

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

“PELIGROSIDAD DE LOS RESIDUOS MINEROS HISTÓRICOS DEL DISTRITO  
MINERO SAN ANTONIO-EL TRIUNFO EN LA PAZ BAJA CALIFORNIA SUR Y  
EVALUACIÓN DE GENERACIÓN DE DRENAJE ÁCIDO A TRAVÉS DE PRUEBAS  
ESTÁTICAS”

**Tesis**

Que para obtener el título de:

**Ingeniero Geólogo**

Presenta:

**Carlos Alberto Magdaleno Rico**

**Director: Dr. Francisco Martín Romero**

**México, D.F., 2014**

# Índice

## Resumen

1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. ÁREA DE ESTUDIO.....	4
2.1 Descripción y localización del área.....	4
2.2 Historia de la minería en la región .....	4
2.3 Estudios de impacto ambiental de la minería en esta región.....	6
2.4 Fisiografía de la zona de estudio .....	7
2.5 Climatología de la zona de estudio .....	8
2.6 Aspectos geológicos del área de estudio .....	8
2.6.1 Geología local del área de estudio.....	8
2.6.2 Aspectos estructurales en la zona de estudio.....	10
2.6.3 Yacimientos minerales en la zona de estudio.....	10
2.7 Hidrología de la zona de estudio .....	11
2.8 Edafología en la zona de estudio.....	13
2.9 Vegetación en la zona de estudio .....	14
3 MARCO TEÓRICO.....	15
3.1 Generalidades.....	15
3.2 Residuos de la industria minera .....	16
3.2.1 Tepetate, terreros, jales y residuos metalúrgicos.....	16
3.2.2 Etapas de minado .....	17
3.2.3 Clasificación de los residuos con base en la NOM-157-SEMARNAT-2009 .....	19
3.3 Procesos geoquímicos que tienen lugar en los desechos mineros de sulfuros metálicos. ....	19
3.3.1 Oxidación de sulfuros metálicos .....	19
3.3.2 Procesos de Neutralización .....	20
3.3.3 Procesos de retención (fenómenos de sorción). ....	24
3.3.4 Actividad bacteriana.....	25
3.4 Clasificación mineralógica de los residuos. ....	26
3.5 Estudio de residuos mineros y valoración de la contaminación de los mismos. ....	27
3.5.1 Peligrosidad de residuos de acuerdo a la experiencia internacional.....	28

3.5.2 Peligrosidad de los residuos mineros de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-157-SEMARNAT-2009. ....	29
4. METODOLOGÍA .....	32
4.1 Inventario de residuos .....	32
4.2 Muestreo.....	33
4.3 Análisis de laboratorio .....	34
4.4 Tratamiento de muestras .....	34
4.5 Peligrosidad de los residuos .....	35
4.5.1 Concentración total de elementos potencialmente tóxicos (EPT).....	35
4.5.2 Toxicidad: constituyentes tóxicos solubles (geodisponiblilidad).....	35
4.6 Generación de drenaje ácido (DA).....	36
4.6.1 Reactividad: capacidad de generación de drenaje ácido .....	36
4.6.2 Determinación de potencial hidrógeno (pH) y conductividad eléctrica (CE) .....	37
4.7 Caracterización química y mineralógica de los residuos .....	37
4.7.1 Caracterización química.....	37
4.7.2 Análisis mineralógico.....	37
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
5.1 Peligrosidad de los residuos mineros .....	38
5.1.1 Concentración total de elementos normados.....	38
5.1.2 Concentración total de elementos no normados.....	41
5.2 Elementos potencialmente tóxicos solubles (geodisponibilidad).....	43
5.2.1 Elementos potencialmente tóxicos normados por NOM-157 .....	43
5.2.2 Elementos potencialmente tóxicos normados por NOM-127 .....	44
5.3 Potencial de generación de drenaje ácido (DA) .....	45
5.3.1 Conductividad eléctrica (CE) y pH de los residuos mineros.....	45
5.3.2 Iones mayores.....	49
5.3.3 Capacidad de generación de drenaje ácido.....	51
5.4 Identificación de fases sólidas y fenómenos geoquímicos .....	52
5.4.1 Concentración de elementos mayores .....	52
5.4.2 Mineralogía .....	54
5.5 Procesos geoquímicos identificados en los residuos de estudio e importancia de los minerales secundarios que se han formado.....	55
5.5.1 Procesos de oxidación .....	55

5.5.2 Procesos de neutralización .....	58
5.5.3 Procesos de retención .....	59
5.5.4 Fases solidas que controlan la movilidad de arsénico (As), plomo (Pb) y antimonio (Sb) .....	60
5.5.5 Minerales secundarios y su relación con la movilidad del arsénico (As), plomo (Pb) y antimonio (Sb).....	62
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	63
6.1 Conclusiones .....	63
6.2 Recomendaciones.....	64
7. BIBLIOGRAFÍA.....	65

## Índice de Tablas

Tabla 1. Minerales agrupados de acuerdo a su capacidad de neutralización de acidez (Jambor,2000). .....	22
Tabla 2. Minerales secundarios comunes que precipitan como producto de la oxidación y neutralización de los minerales primarios (Fuente: Morin y Hutt, 1997). .....	26
Tabla 3. Pruebas para determinar la peligrosidad del residuo.....	30
Tabla 4. Límites máximos permisibles (LMP) para los constituyentes tóxicos en el extracto PECT y base seca.....	30
Tabla 5. Límites para determinar la peligrosidad por el potencial de generación de drenaje ácido..	31
Tabla 6. Inventario de las muestras recolectadas. ....	32
Tabla 7. Concentraciones totales de los residuos (cenizas). *Límite Máximo Permisible (LMP), en la NOM-157-SEMARNAT-2009. Límite de detección del método (LDM), valores máximos y valores mínimos. ....	38
Tabla 8. Concentraciones totales de los residuos (terreros y jal). *Límite Máximo Permisible (LMP), establecido en la NOM-157-SEMARNAT-2009. Límite de detección del método (LDM), valores máximos y valores mínimos. ....	40
Tabla 9. Concentración total de los elementos no normados. Límite de detección del método (LDM), valores máximos y valores mínimos. Tipo de residuo: T= Terrero; C=Ceniza; J= Jal.....	42
Tabla 10. Matriz de Correlación de los residuos (Terreros y Jal), con los elementos normados y no normados.....	43
Tabla 11. Concentraciones solubles de los residuos mineros históricos. Límite de detección del método (LDM).*Limite Máximo Permisible (LMP). T: Terrero; C: Cenizas; J: Jale .....	44
Tabla 12. Concentraciones solubles de elementos no normados de los residuos mineros históricos.* LMP= Límite Máximo Permisible. LDM= Límite de Detección del Método. T: Terrero; C: Cenizas; J: Jal.....	45
Tabla 13. Muestras de los residuos con valores de pH ( $pH \leq 4$ ), considerados peligrosos por la NOM-157. Valor Promedio, valor máximo y valor mínimo. Tipo de residuo: T, Terrero; C, Cenizas; J, Jale.....	46
Tabla 14. Muestras de los residuos con valores de pH ( $pH > 4$ ), considerados no peligrosos por la NOM-157. Promedio, valor máximo y valor mínimo. Tipo de residuo: T, Terrero; C, Cenizas; J, Jale.....	47
Tabla 15. Resultados del análisis por Cromatógrafo, para determinar los iones mayores. T, Terrero; C, Cenizas; J, Jale. LDM=Limite de Detección del Método; LMP= Limite Máximo Permisible; ND= No determinado.....	50
Tabla 16. Valores de la prueba de balance ácido-base (ABA). Cuando la relación PNN < 1.2 (NOM-141-SEMARNAT-2004). Tipo de residuo: T=Terrero; J=Jal.....	52
Tabla 17. Resultados mineralógicos de algunas muestras por DRX.....	54

## Índice de Figuras

Figura 1 Mapa de localización de la zona de estudio. Modificado de INEGI, 2000.....	4
Figura 2 Mapa geológico de la zona de estudio. Geología del área de estudio, l columna geológica y dos secciones que resaltan los rasgos estructurales. Tomado de la carta geológico.minera San Antonio. Escala 1:50,000 (INEGI, 1996).....	9
Figura 3. Plano geológico de la cuenca de San Juan de Los Planes (adaptado de UABCS, 2002)...	12
Figura 4.Mapa topográfico, donde se muestra el tipo de drenaje (dentritico y paralelo) de la zona de estudio. ....	13
Figura 5.Distribución de las franjas mineralizadas en México. SGM, 2011.....	15
Figura 6 . Diagrama donde se muestran las etapas en los procesos de la minería. ....	18
Figura 7. Clasificación de los residuos mineros, según la NOM-157-SEMARNAT-2009 .....	19
Figura 8. Recolección de muestras. a) Terrero=Los Gavilanes, b) Jal=La Columbina, c) Ceniza=Chimenea La Ramona y d) Ceniza=Chimenea Los San Juanes.....	33
Figura 9. Ubicación de las 46 muestras de residuos mineros en la zona de estudio. ....	34
Figura 10. Concentraciones totales promedio de los elementos normados (rectángulos) y sus respectivos límites máximos permisibles (triángulos). ....	39
Figura 11. Concentraciones totales promedio de los elementos normados (rectángulos) y sus respectivos límites máximos permisibles (triángulos). ....	41
Figura 12. Clasificación de los residuos con base en el pH. Los cuadros representan a los residuos identificados como Terreros; los triángulos a las Cenizas y el círculo el jal. a) indica valores de pH $\leq 4$ ; b) valores de pH de 5 a 7; c) valores de 7 a 9. ....	48
Figura 13. Clasificación y distribución de los residuos mineros. Los rombos son cenizas, cuadros terreros y circulo jal. Las estrellas son los pueblos. ....	49
Figura 14. Correlación de sulfatos con calcio. ....	51
Figura 15. Gráfica con la distribución del porcentaje de elementos mayores. Y en la parte inferior se observa la Tabla de los valores obtenidos por FRX. ....	53
Figura 16. Cristales de arsenolita ( $As_2O_3$ ) en las muestras a) Tiro de Chimenea la Ramona y b) 1ra casa de Chimenea los Sn Juanes .....	57
Figura 17. Diagrama de Eh y pH de la especie de As en el sistema acuoso As-O <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O a 25°C y presión a 1 bar. ....	57
Figura 18. Espectros de posibles minerales: a) pirita ( $FeS_2$ ) y b) arsenopirita ( $FeAsS$ ). ....	59
Figura 19. Espectros MEB-EDS, posibles fases minerales: a) jarosita, b) jarosita y c) plumbojarosita. ....	61

## Índice de Ecuaciones

$\text{FeS}_2 + 3.75 \text{O}_2 + 3.5 \text{H}_2\text{O} \text{ ----- } \text{Fe}(\text{OH})_3 + 2\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+$	Ecuación 1 ..... 20
$\text{Fe}_{1-x}\text{S}_2 + (2-x/2) \text{O}_2 + x \text{H}_2\text{O} \text{ ----- } (1-x) \text{Fe}^{2+} + 2\text{SO}_4^{2-} + 2x\text{H}^+$	Ecuación 2 ..... 20
$\text{FeAsS} + 3.25 \text{O}_2 + 1.5 \text{H}_2\text{O} \text{ ----- } \text{Fe}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + \text{H}_3\text{AsO}_4$	Ecuación 3 ..... 20
$\text{PbS} + 2\text{O}_{2(\text{aq})} \text{ ----- } \text{PbSO}_4$	Ecuación 4 ..... 20
$\text{ZnS} + 2\text{O}_{2(\text{aq})} \text{ ----- } \text{Zn}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$	Ecuación 5 ..... 20
$\text{CuFeS}_2 + 4\text{O}_{2(\text{aq})} \text{ ----- } \text{Cu}^{2+} + \text{Fe}^{2+} + 2\text{SO}_4^{2-}$	Ecuación 6 ..... 20
$\text{CaCO}_3 + \text{H}^+ \text{ ---- } \text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^-$	Ecuación 7 ..... 21
$\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O} \text{ ---- } \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Ecuación 8 ..... 21
$\text{FeCO}_3 + \text{H}^+ \text{ --- } \text{Fe}^{2+} + \text{HCO}_3^-$	Ecuación 9 ..... 21
$\text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+ \text{ ---- } \text{Al}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O} \quad (\text{pH entre } 4.0 - 4.3)$	Ecuación 10 .... 22
$\text{Fe}(\text{OH})_{3(\text{s})} + 3\text{H}^+ \text{ ---- } \text{Fe}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O} \quad (\text{pH} < 3.5)$	Ecuación 11 .... 22
$\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6 \text{ ---- } 3\text{FeO}(\text{OH}) + \text{K}^+ + 2\text{SO}_4^{2-} + 3\text{H}^+$	Ecuación 12 .... 23
$\text{Fe}_8\text{O}_8(\text{OH})_6(\text{SO}_4) + 2\text{H}_2\text{O} \text{ ---- } 8\text{FeO}(\text{OH}) + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}^+$	Ecuación 13 .... 23
$2 \text{Mg}_2\text{SiO}_4 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{H}^+ \text{ ----- } \text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + \text{Mg}^{2+}$	Ecuación 14 ..... 24
$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O} \text{ ----- } \text{Ca}^{2+} + \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	Ecuación 15 .... 24
$2 \text{KAlSi}_3\text{O}_8 + 9 \text{H}_2\text{O} + 2\text{H}^+ \text{ ---- } 2 \text{K}^+ + \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 4\text{H}_4\text{SiO}_4$	Ecuación 16 ..... 24
$2 \text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{H}^+ \text{ ----- } \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 2\text{Na}^+ + 4\text{SiO}_{2(\text{amorfo})}$	Ecuación 17 ..... 24
$2 \text{KAl}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + 2\text{H}^+ + 3\text{H}_2\text{O} \text{ ----- } 2\text{K}^+ + 3\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	Ecuación 18 ..... 24
$\text{PN} = [(\text{N}_{\text{NaOH}} \times \text{Vol.}_{\text{NaOH}}(\text{ml})) - (\text{N}_{\text{HCL}} \times \text{Vol.}_{\text{HCL}}(\text{ml})) \times 50] / [\text{peso}(\text{g})]$	Ecuación 19 .... 36
$\text{PA} = \% \text{ de azufre como sulfuro } [\% \text{S}^2] \times 31.25$	Ecuación 20 .... 36
$\text{FeS}_2 + 5.5\text{H}_2\text{O} + 3.75 + 2\text{CaCO}_3 \text{ ----- } \text{Fe}(\text{OH})_3 + 2(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}) + 2\text{CO}_2 \text{ ----}$	Ecuación 21 51

## **Agradecimientos**

Le agradezco a Dios por haberme permitido vivir hasta este día, haberme guiado a lo largo de mi vida, por ser mi apoyo, mi luz y mi camino. Por haberme dado la fortaleza para seguir adelante en aquellos momentos de debilidad.

Le doy gracias a mi madre Catalina Rico Sánchez, por darme la vida, porque es la columna vertebral de la familia, por soportarme tanto tiempo, por el apoyo brindado a lo largo de mi vida. Mamá gracias por darme la oportunidad de estudiar esta carrera y por ser mi ejemplo de vida y superación.

A mis hermanos, Gabriel, Beatriz y Gustavo, por ser parte importante de mi vida y representar la unión familiar. Por su infinito apoyo y comprensión en todo este tiempo y por todos los grandes momentos que en su compañía he disfrutado. A mis sobrinos Gaby, Toño, Sofía y Alberto, que me han enseñado a valorar la vida por las pequeñas cosas como el juego y la compañía.

Agradezco inmensamente a la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por haberme brindado una educación de excelencia y por ser parte fundamental de mi formación como profesional.

De la manera más sincera, quiero agradecer a la administración del Instituto de Geología de la UNAM por su apoyo económico y por haberme brindado la oportunidad de llevar a cabo este trabajo.

A mi director de tesis el Dr. Francisco Martín Romero por haberme brindado todo su apoyo durante este tiempo en el cual estuvimos trabajando, pero sobre todo por brindarme sus conocimientos y paciencia.

A mis sinodales, M.I. José E. Santos Jallath, Dra. Ofelia Morton Bermea, Dra. Laura Mori y al Mtro. Ernesto Hernández Mendiola, por sus valiosos comentarios y observaciones en este trabajo.

Al laboratorio de Geoquímica Ambiental del Instituto de Geología, en especial a Fabiola Vega, Inés Ramos y Daniel Ramos por el apoyo en el trabajo en el análisis de muestras. A la Dra. Teresa Pi Puig por la ayuda en los análisis de Difracción de Rayos X, al Ing. Carlos Linares López por la ayuda en los análisis de la Microsonda Electrónica de Barrido.

A todos mis amigos que han estado siempre conmigo y en todos los momentos difíciles y alegres de mi vida. Y en especial a Violeta Espino que me ha ayudado y apoyado, durante el tiempo de mi formación como Ingeniero Geólogo y para este trabajo.

Y a todas las personas que se me olvida citar, que hayan confiado en mí, que contribuyeron de forma directa e indirecta en la realización de este trabajo.

## Resumen

Nuestro país se ha caracterizado por ser una potencia minera. La minería ha llegado a convertirse en una actividad de gran importancia en algunos estados como: Baja California Sur, Sonora, Chihuahua, Jalisco, San Luis Potosí, Hidalgo, Sinaloa, Colima, y Guerrero.

Esto ha propiciado que miles de millones de toneladas de residuos mineros se encuentren esparcidos en todo el territorio. La concentración de los minerales con valor comercial, depende de procesos físico-químicos lo que genera residuos mineros de diferente granulometría, los cuales dependen de la etapa de minado (procesos de extracción, procesos de beneficio y procesos metalúrgicos). El resultado en dichos procesos son, los residuos denominados “terreros y tepetates”, así mismo encontramos residuos de granulometría fina denominado “jales” y por ultimo tenemos los “residuos metalúrgicos”, entre los que se encuentran escorias, lodos, polvos de horno y “cenizas”.

El área de estudio, se encuentra en el distrito minero San Antonio-El Triunfo (SA-ET), el cual se localiza a 40 Km en línea recta hacia el sureste de la ciudad de La Paz, capital del estado de Baja California Sur.

Los residuos metalúrgicos (cenizas), en el distrito minero SA-ET, están caracterizados por altas concentraciones totales de algunos elementos potencialmente tóxicos (EPT), con valores promedio de 442,156.62mg kg<sup>-1</sup> As, 25,178.44mg kg<sup>-1</sup> Sb, 14,083.88mg kg<sup>-1</sup> Pb, 349.93 mg kg<sup>-1</sup> Ag, 128.29 mg kg<sup>-1</sup> Cr, 113.01 mg kg<sup>-1</sup> Ba y 63.27 mg kg<sup>-1</sup> Cd. En los residuos mineros (terreros y jale), presenta concentraciones totales con valores promedios de 13,919.18mg kg<sup>-1</sup> As, 4,223.36mg kg<sup>-1</sup> Pb, 1,132.25mg kg<sup>-1</sup> Sb, 820.27 mg kg<sup>-1</sup> Ba, 105.64 mg kg<sup>-1</sup> Ag, 92.06 mg kg<sup>-1</sup> Cr y 67.84 mg kg<sup>-1</sup> Cd.

Con respecto a la movilidad de los residuos los resultados obtenidos para el caso de los residuos denominados, terreros y jal, la mayoría de las concentraciones solubles (geodisponibles) de EPT regulados en la NOM-157, son inferiores al LMP, por dicha norma. En los residuos denominados cenizas tenemos concentraciones promedio geodisponibles de As, Cd y Sb, las cuales son 339.96 mg L<sup>-1</sup>, 2.99 mg L<sup>-1</sup> y 2.70 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente. Así mismo se observa que los valores de As, superan por casi 67 veces los LMP establecidos en la norma NOM-157, el Cd lo hace en casi 3 veces y en el Sb en 5 veces, por lo cual dichos residuos se consideran residuos tóxicos.

Los resultados de las pruebas de balance ácido-base se tiene que el único residuo que es potencialmente generador de drenaje ácido es “La Columbina”, la cual se clasificó como un jal y presenta un pH= 6.36 y una CE de 435 (µS/cm) y por esto podría ser generador de drenaje ácido en el futuro cuando se oxide.

La composición mineralógica, determinada por Difracción de Rayos X (DRX), presenta que los residuos mineros denominados terreros y jale se caracterizan por el predominio de cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), jarosita  $[\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6]$  y filosilicatos. Por el mismo método, en las cenizas, el único mineral que se identificó fue arsenolita ( $\text{As}_2\text{O}_3$ ).

Las observaciones realizadas en MEB-EDS para el caso de los terreros y el jal, sugieren que la movilidad de As podría estar regulándose por fases secundaria especulando que se encuentren retenidas partículas en el mineral identificado como jarosita ( $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ).

Otro posible mecanismo para explicar la atenuación natural de As, Sb y Pb podría ser la precipitación de la beudantita ( $(\text{PbFe}_3[\text{SO}_4][\text{AsO}_4][\text{OH}]_6)$ ), aunque la beudantita no fue identificada por DRX, su precipitación ha sido reportada como un mecanismo eficiente para el control de la movilidad del As y Pb en ambientes mineros bajo condiciones ácidas.

Los resultados sugieren que los residuos dominados terreros y jal, no son tan peligrosos ya que presentan altas concentraciones totales de algunos EPT, pero en la prueba del lixiviado no presentan altas concentraciones solubles de los EPT. A diferencia de las cenizas que son peligrosos ya que se identificó el mineral arsenolita, el cual es soluble en agua y puede libera arsénico al medio ambiente.

# 1. INTRODUCCIÓN

Nuestro país se ha caracterizado por ser una potencia minera. De acuerdo con datos del INEGI (2010), México ocupa el segundo lugar a nivel mundial en la producción de plata (Ag), bismuto (Bi) y fluorita (CaF<sub>2</sub>).

Así mismo México, se encuentra en los primeros lugares en la producción de arsénico (As), plomo (Pb) cadmio (Cd), antimonio (Sb) y zinc (Zn). Estos elementos por lo general, se presentan en asociaciones minerales en los yacimientos metálicos.

