolita La Bufa, Arenisca Calderones y Andesita El Cedro). Se limitan a la zona baja de los yacimientos entre 2,350 y 1,800 m snm y tienen leyes menores que las vetas tabulares (Mango, 1992; Randall-Roberts *et al.*, 1994).

La mineralogía de ganga se compone de cuarzo, feldespatos, pirita, calcita, y arcillas como caolinita, esmectita y clorita, principalmente (Petruk y Owens, 1974). Los minerales de mena no sobrepasan el 5 % del volumen

total de las vetas (salvo en el yacimiento profundo, en la mina de Rayas donde en zonas localizadas puede encontrarse 20 % del total entre pirita, calcopirita, galena y esfalerita (SCMMSFG, 2002).

La mena son sulfuros y sulfosales que se presentan formando bandas en el contacto con las rocas encajonantes o como granos diseminados en la ganga, tales como polibasita ( $[Ag, Sb, Cu, Se, As]S_2$ ) con un tamaño de 10 a 100  $\mu\text{m}$ , plata nativa, una solución sólida de acantita-aguilarita-naumannita ( $AgS_2$ - $SeAgS_2$ - $SeS_2$ ), y electrum, todos con un tamaño aproximado de 25  $\mu\text{m}$  (Vassallo, 1988). La pirita ( $FeS_2$ ) presenta una distribución desigual en todas las vetas, en concentraciones del 1 al 10 % (Mango, 1992), la cuales tienden a aumentar con la profundidad (Buchanan, 1979), formando cristales euhedrales cuyo tamaño varía de 10 a 1,000  $\mu\text{m}$  (Vassallo, 1988).

La galena ( $PbS$ ), la calcopirita ( $CuFeS_2$ ) y la esfalerita  $ZnS$  se encuentran siempre juntas en todo el distrito. En la esfalerita, el contenido de cadmio varía entre 3 y 5 %, aumentando a profundidad (Vassallo, 1988). En las partes superiores estos sulfuros se encuentran en bajas concentraciones con tamaño de grano menor a 100  $\mu\text{m}$ , incrementándose sus concentraciones en yacimientos más profundos. En la mina de Rayas en la Veta Madre, de 1,800 a 1,650 m snm hay concentraciones hasta del 15 % de

calcopirita, galena y esfalerita de grano muy grueso, de 2 a 10 mm (SCMMSFG, 2002). Otros minerales metálicos que se encuentran en bajas cantidades son: guanajuatita ( $Se_2Sb_2$ ) pirrotita ( $Fe_{1-x}S$ ), marcasita ( $FeS_2$ ), tetrahedrita ( $[(Cu, Fe)_{12}Sb_4S_{13}]$ ) y arsenopirita ( $FeAsS$ ) (Mango, 1992).

Mango (1992) propone que los fluidos que dieron lugar a la mineralización en el distrito fueron de naturaleza ácida, lo cual deduce por la presencia de alteración argílica (ensamble mineralógico de esmectita, caolinita, halloysita, pirita y cuarzo) asociada espacialmente con la mineralogía de mena y muy localizada en los primeros centímetros cercanos a las estructuras. Sin embargo, los fluidos mineralizantes, que en un inicio fueron ácidos, al interaccionar con las rocas encajonantes se fueron neutralizando y formaron un halo de alteración propilítica (ensamble de clorita, montmorilonita, esmectita, cuarzo, calcita, epidota y trazas de pirita) muy extendida, que alcanza hasta 10 km desde la estructura de la veta.

La alteración potásica (adularia, sericitita, cuarzo) es la segunda en extensión y es favorecida por rocas volcánicas ricas en potasio; se asocia con la mineralización de *stockworks* en las minas Sirena y Las Torres (Mango, 1992). La alteración fílica en el distrito se limita al intrusivo Peregrina y envuelve a la argílica (Randall-Roberts *et al.*, 1994).

La alteración más tardía es la silícica que envuelve a

Tabla 1. Compilación de las características de los principales cuerpos mineralizados en el Distrito de Guanajuato (Gross, 1975; COREMI, 1992; Mango, 1992; Randall-Roberts, 1990; Randall-Roberts *et al.*, 1994). CVSG: Complejo volcánico-sedimentario Sierra de Guanajuato.

Mina <i>Sistema de vetas</i>	Estructura de las vetas <i>Dimensiones del cuerpo mineralizado</i>	Tipo de mineralización, roca encajonante y alteraciones hidrotermales
La Luz <i>La Luz</i>	Dirección 70° NW, bascula a 40° SW. 500 m de largo, 2 a 5 m de espesor, alturas de 2,300 a 1,950 m snm	Filones y brechas de calcita y cuarzo emplazados en rocas magmáticas jurásicas (Kdip) y en calizas de la formación Esperanza dentro del CVSG (Kcsg). Alteración silícica en vetas y propilítica extendida.
Valenciana <i>Veta Madre</i>	Dirección NW 50°, bascula a 60° al SW 1,000 m largo, 2 a 30 m de espesor, alturas de 2,300 a 1,700 m snm	Filones y brechas llenando fisuras. CVSG (Kcsg) al bajo, conglomerado Guanajuato (Tcgu) al alto Alteración silícica en vetas cubierta por argílica, propilítica extendida.
Cata <i>Veta Madre</i>	Dirección NW 50°, bascula a 60° al SW 600 m de largo, 2 a 30 m de espesor, alturas 2,250 a 1,800 m snm	Filones y brechas llenando fisuras. CVSG (Kcsg) al bajo, Conglomerado Guanajuato (Tcgu) al alto. Alteración silícica en vetas cubierta por argílica, propilítica extendida
Rayas <i>Veta Madre</i>	Dirección NW 50°, bascula a 60° al SW 1,400 m de largo, 2 a 30 m de espesor, alturas de 2,250 a 1,650 m snm	Filones y brechas llenando fisuras. CVSG (Kcsg) al bajo, Conglomerado Guanajuato (Tcgu) al alto, intrusivo de diorita en la veta. Metales base de 1,800 a 1,650 m snm con $Cu + Pb + Zn > 10\%$ Alteración silícica en vetas cubierta por argílica, propilítica extendida
Sirena <i>Veta Madre</i>	Dirección 55° SW, bascula a 45° al SW 600 m de largo, 2 a 30 m de espesor, altitudes de 2,300 a 1,800 m snm	<i>Stockwork</i> en andesita El Cedro (Tace) al alto, brechas y filones de cuarzo y calcita en Conglomerado Guanajuato (Tcgu) al bajo. Alteración silícica en vetas cubierta por argílica, potásica y propilítica extendida
Las Torres – Cedro <i>Veta Madre</i>	Dirección 60° NW, bascula a 40° SW; 2,375, 000 m <sup>3</sup> de materiales mineralizados. Stockwork al alto en Bufo (2,100–1,700 m snm) 2 a 40 m de espesor.	<i>Stockwork</i> y brechas. Conglomerado Guanajuato (Tcgu) en piso Riolita La Bufa (Trbu) al alto. Alteraciones potásica y propilítica
Monte de San Nicolás <i>La Sierra</i> <i>Veta Asunción</i>	Dirección 45° NW 2,350–2,100 m snm 2 a 5 m de espesor	Stockwork al alto 2,250–2,350 m snm en andesita El Cedro (Tace). Alteración silícica localizada en la veta, fílica y propilítica

las otras alteraciones. Se presenta muy localizada (máximo 20 m desde las grietas que canalizaron a los fluidos), deposita principalmente sílice y endurece a la roca favoreciendo la preservación de la mineralización dándole resistencia a la erosión (Randall-Roberts *et al.*, 1994). En la Tabla 1 se resumen las características de los principales cuerpos mineralizados que se encuentran en el distrito y se describen brevemente las características de cada sistema de vetas.