La minería ha llegado a convertirse en una actividad de gran importancia en algunos estados de la República Mexicana. Como comenta Carrillo González (2005), la producción minera en México se concentra en algunos estados como: Baja California Sur, Sonora, Chihuahua, Jalisco, San Luis Potosí, Hidalgo, Sinaloa, Colima, y Guerrero.

Por este motivo, en estos sitios se concentran grandes cantidades de residuos mineros. En la exploración a cielo abierto es en donde se deben de remover grandes volúmenes de roca. En la mina subterránea no es así, sin embargo, en el propio yacimiento tenemos minerales de ganga (sin interés económico) los cuales deben ser removidos y constituyen algunos residuos conocidos como jales<sup>1</sup>, en los yacimientos de todo el mundo.

En México, las actividades mineras a gran escala se han desarrollado ininterrumpidamente. En la época colonial no se realizaban actividades mineras a gran escala, podría decirse que las grandes operaciones comenzaron a mediados del siglo XX. Esto ha propiciado que miles de millones de toneladas de residuos mineros se encuentren esparcidos en todo el territorio. La concentración de los minerales con valor comercial, depende de procesos físico-químicos lo que genera residuos mineros de diferente granulometría. Que dependiendo de que exista una etapa de molienda en el procesamiento de los minerales, lo que comprenden los procesos de extracción, procesos de beneficio y procesos metalúrgicos.

En los procesos de extracción, podemos encontrar material de granulometría gruesa, el cual contiene minerales de mena y ganga. El resultado son los residuos denominados “terreros y tepetates”<sup>2</sup>, la diferencia entre terrero (o tepetatera) de material estéril y terrero de lixiviación, es que el primero se constituye de la roca encajonante y no contiene mineral de ganga (generalmente), y los segundos son desechos de un proceso de lixiviación y estos si contienen minerales de ganga. Posteriormente se pasa al proceso de beneficio en el cual se concentra el mineral de interés económico (mena), y en este proceso queda un residuo fino denominado “jales”<sup>1</sup>. Finalmente el mineral concentrado se lleva a una planta metalúrgica, el concentrado va a la fundición (proceso pirometalúrgico) o a una planta electrolítica (proceso hidro-electrometalúrgico), para la refinación, con el fin de obtener el metal de interés económico, en este proceso quedan residuos denominados “residuos metalúrgicos”, entre los que se encuentran escorias, lodos, polvos de horno y cenizas<sup>2</sup>.

El principal problema ambiental asociado a los residuos mineros se relaciona con la dispersión de éstos hacia su entorno. La dispersión dependerá principalmente de las condiciones climáticas ambientales del sitio, bajo estas condiciones ocurre la dispersión de contaminantes por medios físicos (erosión, transporte eólico y pluvial) o por su alteración y movilidad química (disolución y transporte en medio acuoso).

La movilidad química está asociada al drenaje ácido (DA), que a su vez está asociado a residuos mineros y obras abandonadas. El DA se refiere a corrientes de agua que se caracterizan por valores de pH bajos y pueden contener altas concentraciones de elementos potencialmente tóxicos (EPT) disueltos (Lin, 1997; Johnson *et al.*, 2000; Roussel *et al.*, 2000; Moncur *et al.*, 2004).

Los residuos que provienen de la explotación de yacimientos de sulfuros metálicos, contienen cantidades residuales de pirita ( $\text{FeS}_2$ ), pirrotita ( $\text{Fe}_{1-x}\text{S}_2$ ), galena ( $\text{PbS}$ ), esfalerita ( $\text{ZnS}$ ), calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) y arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ). Uno de los principales sulfuros metálicos es la pirita, la cual se oxida por acción del aire (oxígeno) y agua, lo que puede traer como consecuencia la generación de DA, que a su vez puede transportar EPT como cromo (Cr), arsénico (As), cadmio (Cd), cobre (Cu), plomo (Pb) y zinc (Zn). Y pueden convertirse en un problema ambiental al contaminar suelos, sedimentos, aguas superficiales y subterráneas (Bain *et al.*, 2000; Armienta *et al.*, 2001; Jung, 2001).

La generación de DA puede también estar asociado y depender de algunos factores geológicos como son, el tipo de yacimiento, la mineralogía y la roca encajonante.

La oxidación de sulfuros metálicos no siempre genera DA ya que la generación de éste, se encuentra en función del balance de los minerales productores de ácido (sulfuros metálicos), como son pirita, pirrotita, arsenopirita y los minerales neutralizadores, como carbonatos, hidróxidos y aluminosilicatos. En general, cuando la capacidad de neutralización excede la generación de ácido, se consumirá toda la acidez generada y las disoluciones que drenen del depósito de los residuos tendrán un pH cercano al neutro e incluso llegar a ser alcalino, sin embargo, cuando la generación de acidez es mayor se produce el denominado drenaje ácido.

En algunas zonas estudiadas de México donde se explotan yacimientos polimetálicos, asociados a vetas hidrotermales, el DA se caracteriza por altas concentraciones de arsénico y metales pesados de naturaleza tóxica.

Por otra parte, se ha reportado que en yacimientos polimetálicos asociado a depósitos tipo skarn o vetas hidrotermales encajonadas en roca caliza, no ocurre la generación de DA, debido principalmente a la abundancia de minerales con potencial de neutralización como la caliza y wollastonita (Romero *et al.*, 2008, 2010).

Por otro lado, en las zonas mineras donde se explotan yacimientos de hierro (Fe), del tipo IOCG (Iron-Oxide-Copper-Gold Deposits), se ha reportado que el DA no contiene arsénico (As) ni metales pesados tóxicos (Luna, 2011).

De tal forma, en este trabajo se recolectaron muestras del Distrito Minero San Antonio-El Triunfo (SA-ET) ubicado en Baja California Sur, con el objetivo de valorar los residuos mineros (terreros, jales y cenizas), de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, NOM-157-SEMARNAT-2009, NOM-141-SEMARNAT-2003 y NOM-127-SSA1-1994.

Para la adecuada valoración de un residuo peligroso<sup>3</sup> es necesario determinar las concentraciones totales de EPT que contienen con relación al peligro que representan para el ambiente. Es necesario realizar pruebas que permitan identificar su capacidad en la generación de acidez (ABA), así como la capacidad de lixiviación de EPT presentes, bajo condiciones ambientales (EPT solubles). Finalmente se identificarán los principales procesos geoquímicos que gobiernan la movilidad de los EPT.

Objetivo general:

- El objetivo de dicho trabajo es evaluar los residuos mineros, para determinar su comportamiento con base en pruebas así como análisis en laboratorio que nos ayuden a definir si son residuos peligrosos o no para el medio ambiente.
- Valorar la peligrosidad de los residuos mineros con base en normas oficiales mexicanas, con el fin de tomar decisiones (acciones), para dichos residuos.

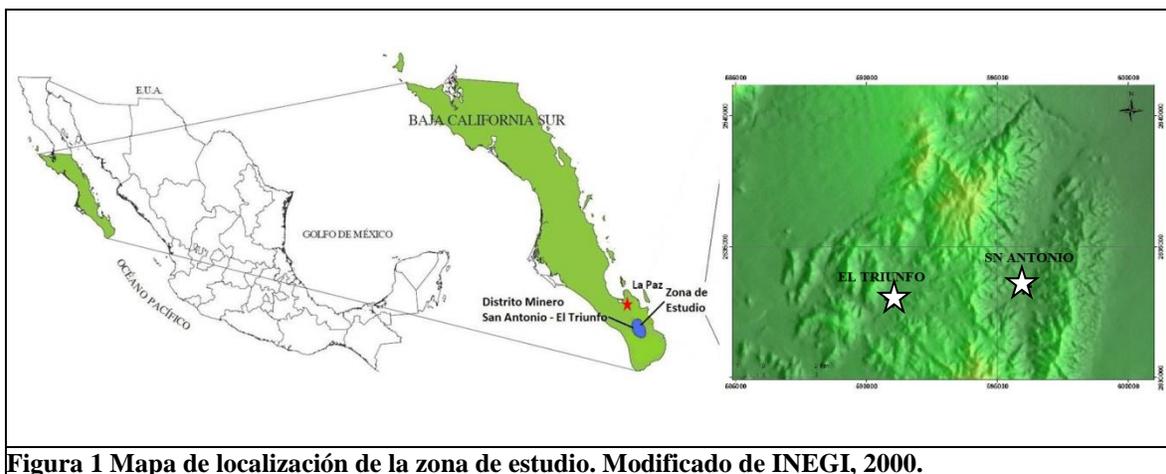
Objetivos particulares:

- Caracterizar los residuos del distrito minero San Antonio- El Triunfo.
  - Evaluar la reactividad de los residuos con base en su generación del drenaje ácido (DA)
  - Evaluar toxicidad ambiental de los residuos con base en la movilidad de algunos EPT, que podrían estar liberando al medio ambiente.
  - Identificar las fases solidas que podrían estar controlando la movilidad de algunos EPT, en los residuos.
1. Jales: residuos sólidos generados en las operaciones primarias de separación y concentración de minerales. NOM-141-Semarnat-2003.
  2. Tepetates: residuos conformados por apilamiento de material mineral, sin valor económico. Incluye al descapote; Terreros: residuos conformados por apilamiento de material mineral de baja ley; Cenizas: residuos provenientes de los procesos pirometalúrgicos. NOM-157-SEMARNAT-2009
  3. Residuos peligrosos: se consideran residuos peligrosos aquellos que presentan una o más de las siguientes características como son, corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad ambiental, inflamabilidad y/o biológicas infecciosas. NOM-052-SEMARNAT-2005

## 2. ÁREA DE ESTUDIO

### 2.1 Descripción y localización del área

El área de estudio (**Figura 1**), se encuentra en el distrito minero San Antonio-El Triunfo (SA-ET), el cual se localiza a 40 Km en línea recta hacia el sureste de la ciudad de La Paz, capital del estado de Baja California Sur.



**Figura 1** Mapa de localización de la zona de estudio. Modificado de INEGI, 2000.

Se llega a la zona por la Carretera Federal Número 1 que va de La Paz hacia Cabo San Lucas (SGM, 2011). El área de estudio se localiza en las coordenadas UTM 2630000 a 2640000 m N y 590000 a 600000 m E (**Figura 1**).

### 2.2 Historia de la minería en la región

La actividad minera en el estado de Baja California Sur, data del año 1700. Esta actividad inició en el año de 1748 cuando Manuel de Ocio empezó a explorar oro (Au) y plata (Ag) en lo que después fue el Real de Minas de Santa Ana, produciéndose 6 toneladas de plata de 1753 a 1768 y continuando hasta 1993 la exploración y explotación (SGM, 2011).

Se presume que los primeros trabajos de minería en la región, comenzaron al establecerse el centro de explotación llamado Real de San Antonio. Se comenzó la explotación en las minas de San Nicolás y San Pedro en el Distrito de El Triunfo; La Gobernadora y La Mina Rica, en el de Santa Ana y San José; y otras, en el de San Antonio donde se establecieron haciendas de beneficio. Las minas fueron explotadas hasta el año 1776, obteniendo cantidades notables de plata en el Real de San Antonio y oro en diversos placeres de los alrededores. (IGM, 1913).

El distrito minero San Antonio-El Triunfo (SA-ET) es el más importante y antiguo del estado, con dos siglos y medio de historia.

Los trabajos de minería se paralizaron por cerca de cien años hasta el descubrimiento de las minas de California, formándose varias compañías franco-americanas, americanas y mexicanas que emprendieron los trabajos de exploración y explotación.

La compañía La Hormiguera Mining Co. se fundó por el año de 1871 y explotó las minas Mendoceña, Hormiguera, María, Elena, Triunfante y Frawell, se calcula que la extracción no debe haber sido menor que 150 toneladas por día (tpd). Por el año de 1878, esta compañía pasó sus derechos a la del Progreso Mining Co., misma que obtuvo concesión para explorar una zona en los Minerales de El Triunfo y San Antonio. Los trabajos desarrollados por esta compañía llegaron a profundidades de 450 m.

Posteriormente, se organizó la Compañía de Minas de El Triunfo, S. A. para arrendar, durante un periodo de 25 años las minas y haciendas de beneficio de la Compañía Metalúrgica de Baja California. Las minas de más activa explotación fueron: Humbolt, Fortuna, San Pedro, San Nicolás, Soledad, Marroqueña, Mendoceña, Hormiguera, María, Elena, Triunfante, Farwell y Gobernadora. (IGM, 1913).

En los años transcurridos de 1879 a 1912, los trabajos de minería reportan producciones de oro de cerca de 8,000 onzas al año. Los trabajos realizados durante este periodo, dieron origen a la mayor parte de los terreros que se ubican actualmente en la región. (Minera Pitalla, 2011)

Para 1913, la Compañía de Minas del Triunfo, S. A. tenía en explotación las minas: Marroqueña, con un socavón labrado sobre la veta de El Triunfo con 250 metros de desarrollo; Nacimiento, sobre la veta El Triunfo, con dos socavones sobre veta; Buena Suerte, sobre la misma veta; Ocote, Guasave, Valenciana y Dolores en la zona de Columbinas. (IGM, 1913)

Cabe mencionar que de 1911 a 1914 la Compañía Metalúrgica de Baja California, S.A., trabajó la hacienda Columbinas a ritmo de 20 a 25 toneladas diarias de mineral procedente de terreros oxidados y de jales de El Triunfo. (SGM, 2011)

Sobre la veta occidental de San Antonio, San José, se trabajaron las minas: Las Ánimas, El Capricho, La Reforma y Santa Cruz. En la zona oriental de San Antonio, se trabajaron las minas: Cerro Colorado, Las Guijas, Los Gavilanes, San Jacinto, Soledad, El Franco, La Recompensa y Las Barrancas.

Todas estas minas se explotaron en muy pequeña escala, siendo su extracción total de 50 a 60 toneladas diarias de mineral sometido directamente al sistema de cianuración para los

metales oxidados y al sistema de lixiviación y cianuración combinados para los metales sulfurados (IGM, 1913).

A finales de 1950, la Comisión de Fomento Minero instaló una planta de medio pesado (500 toneladas por día [tpd]) y flotación (50tpd), un horno de calcinación (rinter) y uno de fundición para barras de plomo. El mineral lo obtenían de la mina Sin Rival y de terreros de otras minas sobre las vetas del sistema El Triunfo.

Las cabezas de flotación tuvieron leyes de 10 gramos de oro (Au), 225 gramos de plata (Ag), 3.5% de plomo (Pb) y 4.3% de zinc (Zn).

La Comisión traspasó sus instalaciones a Minera La Perla que operó de 1954 a 1957. La recuperación total de todo el proceso metalúrgico era del orden de 43% para oro, 66% para plata y 52% para plomo. Ante estas bajas recuperaciones y sus altos costos, minera La Perla optó por cerrar sus operaciones en 1957.

El distrito quedó prácticamente paralizado desde 1958, salvo pequeñas operaciones a nivel de pequeño minero en pilas de cianuración.

De 1968 a 2011 se han realizado exploraciones eventuales por métodos directos e indirectos sobre zonas de interés, con el propósito de conocer el comportamiento mineral y de evaluar posibles zonas económicas. (SGM, 2011).

### **2.3 Estudios de impacto ambiental de la minería en esta región**

En zonas con actividad minera, se han hecho estudios en suelos y sedimentos superficiales que se ha reportado contaminación por arsénico (As), cadmio (Cd), cobre (Cu), níquel (Ni), plomo (Pb), selenio (Se), y zinc (Zn), principalmente (Lizárraga, 2007). Así mismo se han realizado estudios ambientales en la evaluación de elementos potencialmente tóxicos (EPT) debido a que, por enriquecimiento antropogénico, sus concentraciones exceden los niveles reportados en los componentes naturales de los ecosistemas, ya que esto ha provocado efectos negativos sobre la biota y la salud humana. (Romero-Guadarrama, 2011).

Durante las actividades mineras de extracción de oro (Au) y plata (Ag), en el distrito minero San Antonio- El Triunfo (SA-ET) fueron generados una gran cantidad de desechos sólidos (terreros, jales y cenizas), los cuales fueron abandonados en áreas donde son susceptibles al intemperismo pudiendo ser removidos y transportados en épocas de lluvias (erosión hídrica). En un estudio mencionado con la evaluación de EPT en el área minera San Antonio se han detectado EPT. En otro estudio realizado en el área de SA-ET, se ha reportado que hay más de 800, 000 toneladas de desechos mineros de los cuales 600 ton son producto de los procesos de beneficio del oro, con un contenido promedio de 4% de trióxido de arsénico. Así mismo, Carrillo y Drever (1997) identificaron la presencia de

arsenolita ( $\text{As}_2\text{O}_3$ ) en los residuos de las chimeneas, el cual es un subproducto característico de la extracción de oro y plata en Baja California Sur.

En los sedimentos de arroyo asociados a la minería, se presenta enriquecimiento de algunos EPT tales como As, Cd, Pb, y Zn (Carrillo 1996; Carrillo y Huyck, 1997; Carrillo y Drever, 1998 y 1998a; Carrillo-Chavez, *et al.*, 2000; Naranjo, 2004) pero también han detectado altas concentraciones de As en aguas de pozos (Carrillo-Chavez, *et al.*, 2000).

Además, se han hecho estudios para identificar el impacto antropogénico sobre el distrito minero de San Antonio y áreas circundantes, con el propósito de caracterizar los sedimentos de la cuenca de drenaje de San Juan de los Planes, en la playa, las dunas y la plataforma continental de Bahía La Ventana. En dichos estudios se menciona que algunos elementos pueden ser una gran fuente de contaminación, con base en los factores de enriquecimiento en los sedimentos de los diferentes ambientes de depósito destacan: arsénico (As), cadmio (Cd), plomo (Pb), antimonio (Sb). Los criterios de calidad muestran que arsénico (As), mercurio (Hg) y cadmio (Cd) en los desechos de minería y fundición, representan un riesgo para la biota en los sedimentos de arroyo. Para la plataforma continental, los sedimentos de la zona mostraron que el Cd y en menor grado el As representan un riesgo para la biota (Posada-Ayala, 2011).

Por otra parte y hablando del agua subterránea, uno de los desarrollos agrícolas de importancia económica en la parte oriente de la ciudad de la Paz, Baja California Sur, ha desarrollado la presencia de un cono de abatimiento en el que la elevación del nivel estático alcanza 10 m bajo el nivel del mar. Esta zona es conocida como Valle de San Juan de Los Planes, ocupa una cuenca de aproximadamente 930  $\text{Km}^2$  de superficie y junto con el Valle de Santo Domingo constituyen las principales zonas agrícolas del estado. Las dimensiones de dicho acuífero son relativamente pequeñas, por lo que el abatimiento observado es lo suficientemente significativo como para generar una problemática de importancia, que pone en riesgo la calidad del agua subterránea.

## **2.4 Fisiografía de la zona de estudio**

El distrito minero SA-ET, se sitúa dentro de la Provincia Fisiográfica de Baja California, en la subprovincia de la discontinuidad del Cabo. Tiene en su porción centro-norte un alto topográfico constituido por la Sierra Las Calabazas cuya elevación varía de 300 a 960 m. Esta sierra se encuentra flanqueada al oriente por un relieve disectado en forma irregular que da origen a profundos cañones. En el extremo meridional, se levanta la parte norte de la Sierra La Victoria con elevación de 900 m en el Cerro Alto al noroeste del poblado San Antonio. Estas sierras tienen una orientación casi norte-sur (SGM, 1996).

Las geoformas expuestas son el resultado de dos tipos de rasgos, uno de madurez manifestado en los lugares en donde afloran unidades de rocas intensamente erosionadas,

de las que se han derivado sedimentos que han dado forma a lomeríos, terrazas y planicies aluviales y otro en el que aparecen las rocas de origen ígneo y metamórfico donde el perfil adoptó formas abruptas características de sierras complejas (SGM, 1996).

## **2.5 Climatología de la zona de estudio**

El clima característico de SA-ET es seco semicalido, seco muy cálido y cálido. En la zona de estudio se reportan los siguientes datos climáticos:

La temperatura promedio en el municipio de La Paz (de 1984 a 2010) osciló entre los 22 y 26 °C. La temperatura mínima se presenta en el mes de enero, variando de 16.7 a 18.2 °C, observándose un aumento paulatino hasta alcanzar su punto máximo en los meses de junio a septiembre, variando de 27.3 a 29.8°C (CONAGUA, 2009), para descender nuevamente. (INEGI, 2011).

La precipitación media anual en la zona de estudio es de 281 mm. Varía de 175 mm/año, en la planicie costera, hasta 450 mm/año en las zonas altas. La temporada de lluvias corresponde al verano. Los meses de mayor precipitación son de julio a octubre, así como noviembre y diciembre a consecuencia de los ciclones que se presentan en esa época. Así mismo la evaporación potencial es poco mayor a los 2000 mm/año (CONAGUA, 2009).