### Sistema de vetas La Luz

Las vetas del sistema La Luz son fallas pequeñas con tendencia NW 70° a 80° y otras fallas cruzadas. Las minas en este sistema son: La Luz, Bolañitos, Sirio, Golondrinos, San José y San Pedro Xilmonene. Se encuentran en un rango de profundidad de 2,300 a 1,700 m snm encajonadas en el miembro de caliza del CVSG (formación Esperanza) y en rocas intrusivas graníticas (Randall-Roberts *et al.*, 1994). Los yacimientos son filones y brechas (Antúnez, 1964) con leyes en la mina Bolañitos de 220 g Ag/t y 2 g Au/t (Mango, 1992). La mineralogía de ganga dominante es calcita y cuarzo, siendo la calcita en este sistema de vetas mucho más abundante que en las vetas de La Sierra y la Veta Madre (Antúnez, 1964). El tipo de alteración que presentan las rocas encajonantes es propilítica extendida, así como argílica y silícica muy localizada en la estructura de la veta (Mango, 1992).

### Sistema de vetas de La Sierra

Las principales minas son: Asunción, Monte de San Nicolás, Pasadena, Albertina, Peregrina y El Cubo, localizadas entre 2,300 y 1,800 m snm. Transversal a estas vetas se encuentra un yacimiento superior entre los 2,550 y 2,250 m snm con dirección NE con altos niveles de oro asociado localmente con domos riolíticos (Randall-Roberts, 1990). En la veta Asunción existe un *stockwork* que se compone de vetillas de cuarzo y calcita que varían desde pocos milímetros a 30 cm, el grosor de la veta es de 2 a 5 m (Randall-Roberts *et al.*, 1994).

### Veta Madre

Es una falla normal que tiene más de 30 km de largo y un desplazamiento vertical de al menos 1,000 m (Gross, 1975). Ha sido la más importante en cuanto a volúmenes de extracción y su estructura contiene a las minas (de noroeste a sureste): Copenhaguen, Cebada, San Elías, Guanajuatito, La Valenciana, Tepeyac, Cata, Rayas, Mellado, Garrapata, Aparecida, Sirena, Las Torres, Cedro, Purísima, Santo Niño y El Naylor.

Los filones en la veta Madre se encontraban principal-

mente en zonas de bonanza en las partes altas, emplazados en el Conglomerado Guanajuato al alto de la veta y en la formación Esperanza al bajo (Antúnez, 1964). Las brechas se encuentran muy comúnmente en la zona central de la Veta Madre, en los yacimientos bajo y profundo, y se relacionan con la cercanía a la fuente de calor (Mango, 1992). En la mina de Rayas se explota el llamado yacimiento profundo (1,650 – 1,800 m snm) donde se encuentran leyes hasta de 6 a 20 g/t de Au y 2,000 g/t de Ag (SCMMSFG, 2002).

Los principales yacimientos de tipo *stockwork* se ubican en la mina La Sirena donde la roca del piso es el Conglomerado Guanajuato y está encajonada por la Arenisca Calderones, y en la mina Las Torres dentro de la Riolita La Bufa donde la anchura de la veta varía desde pocos centímetros hasta 40 m (Randall-Roberts *et al.*, 1994).

## HISTORIA DE PRODUCCIÓN EN EL DISTRITO DE GUANAJUATO Y PROBLEMÁTICA DE LA GENERACIÓN DE RESIDUOS

No se tiene documentada la cantidad de material que se ha removido de las vetas ni las condiciones geológicas de los yacimientos explotados, ya que esta información ha sido de poco interés para las compañías mineras que sólo llevan registro de las leyes y volúmenes de oro y plata, y en ocasiones de cobre, extraídos. En la Figura 4 se muestra la producción anual de plata en el Distrito de Guanajuato de 1550 a 1986 (datos compilados de Antúnez, 1964; Humboldt, 1822; Galindo-Montiel, 1993; Jáuregui de Cervantes, 1998 y SCMMSFG, 2002).

Aunque se sugiere que hubo actividad minera en tiempos prehispánicos (Antúnez, 1964), no se han encontrado evidencias en campo de la extracción de minerales en tales épocas. En 1548, los españoles iniciaron la explotación utilizando el método de fundición (Antúnez, 1964). Los minerales de oro y plata se encontraban en la superficie y la extracción se limitó a las zonas de bonanza dentro de las vetas (Antúnez, 1964). En 1556 se instauró el sistema de extracción de patio por amalgamación con mercurio en frío, que en 1554 descubrió Bartolomé de Medina en Pachuca (Humboldt, 1822). Para la amalgamación se utilizaron materiales con buenas leyes y algunos millones de toneladas de minerales se segregaron físicamente y se depositaron como material de baja ley en terreros. Debido a que este método sólo recuperaba las partículas de oro y plata, casi la totalidad del material procesado era arrojado como lodos residuales a las corrientes naturales justo debajo de las plantas de beneficio (Fernández, 1879). En la ciudad de Guanajuato existieron aproximadamente 45 haciendas de beneficio por amalgamación, las cuales se encontraban en el margen del río Guanajuato (Jáuregui de Cervantes, 1998).

No fue sino hasta 1726 que se introdujo el uso de la dinamita y durante los 176 años previos se utilizó el método

de "lumbradas". Se calentaban las rocas con leña y se enfriaban súbitamente para que se resquebrajaran. De 1548 a 1726 se movieron principalmente menas en zonas de bonanza someras donde parte de los sulfuros se encontraban oxidados (Antúnez, 1964). El uso de dinamita permitió la explotación de cuerpos profundos. A partir de 1726 y hasta 1800 las minas de la parte central de la Veta Madre (La Valenciana, Cata y Rayas) se encontraron en bonanza y se trabajó a más de 400 m de profundidad (Jáuregui de Cervantes, 1998). Al iniciar la guerra de independencia todas las minas del distrito excepto Rayas fueron destruidas y se inundaron. La inundación de los niveles de explotación en las minas ha sido siempre un problema que limita la extracción. El agua de las minas fue desalojada completamente después de que se introdujo capital inglés en 1824 y se desplazó el malacate de sangre, cuya fuerza motriz eran caballos, por el malacate de vapor, tanto para sacar el agua como las cargas de mineral en los tiros (Antúnez, 1964).

Tanto Humboldt (1822) como Butzer y Butzer (1997), en una compilación sobre el cambio de las condiciones en

el paisaje del Bajío Mexicano en los siglos XVII y XVIII hacen mención de inundaciones desastrosas y numerosas muertes producidas en 1760 y de 1770 a 1804 provocadas por el vaciado indiscriminado de los residuos a los cauces del río. En 1828, el río se azolvó y fue limpiado y nuevamente se azolvó en 1830, lanzándose un decreto que prohibía el vaciado de los residuos en el río. Sin embargo, nuevamente en 1867, 1873 y 1883 ocurrieron inundaciones catastróficas ocasionadas por azolvamiento del río (Antúnez, 1964).

De 1840 a 1860 hubo una bonanza en La Luz, zona donde primero se implantó el método de cianuración, aproximadamente en 1904. Este método de beneficio permitió la utilización de materiales de menor ley y un incremento notable de la producción. A partir de 1905 todas las haciendas de beneficio utilizaron cianuración (Antúnez, 1964).

En 1905 se creía que ya se habían agotado las vetas en el distrito, y de 1905 a 1930 toda la producción se sostuvo por el aprovechamiento de sedimentos en el río, de terreros y de materiales que anteriormente se usaron como retaques