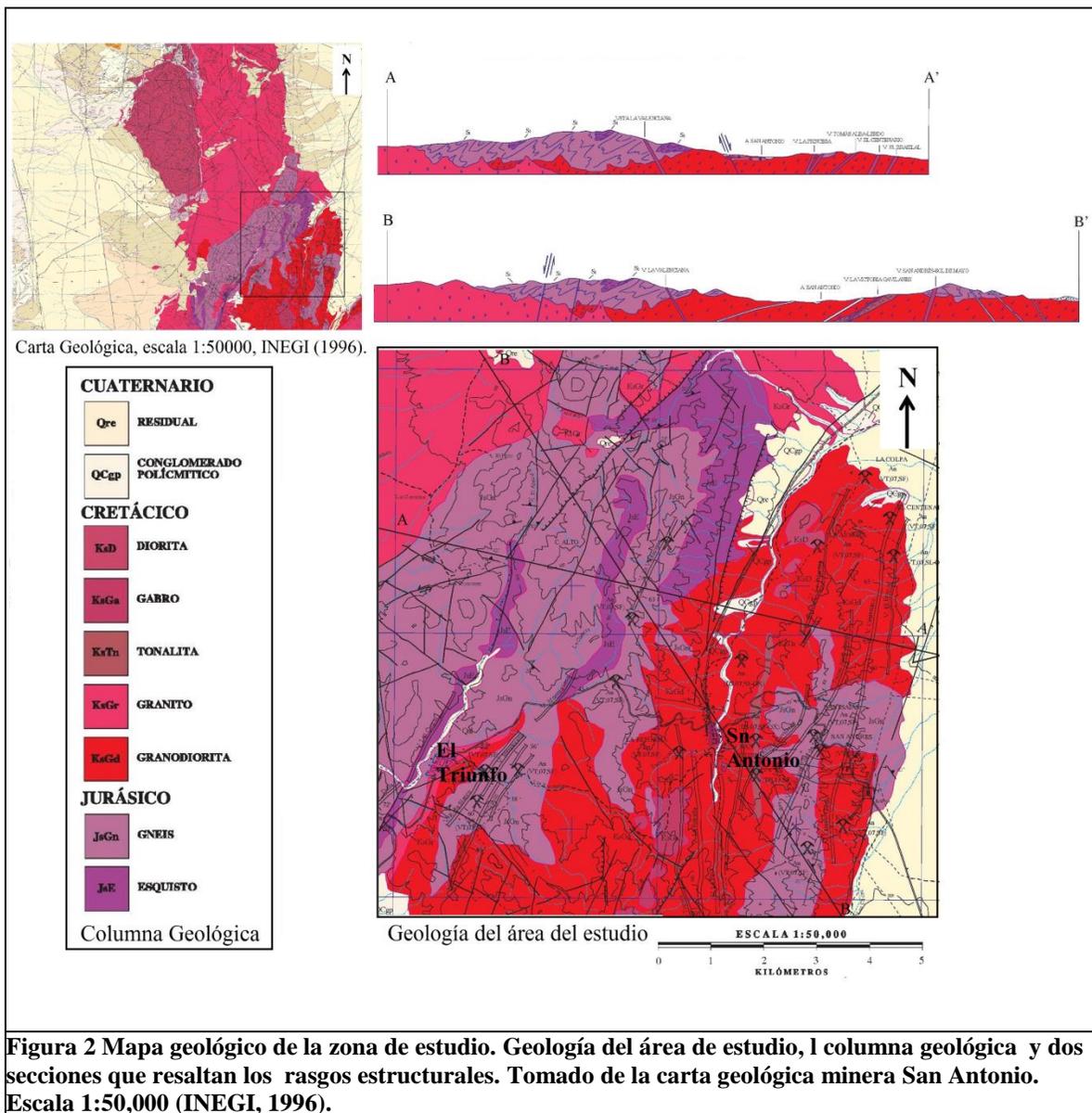
En la zona de estudio, el sistema de vientos dominante durante los meses cálidos tiene una dirección SSE, con velocidades que fluctúan desde 0 hasta 10.3 m/s con un promedio anual de 2.4 m/s. Mientras que, en los meses fríos los vientos provienen del NNW. (Minera Pitalla, 2012).

## **2.6 Aspectos geológicos del área de estudio**

### **2.6.1 Geología local del área de estudio**

En el área afloran rocas metamórficas del Jurásico, intrusivos del Cretácico Superior, intrusivos hipabisales y stoks cuyo rango de edad es del Neógeno hasta antes del Mioceno y una serie de depósitos aluviales no consolidados (**Figura 2**).

Las unidades más antiguas corresponden a un complejo de rocas metamórficas de diferente origen que desarrollan superficies de esquistosidad bien definida. Estas se presentan como esquisto de biotita, de moscovita, cuarzo-feldespático (probablemente derivados de areniscas y lutitas) y gneises. Todas ellas deformadas por un metamorfismo regional y localmente están afectadas por los intrusivos generando rocas de metamorfismo de contacto como hornfel y skarn de epidota. Los esquistos afloran al oriente del poblado El Triunfo, en una franja NE-SW hasta la parte norte de San Antonio. (SGM, 1996) (**Figura 2**).



**Figura 2** Mapa geológico de la zona de estudio. Geología del área de estudio, l columna geológica y dos secciones que resaltan los rasgos estructurales. Tomado de la carta geológica minera San Antonio. Escala 1:50,000 (INEGI, 1996).

Así mismo, afloran cuerpos en forma de diques de composición gabroica, los cuales se encuentran en la parte sur del Poblado San Antonio. La Sierra Las Calabazas está constituida por un cuerpo diorítico en forma de lacolito que representa el último evento magmático del Cretácico. En la zona de El Triunfo-San Antonio, afloran diques de composición similar a la Sierra de las Calabazas. (SGM, 1996) (**Figura 2**).

## 2.6.2 Aspectos estructurales en la zona de estudio

Existen dos eventos tectónicos regionales importantes expuestos en la zona de estudio. El primero es el choque entre la Placa Farallón y la Placa de Norteamérica, conocida como Orogenia Laramide. Este evento provocó el movimiento compresivo y da origen a la intrusión de grandes masas ígneas, así como a procesos de mineralización presentes en la zona. El segundo, desarrollado del Mioceno medio al Plioceno temprano, es el cambio en la configuración del límite entre las placas Pacífico y Norteamericana, dando inicio a la formación de la cuenca del Golfo de California mediante movimientos oblicuos extensionales con orientación NW-SE originando un relieve peninsular gobernado por bloques escalonados y fallas laterales dextrales. A este evento se le asocia la intrusión de estructuras tabulares de diferente composición (SGM, 2000).

Estructuralmente, el área estudiada está controlada por fallamientos normales y laterales, como la falla normal El Carrizal (La Giganta) y gran cantidad de fallas menores. La dirección de fallas normales es de  $N24^{\circ}$  a  $39^{\circ}E$ , sus magnitudes llegan a 25 km. Las direcciones correspondientes a fallamientos laterales posiblemente conjugados, tienen rumbo  $N45^{\circ}$  a  $65^{\circ}E$  con longitudes hasta 40 km y dirección  $N65^{\circ}-80^{\circ} W$  a E-W franco, los cuales están desplazados por las fallas normales (SGM, 1996) (**Figura 2**).

## 2.6.3 Yacimientos minerales en la zona de estudio

Los yacimientos minerales principales que se conocen en el área, son de tipo de relleno de fisuras, depósitos de contacto, así como stockwork y diseminado asociado a intrusivos de cuarzo-diorita-tonalita. Los de mayor distribución, son los de fisuras asociadas a zonas de falla de carácter regional de rumbo NE-SW, que contienen mineralización de oro, plata, plomo, zinc, cobre y arsénico (SGM, 1996) (**Figura 2**).

Estas estructuras mineralizadas, dentro de la zona de estudio, alcanzan hasta 6 km de longitud con un espesor promedio de 0.90 m (Veta La Reforma-La Testera). Es común la alta concentración de valores, principalmente oro y plata, tanto a profundidad como a lo largo de las vetas (minas San Andrés, San Isáis, La Reforma, etc.). Las alteraciones que se observan en este tipo de yacimientos son principalmente silicificación, cloritización y argilización, en menor importancia sericitización. Las rocas encajonantes de la mineralización fundamentalmente son granodioritas, gabros, esquistos de biotita y gneises cuarzo-feldespáticos.

En el Distrito de SA-ET existen dos principales sistemas de mineralización alojados en diques y veta-fallas. El primero, corresponde a El Triunfo, tiene rumbo general  $NE 24^{\circ}$  a  $39^{\circ}SW$  e inclinaciones que varían de  $38^{\circ}$  a  $72^{\circ}$  al SE. El otro, de rumbo franco N-S que varía a  $NE 05^{\circ} SW$  e inclinaciones de  $40^{\circ}$  a  $75^{\circ}$  al poniente o al noroeste correspondiente a

San Antonio. En este distrito ambos sistemas de fallas constituyen un gran graben mineralizado (SGM, 1996) (**Figura 2**).

Las zonas mineralizadas, comúnmente se localizan en vetas con valores de oro (Au), plata (Ag), plomo (Pb) y zinc (Zn), asociados a óxidos y sulfuros, tanto en forma maciza como en diseminados dentro de estructuras de cuarzo. La roca encajonante corresponde a un granito de biotita y en otros casos, granodiorita y granito. La distribución mineralógica predominante, es en forma diseminada con presencia de sulfuros como argentita (Ag<sub>2</sub>S), galena (PbS), pirita (FeS<sub>2</sub>), esfalerita (ZnS) y arsenopirita (FeAsS) (SGM, 2000).

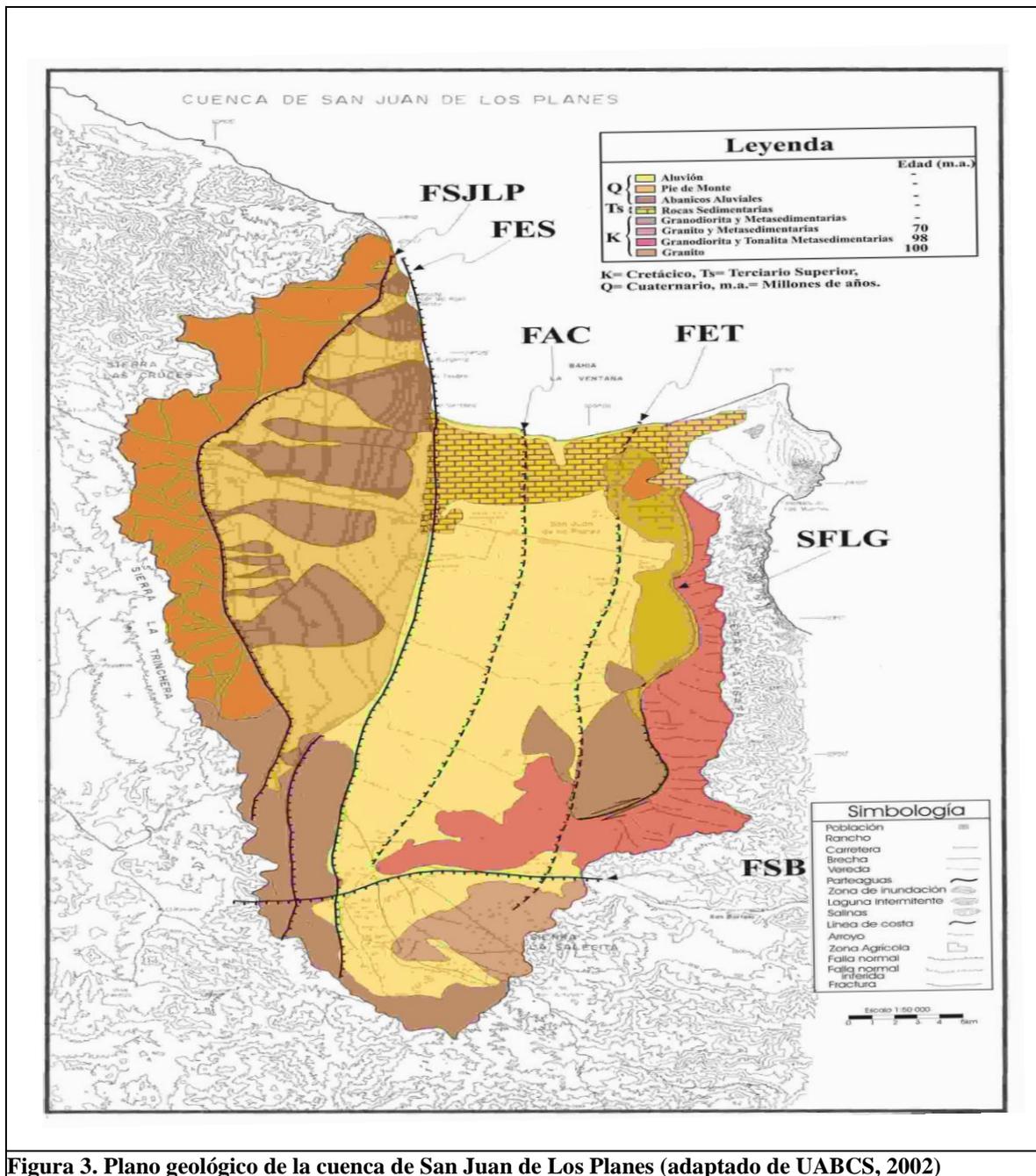
En el granito de la Sierra La Trinchera (en su flanco oriente), existen zonas con fuerte alteración potásica. Con relación a los pórfidos auríferos que contiene los depósitos stockwork y diseminados, los minerales consisten principalmente de oro libre, asociado a pirita y arsenopirita. Su distribución es más restringida, como sucede en las localidades del Tajo San Antonio y San Alberto. Las dimensiones conocidas de estos cuerpos mineralizados son de hasta 8,000 m de longitud y de 200 m de ancho (lado oriente del Poblado San Antonio). Las alteraciones que afectan a este tipo de yacimientos son la oxidación, silicificación y cloritización. (SGM, 1996) (**Figura 2**).

## **2.7 Hidrología de la zona de estudio**

La zona de estudio se localiza dentro del Acuífero Los Planes que está comprendido en la Región Administrativa I, Península Baja California. Pertenece a la Región Hidrológica No. 6, Baja California Sureste. La profundidad en 1996 del nivel estático del acuífero oscilaba entre 20 y 130 m, presentando los valores mínimos en la planicie costera y los máximos hacia la serranía. (CONAGUA, 2009).

La zona en la que el nivel del agua en los pozos se ubica por debajo del nivel medio del mar, abarca la parte noreste de la zona de extracción, 11 km tierra adentro. Así mismo las cargas hidráulicas en el agua subterránea por debajo del nivel del mar (nm), generan un gradiente hidráulico que provoca que el movimiento del agua subterránea sea del mar hacia el continente. También se observa agua subterránea termal probablemente asociada al flujo profundo en fracturas a través del material intrusivo (CONAGUA, 2003).

Para el aprovechamiento del agua subterránea la Gerencia Estatal de Baja California Sur, determinó que dentro de la cuenca de San Juan de los Planes, especialmente en la zona sur (Sierra La Salecita y San Antonio), existen una cantidad (UABCS, 2002 reporta alrededor de 40 pozos ) de aprovechamientos (la mayoría pozos excavados a mano denominados norias) utilizados para abastecimiento doméstico y de abrevaderos de bovinos y caprinos (CONAGUA, 2003) (**Figura 3**).



**Figura 3. Plano geológico de la cuenca de San Juan de Los Planes (adaptado de UABCS, 2002)**

El drenaje en la zona es abundante y presenta una disposición dendrítica en las partes altas que cambia a paralela al descender hacia la planicie (Figura 4). El colector principal es el arroyo Los Planes el cual se ubica en la parte noreste de la Figura 4, mismo que presenta un volumen de escurrimiento del orden de  $2 \text{ mm}^3/\text{año}$ . Recibe aportación de algunos afluentes, lo que lleva a la formación de cauces entrelazados en las partes bajas. Las corrientes son de régimen intermitente y en general se infiltran al alcanzar la planicie aluvial. Cuando el régimen de lluvias es mayor, los escurrimientos más importantes llegan a descargar al mar, que se encuentra en la parte oeste de la zona de estudio (CONAGUA, 2009).

En la Sierra Las Calabazas afloran rocas intrusivas en forma de lacolito y su relación con las rocas circundantes, constituyen patrones estructurales que han dado origen a redes de drenaje de tipo paralelo y dendrítico que se integran en las partes altas y se desintegran en las bajas, perdiéndose en muchas ocasiones en la planicie costera o aluvial. Las corrientes principales de tipo intermitente son los arroyos San Antonio, San Blas, Santa Rita, Las Tijeras, El Salto y el Cardón (SGM, 1996).

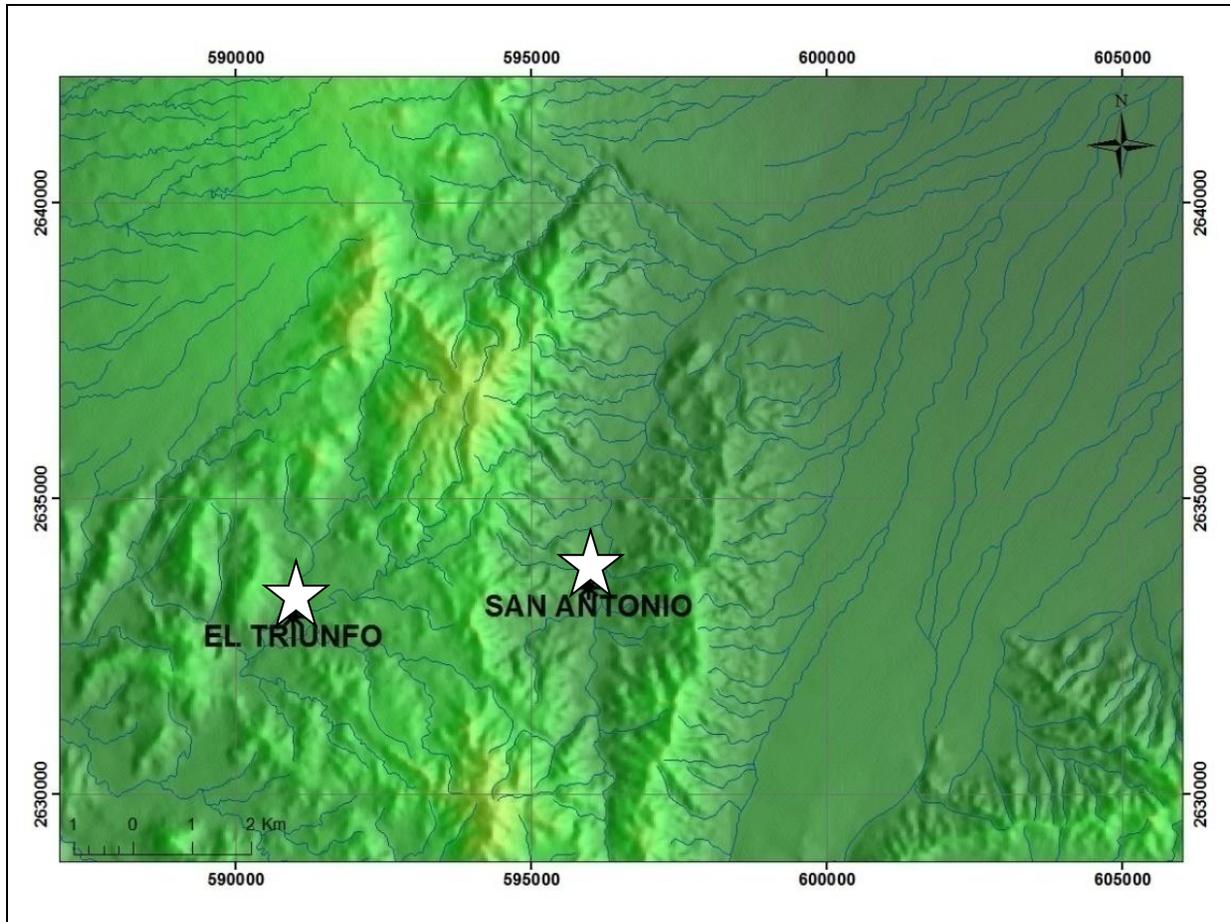


Figura 4. Mapa topográfico, donde se muestra el tipo de drenaje (dendrítico y paralelo) de la zona de estudio.

## 2.8 Edafología en la zona de estudio

Los suelos predominantes de la zona de estudio son: fluvisoles en las zonas costeras, representado por aluviales, así como por regosoles y litosoles, cubriendo los piedemontes y laderas de las montañas (Compañía Minera Pitalla, 2012).

## **2.9 Vegetación en la zona de estudio**

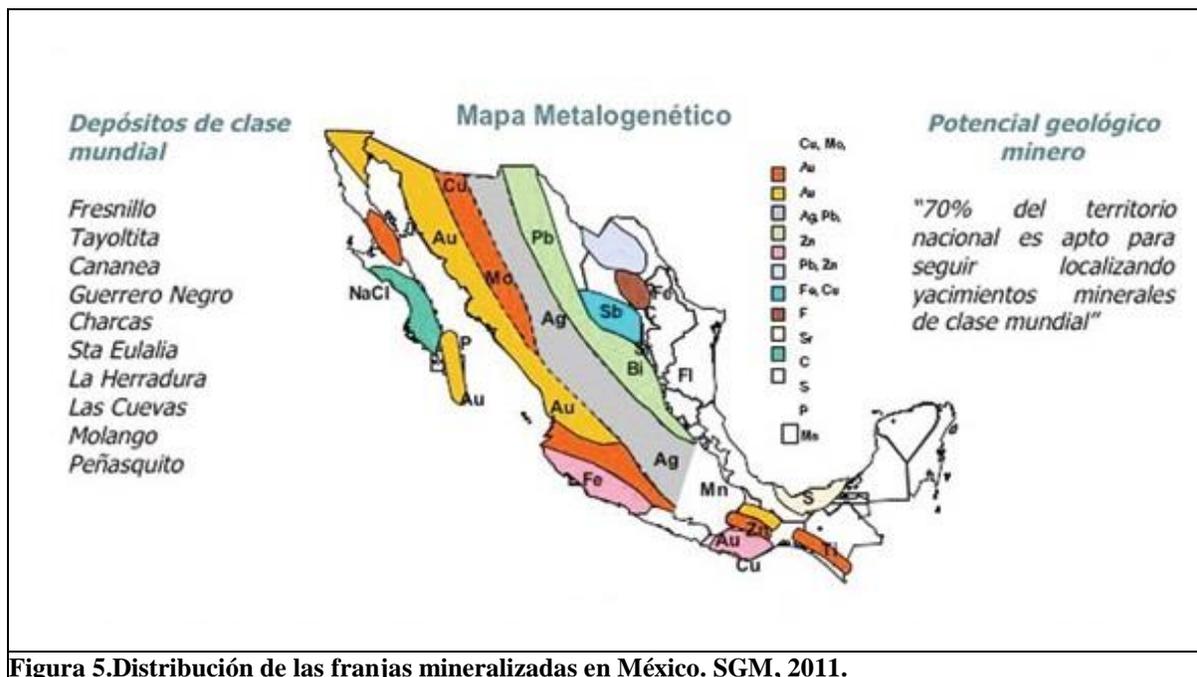
En general, el estado presenta un desarrollo de matorrales xerófilos, como sarcocaulé (con mayor abundancia y representado por especies como el copal, hierba del burro, palo verde, ocotillo y otras), crasicaulé, sarcocrasicaulé de neblina (como el cardón, pitahaya agria, pitahaya dulce, etc.), desértico micrófilo y mezquital, constituidos por una gran diversidad de formas vegetales adaptadas a la aridez, desde arbustos de tallos carnosos, gruesos, en ocasiones retorcidos, hasta pequeñas plantas efímeras estacionales (Romero-Guadarrama, 2011).