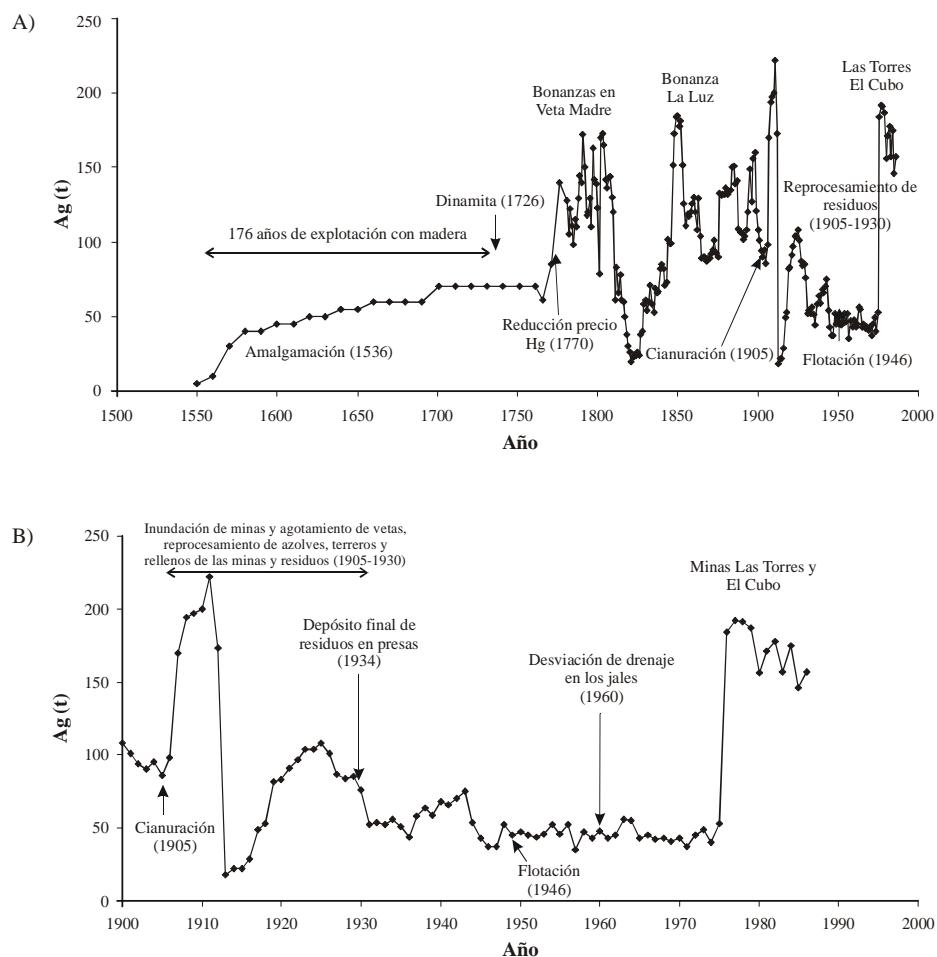


Figura 4. Producción de plata en el Distrito de Guanajuato. A) De 1550 a 1986. B) De 1900 a 1986. No se cuenta con datos de producción antes de 1750, se estiman tendencias a partir de datos de Humboldt (1824), Mango (1992) y SCMMMSFG, 2002).

en las minas. A estos minerales considerados de "baja ley" se les dieron por lo menos tres tratamientos por cianuración debido a sus leyes altas,  $> 2 \text{ g/t}$  de oro (Archivo General de la Nación, 1934). Por ejemplo, de 1925 a 1928 se trabajaron en la Veta Madre tres millones de toneladas de retaques que tenían leyes de 170 a 200 g Ag/t y 1.5 a 3 g Au/t. Anteriormente sólo se extraía material de zonas de bonanza con valores mayores a varios kilos de Ag/t y donde el oro era apreciado fácilmente por la vista (Wandke y Martínez, 1928).

Los residuos de la cianuración también fueron vaciados a las corrientes naturales sin ninguna precaución, y en 1934 el río Guanajuato nuevamente se azolvó casi completamente ocasionando problemas en el desagüe de la ciudad (Antúnez, 1964). Con el fin de disminuir riesgos de inundaciones, en 1934 se construyeron las primeras estructuras conocidas como "presas de jales". Tan sólo entre 1934 y 1944 fueron depositados más de dos millones de toneladas de jales en la zona de Pozuelos, al sur de la Ciudad (Guiza *et al.*, 1949). En 1946 se implementó el método de flotación *bulk* que es el que se utiliza en la actualidad (Archivo General de la Nación, 1947). Este método consiste en la recuperación de todas las fases de sulfuros utilizando reactivos (xantatos) que rompen la tensión superficial de los granos de tal manera que los sulfuros flotan al estar en contacto con burbujas de aire.

En los jales de cianuración no se realizaban obras para desviar el drenaje de la cuenca de depósito y las estructuras podían ser erosionadas por las lluvias. Pero los mecanismos de construcción de las presas de jales han cambiado con el tiempo, y desde 1946 las presas de jales se construyen por el método de aguas arriba aprovechando las fuertes pendientes y se realizan obras para desviar el drenaje de la cuenca de depósito.

De acuerdo a la producción en el distrito en 1994 puede establecerse que en ese tiempo tres compañías mineras depositaban más de 3,000 t/día en presas de jales (Randall-Roberts *et al.*, 1994). Actualmente sólo operan dos compañías mineras y el depósito de residuos ha disminuido a menos de 2,000 t/día.

## POSIBLES ESCENARIOS GEOQUÍMICOS PARA LOS JALES

### Oxidación y erosión preminería

Una vez que se formaron los yacimientos epitermales, hace aproximadamente 28 millones de años (Mango, 1992), tanto los cuerpos mineralizados como las rocas encajonantes se erosionaron de manera diferencial. Las rocas que presentan alteración silícica tuvieron gran resistencia a la erosión por estar endurecidas. El sistema de vetas La Sierra se encuentra topográficamente arriba en comparación con las vetas La Luz y Veta Madre debido a la alteración silícica extendida que presentan las vetas de La Sierra (Randall-

Roberts *et al.*, 1994).

Las rocas en el Distrito de Guanajuato, así como los yacimientos, se han erosionado por lo menos 200 m (Randall-Roberts *et al.*, 1994) y el material arrastrado fue el de zonas de bonanza si se considera que a niveles topográficos altos hay leyes mayores (Buchanan, 1979). Vale la pena, al menos como idea de exploración geoquímica, considerar que estos minerales económicos deben encontrarse gradiente abajo en los rellenos aluviales del Bajío y que los pies de monte posiblemente contengan clastos con buenas leyes de oro y plata.

La extracción de minerales económicos alojados en fisuras ha producido oquedades que pueden almacenar miles de metros cúbicos de agua, dando lugar a que los flujos subterráneos sean controlados por la estructura de las obras mineras. El hecho de que la evaporación (2,000 mm) sea mucho mayor que la precipitación (671 mm) y considerando que la topografía no permite niveles freáticos someros, es de esperar que la zona de oxidación haya sido profunda.

### Estimación de las cantidades de material removido y volúmenes de residuos

Con el fin de plantear cantidades máximas y mínimas de los materiales que han sido removidos de las vetas, se desarrollan cálculos basados en volúmenes de la producción de oro en el distrito y las leyes promedio de los yacimientos. Los datos más confiables de la producción total de oro los proporciona Mango (1992): desde 1560 hasta 1990 se recuperaron 34,850 t de plata y 175 t de oro. En el año de 1976, cuando entró en operación la Compañía Minera Las Torres explotando un yacimiento de *stockwork* (cerró sus operaciones en Septiembre de 2003), se elevó notablemente la producción del distrito; de 1976 a 1990 se producían en el distrito 2 t anuales de oro (Galindo-Montiel, 1993). Si se considera que esta tendencia anual (2 t de oro) se ha mantenido, entonces de 1991 a 2002 se recuperaron 22 t de oro que aunadas a las 175 que se trajeron de 1560 a 1990 dan un total de 197 t de oro. Esta cifra puede cerrarse a 200 t de oro para simplificar los cálculos.

Para proponer un volumen máximo de residuos se toma como ley mínima de Au en los yacimientos 1 g/t y para un volumen mínimo se considera la ley promedio de las zonas de bonanza de 20 g/t (Querol *et al.*, 1988). Asumiendo conservadoramente que los residuos representan 95% del material procesado, puede estimarse que a lo largo de toda la historia de extracción se han generado un mínimo de 6.33 Mt de residuos y un máximo de 190 Mt. La cifra mínima es muy baja y lejana de la realidad debido a que las zonas de bonanza son muy localizadas. Si se considera una ley promedio 2 g/t para el material que se ha removido a lo largo de la historia, entonces la cantidad de residuos generada sería de aproximadamente 95 Mt.

Dispersos en el área del distrito existen más de 40

depósitos de residuos entre jales y terreros, además de sedimentos de jales de amalgamación en el lecho del río Guanajuato. Los terreros que anteriormente se consideraron material de baja ley han sido y son aprovechados debido a que la “baja ley” fue consecuencia de la baja recuperación del oro que obtenían cuando se aplicó el método de amalgamación. En el valle de Santa Teresa existen aproximadamente 20 Mt de sedimentos de jales que se están considerando como un yacimiento potencial de oro (contiene leyes de 0.3 g Au/t) y que en algún momento pueden ser reprocesados (COREMI, 1992).