La vegetación de la zona consta principalmente de especies raras y estrictamente endémicas. De acuerdo a la disminución del gradiente altitudinal se localizan las siguientes comunidades vegetales: bosque de pino-encino, bosque de encino, selva baja caducifolia, matorral sarcocaulé, y agrupaciones costeras (Compañía Minera Pitalla, 2012).

### 3 MARCO TEÓRICO

#### 3.1 Generalidades

México es un país con abundantes recursos minerales (**Figura 5**), lo que ha marcado su tradición minera. Entre los principales tipos de yacimientos que se han explotado están: yacimientos epitermales (Taxco, Guanajuato, Pachuca, Zacatecas, Santa Bárbara, etc.), yacimientos tipo skarn (Charcas, Zimapán, La Paz, Concepción del Oro, etc.), yacimientos tipo sulfuros masivos vulcanogénicos (Tizapa, Rey de Plata, etc.) y yacimientos tipo pórfido cuprífero (La Caridad, Cananea, etc.) (SGM, 2011).



En los diferentes tipos de yacimientos, ocurren tanto los minerales económicos (mena), como los minerales no económicos (ganga) y con el fin de separarlos son sometidos a diferentes procesos físico-químicos. El avance de la tecnología en la industria minera mundial, propició la introducción en México de procesos metalúrgicos como la flotación y la cianuración a inicios del siglo XX, lo que ha permitido explotar mayores volúmenes de mineral con valor comercial, a la vez que propició la generación de mayores cantidades de residuos mineros.

Históricamente, los residuos generados fueron depositados en los alrededores de las minas en sitios topográficamente bajos sin ninguna consideración ambiental, convirtiéndose en focos de contaminación para la región.

En la actualidad la industria minera se debe desarrollar bajo el concepto de Desarrollo Sustentable y por tanto debe de cumplir con leyes ambientales de cada país y con las exigencias de la comunidad internacional, teniendo como un rubro importante la conservación del medio ambiente, para lo que se han implementado diversas tecnologías aplicadas al tratamiento y almacenamiento de los residuos (Camero, 2000).

Debido a que la minería es una actividad que se caracteriza por su alto volumen de generación de residuos, algunos de ellos potencialmente tóxicos, los cuales pueden constituir un riesgo a la salud y al medio ambiente, en caso de ser manejados de manera inadecuada, en México, se publicó la Norma Oficial Mexicana NOM-157-SEMARNAT-2009, “que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros”. Así mismo está la Norma Oficial Mexicana NOM-052SEMARNAT-2005, “que establece las características, el proceso de identificación, clasificación y el listado de los residuos peligrosos”.

Actualidad, existen zonas mineras en explotación en diversos estados de México tales como: Durango, Zacatecas, San Luis Potosí, Guerrero, Hidalgo, Sonora, Sinaloa, Coahuila, Guanajuato, Baja California, Michoacán, Oaxaca, Nayarit, Querétaro y Chihuahua. Sin embargo, sólo en algunos estados se reportan estudios ambientales. Algunos ejemplos de esto son: el distrito minero de Guanajuato donde se ha estudiado la presencia de metales pesados en ríos como resultado de la actividad minera (Ridgway *et al.*, 1995), en Zimapán, Hidalgo, donde se han efectuado investigaciones acerca del origen del arsénico en el agua subterránea (Armienta *et al.*, 1997) y del potencial mutágeno de esta agua contaminada (Gómez-Arroyo *et al.*, 1997), en San Luis Potosí, donde se han determinado las concentraciones de arsénico (As) y metales pesados en suelo y vegetación aledaños a depósitos de jales (Castro-Larragoitia *et al.*, 1997), en Baja California Sur, donde se evaluó la potencial contaminación por arsénico de los desechos mineros de minas de oro y plata hacia el agua subterránea (Carrillo y Drever, 1998a), y en Taxco, Guerrero, donde se ha estudiado el fenómeno de drenaje ácido en los residuos mineros y su impacto al entorno (Romero *et al.*, 2007).

## **3.2 Residuos de la industria minera**

### **3.2.1 Tepetate, terreros, jales y residuos metalúrgicos**

Existen varios tipos de residuos mineros de acuerdo a la etapa de la minería que se realiza, en el proceso de extracción encontramos tepetates y terreros, en el proceso de beneficio tenemos jales y en los procesos metalúrgicos (procesos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos) encontramos cenizas, escorias y lodos (precipitados). En la **Figura 6** se puede observar los procesos en las etapas de minado y los residuos correspondientes a cada uno de ellos.

### 3.2.2 Etapas de minado

#### **Proceso de extracción del mineral.**

La operación de la mina, dependiendo de la forma y localización espacial del yacimiento, se puede desarrollar en forma subterránea o a tajo abierto. En ambos casos, se realizan actividades como es, la extracción del mineral por medios mecánicos (como explosivos o palas cargadoras, en el caso del material suelto).

En esta etapa se obtienen los residuos mineros como el tepetate (material estéril) y los terreros (material mineral de baja ley), que posteriormente se depositarán y se les dará un manejo integral adecuado.

Existe además la etapa de transporte donde después de haberse seleccionado y separado el material estéril del material económico. Si es material estéril se lleva a terreros (tepetateras) y si es mineral se lleva directamente a la planta de beneficio y se deposita en tolvas (generalmente), que normalmente se ubican delante del concentrador.

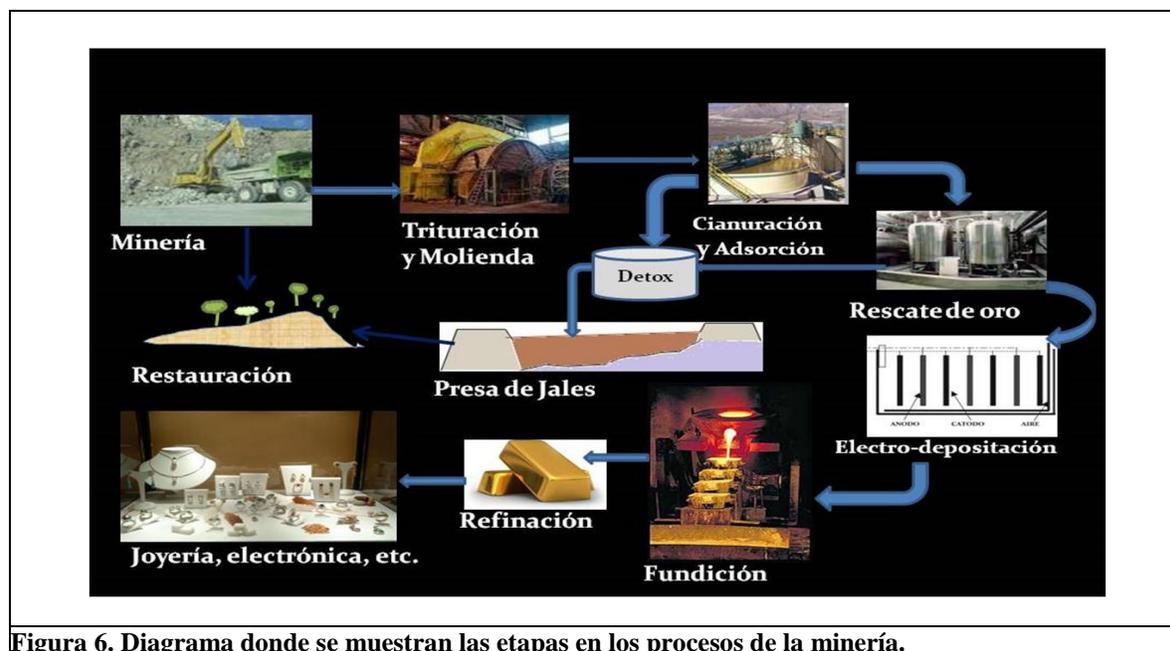
#### **Proceso de beneficio del mineral (procesos de lixiviación)**

En esta etapa se busca, por distintos medios, lograr que el mineral pueda ser comercializable. Para esto se recurre a distintos métodos de beneficio de minerales, los cuales no solo dependen del tipo de mineral, sino también de las características propias de cada yacimiento. En el caso de los minerales metalíferos, normalmente es necesaria la concentración, que consiste en liberar el mineral económico de la roca en donde se encuentra, valiéndose de medios mecánicos como la trituración, la molienda y la clasificación. Por motivos económicos, es rara la vez que es posible liberar el mineral en un 100% (**Figura 6**).

Algunos procesos de concentración empleados en la actualidad se realizan con base en algunas propiedades físicas de sus componentes en los minerales como son, la concentración gravimétrica, técnicas que ocupan mesas vibratorias. Así mismo por su propiedad en susceptibilidad magnética existe la separación de minerales paramagnéticos y altamente magnéticos (o ferromagnéticos), de minerales diamagnéticos (ganga y/o minerales débilmente magnéticos), mediante electroimanes. Los tipos de separación electromagnética comúnmente empleados son: separadores secos, y separadores húmedos. También existe el método de flotación (físico-químico) que hoy es el más empleado para sulfuros. Así como la cianuración en tanques (químico), que es muy empleado en la recuperación de oro (Au).

## Procesos metalúrgicos (pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos)

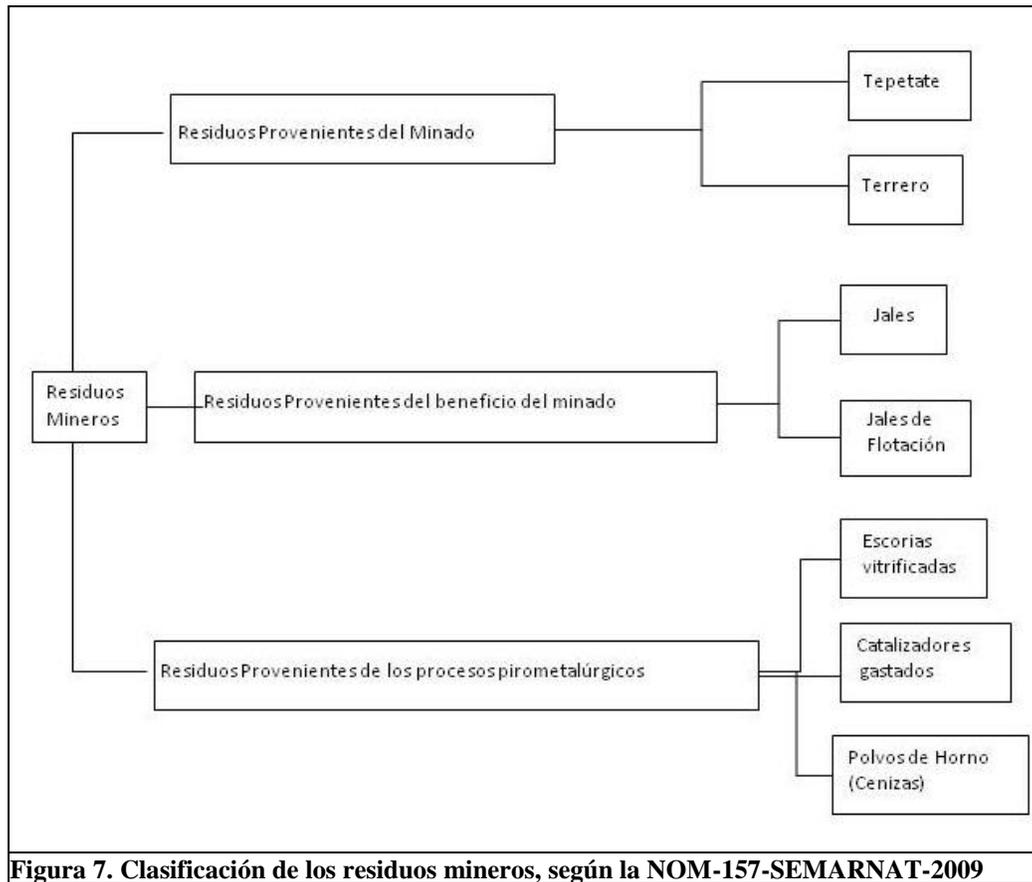
Son procesos a temperatura elevada para la obtención y refinación de metales, como la fundición. Es una técnica para la extracción de metales por medio de calor a partir de las menas del yacimiento, directamente o después de concentrarlas. Se trata de extraer el metal del mineral, también conocido como purificación de los metales, para obtener un producto final (**Figura 6**).



**Figura 6.** Diagrama donde se muestran las etapas en los procesos de la minería.

Los residuos de procesos de concentración de minerales como oro (Au), plata (Ag), plomo (Pb), zinc (Zn) y cobre (Cu) generalmente contienen sulfuros metálicos residuales como la pirita ( $\text{FeS}_2$ ), pirrotita ( $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$ ), galena ( $\text{PbS}$ ), esfalerita ( $\text{ZnS}$ ), calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) y arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ) que, en condiciones de intemperismo húmedo, pueden generar un drenaje ácido (DA) el cual puede transportar elementos potencialmente tóxicos (EPT) como el arsénico (As), cadmio (Cd), plomo(Pb), cobre(Cu), zinc (Zn), etc. (Romero *et al.* 2007).

### 3.2.3 Clasificación de los residuos con base en la NOM-157-SEMARNAT-2009



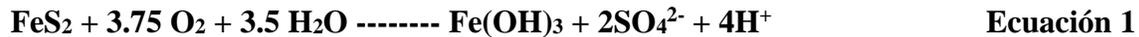
## 3.3 Procesos geoquímicos que tienen lugar en los desechos mineros de sulfuros metálicos.

### 3.3.1 Oxidación de sulfuros metálicos

Los sulfuros metálicos en los residuos se pueden oxidar al estar expuestos a los fenómenos de intemperismo (interacción con oxígeno y agua). Los minerales se oxidan con mayor dificultad que los compuestos amorfos. Los sulfuros metálicos más importantes asociados a la generación de acidez son la pirita ( $\text{FeS}_2$ ), pirrotita ( $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$ ) y arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ).

Diferentes autores, han reportado las reacciones de oxidación, de los principales sulfuros metálicos encontrados en los residuos mineros con base en ecuaciones químicas (Faure 1980, Bain *et al.*, 2000, Jenning *et al.*, 2000, Armienta *et al.*, 2001, Costello 2003). A continuación se presentan algunas ecuaciones que pueden provocar reacciones de oxidación en algunos sulfuros metálicos:

Pirita (FeS<sub>2</sub>)



Pirrotita (Fe<sub>1-x</sub>S)



Arsenopirita (FeAsS)



Galena (PbS)



Esfalerita (ZnS)



Calcopirita (CuFeS<sub>2</sub>)



De acuerdo a las reacciones planteadas en las ecuaciones químicas anteriores, se puede decir que la problemática ambiental derivada de la oxidación de los sulfuros metálicos está asociada a la liberación de iones sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) y especies de arsénico que pueden producir protones (H<sup>+</sup>) y aniones como los arseniatos (AsO<sub>4</sub><sup>3-</sup>). Lo que después podrían dar origen al denominado drenaje ácido. La composición química del drenaje ácido es controlado por las características geológicas como el origen del yacimientos, la mineralogía, los proceso de beneficio y las condiciones climáticas (Seal y Hammarstrom, 2003).

### 3.3.2 Procesos de neutralización

El proceso mediante el cual se consume ácido se denomina “neutralización”. Cuando la capacidad neutralizadora que se puede encontrar en algunos minerales como, carbonatos, oxi-hidróxidos de hierro y aluminosilicatos, excede la generación de ácido principalmente producido por minerales como la pirita, se consumirán todos los protones (H<sup>+</sup>) y el agua que drene del depósito tenderá a un pH cercano al neutro e incluso alcalino.

De acuerdo con Jambor (1994), cuando los protones (H<sup>+</sup>) son liberados por la oxidación de sulfuros y existe la presencia o están en contacto con carbonatos, hidróxidos y aluminosilicatos, se presentan reacciones amortiguadoras de pH. Los principales mecanismos de las reacciones y procesos que se pueden generar en los residuos son:

- a) Disolución de carbonatos
- b) Disolución de hidróxidos y óxidos de hierro (Fe)
- c) Alteración de aluminosilicatos

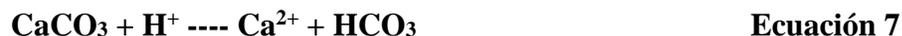
**Disolución de carbonatos.**

La disolución de carbonatos libera cationes alcalinos y metálicos como son: calcio (Ca<sup>2+</sup>), magnesio (Mg<sup>2+</sup>), hierro (Fe<sup>2+</sup>) y manganeso (Mn<sup>2+</sup>). Estos cationes participan en la formación de minerales secundarios incluyendo hidróxidos, que posteriormente pueden disolverse y contribuir a la neutralización del drenaje ácido (Jambor, 1994; Dold, 2002).

Las reacciones que involucran la disolución de carbonatos en los residuos, pueden mantener las condiciones de pH cercanas a las neutras, así como prevenir la excesiva liberación y transporte de metales solubles que generalmente ocurren bajo condiciones ácidas.

La disolución de la calcita (Ecu.7) bajo condiciones ácidas, consume la acidez y produce la liberación de calcio (Ca<sup>2+</sup>) que en presencia de los sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) liberados por la oxidación de la pirita (FeS<sub>2</sub>) (Ecu.1), deriva en la precipitación de yeso (CaSO<sub>4</sub>•2H<sub>2</sub>O) (Ecu.8).

Calcita



Yeso



Cuando un residuo se encuentra bajo condiciones ácidas, la calcita (CaCO<sub>3</sub>), es el primer carbonato que se disuelve, lo que puede ayudar a mantener el pH del drenaje minero cercano al neutro (entre 6.5 y 7.5) controlando la liberación y transporte de elementos potencialmente tóxicos. (Jambor 1994; Dold 2002).

Otro carbonato que puede actuar como neutralizador es la siderita. Su disolución está dada por la siguiente ecuación.

Siderita



Los minerales más comunes que consumen protones (H<sup>+</sup>) al disolverse son los carbonatos y de ellos el más importante es la calcita (CaCO<sub>3</sub>), pero hay otros minerales que comúnmente

se encuentran en los residuos, sin embargo, tienen una reactividad menor con relación al carbonato de calcio (**Tabla 1**).

Minerales Tipo	Reactividad relativa
Calcita, Aragonita, Dolomita, Brucita	1
Anortita, Nefelita, Olivino, Granate, Jadeita Leucita, Diopsida, Wollastonita	0.6
Epidota, Enstatita, Hiperstena, Augita , Hedenbergita, Hornblenda, Glaucofano, Tremolita, Actinolita, Antofilita, Serpetina, Crisolita, Talco, Clorita, Biotita.	0.4
Albita, Oligoclasa, Labradorita, Vermiculita Montmorillonita, Gibbsita, Caolinita.	0.02
Feldespató potásico, Moscovita	0.01
Cuarzo, Rutilo, Zircón	0.004

**Tabla 1. Minerales agrupados de acuerdo a su capacidad de neutralización de acidez (Jambor,2000).**

Cuando los carbonatos se agotan, el consumo de acidez se da a través de algunos hidróxidos metálicos como gibbsita ( $Al(OH)_3$ ) y ferrihidrita ( $Fe(OH)_3$ ).

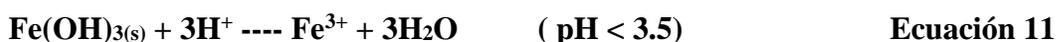
### Disolución de hidróxidos.

Si la generación de ácido continua y los carbonatos han sido consumidos, el pH seguirá en condiciones acidas, pudiéndose dar la disolución de gibbsita [ $Al(OH)_3$ ] a un pH de 4.3 a 4.0. Cuando las condiciones siguen con valores de pH bajos (pH menores a 3.5), se propicia la disolución de  $Fe(OH)_3$  (Jambor 1994, Dold 2002). Estas reacciones se muestran a continuación:

Gibbsita



Ferrihidrita

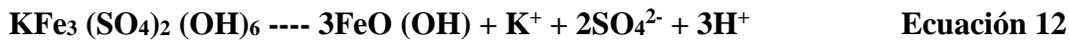


Como resultado de la neutralización e incremento del pH, existe la precipitación de oxi-hidróxidos metálicos como gibbsita amorfa, ferrihidrita, goethita o schwertmanita (Jambor

1994; Dold 2002). El ion férrico proviene de las reacciones de oxidación de los sulfuros y el aluminio disuelto proviene de la disolución de los aluminosilicatos.

El proceso de oxidación de los sulfuros puede generar la precipitación de minerales secundarios de hierro (Fe), entre los que destacan los oxi-hidróxidos y los sulfatos, por ejemplo la jarosita que tiende a formarse en ambientes de pH bajo (1.5-3) y altas concentraciones de sulfatos (>3000 mg/L), la schwertmannita en acidez moderada (pH de 3-4) y sulfatos moderados (1000 a 3000 mg/L) y la ferrihidrita en ambientes con pH neutro (>5).

Jarosita ---- Goethita



Schwertmannita----- Goethita



Los oxi-hidróxidos de Fe son los minerales secundarios que se forman con más frecuencia en los ambientes oxidados de los desechos mineros. Estos pueden componerse de Fe (II), Fe (II) + Fe (III) o sólo de Fe (III) (Dold, 2002).