Considerando un promedio de 95 Mt de residuos y los 20 Mt que al menos existen como sedimentos en el río Guanajuato, en el área del Distrito de Guanajuato hay aproximadamente 75 Mt de residuos como jales y material considerado de baja ley. Esta cifra tal vez resulte alta si se toma en cuenta el reprocesamiento de algunos jales y terreros, sin embargo se han propuesto cifras aún más altas. Por ejemplo Carrillo *et al.* (2003) proponen que en un área de 100 km<sup>2</sup> alrededor de la ciudad de Guanajuato existen 150 Mt de residuos entre jales y terreros. Para dar cifras más confiables de los volúmenes de residuos, de tal forma que sea posible contrastarlos con los datos que sugiere la historia de producción, se debe desarrollar una cartografía de los residuos, tanto de los depósitos de jales, los terreros con baja ley y de los sedimentos gradiente abajo de las haciendas de beneficio por amalgamación.

Son muy pocos los estudios desarrollados para conocer el impacto al ambiente que han tenido los residuos mineros en la zona. Rydgway *et al.* (1995) analizaron muestras de sedimentos sobre bancos de inundación en la región, y observaron que en los ríos Guanajuato y El Cubo (afluentes del río Lerma) los niveles de metales pesados (As, Cu, Pb y Zn) son de 5 a 10 veces mayores que en sedimentos del río Laja (también afluente del Lerma), donde las actividades mineras son mínimas en comparación con las otras dos subcuencas. Ramos-Posada *et al.* (1994) realizaron estudios en sedimentos de los afluentes del río Lerma con el fin de comparar niveles de metales pesados en sedimentos, reportando para el río Guanajuato un enriquecimiento respecto a los niveles medios de la corteza de 65 veces para plata y de 139 veces para cobre.

### Procesos de beneficio y tipos de residuos

Las propiedades de los residuos mineros son un reflejo de la mineralogía del yacimiento y son influidas por los tratamientos de extracción a que fueron sometidos los minerales. En la Tabla 2 se resumen las características de los residuos según los sistemas de beneficio utilizados.

#### Fundición

La fundición se utilizó en menas de zonas de bonanza donde los minerales podían separarse fácilmente. Se utilizaba óxido de plomo para recuperar oro y plata. De

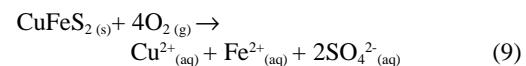
1548 a 1905, la fundición aportó aproximadamente la cuarta parte de la plata recuperada en Guanajuato (Antúnez, 1964). Este método se sigue utilizando con algunas variantes si se tienen muy buenas leyes dentro de los yacimientos. Los residuos son escorias vitrificadas con muy bajo potencial de toxicidad.

#### Amalgamación

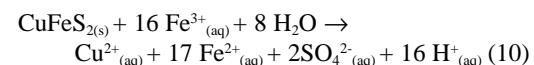
El método de patio o amalgamación con mercurio se aplicó durante 348 años, de 1556 a 1905. Tenía como base la disolución de minerales de oro y plata favorecida por los iones cloruro y cúprico, y la formación posterior de una amalgama de esos elementos al entrar en contacto con mercurio (Johnson y Whittle, 1999).

Los minerales se molían en húmedo por varios días, se agregaba una mezcla de sal común y magistral (calcopirita “reverberada” u oxidada que formaba sulfato de cobre) y se dejaban en contacto con una capa de mercurio que previamente se había extendido en un piso circular. Antúnez (1964) propone que se usaban 2.51 kg de sulfato de cobre por tonelada de minerales tratados. Cuando la amalgama se saturaba de oro y plata, ésta era removida y el mercurio se recuperaba por destilación. El oro se separaba del concentrado disolviendo la plata en ácido sulfúrico, operación que se realizaba en la casa de moneda (Fernández, 1879).

Aunque no existen evidencias documentadas de que la amalgamación liberó acidez durante el tratamiento, el proceso llamado de reverberación se refiere a la oxidación de la calcopirita para producir el magistral (sulfato de cobre), sustancia esencial para la formación de la amalgama. Bajo las condiciones que existían en las vetas debido a la presencia de calcita, la calcopirita inicialmente debió oxidarse a través de la reacción con oxígeno (Plumlee, 1999):



En medio ácido (posiblemente de manera local se oxidaron también granos de pirita y en ausencia de calcita) el agente oxidante es el ion férrico, que produce protones:



Sin embargo si es que hubo generación de acidez cuando se “reverberaba” la calcopirita, quizás fue neutralizada por los carbonatos que también eran molidos.

La eficiencia de la amalgamación era muy baja, principalmente debido al método de molienda que dejaba granos muy grandes, con el 50% de las partículas de tamaños mayores a 250 µm (Fernández, 1879). Debido a que la eficiencia en la recuperación era notablemente mayor cuando el oro se encontraba en estado libre (75 %) que cuando estaba asociado con sulfuros (menos del 40 %), parte de las menas también eran oxidadas o “reverberadas”

Tabla 2 Características de los diferentes tipos de residuos según los procesos de beneficio utilizados en el Distrito de Guanajuato (compilación de Antúnez, 1964, Fernández, 1879, SCMMSFF, 2002). EPT: Elementos con potencial tóxico.

Atributo	Tipo de residuo según el método de beneficio			
	Fundición	Amalgamación	Cianuración	Flotación bulk
Leyes requeridas	Muy altas, sólo en zonas de bonanza	Antiguamente sólo se trataban materiales con > 1 kg Ag/t	Depende del <i>cutoff</i> Generalmente > 0.3 g Au/t	Au > 1 g/t Ag > 100 g/t FeS <sub>2</sub> > 1 %
Reactivos e implementos	Madera Litargirio (PbO)	Azogue 1 lb Hg/lb Ag CuSO <sub>4</sub> , 2.51 kg/t	NaCN 1.5 a 2.7 g/t CaO 4 a 6 kg/t pH 10	Amil-xantato de Na Glicoles, pH 7.6
Volumen de residuos	Del 50 al 90 % del original	Más del 99 % del original	Más del 99 % del original	Del 95 al 99 % del original, según los contenidos de FeS <sub>2</sub>
Extensión y movilidad de los residuos	Escorias muy localizadas espacialmente	Vertidos directamente al río, arrastrados y depositados en zonas de baja energía.	Depositados en presas a las que no se desvió el drenaje natural, fuertemente erosionados y arrastrados por más de 5 km	Depositados en presas donde se desvió el drenaje natural, erosión hídrica controlada y eólica intensa si no se recubren
Potencial de generación de acidez y liberación de EPT	bajo, escorias vitrificadas	Durante el tratamiento muy alto. Actualmente depende de la concentración de sulfuros residuales	Durante el tratamiento muy alto. Actualmente depende de la concentración de sulfuros residuales	Depende de la pirita residual y de la calcita en la ganga, generalmente es bajo
Condiciones de humedad y aireación	Materiales encapsulados no permeables	Depende de las condiciones del ambiente sedimentario	Grano grueso, 50 % > 0.2 mm Fáciles de drenar y bien aireados	Normalmente 80 % a -100 mallas. Dos escenarios extremos: <i>Proximal</i> : bien aireado y baja capacidad de retención de humedad (CRH) <i>Distal</i> : mal aireado y alta CRH

para liberar el oro de los sulfuros (Antúnez, 1964).

La amalgamación produjo 26,408 t de plata y durante el proceso se iba con los residuos al menos una cantidad equivalente de mercurio (Antúnez, 1964). Una cantidad preliminar estimada del mercurio liberado en el Distrito de Guanajuato es de 20 a 30 mil toneladas, el cual posiblemente se encuentre en los sedimentos gradiente abajo de las haciendas de beneficio. Johnson y Whittle (1999) estiman que en el territorio de México se liberaron más de 100,000 t de mercurio cuando se aplicó el método de patio. Considerando que todo el mercurio extraído en Almadén, España, de 1570 a 1820 fue utilizado en las minas de México, Camargo (2002) propone que fueron 117,000 t, mientras que Nriagu (1994) sugiere que fueron 126,000 t.

Debido a que los residuos fueron vaciados sin ningún control, todos los jales de amalgamación en el distrito se encuentran como sedimentos en el río, a menos que hayan sido removidos y explotados por cianuración como ocurrió de 1905 a 1930.

### Cianuración

La cianuración se aplicó en todo el distrito de 1905 a 1946. La molienda no cambió mucho y el método de molienda dejaba más del 50 % de los granos con tamaño

mayor a 200  $\mu\text{m}$  (Antúnez, 1964). Los jales que resultaron de la cianuración fueron vaciados al cauce del río hasta 1934, posteriormente se depositaron en presas de jales. Todos los jales de cianuración fueron construidos sin considerar obras de desviación del drenaje de la cuenca de depósito y son susceptibles a ser erosionados. El tamaño de grano favorece la difusión de oxígeno y percolación de humedad y los sulfuros posiblemente se encuentran oxidados. Al igual que con el mercurio en el proceso de amalgamación, no existen evidencias de las posibles afectaciones al ambiente por el cianuro liberado. Actualmente menos del 20% de los minerales extraídos en el distrito se procesan por cianuración.

### Flotación "bulk"

La flotación *bulk* se implantó en el distrito desde 1946 (Archivo General de la Nación, 1947) y se emplea para recuperar las fases de sulfuros, principalmente la pirita. Los residuos de flotación en el Distrito de Guanajuato se encuentran empobrecidos en sulfuros respecto a la mena de origen, sin embargo se encuentran varios millones de toneladas de estos jales que pueden representar un riesgo al ambiente.

La Sociedad Cooperativa Minero Metalúrgica Santa

Fé de Guanajuato (SCMMSFG) utiliza actualmente en su planta de beneficio de 25 a 50 g por tonelada del espumante polipropilenglicol así como de 35 a 50 g/t del colector amil-xantato de potasio; el proceso se realiza a un pH entre 7.5 y 8. Ocasionalmente se agrega metasilicato de sodio (10 g/t) para deprimir a la sílice (SCMMSFG, 2002). La flotación tiene una eficiencia promedio de recuperación de 85 % de piritita, 87.5 % de oro, 88.6 % de plata y 47.4 % de cobre; el material que no flota (más del 95 % del original) es enviado al depósito de jales (SCMMSFG, 2002).

La molienda es un factor muy importante. Por ejemplo, la SCMMSFG muele el material dejando el 80% a un tamaño menor que 100 mallas (250 micras), y en los molinos se tiene un desgaste de las bolas del molino de 2.6 kilos de hierro-bola por tonelada de material molido; este material termina también en los depósitos de jales (SCMMSFG, 2002). La Compañía Minera Las Torres explotaba un yacimiento de *stockwork* donde el tamaño de los granos de sulfuros es pequeño y molía para obtener 80% del material a un tamaño < 200 mallas (125 micras).

Los jales de flotación presentan alta variabilidad espacial en sus propiedades, siendo el principal factor de control el origen geológico, ya que las compañías mineras establecidas en el distrito explotan más de una mina con diferentes condiciones de oxidación. Otra fuente de variabilidad es el método de “aguas arriba” por el que se han construido los jales rellenando las cañadas. Durante el depósito se desarrolla una clasificación textural: las partículas gruesas sedimentan cerca de la cortina de retención, donde se vacían los lodos, mientras que las arcillas migran en suspensión hacia los extremos distales. Los reactivos dispersantes utilizados en la flotación favorecen una estratigrafía muy compleja, alternándose capas menores de 5 a 1 cm de espesor con texturas arenosas y arcillosas en cada etapa de depósito. Los estratos arenosos y las zonas proximales tienen alta permeabilidad y se encuentran bien aireados favoreciendo condiciones oxidantes, mientras que en las zonas distales se estanca el agua en la superficie y esto puede favorecer condiciones reductoras (Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach, 1998). Algunas presas de jales pueden considerarse yacimientos potenciales de oro y plata, en el Distrito de Guanajuato contienen de 0.15 a 0.54 g Au/t y de 14 a 42 g Ag/t (Ramos-Ramírez, 1991); si el precio del oro y de la plata suben o si se desarrollara un método metalúrgico relativamente barato, estos jales podrían ser reprocesados.

### Hipótesis sobre el potencial de generación de acidez en los jales y las rocas

Puede estimarse la capacidad de neutralización neta de acidez (CNNA) en los jales cuantificando los moles de minerales generadores de acidez (sulfuros haciendo una especiación de azufre) y los moles de minerales con capacidad de neutralización o los carbonatos (White *et al.*,

1999). Se asume que la piritita se encuentra en contacto con la calcita y que las reacciones de oxidación y neutralización ocurren simultáneamente, según la ecuación (6).

Se observa que se requieren al menos dos moles de calcita para neutralizar la acidez que genera la oxidación de un mol de piritita. Sin embargo, Dold (1999) argumenta que la neutralización se efectúa a pH cercano a la neutralidad, y que la especie dominante es bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) y no carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) como asume la ecuación 6. Debido a que el bicarbonato sólo neutraliza un protón y la oxidación por oxígeno genera cuatro moles de protones (ecuación 1) se requieren 4 moles de calcita para neutralizar la acidez que genera la oxidación de un mol de piritita (Dold, 1999).

Ramos-Ramírez (1991) con base en la reconstrucción mineralógica de una muestra de jales de flotación proveniente de la zona central de la Veta Madre, propone una concentración de 1.85 % de piritita y 7.12 % de calcita. Tomando como base de cálculo una tonelada de material, habrá 712 moles de calcita y 153 moles de piritita; por lo tanto, aún si se consideran 4 moles de calcita para estimar la CNNA como plantea Dold (1999), habría un residual de 100 moles de calcita que mantendría el pH de neutro a alcalino si toda la piritita se oxidara.

Los datos propuestos por Ramos-Ramírez (1991) fueron obtenidos de una muestra compuesta cuyas submuestras provienen de la mezcla de muestras colectadas a lo largo de un mes durante 1989 de lodos residuales enviados a la presa de jales Valenciana-7 de la SCMMSFG. Debido a que cada mina se encuentra emplazada en diferente litología y con alteraciones hidrotermales características, el contenido de piritita y calcita en los jales es consecuencia de los porcentajes de estos minerales en el material que se explotaba en cada mina durante el transcurso del muestreo.

Al menos en la superficie, los jales del Distrito de Guanajuato tienen alta variabilidad espacial (Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach, 1998), por lo que es necesario tomar en cuenta los escenarios identificados en campo para plantear una estrategia de muestreo para distinguir los valores extremos de la CNNA y de potencial de liberación de EPT en función de la procedencia dentro de los yacimientos.

Carrillo *et al.* (2003) concluyen que los jales del Distrito de Guanajuato son geoquímicamente estables y que debido a la alta relación de carbonatos/sulfuros (12/1), los jales no generan acidez. Sin embargo, no toman en cuenta la variabilidad espacial ya que no describen los sitios dentro de los jales donde se colectaron las muestras y no hacen un contraste entre las zonas arenosas y arcillosas. Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach (en preparación) describen la presencia de condiciones ligeramente ácidas (pH=5) en algunos horizontes de jales con más de 70 años de exposición a la atmósfera (Pozuelos), que sugieren que a plazos mayores a 100 años algunos jales pueden presentar acidificación. Los jales de Pozuelos provienen de la cianuración de sedimentos del río Guanajuato.