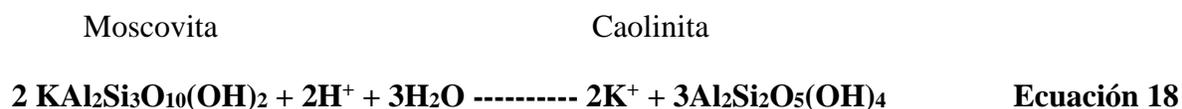
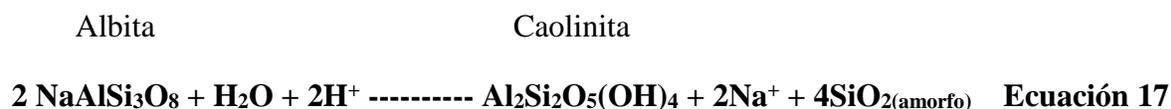
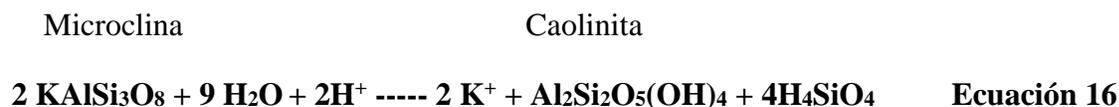
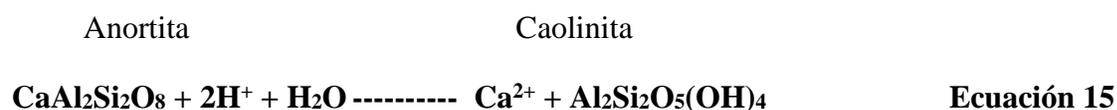
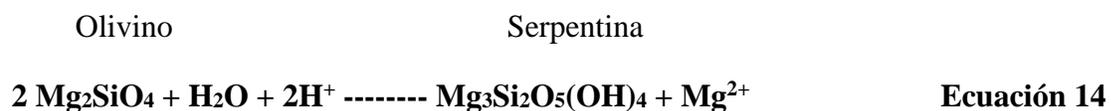
La formación de oxi-hidróxidos de Fe es importante desde el punto de vista ambiental ya que juegan un papel determinante en los procesos de retención de los EPT debido a los fenómenos de sorción (Goldberg 1986; Fuller *et al.*, 1993; Bowel 1994; Lin 1997; Foster *et al.*, 1998; McGregor *et al.*, 1998, Romero *et al.*, 2007).

### **Disolución de aluminosilicatos.**

Bajo condiciones de pH ácido, después de que los carbonatos y los hidróxidos son consumidos, comienza la disolución de los aluminosilicatos (Jambor 1994, Jambor *et. al.*, 2003). La disolución de muchos aluminosilicatos consume iones H<sup>+</sup> y contribuye con cationes como calcio (Ca<sup>2+</sup>), magnesio (Mg<sup>2+</sup>), hierro (Fe<sup>2+</sup>), sodio (Na<sup>+</sup>), potasio (K<sup>+</sup>), silicio (Si<sup>3+</sup>) y aluminio (Al<sup>4+</sup>) (Jambor 1994; Dold 2002).

Para el caso de las plagioclasas, como la anortita, el intemperismo es muy similar al de los feldespatos provocando la liberación de Na<sup>+</sup> y/o Ca<sup>2+</sup>. Bajo condiciones de pH ácido, las plagioclasas pueden reaccionar para formar caolinita, pero a pH básico pueden formar esmectita (Jambor, 1994; Dold, 2002).

La moscovita, los piroxenos y los anfíboles se alteran a clorita y por decremento de pH, la clorita se altera a arcillas como la sericita, caolinita o montmorillonita. Estas arcillas juegan un papel muy importante en la retención de EPT. A continuación se presentan algunas de estas ecuaciones químicas y sus reacciones:



### 3.3.3 Procesos de retención (fenómenos de sorción).

Los fenómenos de sorción incluyen la adsorción, la absorción y el intercambio iónico. La adsorción indica que los solutos se adhieren a la superficie de los sólidos; la absorción, en cambio sugiere que los solutos se introducen dentro de las superficies de los sólidos y el intercambio iónico involucra la sustitución de un sorbato por otro en la superficie del sólido.

El concepto de adsorción, generalmente, se entiende en un sentido más amplio que el expuesto anteriormente, por ejemplo Fuller (1993) denomina como “adsorción” al fenómeno de retención de arseniatos durante la formación de ferrihidritas (co-precipitación). Drever (1997) señala que hablar de intercambio iónico equivale a hablar de adsorción electrostática.

El fenómeno de adsorción es considerado el proceso químico más importante que afecta el movimiento de contaminantes (Drever, 1997). Mediante este proceso, los arseniatos pueden ser removido de la fase líquida y retenidos en superficies minerales cargadas positivamente por enlaces químicos que permiten la formación de nuevas compuestas conocidos como complejos de superficie.

Los minerales tienen la capacidad de retener a los aniones o cationes. Cuando el pH del agua es menor que el pH del Punto de Carga Cero (PCC), la superficie se carga positivamente y retiene a los aniones, cuando el pH del agua es mayor que el pH del PCC, la superficie se carga negativamente permitiendo la retención de cationes. En las aguas subterráneas con pH=6-9, las superficies minerales se pueden cargar positivamente y tener

capacidad para retener en sus superficies especies cargadas negativamente (como los arseniatos), se destacan las superficies de oxi-hidróxidos de hierro (Fe), aluminio(Al) y de carbonatos ( $\text{CO}_3$ ) cuyo PCC son mayores que el pH de las aguas subterráneas (Appelo, 1993).

Sin embargo, algunos autores (Manning y Goldberg, 1997) reportan la adsorción de arseniatos en superficies de minerales de arcilla (caolinita, illita, montmorillonita). El PCC de los minerales de arcilla es muy bajo (2-4), lo que indica que en presencia de aguas con pH mayores de 5 se cargaran negativamente, sin embargo los grupos de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  presentes en estos minerales, los hacen capaces de adsorber aniones, al aumentar el PCC de las capas superficiales de los mismos.

Por otro lado en la literatura, se ha reportado ampliamente el buen desempeño de las superficies de los oxi-hidróxidos de Fe como adsorbentes de especies de arsénico, siendo más fuertemente adsorbida la especie de los arseniatos (Xu et al.,1991; Fuller *et al.*, 1993; Fetter, 1993; Bowel, 1994); Van Der Hoek *et al.*,1994); Sun y Doner, 1998). Se puede entonces, interpretar que la existencia y movilidad de especies de arsénico disueltas en las aguas puede estar limitadas por la presencia de superficies de oxi-hidróxidos de Fe, los cuales son estables en un amplio rango de Eh-pH.

#### **3.3.4 Actividad bacteriana**

Se reconoce que ciertas bacterias pueden acelerar los procesos de oxidación, incrementando con ello las condiciones de generación de un posible drenaje ácido. La bacteria *Thiobacillus ferrooxidans* es capaz de oxidar compuestos de azufre reducidos, así como oxidar el hierro ferroso en férrico que puede actuar como oxidante. Otras bacterias conocidas como catalizadores de la oxidación de los minerales sulfurosos son: *Thiooxidans* y *Sulfolobus*. La velocidad con la que ocurre la oxidación bacteriana depende de los siguientes parámetros: temperatura, pH, nutrientes, área superficial del mineral sulfuroso, disponibilidad de oxígeno y de dióxido de carbono.

Por tanto, la oxidación continua puede crear condiciones ideales para el crecimiento de las bacterias oxidantes. La producción de protones ( $\text{H}^+$ ) y la consiguiente disminución de pH, hasta un nivel adecuado para las bacterias que oxidan el sulfato y el hierro, la producción de hierro férrico y el aumento de temperatura debido al proceso de oxidación exotérmico, dan por resultado unas condiciones idealmente adecuadas para estas bacterias.

### 3.4 Clasificación mineralógica de los residuos.

Jambor (1994) comenta que existen dos tipos de minerales que podemos encontrar procedentes del yacimiento y otros minerales los cuales pueden precipitar posteriormente, el propone la siguiente clasificación: minerales primarios y minerales secundarios.

Minerales primarios: son los que provienen del yacimiento mineral de acuerdo a la mineralogía inicial. Estos minerales han pasado por los procesos de minado, procesos físicos, pero no han sufrido alteración química. Principalmente pueden encontrarse en los tepetate y terreros, producto del proceso de minado, aunque también pueden encontrarse en los jales.

Minerales secundarios: son los que se forman posteriormente al depósito principalmente por los procesos de oxidación y neutralización que ocurren en los residuos propiciando la precipitación de minerales secundarios. Los sulfuros metálicos, carbonatos, silicatos y aluminosilicatos que son minerales primarios sufren alteración físico-química y dan origen a una serie de minerales secundarios que precipitan como producto de la oxidación y neutralización de los minerales primarios (**Tabla 2**).

Nombre	Fórmula	Nombre	Fórmula
Yeso	CaSO <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O	Caolinita	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>
Alúmina	AlO <sub>3</sub>	Serpentinita	Mg <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>
Rozenita	FeSO <sub>4</sub> 4H <sub>2</sub> O	Piromorfita	Pb <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> Cl
Anglesita	PbSO <sub>4</sub>	Escorodita	FeAsO <sub>4</sub> * 2H <sub>2</sub> O
Jarosita	KFe <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	Beudantita	PbFe <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub> SO <sub>4</sub> (OH) <sub>6</sub>
Magnetita	FeO*Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Estrengita	FePO <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O
Anhidrita	CaSO <sub>4</sub>	Otavita	CdCO <sub>3</sub>
Goethita	α* FeO(OH)	Rodocrosita	MnCO <sub>3</sub>
Ferrihidrita	5 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> * 9H <sub>2</sub> O	Dolomita	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>
Lepidocrocita	γ* FeO(OH)	Siderita	FeCO <sub>3</sub>
Gibbsita	Al(OH) <sub>3</sub>	Cerusita	PbCO <sub>3</sub>

**Tabla 2. Minerales secundarios comunes que precipitan como producto de la oxidación y neutralización de los minerales primarios (Fuente: Morin y Hutt, 1997).**

La cantidad y composición de los minerales secundarios varía de acuerdo a algunos factores, como la composición mineralógica inicial, el tipo de yacimiento y los factores climáticos, el grado de oxidación, la infiltración, el grado de evaporación y el tamaño del grano (granulometría) de los residuos (Blowes *et al.*, 2003).

La precipitación de minerales secundarios como óxidos, hidróxidos, sulfatos, carbonatos y arseniatos de los metales liberados durante la oxidación es uno de los principales controles de la movilidad de los EPT (Blowes y Jambor 1990, Lin. 1997; McGregor *et al*, 1998, Bain *et al*, 2000, Roussel *et al*, 2000; Johnson *et al*, 2000).

La sorción o adsorción y co-precipitación de aniones (arseniatos, seleniatos, sulfatos, fosfatos) y cationes (metales pesados) en la superficie de minerales de arcillas, oxi-hidróxidos de Fe, Al, Mn y calcita ha sido ampliamente documentada como otro de los principales controles de la movilidad de los metales y metaloides potencialmente tóxicos (MMPT) (Frost y Griffin, 1976; Goldberg y Glaubig, 1988; Xu *et al*, 1991; Fuller *et al*, 1993; Fetter, 1993; Bowel, 1994; Van Der Hoek *et al*, 1994; Sun y Doner, 1998; Bothe y Brown, 1999; Romero, 2000).

### **3.5 Estudio de residuos mineros y valoración de la contaminación de los mismos.**

El principal problema ambiental asociado a los residuos se relaciona con la dispersión de los mismos hacia su entorno. En las zonas lluviosas, esta problemática está relacionada con la generación de drenaje ácido (DA) y su dispersión a través de los escurrimientos superficiales (dispersión hídrica); mientras que en las zonas áridas se relaciona con la dispersión provocada por el viento (dispersión eólica).

El DA se genera por la oxidación de los sulfuros metálicos y son escorrentías que comúnmente se caracterizan por tener valores bajos de pH y altas concentraciones de EPT disueltos (Lin 1997; Johnson *et al*. 2000; Roussel *et al*. 2000; Moncur *et al*. 2005) que al transportarse, pueden convertirse en un problema ambiental severo al contaminar suelos, sedimentos, aguas superficiales y subterráneas (Bain *et al*. 2000; Armienta *et al*. 2001; Jung 2001).

La oxidación de los sulfuros metálicos puede producir drenaje ácido: éste está en función del balance entre los minerales productores de ácido, como los sulfuros metálicos, y los minerales con capacidad de neutralización, como carbonatos, oxi-hidróxido de Fe y aluminosilicatos.

Para que ocurra la oxidación en los residuos, es necesario que contengan sulfuros metálicos reactivos y que existan las condiciones climáticas apropiadas (aire y agua o atmosfera

húmeda). Cuando ocurre la oxidación de los sulfuros metálicos, comúnmente los residuos presentan una coloración amarilla, café o rojiza.

### **3.5.1 Peligrosidad de residuos de acuerdo a la experiencia internacional**

Considerando que la generación del drenaje ácido es una función del tiempo y del balance entre los minerales de sulfuros metálicos (generadores de acidez) y los minerales neutralizadores (consumidores de ácido); para la adecuada valoración y/o predicción del comportamiento de los residuos con relación al peligro potencial que pueden representar para el ambiente, es necesario realizar pruebas de acuerdo a la estrategia de estudio propuesta por Lawrence(1990): pruebas de lixiviación, pruebas estáticas y pruebas cinéticas. La primera prueba valora la movilidad de los constituyentes tóxicos, mientras que las dos restantes evalúan el potencial de generación de acidez.

#### **Pruebas de lixiviación**

Son pruebas de tipo indicativo y se realizan tanto en residuos inalterados (no oxidados) como en residuos oxidados, con el fin de determinar los componentes mayormente solubles que se pueden dispersar en el ambiente, por lo tanto, para aplicar esta prueba no es necesario considerar si han o no ocurrido procesos de oxidación en los sulfuros metálicos de los residuos.

La prueba de lixiviación, tiene el propósito de caracterizar la peligrosidad de los residuos por su toxicidad. Es la referida a la "Prueba para realizar la extracción de metales y metaloides en los residuos, con agua en equilibrio con CO<sub>2</sub>". En el extracto obtenido se cuantifican los metales y metaloides.

Si la concentración en el extracto de uno o varios de los constituyentes tóxicos es superior a los límites permisibles, regulados por alguna norma, los residuos son peligrosos por su toxicidad.

#### **Pruebas estáticas**

Son pruebas de tipo predictivo, para pronosticar el potencial de generación de drenaje ácido en el futuro. Los resultados de las pruebas estáticas permiten estimar el balance entre los minerales generadores de acidez y aquellos consumidores de ácido. El procedimiento más utilizado para estimar el balance entre los minerales generadores de acidez y los neutralizadores es el propuesto por Lawrence (1997), denominada "Prueba Modificada de Balance Acido-Base (PM-ABA)".

La prueba de Balance Ácido-Base tiene el propósito de caracterizar la peligrosidad de los residuos por su reactividad.

## Pruebas cinéticas

Las pruebas cinéticas consisten en someter a intemperismo acelerado a las muestras, bajo condiciones controladas de laboratorio. Una de las pruebas más utilizadas es la prueba de celdas húmedas, que es una prueba diseñada para simular los procesos de intemperismo geoquímico bajo condiciones óptimas de oxidación. El extracto del lavado se analiza y se obtiene datos de pH, potencial redox, acidez, alcalinidad, sulfatos, conductividad eléctrica y concentración de EPT disueltos.

Estos datos pueden utilizarse para evaluar la velocidad relativa de liberación de productos de oxidación, el grado del intemperismo, y para estimar el tiempo que debe pasar para la generación de ácido. La interpretación de los datos resultantes de las pruebas cinéticas es compleja, por lo que en la práctica se le da un mayor peso a los resultados de las pruebas estáticas para la clasificación de los residuos (jales), con fines de planeación en la toma de medidas de prevención (Lawrence et al. 1997).

### 3.5.2 Peligrosidad de los residuos mineros de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-157-SEMARNAT-2009.

“La minería es una actividad que se caracteriza por su alto volumen de generación de residuos, algunos de ellos potencialmente tóxicos, los cuales pueden constituir un riesgo a la salud y al medio ambiente, en caso de ser manejados de manera inadecuada”.

#### Caracterización del residuo

La NOM-157 establece los límites máximos permisibles (LMP), en base seca y para los constituyentes tóxicos en el extracto (PECT), los cuales nos ayudan en la caracterización de un residuo, dichas pruebas se realizarán conforme a las especificaciones establecidas en dicha norma, como son:

- a) Las concentraciones totales de los elementos incluidos en la **Tabla 4**: antimonio (Sb), arsénico (As), bario (Ba), berilio (Be), cadmio (Cd), cromo (Cr), mercurio (Hg), plata (Ag), plomo (Pb) y selenio (Se).
- b) La movilidad de los metales y metaloides geodisponibles presentes en el residuo, con base en los métodos de la prueba (PM-ABA).
- c) El potencial de generación de drenaje ácido.
- d) El pH de la disolución del residuo en agua.

Las pruebas que deberán realizarse dependen de la etapa del proceso minero en la que se genere el residuo, **Tabla 3**.

<b>Etapa del proceso minero</b>	<b>Pruebas a realizar en el residuo</b>
Minado y Tratamiento de minerales	Concentración Total (base seca) Movilidad Potencial de generación de drenaje ácido
Producción de metales mediante procesos pirometalúrgicos o hidrometalúrgicos	Concentración Total Movilidad pH de la disolución del residuo en agua.

**Tabla 3. Pruebas para determinar la peligrosidad del residuo.**

### **Concentraciones totales (base seca)**

Para determinar las concentraciones totales de los elementos señalados en la NOM-157 se llevan a cabo procedimientos como: métodos analíticos de la NOM-147-SEMARNAT/SSA 1-2004, métodos de espectrofotometría de absorción atómica y el método de espectrofotometría de emisión con plasma acoplado inductivamente.

### **Movilidad**

La prueba de movilidad se realiza cuando la concentración total de los elementos normados es mayor que el correspondiente límite máximo permisible (LMP) señalado en la **Tabla 4**.

<b>Contaminante</b>	<b>LPM (mg/L) PECT</b>	<b>LMP (mg/Kg) Base seca</b>
Antimonio	0.53	10.6
Arsénico	5.00	100
Bario	100.0	2000
Berilio	1.22	24.4
Cadmio	1.00	20
Cromo	5.00	100
Mercurio	0.20	4
Plata	5.00	100
Plomo	5.00	100
Selenio	1.00	20

**Tabla 4. Límites máximos permisibles (LMP) para los constituyentes tóxicos en el extracto PECT y base seca.**

Posteriormente se realizara la prueba de lixiviado para extraer los constituyentes tóxicos:

La prueba de lixiviación se realiza con agua en equilibrio con CO<sub>2</sub> como se señala en la NOM-141-SEMARNAT-2003.

Cuando la concentración en el lixiviado de algunos de los elementos señalados en la Tabla 4, sea superior a los límites máximos permisibles (LMP) señalados en la prueba de extracción de los constituyentes tóxicos (PECT) señalados en el mismo, se concluye que el residuo es peligroso por la toxicidad asociada con la movilidad del elemento en cuestión.

## Prueba para determinar pH

En los residuos de los procesos mineros, la generación de acidez se determina mediante la medición del pH. Cuando el valor del pH sea  $\leq 4$  o mayor que 10, se considera que el residuo es peligroso.

Pruebas para determinar el potencial de generación de drenaje ácido.

Esta prueba consiste en definir el balance entre los minerales generadores de ácido y aquellos con potencial de neutralización. Al realizar la determinación, se debe registrar el valor del potencial de neutralización (PN) y la determinación del potencial de acidez (PA) de la muestra. El cálculo del potencial neutralización neto (PNN) se realiza mediante la siguiente formula  $PNN=PN/PA$ .

Cuando PNN es menor a 1.2, en el caso de que los residuos sean jales, se considera que los residuos son generadores de ácido.

En los residuos de los procesos de minado y tratamiento de minerales, el potencial de generación de drenaje ácido se determina aplicando la prueba modificada de balance ácido-base (ABA por sus siglas en inglés).

Para determinar si el residuo es generador potencial de drenaje ácido, se debe de aplicar la prueba ABA establecida en la NOM-141-SEMARNAT-2003 y sujetarse a los límites establecidos en la **Tabla 5**, de la NOM-157.

<b>Criterio</b>	<b>Calificación</b>	<b>Peligrosidad</b>
$PN/PA \leq 3$	Generador de drenaje ácido	Peligroso */
$PN/PA > 3$	No generará drenaje ácido	No peligroso

\*/ Si el valor de la relación PN/PA es mayor a 1 y menor o igual a 3, se considera generador de ácido. En este caso, el generador podrá optar por realizar la prueba estándar de laboratorio sobre intemperización de materiales sólidos utilizando una celda húmeda, para determinar que el residuo no es peligroso.

**Tabla 5. Límites para determinar la peligrosidad por el potencial de generación de drenaje ácido.**

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1 Inventario de residuos

Se hizo un inventario de los depósitos de residuos mineros del distrito minero SA-ET con base en las muestras que se recolectaron (**Tabla 6**).

De todas las 46 muestras colectadas, se identificaron: 40 terreros, 5 cenizas y 1 sólo jal. Esta identificación se hizo con base en sus características físicas observadas. Cabe mencionar que de cada muestra se recolectó una cantidad aproximada de 2 Kg, para su tratamiento y análisis.

Muestra	X	Y	Tipo	Muestra	X	Y	Tipo
Cañada de agua	596878	2631155	Terrero	Pedro y Pablo 3	593298	2634558	Terrero
El Capricho	595325	2632298	Terrero	Pedro y Pablo 4	593197	2634506	Terrero
El Ocote 1	594743	2635784	Terrero	Pedro y Pablo 5	593180	2634417	Terrero
El Ocote 2	594873	2635769	Terrero	San Alberto	596715	2632249	Terrero
El polvorín	596581	2633148	Terrero	San Cristobal	597245	2631819	Terrero
Espinoceña 1	594462	2635484	Terrero	San Gerónimo	596566	2634055	Terrero
Espinoceña 2	594595	2635590	Terrero	San Isáis	597949	2633368	Terrero
Espinoceña 3	594723	2635468	Terrero	Santa Rosa	591672	2632514	Terrero
Guasave 1	595025	2636741	Terrero	La Soledad 1	592498	2633273	Terrero
Humboldt 1	594228	2634953	Terrero	Tajo Sn Antonio	596413	2634672	Terrero
Humboldt 2	594088	2634741	Terrero	Tiro 96 (I)	594011	2634637	Terrero
Humboldt 3	594042	2634752	Terrero	Tiro 96 (II)	593968	2634612	Terrero
La Aurora	597937	2636769	Terrero	Tiro 96 (III)	593986	2634573	Terrero
La Colpa	598860	2638323	Terrero	Tiro 96 (IV)	593964	2634543	Terrero
Columbina	599333	2637473	Jal	Tiro 96 (V)	594006	2634459	Terrero
La Cruz 1	596932	2634979	Terrero	Tiro 96 (VI)	593820	2634348	Terrero
La Marroqueña	591703	2632164	Terrero	Valenciana 1	595127	2636909	Terrero
La Reforma	595325	2632939	Terrero	Valenciana 2	595116	2636783	Terrero
Las Palomas	596724	2634123	Terrero	La Ramona	590963	2632591	Cenizas
Los Gavilanes	597132	2633225	Terrero	Ladrillos la Ramona	590963	2632591	Cenizas
La Mendoseña	591495	2632066	Terrero	Tiro Chi. Los Sn Juanes	596268	2630861	Cenizas
Pedro y Pablo 1	593585	2634724	Terrero	L. d Chi. Los Sn Juanes	596268	2630861	Cenizas
Pedro y Pablo 2	593435	2634627	Terrero	la C. Ch los Sn Juanes	596268	2630861	Cenizas

**Tabla 6. Inventario de las muestras recolectadas.**

## 4.2 Muestreo

Se recolectaron en el distrito minero San Antonio-El Triunfo (SA-ET), un total de 46 muestras de residuos mineros, de las cuales, 41 fueron muestras compuestas.