En la Figura 5 se muestra un corte transversal

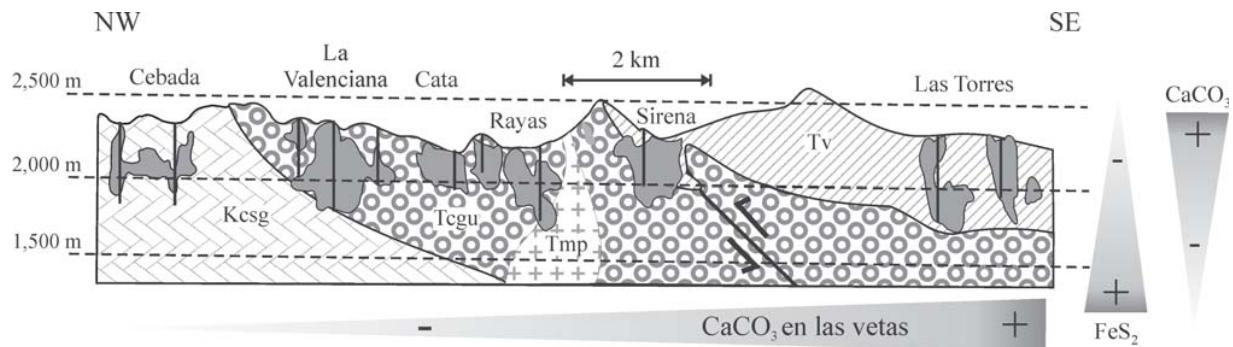


Figura 5. Sección transversal de la zona central de la Veta Madre resaltando la distribución de calcita y pirita, exageración vertical 2X. Las claves de la litología se definen en Figura 3. Tmp: intrusivo Peregrina.

idealizado de la parte central de la Veta Madre para comparar los contenidos de pirita y calcita en función de la profundidad y del tipo de roca encajonante. Los factores que controlan la concentración de pirita en las vetas son:

a) Tipo de mena. Se tiene un incremento a profundidad en el contenido de pirita y otros sulfuros (Buchanan, 1979; Randall-Roberts *et al.*, 1994). Según la mena, los contenidos de sulfuros siguen la tendencia: filones > brechas > stockwork (Mango, 1992). Las asociaciones entre sulfuros determinan su potencial de reactividad, por ejemplo Cruz *et al.*, (2001a, 2001b) demostraron a través de estudios electroquímicos que el contacto de sulfuros con diferente potencial de oxidación controla la reactividad de la pirita, promoviendo la oxidación o inhibiéndola. Además son muy importantes las relaciones texturales entre sulfuros y minerales con baja tasa de intemperismo como cuarzo y feldespatos.

b) Condiciones de oxidación naturales. Parte de los sulfuros se han transformado en las menas oxidadas y la capacidad de generación de acidez dependerá de la presencia de minerales secundarios que al disolverse liberan protones (Dold, 1999).

c) Proceso de beneficio. El tamaño de grano de la molienda determina la exposición de los sulfuros a los agentes atmosféricos y controla los aportes de agua y oxígeno. En los procesos de amalgamación y cianuración el material era molido a grano grueso y sólo la fracción de los sulfuros que resultaron expuestos se ha oxidado. La flotación requiere que los sulfuros se encuentren libres para el contacto con los reactivos, y debido a esto la molienda se ajusta al tamaño de los granos que contienen oro y plata para liberarlos de las matrices de cuarzo y feldespato en que puedan encontrarse encapsulados.

El contenido de calcita en los jales es función de su concentración en la ganga y se relaciona con la alteración hidrotermal de las rocas encajonantes. En la Tabla 3 se presenta un resumen de los tipos de alteración que se presentan en el Distrito de Guanajuato y su influencia tanto en la generación como en la neutralización de acidez. El único tipo de alteración hidrotermal que favorece la capacidad de neutralización de acidez es la propilítica, que se encuentra muy extendida, por más de 10 km desde el centro de la veta. Este tipo de alteración es más fuerte en rocas de composición máfica como en el CVSG y en los

Tabla 3. Relación del tipo de alteración hidrotermal y las características de las rocas. CGA: capacidad de generación de acidez, CNA: capacidad de neutralización de acidez (adaptada de Plumlee, 1999).

Tipo de alteración	Productos	Efectos químicos	Efectos físicos	Ubicación en la zona
Argílica	Caolinita, ilita, montmorilonita, pirita, clorita	Disminuye CNA Aumenta CGA	Disminuye la permeabilidad en las fracturas por arcillas	En el primer metro en las vetas
Fílica	Cuarzo, sericita, pirita	Aumenta CGA	Disminuye la permeabilidad en rocas y fracturas	Principalmente en intrusivo Peregrina
Potásica	Feldespato potásico, biotita	Grano grueso del feldespato disminuye reactividad	Disminuye permeabilidad	Principalmente en Riolita La Bufa
Propilítica	Calcita, clorita, pirita epidota	Aumenta CNA	Disminuye permeabilidad	Muy extendida > 10 km desde el centro de las vetas
Silícica	Cuarzo	Disminuye CNA	Disminuye permeabilidad y aumenta la dureza	Localizada en las vetas, en veta La Sierra extendida

intrusivos Mesozoicos (Mango, 1992). La concentración de calcita varía desde niveles bajos en las minas del norte (Cebada, La Valenciana, Cata y Rayas) hasta ser el mineral de ganga dominante en la mina Las Torres, localizada al sur (Randall-Roberts *et al.*, 1994).

Las rocas que afloran en el distrito tienen concentraciones bajas de calcita y pirita, salvo la formación Esperanza, que es el miembro de caliza del CVSG. Por naturaleza, tanto el Conglomerado Guanajuato como las rocas volcánicas no contienen carbonatos, a menos que presenten alteración propilítica. El CVSG tiene variaciones estratigráficas fuertes respecto a los contenidos de calcita y pirita; en esta unidad se encuentran pizarras negras y dos yacimientos de sulfuros masivos (con altas concentraciones de pirita y metales base), que localmente tienen alta capacidad de generación de acidez, así como calizas. No se ha desarrollado aún una cartografía detallada de esta unidad considerando las distintas litologías y el potencial de generación y neutralización de acidez.

Como ejemplo de la explotación histórica de las vetas se muestra un corte de la parte central de la Veta Madre en la Figura 6. En la parte alta se encuentra lo que fue una zona de oxidación preminería, en la mina Mellado, donde se movieron las primeras toneladas de mineral entre 1550 y 1700 (Antúnez, 1964). Sólo se explotaron las zonas de bonanza y se depositó material de muy buena ley como terreros, los que se oxidaron y actualmente están siendo procesados. Las obras mineras propiciaron la percolación de agua y aire, oxidando parte del cuerpo conocido como San Vicente, el cual ha explotado desde 1700 a la actualidad; los minerales en este yacimiento tienen bajas concentraciones de pirita (SCMMSFG, 2002). La mina de

Tabla 4. Cantidad de pirita y calcita según cada veta y zonas dentro de la Veta Madre (VM). CVSG: Complejo volcánico-sedimentario Sierra de Guanajuato.

Veta	Tipo de mena y encajonante	FeS <sub>2</sub> (%)	CaCO <sub>3</sub> (%)
La Luz	Filón en calizas y volcánicas	1 – 5	> 25
La Sierra	Brechas y <i>stockwork</i> en andesitas	1 – 5	5 – 10
VM centro somero Oxidación	Filón en Conglomerado Guanajuato y CVSG	0 – 5	5 – 10
VM centro profundo	Brechas en Conglomerado Guanajuato y CVSG	1 – 10	5 – 10
VM sur	<i>Stockwork</i> en riolita	1 – 5	10 – 20

Rayas se encuentra en una zona no oxidada salvo cerca de las oquedades, además los niveles de inundación han variado a lo largo de la historia provocando ciclos de oxidación y reducción de las menas. La parte más profunda, un yacimiento de metales base asociado a un pórfito de monzonita contiene materiales con altas concentraciones de sulfuros contenido hasta 10 % de pirita (SCMMSFG, 2002).

En la Tabla 4 se proponen los porcentajes de pirita y calcita en los tres sistemas de vetas y en las zonas dentro de la Veta Madre: en el centro de la veta (VMC) en las minas de La Valenciana Cata y Rayas (VMC profundo), en la zona somera de la parte central en la mina San Vicente (VMC somero) y en la mina Las Torres en la porción sur de la veta (VMS). Se propone que según su origen, los jales resultantes tendrán el orden relativo de cantidades de pirita: VMC profundo (1 a 10 %) > La Sierra (1 a 5 %) ≈ La Luz (1 a 5 %) > VM sur (1 a 5 % en un *stockwork*) > VMC somero (0–5 %, según la oxidación de la mena). Para los contenidos de calcita: La Luz (más del 25 %) > VM sur (10 a 20 %) > La Sierra (5 a 10 %) ≈ VMC somero (5 a 10 %) ≈ VMC profundo (5 a 10 %).

Puede plantearse también un orden relativo de la CNNA (razón estequiométrica de calcita respecto a pirita para neutralizar la acidez generada) que tendría cada yacimiento: La Luz > VM sur > VMC somero ≈ La Sierra ≈ VMC profundo. Los jales que provienen de las zonas bajas de los yacimientos pueden tener capacidad de generación de acidez debido a los altos contenidos de sulfuros en la mena, siendo la cantidad de calcita presente en la ganga (dependiente del tipo de alteración hidrotermal en cada sección del yacimiento) el factor que controlará la generación de acidez.

## CONCLUSIONES

La compilación de la historia de extracción en un distrito minero es muy útil para plantear hipótesis sobre los escenarios ambientales que pueden presentarse. En el

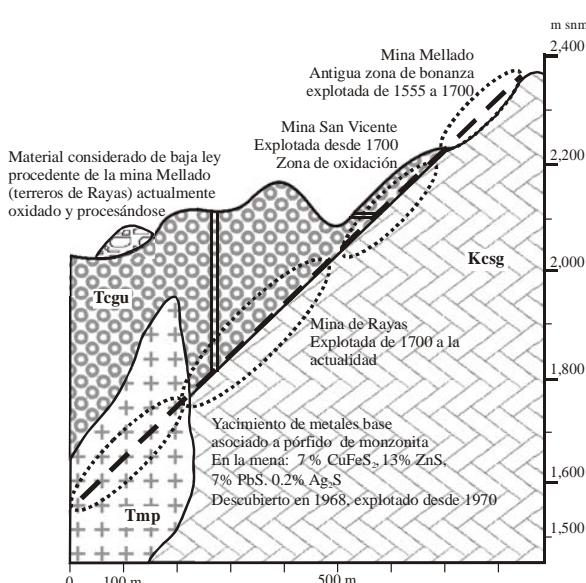


Figura 6. Corte transversal a lo largo de la Veta Madre, en la zona de las minas Mellado, San Vicente y Rayas, mostrando las diferentes épocas de extracción, los óvalos representan las zonas donde se extrajo mineral. Las claves como en Figura 3. Tmp: intrusivo Peregrina.

Distrito de Guanajuato se han generado aproximadamente 95 Mt de residuos provenientes de vetas epitermales, algunos jales pueden tener capacidad de generar acidez y liberar los EPT que contienen (As, Cd, Cu, Pb, Se y Zn de las vetas) además de Hg por la amalgamación y cianuro.

El vertido de los jales de amalgamación al río Guanajuato ocasionó muchas inundaciones catastróficas además de que la posible presencia de EPT y mercurio residual pueden provocar impactos adicionales.

Los residuos de cianuración fueron vaciados al río de 1895 a 1934, hasta que se construyeron los primeros depósitos de jales, sin embargo entre 1934 y 1946 no se contemplaron obras de desviación del drenaje natural y estas estructuras pueden estar fuertemente erosionadas. Comparativamente, los jales de flotación construidos desde 1946 sí consideraron la desviación del drenaje en las cuencas de depósito.

Trabajos preliminares muestran que los jales no han presentado hasta ahora liberación de acidez debido la presencia de una mayor cantidad de calcita respecto a pirita. La presencia de pirita y calcita en las rocas depende del tipo de alteración hidrotermal. La alteración argílica, que se encuentra muy localizada en las vetas, aporta pirita, mientras que la ateración propilítica, que se encuentra muy extendida en el distrito, es el único tipo de alteración que aporta calcita y favorece a la capacidad de neutralización de acidez.

El contenido de pirita en cada veta es variable, y se ha observado que los contenidos en las vetas siguen el orden relativo: VMC profundo > La Sierra ≈ La Luz > VM Sur > VMC somero.

Las rocas en el distrito no contienen calcita, salvo aquéllas propilitizadas y las calizas de la formación Esperanza en el CVSG. El contenido de calcita varía desde concentraciones bajas en las minas del norte (Cebada, La Valenciana, Cata y Rayas) hasta ser el mineral de ganga dominante en la mina Las Torres, localizada al sur. El orden relativo de concentración de calcita es: La Luz > La Sierra ≈ Veta Madre Sur > Veta Madre Centro. Es posible plantear el siguiente orden relativo de la capacidad de neutralización neta de acidez de acuerdo al yacimiento: La Luz > Veta Madre Sur > Veta Madre centro somero ≈ La Sierra ≈ Veta Madre centro profundo. Los jales que tienen como origen las partes bajas de los yacimientos son los que tienen mayor potencial de aportar acidez y EPT al ambiente en el Distrito Minero de Guanajuato.

## AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT por la beca para realizar tesis de doctorado a Yann René Ramos Arroyo, a la Dra. Elizabeth Ferry del Queens College, N.Y., por el apoyo en la revisión de documentos del Archivo General de la Nación, al Ing. Armando Álvarez por los comentarios, al personal de la SCMMSFG por permitir la revisión de los archivos de

producción y a los dos árbitros anónimos que con sus valiosos comentarios mejoraron notablemente la estructura de este manuscrito.

## REFERENCIAS

- Antúnez, E.F., 1964, Monografía Histórica y Minera del Distrito Minero de Guanajuato: México, Consejo Nacional de Recursos Naturales no Renovables, Publicación 17-E, 589 p.
- Archivo General de la Nación, 1934, Expediente 434.1/211, Se declara el agotamiento de la veta en la mina "La Valenciana": Dirección del Archivo Histórico Central, 30 p.
- Archivo General de la Nación, 1947, Expediente 606.1/33, Informe del Gerente General Relativo a las Operaciones de la Sociedad Cooperativa Minero-Metalúrgica "Santa Fé de Guanajuato" No. 1, S.C.L., Noviembre de 1947. Se realizan pruebas metalúrgicas para probar la factibilidad del método de flotación en minerales del Distrito Minero de Guanajuato: Dirección del Archivo Histórico Central, 42 p.
- Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, A.C. (AIMMGM), 1993, Manual de Presas y Depósitos de Jales, traducción del inglés del Boletín 45 de la International Commission on Large Dams (ICOLD): México, D.F., AIMMGM, 80 p.
- Baker, B.J., Banfield, J.F., 2003, Microbial communities in acid mine drainage: *FEMS Microbiology Ecology*, 44, 139–152.
- Buchanan, L.J., 1979, The Las Torres mine, Guanajuato, México; Ore controls of a fossil geothermal system: Colorado, Colorado School of Mines, tesis doctoral, 138 p.
- Butzer, K., Butzer, E., 1997, The "natural" vegetation of the Mexican Bajío: archival documentation of the 16th Century savanna environment: *Quaternary International*, 43/44, 161–172.
- Camargo, J.A., 2002, Contribution of Spanish-American silver mines (1570–1820) to the present high mercury concentrations in the global environment; a review: *Chemosphere*, 48, 51–57.
- Carrillo-Chávez, A., Morton-Bermea, O., González-Partida, E., Rivas-Solórzano, H., Oesler, G., García-Meza, V., Hernández, E., Morales, P., Cienfuegos, E., 2003, Environmental geochemistry of the Guanajuato Mining District, Mexico: *Ore Geology Reviews*, 23, 277–297.
- Castro-Larragoitia, J., Kramar, U., Puchelt, H., 1997, 200 years of mining activities at La Paz/San Luis Potosí/Méjico. Consequences for environment and geochemical exploration: *Journal of Geochemical Exploration*, 58, 81–91.
- Clark, K.F., Foster, C.T., Damon, P.E., 1982, Cenozoic mineral deposits and subduction-related magmatic arcs in Mexico: *Geological Society of America Bulletin*, 93, 533–544.
- Comisión Nacional del Agua (CNA), 2000, Manual de Presas de Jales: México, Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Gerencia de Ingeniería Básica y Normas Técnicas, 120 p.
- Consejo de Recursos Minerales (COREMI), 1992, Monografía Geológico-Minera del Estado de Guanajuato: México, D.F., Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, Subsecretaría de Minas e Industria Básica, Consejo de Recursos Minerales, primera edición, 136 p.
- Cruz, R., Bertrand, C., Monroy, M., González, I., 2001a, Effect of sulfide impurities on the reactivity of pyrite and pyritic concentrates: a multi-tool approach: *Applied Geochemistry*, 16, 803–819.
- Cruz, R., Méndez, B.A., Monroy, M., González, I., 2001b, Cyclic voltammetry applied to evaluated reactivity in sulfide mining residues: *Applied Geochemistry*, 16, 1631–1640.
- Dold, B., 1999, Mineralogical and geochemical changes of copper flotation tailings in relation to their original composition and climatic setting-implications for acid mine drainage and element mobility: Génova, Suiza, Université de Genève, Département de Minéralogie, tesis doctoral, xiii + 230 p.