Las 5 muestras restantes fueron residuos metalúrgicos las cuales fueron muestras simples ya que se colectaron dentro y cerca de las chimeneas Los San Juanes y La Ramona (Figura 8).

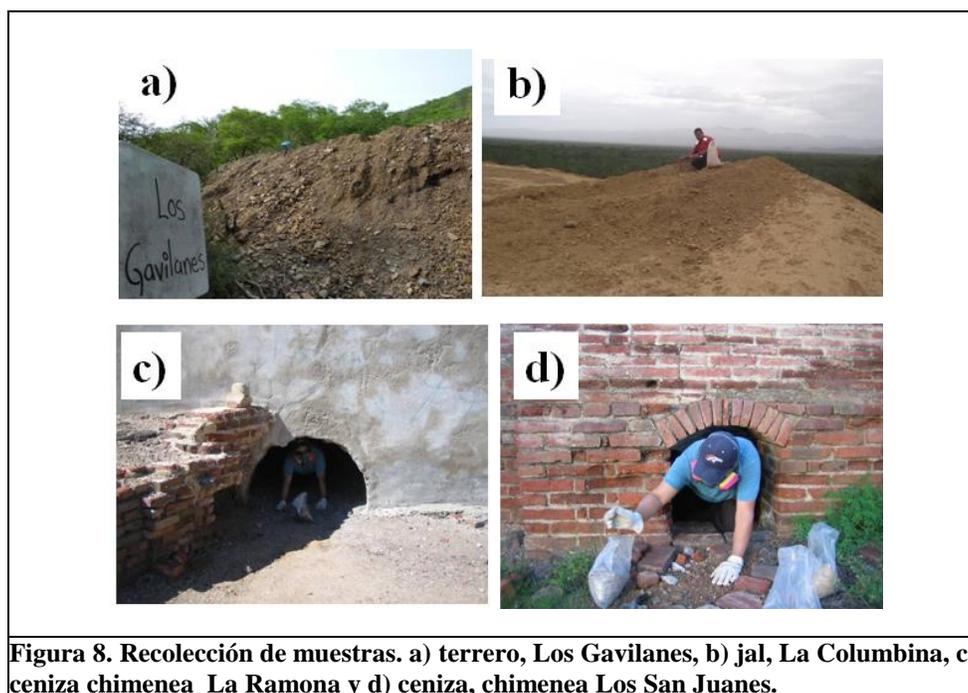


Figura 8. Recolección de muestras. a) terrero, Los Gavilanes, b) jal, La Columbina, c) ceniza chimenea La Ramona y d) ceniza, chimenea Los San Juanes.

En la **Figura 9**, se pueden observar las 46 muestras (residuos) recolectadas y su distribución en el área de estudio. Se puede ver que algunos residuos se encuentran cerca de los poblados El Triunfo y San Antonio.

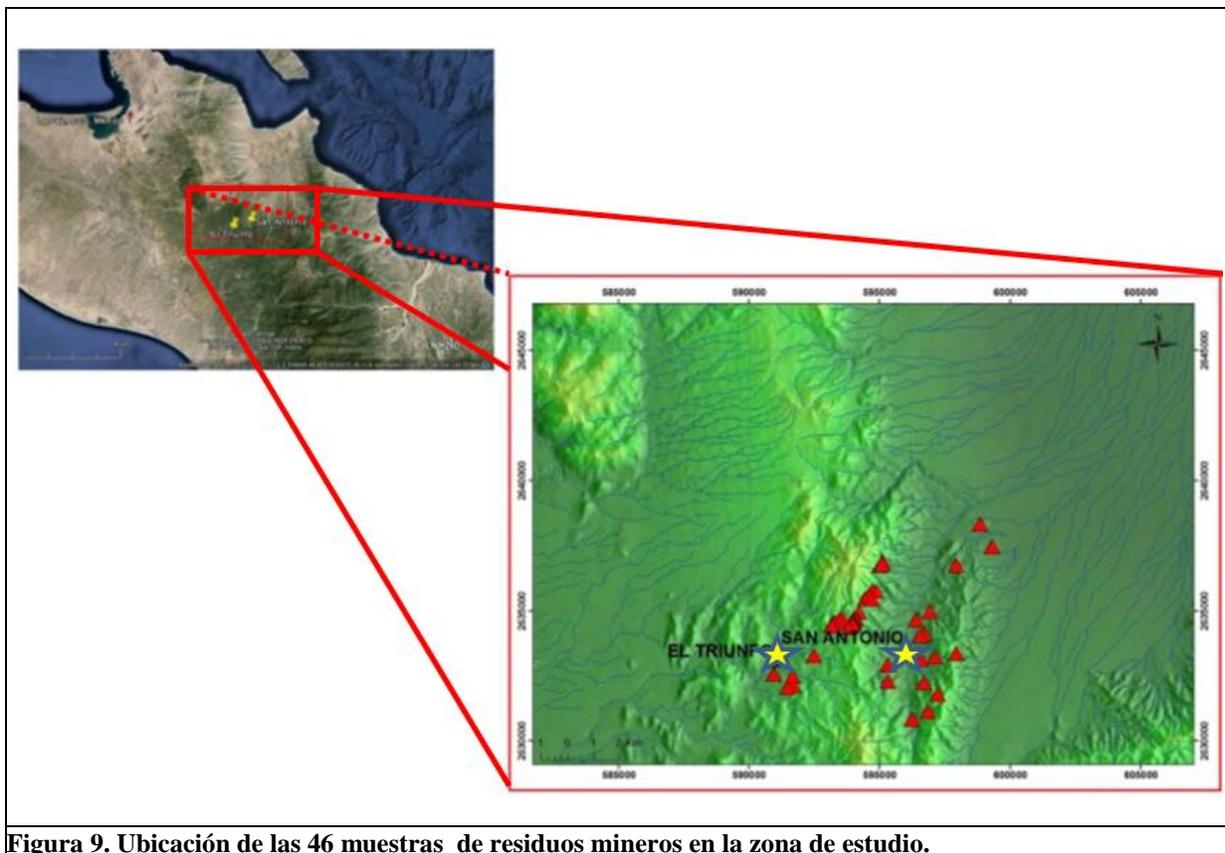


Figura 9. Ubicación de las 46 muestras de residuos mineros en la zona de estudio.

### 4.3 Análisis de laboratorio

Las pruebas se realizaron en los laboratorios de la Universidad Nacional Autónoma de México: en el Laboratorio de Geoquímica Ambiental, en el Laboratorio de Difracción de Rayos X, en el Laboratorio de Fluorescencia Rayos X, del Instituto de Geología. También se realizaron análisis en el Laboratorio Universitario de Petrología, del Instituto de Geofísica y en el Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental (CENICA), en las instalaciones de la Universidad Autónoma Metropolitana campus Iztapalapa.

### 4.4 Tratamiento de muestras

Las muestras de los residuos mineros, se secaron a temperatura ambiente. Una vez secas, se disgregaron, tamizaron por malla del número 10 (2mm), se cuartearon y se homogeneizaron. Así mismo, se trituraron y molieron (tamaño malla 200), para su posterior análisis.

## **4.5 Peligrosidad de los residuos**

### **4.5.1 Concentración total de elementos potencialmente tóxicos (EPT)**

Con el fin de valorar la peligrosidad de los residuos, se determinó la concentración total de EPT de acuerdo a la NOM-157.

Para la realización de este análisis se utilizaron aproximadamente 20g de muestra homogeneizada, finamente molida y colocadas dentro de bolsas plásticas.

Los análisis para determinar las concentraciones totales de EPT se realizaron de acuerdo al método estandarizado EPA 6200, utilizando un equipo portátil de Fluorescencia de Rayos X de tercera generación, modelo: NITTON XLt3, marca: Thermo Scientific. Entre los elementos analizados se encuentran las concentraciones totales de arsénico (As), bario (Ba), cadmio(Cd), cromo (Cr), mercurio (Hg), plata(Ag), plomo (Pb), selenio (Se), cobre (Cu), zinc(Zn), níquel(Ni), cobalto (Co) y vanadio (V).

Para valorar la precisión del método y la calidad de los resultados se utilizaron materiales de referencia, como son: 2710a Montana soil, Blank y Till-4, que se leyeron periódicamente después de cada lote de 10 muestras analizadas, con el fin de evaluar la exactitud del análisis, así mismo, cada muestra se leyó por triplicado para evaluar la precisión del método.

### **4.5.2 Toxicidad: constituyentes tóxicos solubles (geodisponibilidad)**

Para valorar la peligrosidad de los residuos por su toxicidad se realizó la prueba de lixiviación, siguiendo el procedimiento señalado en la Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003.

De acuerdo a la metodología referida en dicha norma, la prueba del lixiviado consiste en:

- a) Preparar suspensiones de los residuos en una relación 1:20 con agua en equilibrio con dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) con un pH de  $5.5 \pm 0.2$
- b) Agitar durante 18.0 horas  $\pm 0.25$  horas (agitador orbital).
- c) Separar la fase sólida del lixiviado mediante la centrifugación y filtración con membrana de 0.45  $\mu\text{m}$ .

La geodisponibilidad se determinó utilizando un espectrómetro de emisión óptica con plasma inductivamente acoplado (IPC-OES), marca: Thermo Scientific, modelo: iCAP 6500 series.

Así mismo, se realizó la determinación de iones mayores en los lixiviados, utilizando un Cromatógrafo marca: Metrohm modelo: 883 Basic IC plus.

## **4.6 Generación de drenaje ácido (DA)**

### **4.6.1 Reactividad: capacidad de generación de drenaje ácido**

Para poder valorar la capacidad de generación del drenaje ácido (DA), se realiza la prueba de balance ácido-base, utilizando el método propuesto por Lawrence, denominado “Prueba Modificada de Balance Ácido-Base (PM-ABA)”, como lo señala la NOM-141-SEMARNAT-2004.

Esta prueba consiste en determinar el potencial de neutralización (PN), que está dado por la presencia de minerales que contienen carbonatos, principalmente calcita, y el potencial de acidez (PA), que está dado por la presencia de minerales que contienen azufre, principalmente pirita.

Para determinar el PN, se determinaron los carbonatos por titulación, que se lleva a cabo agitando la muestra durante 24 horas y, después de que se haya completado la acidificación, se titula el ácido que no ha sido consumido con una base estandarizada (NaOH) a un pH=8.3; posteriormente se calcula el equivalente de carbonato de calcio a través de la ecuación:

$$\text{PN} = [(N_{\text{NaOH}} \times \text{Vol.}_{\text{NaOH}}(\text{ml})) - (N_{\text{HCl}} \times \text{Vol.}_{\text{HCl}}(\text{ml})) \times 50] / [\text{peso (g)}] \quad \text{Ecuación 19}$$

La PM-ABA solamente toma en cuenta la cantidad de azufre que se encuentra en forma de sulfuro, por lo que el PA, se calcula aplicando la siguiente ecuación:

$$\text{PA} = \% \text{ de azufre como sulfuro } [\% \text{S}^{2-}] \times 31.25 \quad \text{Ecuación 20}$$

$$\% \text{ de azufre como sulfuro (S}^{2-}) = [\% \text{ azufre total} - \% \text{ azufre como sulfato (S}^{6+})]$$

En la NOM-141, se señala que si la relación PN/PA es < 1.2, los residuos se consideran generadores potenciales de drenaje ácido.

#### **4.6.2 Determinación de potencial hidrógeno (pH) y conductividad eléctrica (CE)**

Para la obtención del pH y la conductividad eléctrica (CE) se prepararon suspensiones de las muestras homogeneizadas en relación 1:5 sólido: agua desionizada. En el caso del pH, las suspensiones se agitaron por una hora a una velocidad de 220 rpm, de acuerdo al método EPA 9045C, y se leyeron con un potenciómetro HI98185 PH/ORP/ISE Meter. Posteriormente, en esta misma suspensión, después de haberse centrifugado, se determinó la conductividad eléctrica con un conductímetro Hanna HI99301 EC, de acuerdo al método de la SSSA Book Series No. 5 parte III (1996).

### **4.7 Caracterización química y mineralógica de los residuos**

#### **4.7.1 Caracterización química**

##### ***4.7.1.1 Concentraciones totales de elementos mayores (EM).***

Se determinó la concentración total de los siguientes elementos mayores (EM), mediante Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X (FRX) con un sistema secuencial de FRX, marca: Siemens, modelo: SRS 3000, el cual entrega los resultados como el porcentaje de los óxidos de los EM presentes, como son: silicio ( $\text{SiO}_2$ ), titanio ( $\text{TiO}$ ), aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), calcio ( $\text{CaO}$ ), potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ ), magnesio ( $\text{MgO}$ ), manganeso ( $\text{MnO}$ ), sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) fosforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) y hierro total ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

Estos análisis se realizaron con el fin de poder interpretar mejor los datos obtenidos por el método de Difracción de Rayos X (DRX).

#### **4.7.2 Análisis mineralógico**

##### ***4.7.2.1 Identificación de fases sólidas***

Considerando que los EPT se concentran en las partículas más finas (Romero et al., 2007) las muestras homogeneizadas fueron tamizadas por la malla 400 con el fin de aumentar la posibilidad de identificar los minerales que contienen EPT utilizando las técnicas de DRX y MEB.

Se identificó la mineralogía de los residuos utilizando las técnicas de: Difracción de Rayos X (DRX), los difractogramas se midieron en un Difractómetro SHIMADZU equipado con monocromador y tubo de cobre. Para complementar este análisis, se realizó Microscopía Electrónica de Barrido Acoplada a Espectrometría de Rayos X por Energía Dispersa (MEB-EDS).

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 Peligrosidad de los residuos mineros

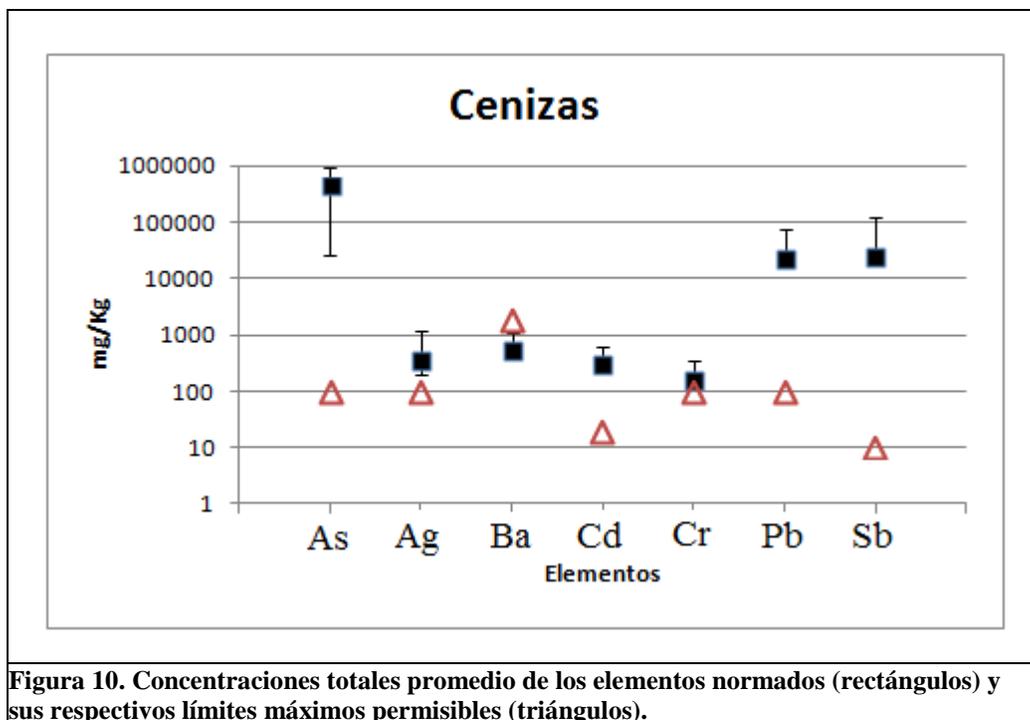
#### 5.1.1 Concentración total de elementos normados

Los residuos históricos metalúrgicos (cenizas), del Distrito Minero San Antonio-el Triunfo (SA-ET), están caracterizados por altas concentraciones totales de algunos elementos potencialmente tóxicos (EPT), con valores promedio de 442,156.62mg kg<sup>-1</sup> As, 25,178.44mg kg<sup>-1</sup> Sb, 14,083.88mg kg<sup>-1</sup> Pb, 349.93 mg kg<sup>-1</sup> Ag, 128.29 mg kg<sup>-1</sup> Cr, 113.01 mg kg<sup>-1</sup> Ba y 63.27 mg kg<sup>-1</sup> Cd (**Tabla 7**).

	As	Ag	Ba	Cd	Cr	Pb	Sb
Muestra	mg/kg						
L. de chimenea los Sn Juanes	480,093.09	885.93	565.03	316.33	<LDM	50,295.19	101,798.44
Tiro chimenea los Sn Juanes	448,200.00	156.69	<LDM	<LDM	181.33	<LDM	5,034.57
Tiro de chimenea la ramona	442,050.00	195.94	<LDM	<LDM	152.95	<LDM	1,242.24
1a casa chimenea los Juanes	425,310.00	269.64	<LDM	<LDM	173.28	850.00	752.65
L. de chimenea la Ramona	415,130.00	241.46	<LDM	<LDM	134.37	19,274.19	17,064.31
Promedio	442,156.62	349.93	113.01	63.27	128.39	14,083.88	25,178.44
Max	480,093.09	885.93	565.03	316.33	181.33	50,295.19	101,798.44
Min	415,130.00	156.69	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	752.65
LMP (mg/Kg)	100.00	100.00	2,000.00	20.00	100.00	100.00	10.60

**Tabla 7. Concentraciones totales de los residuos (cenizas). \*Límite Máximo Permisible (LMP), en la NOM-157-SEMARNAT-2009. Límite de detección del método (LDM), valores máximos y valores mínimos.**

Las concentraciones de EPT, se compararon con los límites máximos permisibles (LMP), y se puede observar que casi todos rebasan el LMP, excepto las concentraciones de Ba (**Figura 10**).

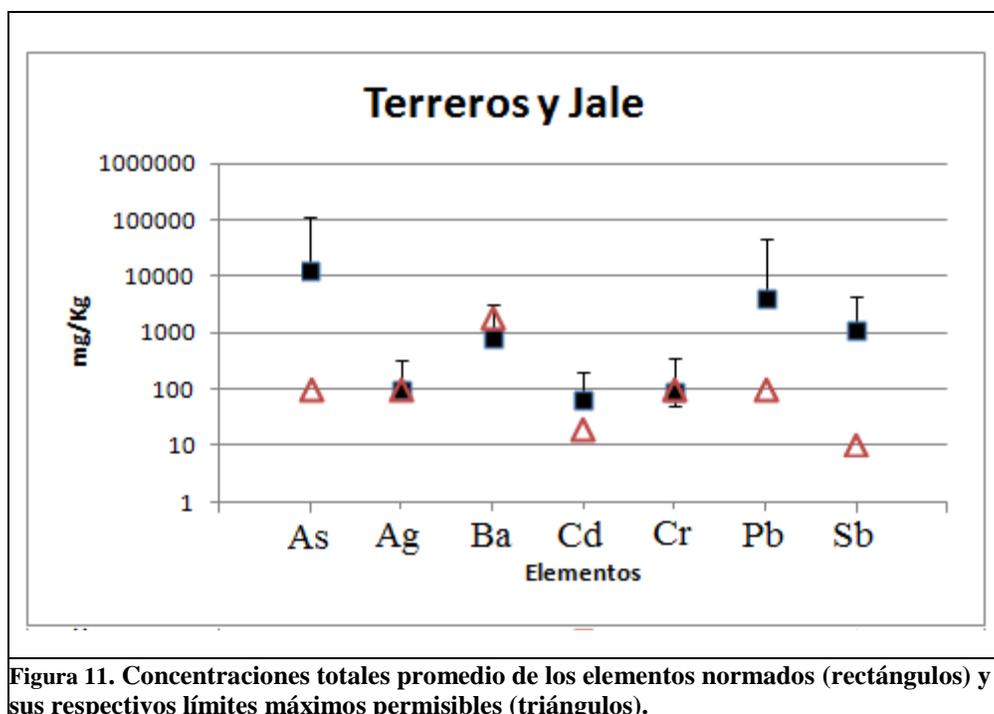


Así mismo se determinaron las concentraciones totales en los residuos mineros (terreros y el jal), presentando valores promedios de  $13,919.18 \text{ mg kg}^{-1}$  As,  $4,223.36 \text{ mg kg}^{-1}$  Pb,  $1,132.25 \text{ mg kg}^{-1}$  Sb,  $820.27 \text{ mg kg}^{-1}$  Ba,  $105.64 \text{ mg kg}^{-1}$  Ag,  $92.06 \text{ mg kg}^{-1}$  Cr y  $67.84 \text{ mg kg}^{-1}$  Cd. (**Tabla 8**)

	As	Ag	Ba	Cd	Cr	Pb	Sb
<b>Muestra</b>	<b>mg/kg</b>						
La Colpa	96,829.16	<LDM	1,265.54	<LDM	<LDM	47.12	50.47
La Columbina	89,116.49	125.40	1,682.40	107.89	<LDM	43,368.27	3,295.06
Tiro 96-6	22,479.80	124.77	651.20	53.98	<LDM	5,722.63	1,069.08
Pedro y Pablo 3	21,325.35	111.92	731.79	<LDM	<LDM	3,314.36	1,736.96
San Cristobal	17,923.68	31.37	736.01	<LDM	45.28	230.21	165.14
Pedro y Pablo 4	17,738.38	224.82	863.73	20.80	<LDM	8,854.40	2,584.21
San Alberto	17,242.71	24.25	715.16	<LDM	43.45	319.13	765.03
Espinoceña 3	16,820.14	61.22	770.49	<LDM	<LDM	4,511.03	656.78
Pedro y Pablo 5	16,793.02	151.51	889.62	39.74	<LDM	5,296.26	1,833.10
El Ocote 2	15,633.02	110.04	823.51	34.86	<LDM	4,253.91	175.76
Tiro 96-5	15,257.97	164.45	816.90	81.86	<LDM	3,743.02	820.97
Humboldt 1	14,997.59	155.03	807.84	63.65	<LDM	4,332.20	686.83
Guasave 1	14,948.95	80.86	901.22	<LDM	<LDM	4,258.05	137.17
Cañada de agua	13,864.45	<LDM	739.03	<LDM	121.24	168.70	91.02

Valenciana 2	13,285.99	51.13	926.80	<LDM	<LDM	3,890.75	84.53
Soledad 1	11,830.21	153.01	641.27	61.28	<LDM	4,174.12	3,182.06
Tiro 96-3	9,889.44	155.51	924.74	53.68	<LDM	4,599.07	900.24
Humboldt 2	9,352.02	84.35	724.19	93.36	62.05	2,242.55	324.28
Tiro 96-4	8,952.97	118.63	1,079.70	99.46	<LDM	3,687.16	706.37
Espinoceña 1	8,774.73	90.31	718.30	81.92	<LDM	4,796.14	1,635.58
Humboldt 3	8,704.05	118.13	812.91	97.04	<LDM	4,168.77	606.47
La Mendoceña	8,395.11	191.79	512.29	76.15	<LDM	3,917.29	2,043.85
Tiro 96-2	7,813.03	175.51	848.56	101.95	<LDM	4,942.77	855.66
El Ocote	6,814.66	40.69	656.21	48.21	46.48	2,153.98	376.13
Pedro y Pablo 2	6,764.92	81.65	1,061.65	<LDM	<LDM	2,657.24	624.75
Tiro 96-1	6,325.78	65.48	969.37	87.69	<LDM	2,049.22	338.98
Los Gavilanes	6,216.08	37.63	657.88	34.22	<LDM	1,174.19	832.81
Santa Rosa	6,066.70	118.44	402.07	43.62	<LDM	3,881.59	3,138.88
El Polvorín	5,853.89	<LDM	2,415.40	<LDM	74.95	<LDM	<LDM
San Gerónimo	5,765.37	<LDM	1,120.43	<LDM	<LDM	20.39	<LDM
Valenciana 1	5,714.89	<LDM	361.39	<LDM	<LDM	3,711.91	<LDM
La Aurora	5,267.88	<LDM	433.41	<LDM	270.72	26.13	<LDM
Espinoceña 2	5,129.56	56.04	503.04	58.56	64.88	3,163.29	335.16
Pedro y Pablo 1	4,639.39	155.79	1,080.52	48.05	<LDM	4,657.45	1,934.82
Tajo San Antonio	4,527.00	<LDM	618.72	<LDM	99.46	<LDM	<LDM
La Marroqueña	4,459.22	162.99	541.79	118.08	<LDM	3,947.36	2,482.94
San Isaías	4,456.34	87.83	570.10	23.05	<LDM	1,455.78	1,379.17
Las Palomas	4,154.82	<LDM	878.54	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM
La Cruz	3,630.29	<LDM	1,114.93	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM
El Capricho	3,564.99	24.42	261.83	42.33	<LDM	946.39	1,831.85
La Reforma	3,366.53	45.59	400.42	124.63	<LDM	1,581.42	814.48
Promedio	13,919.18	105.64	820.27	67.84	92.06	4,223.36	1,132.25
Max	96,829.16	224.82	2,415.40	124.63	270.72	43,368.27	3,295.06
Min	3,366.53	24.25	261.83	20.80	43.45	20.39	50.47
LMP (mg/Kg)	100.00	100.00	2,000.00	20.00	100.00	100.00	10.60
<b>Tabla 8. Concentraciones totales de los residuos (terreros y jal). *Límite Máximo Permisible (LMP), establecido en la NOM-157-SEMARNAT-2009. Límite de detección del método (LDM), valores máximos y valores mínimos.</b>							

En la **Figura 11**, se observan como algunos valores de la concentración de EPT, superan el LMP. Entre los que destacan As, Ag, Cd, Pb y Sb.



### 5.1.2 Concentración total de elementos no normados

En la **Tabla 9**, se presentan concentraciones de elementos no normados. Con valores promedio de 92,118.84mg kg<sup>-1</sup> Fe, 18,312.86mg kg<sup>-1</sup> K, 14,131.89mg kg<sup>-1</sup> Ca, 4,433.46mg kg<sup>-1</sup> Zn, 3,416.46 mg kg<sup>-1</sup> Ti, 904.97 mg kg<sup>-1</sup> Mn, 288.91 mg kg<sup>-1</sup> Cu, 131.25 mg kg<sup>-1</sup> Ni y 129.76 mg kg<sup>-1</sup> V.

	Ca	Cu	Fe	K	Mn	Ni	Ti	V	Zn
<b>Tipo</b>	<b>mg/Kg</b>								
C	46,890.17	190.14	80,073.54	9,232.49	1,303.65	<LDM	3,683.45	119.16	3,541.01
C	42,354.57	81.79	62,440.95	17,772.63	1,527.09	<LDM	3,988.78	117.61	1,579.03
C	41,433.41	217.26	100,539	6,172.32	1,145.11	251.12	2,738.97	138.7	90.77
C	37,363.87	3,535.40	399,751.53	4,188.29	<LDM	<LDM	1,041.91	<LDM	39,641.51
C	3,3261	175.94	58,302.02	18,365.41	485.19	<LDM	2,519.95	<LDM	1,473.25
T	30,097.4	<LDM	71,804.09	11,687.78	511.61	111	3,602.22	196.25	65.85
J	28,624.78	<LDM	65,948.84	17,648.82	536.52	116.54	3,791.16	145.02	41.62
T	24,005.24	<LDM	47,058.83	14,843.93	472.64	<LDM	4,469.18	148.08	26.55
T	23,588.63	949.61	91,902.06	13,274.97	1,400.89	172.01	3,425.29	136.79	455.92
T	19,867.94	75.87	43,810.77	23,872.74	314.45	<LDM	4,140.69	<LDM	1,118.61
T	19,618.1	247.19	75,094.06	17,649.33	853.85	<LDM	3,078.31	<LDM	3,212.05
T	18,134.96	288.47	106,373.41	14,082.5	932.65	132.89	3,238.99	130.48	205.66
T	16,801.28	152.54	61,644.53	22,795.13	491.35	<LDM	4,083.97	<LDM	2,704.5
T	16,682.36	162.65	50,498.15	24,993.32	637.88	84.43	4,523.53	123.74	3,524.82

T	16,469.63	112.07	112,852.34	13,505.74	2,201.68	110.98	2,925.11	<LDM	2,494.6
T	15,954.59	243.1	57,799.75	22,323.66	804.58	<LDM	3,693.26	<LDM	2,506.93
T	15,618.29	<LDM	93,216.05	18,925.11	2,005.71	<LDM	3,287.43	118.55	3148.7
T	15,328.5	95.92	73,232.73	14,388.44	1,123.87	<LDM	4,347.4	113.92	836.37
T	15,053.46	115.55	91,448.59	18,342.11	3,129.56	<LDM	3,435.12	<LDM	5,117.85
T	15,036.15	148.89	49,030.21	26,852.6	604.23	<LDM	4,566.9	161.61	3,712.69
T	14,396.51	899.49	239,684.39	10,803.03	<LDM	<LDM	1,299.63	<LDM	1,936.22
T	12,997.64	85.48	58,142.26	22,052.67	973.72	<LDM	4,760.24	136.84	2,731.54
T	12,320.26	<LDM	32,305.06	29,997.93	199.02	<LDM	4,535.65	141.28	28.45
T	10,829.8	<LDM	358,150.88	1,166.52	<LDM	<LDM	532.82	<LDM	68,604.10
T	9,882.41	121.18	54,702.88	22,085.33	2,027.19	85.95	3,714.94	102.94	423.22
T	9,476.58	136.79	44,990.38	17,451.48	356.62	<LDM	4,863.25	142.99	1,346.29
T	9,466.06	265.22	64,424.95	25,507.97	785.27	89.62	4,662.62	135.38	4,371.16
T	9,183.41	129.88	62,934.75	22,539.47	600.28	<LDM	4,144.38	112.04	1,023.63
T	8,003.63	104.21	90,584.77	24,467.3	538.05	113.16	3,315.99	135.4	35.09
T	7,749.92	144.06	101,748.41	15,865.23	371.98	<LDM	2,759.53	<LDM	929.84
T	6,587.43	178.94	61,470.34	21,014.55	760.02	<LDM	3,974.09	122.71	3,325.18
T	5,247.96	174.31	91,740.38	20,239.63	423.24	<LDM	3,334.75	<LDM	993.68
T	5,067.76	81.57	202,920.75	9,238.11	2,868.11	176.09	2,409.69	<LDM	2,552.68
T	4,436.85	<LDM	7,496.67	1,583.33	<LDM	<LDM	487.1	<LDM	<LDM
T	4,425.13	201.29	65,240.94	23,667.45	671.62	<LDM	3,903.93	<LDM	2,863.44
T	4,316.01	62.9	58,197.92	31,047.17	494.98	<LDM	4,498.88	120.84	1,156.34
T	3,883.77	147.58	76,775.13	23,212.59	366.09	<LDM	3,592.76	<LDM	1,744.66
T	3,735.02	153.23	94,748.13	24,086.43	880.52	<LDM	4,017.08	127.67	300.82
T	3,406	195.81	75,955.29	20,261.89	493.15	<LDM	3,921.3	<LDM	3,645.32
T	2,134.25	49.8	77,441.27	26,104.2	453.89	<LDM	3,938.69	<LDM	1,380.86
T	2,112.03	<LDM	74,568.47	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	56.6	10,454.43
T	2,064.4	115.06	41,633.26	30,396.58	623.28	<LDM	5,453.9	<LDM	3,075.96
T	1,990.39	<LDM	2,122.5	<LDM	<LDM	<LDM	497.5	<LDM	5,505.53
T	1,901.94	72.83	88,738.69	18,875.91	423.33	<LDM	3,505.08	<LDM	989.5
T	1,749.19	<LDM	97,917.16	19,255.6	500.92	<LDM	3,429.38	<LDM	156.07
T	514.97	<LDM	220,009.63	13,928.26	<LDM	<LDM	1,605.99	<LDM	<LDM
Promedio	14,131.89	288.91	92,118.84	18,312.86	904.97	131.26	3,416.46	129.77	4,433.46
Máximo	46,890.17	3535.4	399,751.53	31,047.17	3,129.56	251.12	5,453.9	196.25	68,604.1
Mínimo	514.97	49.8	2,122.5	1,166.52	199.02	84.43	487.1	56.6	26.55

**Tabla 9. Concentración total de los elementos no normados. Límite de detección del método (LDM), valores máximos y valores mínimos. Tipo de residuo: T= Terrero; C=Ceniza; J= Jal.**

Se realizó una matriz de correlación con los elementos analizados por FRX, para ver la relación que tiene cada elemento y tratar de identificar las asociaciones entre los EPT (Tabla 10).

En dicha Tabla se puede observar la relación entre As con Fe, que es 0.78; la de Ag con Sb y Zn, que son 0.67 y 0.61; la relación del Cd con Zn que es 0.92, la de Cr con Ni, de 0.64; la de K con Ti, de 0.64; y la de Zn con Ag y Cd, 0.61 y 0.92 respectivamente.

La relación de As-Fe, se debe a que los dos se encuentran en la misma fase mineral (arsenopirita), Así mismo la relación de Cd-Zn, nos indicaría que el Cd tiende a sustituir al Zn, por su similar radio iónico y carga iónica.

La alta correlación entre elementos como Cd con Zn, nos podría indicar que los dos elementos se mueven o se podrían mover en la misma fase mineral y ayudar para entender los procesos de atenuación de algunos EPT.

	As	Ag	Ba	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	K	Mn	Ni	Pb	Sb	Ti	V	Zn
As	<b>1.00</b>	0.02	0.39	-0.21	0.00	-0.12	0.39	0.78	-0.29	-0.32	-0.16	0.59	0.17	-0.68	-0.34	-0.17
Ag	0.02	<b>1.00</b>	-0.07	-0.30	0.57	-0.42	0.14	0.07	0.12	0.17	-0.32	0.36	0.67	-0.09	-0.46	0.61
Ba	0.39	-0.07	<b>1.00</b>	-0.30	-0.12	-0.08	0.18	0.26	0.13	-0.49	-0.03	0.31	-0.12	-0.20	0.02	-0.25
Ca	-0.21	-0.30	-0.30	<b>1.00</b>	0.07	0.36	0.12	-0.16	-0.51	0.19	0.31	-0.12	-0.08	-0.09	0.39	-0.04
Cd	0.00	0.57	-0.12	0.07	<b>1.00</b>	-0.27	0.22	0.03	0.06	0.24	-0.26	0.36	0.42	0.05	-0.18	0.92
Cr	-0.12	-0.42	-0.08	0.36	-0.27	<b>1.00</b>	0.09	0.01	-0.33	0.03	0.64	-0.20	-0.34	-0.07	0.37	-0.27
Cu	0.39	0.14	0.18	0.12	0.22	0.09	<b>1.00</b>	0.34	-0.27	-0.03	0.23	0.59	0.19	-0.32	-0.05	0.09
Fe	<b>0.78</b>	0.07	0.26	-0.16	0.03	0.01	0.34	<b>1.00</b>	-0.57	0.13	0.22	0.53	0.43	-0.83	-0.34	-0.10
K	-0.29	0.12	0.13	-0.51	0.06	-0.33	-0.27	-0.57	<b>1.00</b>	-0.31	-0.45	-0.16	-0.23	0.64	-0.02	0.18
Mn	-0.32	0.17	-0.49	0.19	0.24	0.03	-0.03	0.13	-0.31	<b>1.00</b>	0.35	-0.16	0.38	-0.12	0.01	0.36
Ni	-0.16	-0.32	-0.03	0.31	-0.26	<b>0.64</b>	0.23	0.22	-0.45	0.35	<b>1.00</b>	-0.20	-0.12	-0.25	0.33	-0.25
Pb	0.59	0.36	0.31	-0.12	0.36	-0.20	0.59	0.53	-0.16	-0.16	-0.20	<b>1.00</b>	0.53	-0.44	-0.33	0.15
Sb	0.17	<b>0.67</b>	-0.12	-0.08	0.42	-0.34	0.19	0.43	-0.23	0.38	-0.12	0.53	<b>1.00</b>	-0.37	-0.47	0.39
Ti	-0.68	-0.09	-0.20	-0.09	0.05	-0.07	-0.32	-0.83	<b>0.64</b>	-0.12	-0.25	-0.44	-0.37	<b>1.00</b>	0.41	0.20
V	-0.34	-0.46	0.02	0.39	-0.18	0.37	-0.05	-0.34	-0.02	0.01	0.33	-0.33	-0.47	0.41	<b>1.00</b>	-0.23
Zn	-0.17	<b>0.61</b>	-0.25	-0.04	<b>0.92</b>	-0.27	0.09	-0.10	0.18	0.36	-0.25	0.15	0.39	0.20	-0.23	<b>1.00</b>

**Tabla 10. Matriz de Correlación de los residuos (terreros y jal), con los elementos normados y no normados.**

## 5.2 Elementos potencialmente tóxicos solubles (geodisponibilidad)

### 5.2.1 Elementos potencialmente tóxicos normados por NOM-157

Con el fin de valorar la toxicidad de los residuos presentes en la zona de estudio, se seleccionaron 13 muestras (9 terreros, 3 cenizas y a 1 jal), de las 46 colectadas, dichas muestras fueron escogidas por sus altas concentraciones totales de EPT. A las muestras seleccionadas se les realizó la prueba de extracción, con base en la NOM-141-SEMARNAT-2003.

De tal forma, en la **Tabla 11** se muestran los resultados obtenidos en dicha prueba. Para el caso se los residuos (terreros y jal), la mayoría de las concentraciones geodisponibles de EPT regulados en la NOM-157, son inferiores al LMP propuesto en la norma, con excepción de la Mendoseña donde el valor del Cd es de 1.283 mg L<sup>-1</sup> superando el LMP.

Para el caso de las cenizas, los resultados indican que las concentraciones promedio geodisponibles de As, Cd y Sb, son 339.96 mg L<sup>-1</sup>, 2.99 mg L<sup>-1</sup> y 2.70 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente. Se observa que los valores de As, superan por casi 67 veces los LMP establecidos en la norma NOM-157, el Cd lo hace en casi 3 veces y en el Sb en 5 veces, por lo cual dichos residuos se consideran residuos tóxicos (**Tabla 11**).

		Ag	As	Ba	Cd	Pb	Sb
Tipo	Muestra	mg/L					
C	1a Casa de Chi. Los Sn Juan	<LDM	668.800	<LDM	6.206	<LDM	1.090
C	Tiro de Chi. La Ramona	<LDM	185.200	<LDM	1.476	0.295	2.179
C	Tiro de Chi. Los Sn Juan	<LDM	165.900	<LDM	1.310	<LDM	4.857
J	La Columbina	<LDM	1.8155	<LDM	<LDM	<LDM	0.027
T	San Isais	<LDM	0.188	<LDM	0.571	<LDM	0.034
T	Tiro 96-6	<LDM	0.146	<LDM	0.249	<LDM	<LDM
T	Los Gavilanes	<LDM	0.111	<LDM	0.697	<LDM	<LDM
T	La Mendoseña	0.017	0.024	<LDM	1.283	0.016	<LDM
T	Valenciana 2	<LDM	0.018	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM
T	Santa Rosa	<LDM	0.010	<LDM	0.382	<LDM	<LDM
T	La Soledad	<LDM	0.009	<LDM	0.602	<LDM	<LDM
T	La Colpa	<LDM	<LDM	0.018	<LDM	<LDM	<LDM
T	Pedro y Pablo 4	<LDM	<LDM	<LDM	0.069	0.018	0.016
	LDM (mg/L)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	LMP*NOM-157 (mg/L)	5	5	100	1	5	0.53

**Tabla 11. Concentraciones solubles de los residuos mineros históricos. Límite de detección del método (LDM). \*Límite Máximo Permissible (LMP). Tipo de residuo: T=Terrero; C=Cenizas; J= Jale**

### 5.2.2 Elementos potencialmente tóxicos normados por NOM-127

Los concentraciones obtenidas en el lixiviado se compararon con los límites permisibles máximos (LMP), en agua potable y aunque en el lixiviado son concentraciones geodisponibles en los residuos, dichos datos nos podrían servir como referencia para decir que existe la posibilidad de que dicha solución acuosa con altas concentraciones de algunos elementos normados por dicha norma, presentarían un riesgo para los acuíferos cercanos.

En la **Tabla 12**, se presentan las concentraciones geodisponibles de los elementos que no se encuentran regulados por la NOM-157, sin embargo están regulados por NOM-127-SEMARNAT-1994.

En dicha Tabla, se puede observar que las concentraciones de los elementos solubles rebasan los LMP por la NOM-127. Los valores promedios de Al, Fe, Mn y Zn son, 4.57 mg L<sup>-1</sup>, 0.54 mg L<sup>-1</sup>, 4.72 mg L<sup>-1</sup> y 18.67 mg L<sup>-1</sup> respectivamente. De estos, el único que no supera los LMP es el Cu.

Estos datos son muy importantes ya que como se mencionó anteriormente en la zona donde se encuentra el pueblo San Antonio, existe la presencia de un aprovechamiento del agua subterránea la cual en su mayoría es por pozos excavados a mano denominados norias, utilizados para consumo doméstico.

		Al	Cu	Fe	Mn	Zn
Tipo	Muestra	mg/L				
C	1a Casa de chimenea los Sn Juanes	21.09	0.05	0.67	0.04	0.02
C	Tiro de chimenea la Ramona	3.51	0.29	0.13	0.49	16.24
C	Tiro de chimenea los San Juanes	0.49	<LDM	0.02	0.01	0.03
J	La Columbina	<LDM	0.01	0.21	<LDM	<LDM
T	San Isais	11.60	0.43	0.78	10.42	28.75
T	Tiro 96-6	1.62	0.19	0.05	1.27	10.49
T	Los Gavilanes	8.39	0.29	0.75	8.89	37.22
T	La Mendoseña	4.07	0.15	2.54	13.20	55.53
T	Valenciana 2	0.37	<LDM	0.33	0.70	0.06
T	Santa Rosa	0.98	0.08	0.05	4.23	17.72
T	La Soledad	1.40	0.11	0.03	16.79	34.55
T	La Colpa	0.18	0.06	1.35	0.03	<LDM
T	Pedro y Pablo 4	1.10	0.08	0.06	0.62	4.71
	Promedio	4.57	0.16	0.54	4.72	18.67
	Maximo	21.09	0.43	2.54	16.79	55.53
	Minimo	0.18	0.01	0.02	0.01	0.02
	LDM (mg/L)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	LMP*NOM-127-SEMARNAT-1994	0.20	2.00	0.30	0.15	5.00

**Tabla 12. Concentraciones solubles de elementos no normados de los residuos mineros históricos.\* LMP= Límite Máximo Permissible. LDM=Límite de Detección del Método. Tipo de residuo: T= Terrero; C= Cenizas; J=Jal**

### 5.3 Potencial de generación de drenaje ácido (DA)

#### 5.3.1 Conductividad eléctrica (CE) y pH de los residuos mineros.

En la **Tabla 13** y **Tabla 14**, se muestran los resultados de pH y conductividad eléctrica. Se puede observar que para los terreros el pH varía entre 3.3 y 8.73; mientras que para las cenizas el pH varía entre 3.09 y 5.68. Por otro lado el residuo identificado como jal presenta un pH de 6.36.