- Dudka, S., Domínguez, C.A., 1997, Environmental impacts of metal ore mining and processing: a review: *Journal of Environmental Quality*, 26, 590–602.
- Fernández, V., 1879, Práctica del beneficio de minerales de plata auríferos usado en el Distrito de Guanajuato llamado de patio: *La Naturaleza*, 4, 1877–1879.
- Galindo-Montiel, J.Y., 1993, La producción en el Distrito Minero de Guanajuato desde el S. XVII hasta la época actual: Guanajuato, México, Universidad de Guanajuato, Facultad de Minas, Metalurgia y Geología, tesis de maestría, 357 p.
- Gray, N.F., 1997, Environmental impact and remediation of acid mine drainage: a management problem: *Environmental Geology*, 30, 62–71.
- Gross, W.H., 1975, New ore discovery and source of silver–gold veins, Guanajuato, México: *Economic Geology*, 70, 1175–1189.
- Guiza, R., Rendón, F., Baltierra, J.J., 1949, Estudio geológico del Distrito Minero de Guanajuato, Gto. (zona de la veta Madre): México, Instituto Nacional para la Investigación de Recursos Minerales, Boletín 22, 75 p.
- Heald, P., Foley, N.K., Hayba, D.O., 1987, Comparative anatomy of volcanic-hosted epithermal deposits: acid–sulfate and adularia–sericite types: *Economic Geology*, 82, 1–26.
- Humboldt, A., 1822, *Ensayo Político Sobre el Reino de la Nueva España*: México, Editorial Porrúa, S.A., quinta edición, 1991, 698 p.
- Jáuregui de Cervantes, A., 1998, Relato histórico de Guanajuato, Guanajuato: Guanajuato, Ediciones La Rana, Instituto de Cultura del Estado de Guanajuato, 189 p.
- Johnson, D.A., Whittle, K., 1999, The chemistry of the Hispanic-American amalgamation process: *Journal Chemical Society Dalton Translations*, 23, 4239–4243.
- Langmuir, D., 1997, *Aqueous Environmental Geochemistry*: New Jersey, Prentice Hall, 590 p.
- Larocque, A.L., Rasmussen, P.E., 1998, An overview of trace metals in the environment, from mobilization to remediation: *Environmental Geology*, 33, 85–91.
- Mango, H.N., 1992, Origin of epithermal Ag–Au–Cu–Pb–Zn mineralization on the Veta Madre, Guanajuato, México: Hanover, New Hampshire, Dartmouth College, tesis doctoral, 138 p.
- Martínez-Reyes, J., 1992, Mapa geológico de la Sierra de Guanajuato: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Cartas Geológicas de México serie 1:100,000.
- Martínez-Reyes, J., Vassallo, L.F., Franco, F.J., 1995, Geología y potencial minero de la porción central-poniente del Estado de Guanajuato: Guanajuato, México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Estación Regional del Centro, Gobierno del Estado de Guanajuato, Secretaría de Desarrollo Económico, Dirección de Promoción Minera, 70 p.
- Miranda-Gasca, M.A., 2000, The metallic ore-deposits of the Guerrero Terrane, western Mexico; an overview: *Journal of South American Earth Sciences*, 13, 403–413.
- Moore, J.N., Luoma, S.N., 1990, Hazardous wastes from large-scale metal extraction: *Environment Science and Technology*, 24, 1278–1284.
- Nriagu, J.O., 1994, Mercury pollution from the past mining of gold and silver in the Americas: *The Science of the Total Environment*, 149, 167–181.
- Petruk, W., Owens, D.R., 1974, Some mineralogical characteristics of the silver deposits in the Guanajuato mining district, Mexico: *Economic Geology*, 69, 1078–1085.
- Plumlee, G.S., 1999, The environmental geology of mineral deposits, in Plumlee, G.S. (ed.), *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits, Part A: Processes, Techniques, and Health: Reviews in Economic Geology*, 6A, 71–116.
- Plumlee, G.S., Nash, J.T., 1995, Geoenvironmental models of mineral deposits; fundamentals and applications, in du Bray, E.A. (ed.), *Preliminary Descriptive Geoenvironmental Models of Mineral Deposits: U.S. Geological Survey, Open-File Report*, 1–9.
- Plumlee, G.S., Smith, K.S., Berger, B.R., Foley-Ayso, N., Klein, D.P., 1995, Creede, Comstock and Sado epithermal vein deposits, in du Bray, E.A. (ed.), *Preliminary Descriptive Geoenvironmental Models of Mineral Deposits: U.S. Geological Survey, Open-File Report*, 152–156.
- Querol, F.S., Lowther, G.K., Navarro, E., 1988, Yacimientos minerales del Distrito de Guanajuato, Gto., in Salas, G.P. (ed.), *Geología Económica de México*: México, Fondo de Cultura Económica, 515–528.
- Ramos-Arroyo, Y.R., Siebe-Grabach, C.D., 1998, Variabilidad espacial de condiciones geoquímicas en presas de jales: *Actas INAGEQ*, 4, 51–63.
- Ramos-Posada, M.E., Hansen-Hansen, A., M., Ortega, L.V., 1994, Enriquecimiento de metales en sedimentos de la Cuenca Lerma-Chapala, in IV Congreso Nacional de Geoquímica, Jiutepec, Morelos: México, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 151–156.
- Ramos-Ramírez, E., 1991, Reconstrucción mineralógica de los jales de Guanajuato y el estudio sobre el seguimiento de las especies químicas contenidas en sus componentes no metálicos: Guanajuato, México, Universidad de Guanajuato, Facultad de Ciencias Químicas, tesis de maestría, 135 p.
- Randall-Roberts, J., 1990, Geology of El Cubo mine and area, Guanajuato, México, in Clark, K.F. (ed.), *Mexican Silver Deposits, Guidebook*: Society of Economic Geologists, SEG Guidebooks Series, 6, 213–227.
- Randall-Roberts, J.A., Saldaña, E., Clark, K.F., 1994, Exploration in a volcano-plutonic center at Guanajuato, México: *Economic Geology*, 89, 1722–1751.
- Ridgway, J., Flight, D.M.A., Martiny, B., Gómez-Caballero, A., Macías-Romo, C., Greally, K., 1995, Overbank sediments from central México: an evaluation of their use in regional geochemical mapping and studies of contamination from modern and historical mining: *Applied Geochemistry*, 10, 97–109.
- Robertson, W.D., 1994, The physical hydrology of mill-tailings impoundments, in Jambor, J.L., Blawes, D.W. (eds.), *Short Course Handbook on Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-Wastes*: Ontario, Canada, Mineralogical Association of Canada, 1–18.
- Sociedad Cooperativa Minero Metalúrgica Santa Fé de Guanajuato S.A. de C.L. (SCMMSFG), 2002, *Archivos de producción 1977–2001*: Guanajuato, México, 1460 p.
- Salomons, W., 1995, Environmental impact of metals derived from mining activities; Processes, predictions, prevention: *Journal of Geochemical Exploration*, 52, 5–23.
- Singer, P.C., Stumm, W., 1970, Acid mine drainage; the rate determining step: *Science*, 167, 1121–1123.
- Vassallo, L.F., Martínez-Reyes, J., Paris, J.P., 1996, Estructuras circulares y lineales en el Distrito Minero de Guanajuato, México y su significado en la prospección minera: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 13, 252–257.
- Vassallo, L.F., 1988, Características de la composición mineralógica de las menas de la Veta Madre de Guanajuato: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, 7, 232–243.
- Wandke, A., Martínez, J., 1928, The Guanajuato Mining District, Guanajuato México: *Economic Geology*, XXIII, 1, 1–44.
- White, W.W., Lapakko, K.A., Cox, R.L., 1999, Static test methods most commonly used to predict acid-mine drainage; practical guidelines for use and interpretation, in Plumlee, G.S. (ed.), *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits, Part A: Processes, Techniques, and Health: Reviews in Economic Geology*, 6A, 325–338.

Manuscrito recibido: Septiembre 13, 2003

Manuscrito corregido recibido: Marzo 1, 2004

Manuscrito aceptado: Marzo 10, 2004