Así mismo se puede observar que en la mayoría de las muestras, la conductividad eléctrica (CE) es inversamente proporcional con los valores de pH. Esto quiere decir que a valores bajos de pH corresponden valores relativamente altos de CE.

En las muestras que presentan valores de  $\text{pH} \leq 4$ , el pH promedio es de 3.6 y la CE es de 1143.50 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) **Tabla 13**. Por otro lado en las muestras con valores de pH superiores a 4, (**Tabla 14**). Se puede observar que el valor promedio es de 6.03 y la CE de 602.25 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

Los valores promedios relativamente altos de CE y los valores de pH ácidos en las muestras, podrían indicar que estos materiales están intensamente oxidados y que durante este proceso se liberaron protones y se formaron sales solubles.

Los resultados de la **Tabla 13** y **Tabla 14** se podrían interpretar que bajo condiciones ácidas podríamos tener mayores valores de CE, esto se debe probablemente a que en medios ácidos se puede propiciar la disolución de minerales presentes en los residuos mineros. Considerando que la disolución de minerales implica su disociación en sus iones componentes, los cuales podrían pasar a formar parte de los lixiviados, y darnos el subsecuente aumento de la CE.

Tipo	Muestra	pH	CE [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]
T	Pedro y Pablo 5	4.07	507
T	Tiro 96 -6	3.94	1919
T	Santa Rosa	3.91	1533
C	Tiro de Chimenea Los San Juanes	3.75	365.5
T	Pedro y Pablo 4	3.67	945
T	La Colpa	3.62	131.5
C	Ladrillos de Chimenea La Ramona	3.61	1758.5
T	Mendoceña	3.57	1975
T	Soledad 1	3.54	1323
T	Valenciana 2	3.4	217
T	Los Gavilanes	3.3	1041
T	San Isaías	3.29	1724
C	1a casa de Chimenea Los San Juanes	3.09	1426
	Promedio	3.60	1143.50
	Máximo	4.07	1975.00
	Mínimo	3.09	131.50

**Tabla 13. Muestras de los residuos con valores de pH ( $\text{pH} \leq 4$ ), considerados peligrosos por la NOM-157. Valor Promedio, valor máximo y valor mínimo. Tipo de residuo: T, Terrero; C, Cenizas; J, Jale.**

Por otra parte cuando los residuos presentan valores con pH altos ( $\text{pH} > 6$ ), es muy probable que no provoquen drenaje ácido y así, no ser un riesgo para el medio ambiente.

Tipo	Muestra	pH	CE [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]
T	Cañada del Agua	8.73	41.95
T	El Capricho	8.07	54.9
T	San Gerónimo	7.89	43.3
T	Tajo San Antonio	7.63	39.5
T	Las Palomas	7.18	15.37
T	La Reforma	7.07	110.5
T	La Aurora	7.03	56.2
T	Tiro 96 -1	6.94	958
T	Tiro 96 -2	6.9	625
T	La Cruz	6.89	11.62
T	El Polvorín	6.56	10.62
J	La Columbina	6.36	435
T	Tiro 96 -5	6.29	1402
T	San Cristobal	6.27	933
T	San Alberto	6.2	30.7
T	Espinoceña 1	6.13	1318
T	El Ocote 1	6.07	1087
T	El Ocote 2	5.94	1049
T	Tiro 96 -4	5.72	455
C	Tiro de Chimenea La Ramona	5.68	1532.5
T	Espinoceña 2	5.64	22.9
T	Tiro 96 -3	5.56	1265
T	Humboldt 2	5.53	682
T	Pedro y Pablo 2	5.35	1168
T	Humboldt 3	5.17	218
T	La Marroqueña	5.15	1325
T	Valenciana 1	5.09	811
T	Humboldt 1	4.61	366
T	Guasave 1	4.46	562.5
C	Ladrillos de Chimenea Los San Juanes	4.39	1576
T	Pedro y Pablo 1	4.17	76.6
T	Espinoceña 3	4.11	322
T	Pedro y Pablo 3	4.11	1270
	Promedio	6.03	602.25
	Máximo	8.73	1576.00
	Mínimo	4.11	10.62

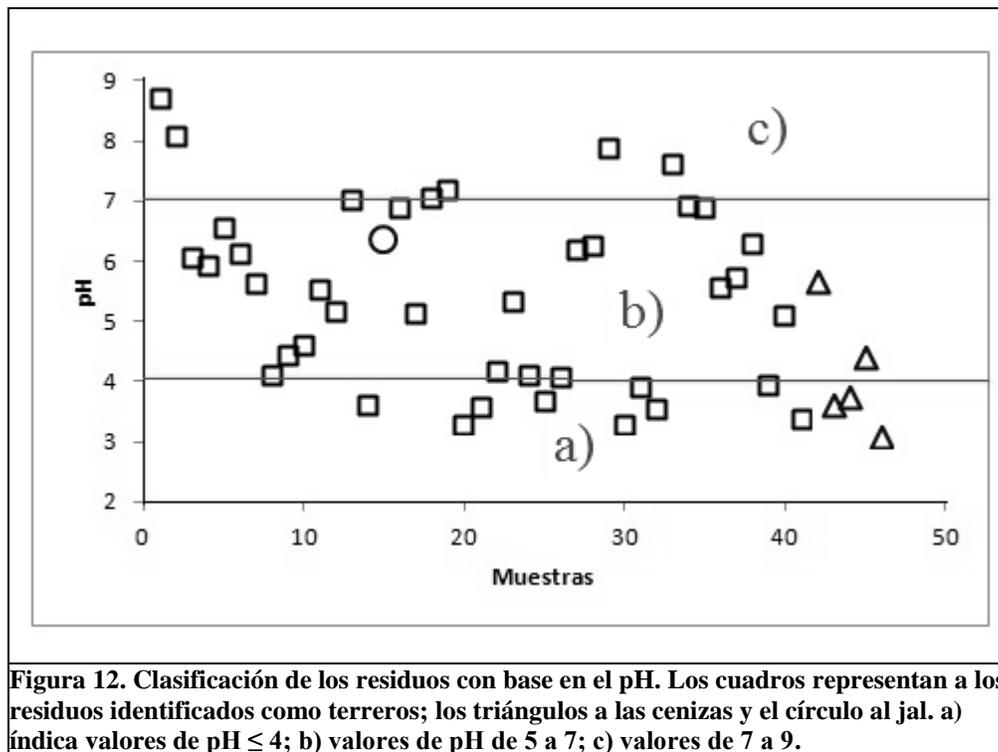
**Tabla 14. Muestras de los residuos con valores de pH ( $\text{pH}>4$ ), considerados no peligrosos por la NOM-157. Promedio, valor máximo y valor mínimo. Tipo de residuo: T, Terrero; C, Cenizas; J, Jale.**

En la **Figura 12**, se presentan las muestras que son consideradas como residuos peligrosos por la NOM-157-SEMARNAT-2009, debido a que presentan valores de  $\text{pH} \leq 4$ . Así mismo, se presentan los residuos que no son considerados residuos peligrosos por dicha norma, con base en los valores de  $\text{pH}$ .

Estos valores nos sirven para identificar cuáles residuos son o pueden ser generadores de drenaje ácido (valores de  $\text{pH} \leq 4$ ).

Se realizó una clasificación de los residuos con base en los valores de  $\text{pH}$ .

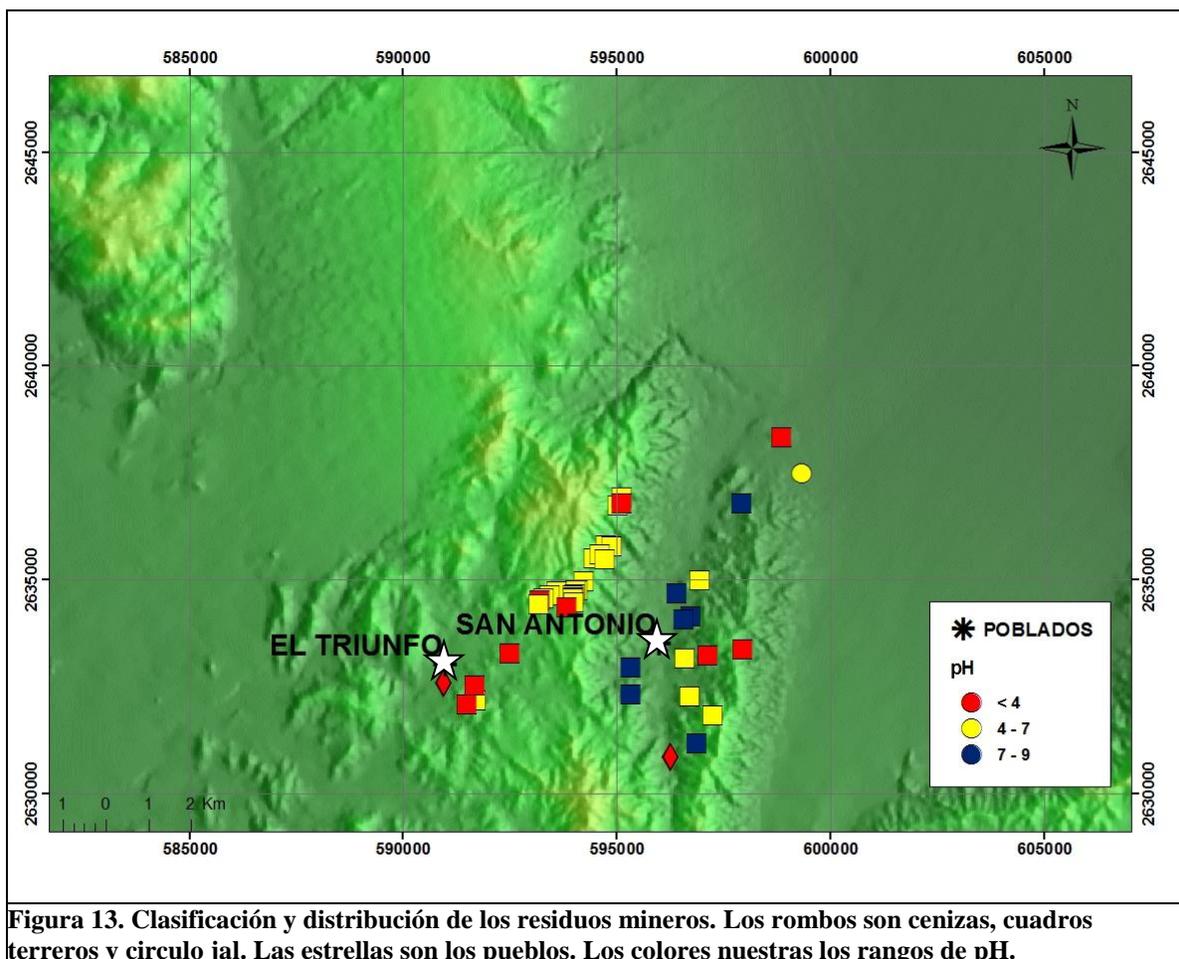
- a) Residuos ácidos, con valores de  $\text{pH} \leq 4$
- b) Residuos moderadamente ácidos a neutros, con valores de  $\text{pH}$  de 5 a 7
- c) Residuos neutros a básicos, con valores de  $\text{pH}$  de 7 a 9



**Figura 12. Clasificación de los residuos con base en el pH. Los cuadros representan a los residuos identificados como terreros; los triángulos a las cenizas y el círculo al jal. a) indica valores de  $\text{pH} \leq 4$ ; b) valores de  $\text{pH}$  de 5 a 7; c) valores de 7 a 9.**

En la **Figura 12** se puede observar, con base en la clasificación propuesta anteriormente, que tenemos 12 residuos ácidos, 29 moderadamente ácidos a neutros y 5 residuos neutros a básicos. Lo cual podemos decir que tenemos aproximadamente 26%, 63% y 11% de residuos ácidos, moderadamente ácidos a neutros y neutros a básicos, respectivamente.

Así mismo se elaboró un mapa topográfico para observar la distribución de los residuos en el área de estudio (**Figura 13**). En dicho mapa se pueden observar también la clasificación de los residuos con base en el pH y la cercanía que tienen los residuos con respecto a los pueblos El Triunfo y San Antonio.



**Figura 13. Clasificación y distribución de los residuos mineros. Los rombos son cenizas, cuadros terreros y círculo jal. Las estrellas son los pueblos. Los colores muestran los rangos de pH.**

### 5.3.2 Iones mayores

En la **Tabla 15**, se presentan los datos de los iones mayores: se muestra que la composición química de los lixiviados está dominada por la presencia del anión sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y el catión calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ).

En dicha Tabla, se puede observar que los aniones como  $\text{SO}_4^{2-}$  en muestras como Tiro 96-6, La Mendoseña, Santa Rosa, 1ra Casa de Chimenea los San Juanes, La Soledad, San Isaías, y El Tiro de Chimenea la Ramona, superan el LMP por la NOM-127-SEMARNAT-1994, con valores de  $1,108.49 \text{ mg L}^{-1}$ ,  $919.40 \text{ mg L}^{-1}$ ,  $812.55 \text{ mg L}^{-1}$ ,  $723.94 \text{ mg L}^{-1}$ ,  $623.04 \text{ mg L}^{-1}$ ,  $531.66 \text{ mg L}^{-1}$  y  $450.58 \text{ mg L}^{-1}$ , respectivamente (**Tabla 15**).

Además La Columbina es el único residuo que supera el LMP en  $\text{NO}_3^-$ , con un valor de  $23.89\text{mg L}^{-1}$ . Así mismo, se puede ver que el residuo denominado Tiro de Chimenea Los San Juanes, supera el LMP de  $\text{F}^-$ , con un valor de  $7.96\text{ mg L}^{-1}$  (**Tabla 15**).

		$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{F}^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$
<b>Tipo</b>	<b>Muestra</b>	<b>mg/L</b>							
T	Tiro 96-6	<LDM	0.30	411.67	1.14	<LDM	0.08	0.33	1108.49
T	La Mendoseña	<LDM	0.31	276.78	8.54	0.15	0.86	4.54	919.40
T	Santa Rosa	<LDM	0.86	285.21	1.48	<LDM	<LDM	<LDM	812.55
C	1a Casa de Chi. los Sn Juan	21.90	7.18	136.11	107.12	<LDM	48.46	0.17	723.94
T	La Soledad	<LDM	<LDM	125.57	9.64	<LDM	0.71	4.64	623.04
T	San Isaías	<LDM	<LDM	73.54	43.74	0.50	2.24	7.12	531.66
C	Tiro de Chi. La Ramona	6.92	2.34	145.42	11.98	<LDM	0.37	0.24	450.58
T	Los Gavilanes	<LDM	<LDM	58.70	24.84	<LDM	1.86	4.27	383.40
T	Pedro y Pablo 4	<LDM	0.44	74.64	1.86	<LDM	<LDM	0.40	217.18
J	La Columbina	17.45	2.21	53.85	2.33	<LDM	11.97	23.89	146.70
C	Tiro de Chi. los Sn Juan	2.90	0.64	32.73	5.39	7.96	26.47	2.85	69.50
T	Valenciana 2	0.45	0.74	6.36	2.10	<LDM	0.68	2.01	41.04
T	La Copla	0.53	0.56	4.56	1.96	<LDM	0.42	0.48	31.59
	LDM	0.4	0.3	0.4	0.2	0.06	0.07	0.1	0.04
	LMP-NOM-127 (mg/L)	200.00	ND	ND	ND	1.5	250.00	10.00	400.00

**Tabla 15. Resultados del análisis por Cromatógrafo, para determinar los iones mayores. Tipo de residuo: T=Terrero; C=Cenizas; J=Jale. LDM, Límite de Detección del Método; LMP, Límite Máximo Permisible; ND, No determinado.**

Dicha comparación se realizó porque el informe de CONAGUA (2003), menciona que a lo largo de los años se, ha desarrollado un cono de abatimiento en el que la elevación del nivel estático alcanza 10 m bajo el nivel del mar, por lo que puede producir diversos impactos ambientales. Como por ejemplo el abatimiento del nivel del agua en los pozos por debajo de la elevación media del mar, y provocar el aumento de la salinidad (salinización), que consiste en el incremento de sólidos totales disueltos del agua subterránea, ocasionando concentraciones mayores al nivel de fondo geoquímico (Richter y Kreitler, 1993).

Así mismo, se realizó un análisis de correlación entre los diferentes iones presentados en la **Tabla 15**. El análisis estadístico de estos datos indica que la mayor correlación se determinó entre  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  con un coeficiente de correlación " $R^2$ " = 0.8497 (**Figura 14**) lo que indica que la presencia de estos iones podría deberse a la disolución del yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) que es uno de los minerales secundarios más importantes que ocurren como producto de las reacciones de oxidación de la pirita ( $\text{FeS}_2$ ) y neutralización por la disolución de la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) en los residuos mineros, a través de la siguiente ecuación química:



El producto de esta correlación la podemos ver con el análisis mineralógico que se hizo por DRX, ya que en algunas muestras como son los terreros, se logró identificar el mineral conocido como yeso.

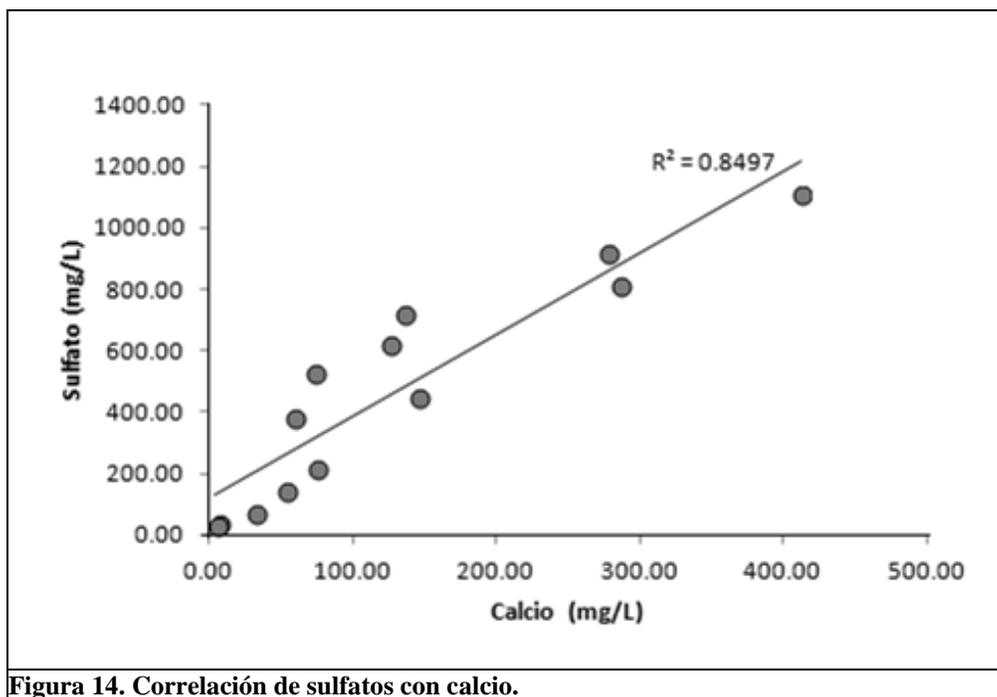


Figura 14. Correlación de sulfatos con calcio.

### 5.3.3 Capacidad de generación de drenaje ácido

Como se identificó con anterioridad algunos residuos presentan valores de  $\text{pH} \leq 4$ , lo cual sugiere que actualmente podrían generar drenaje ácido o lo podrían generar en el futuro. Sin embargo para los residuos que presentan valores de  $\text{pH} > 4$  (neutros y básicos) fue necesario analizarlos para determinar la capacidad de generación de drenaje ácido mediante la prueba modificada de balance ácido-base.

Con el fin de valorar la reactividad de los residuos en la zona, se evaluó su potencial de generación de drenaje ácido (DA). Para lo cual se realizaron pruebas de balance ácido-base (ABA) con base en los valores de pH obtenidos anteriormente.

Como se mostró en la **Tabla 13** y **Tabla 14**, se seleccionaron muestras con los valores más altos de pH así como el único jal presente en las muestras, de acuerdo a la metodología señalada en la norma oficial mexicana NOM-141-SEMARNAT-2004.

Cabe mencionar que para el caso de los residuos clasificados como cenizas y algunas muestras con valores de  $\text{pH} \leq 4$ , como menciona la NOM-157-SEMARNAT-2009, se considera que el residuo ya es peligroso y por lo tanto no fue necesario realizar dicha prueba.

Los resultados de las pruebas de balance ácido-base se presentan en la **Tabla 16**. Esta prueba nos permite evaluar los residuos con base en la generación de drenaje ácido.

Se puede observar que el único residuo que es potencialmente generador de drenaje ácido es “La Columbina”, la cual se clasificó como un jal y presenta un  $\text{pH} = 6.36$  y una CE de  $435 \text{ } (\mu\text{S}/\text{cm})$  y por esto podría ser generador de drenaje ácido en el futuro cuando se oxide. En este residuo el potencial de neutralización “PN”=  $42.383 \text{ [Kg CaCO}_3/\text{ton}]$  y el potencial de acidez “PA”=  $37.103 \text{ [Kg CaCO}_3/\text{ton}]$ , por lo tanto el potencial de neutralización neto (PNN) PN/PA es de 1.142. De acuerdo a los criterios establecidos en la Normatividad Ambiental de México, el jal también se clasifica como generador potencial de acidez (**Tabla 16**).

				PA	PN	PNN
pH	CE [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	Tipo	Muestra	[Kg CaCO <sub>3</sub> /Ton]	[Kg CaCO <sub>3</sub> /Ton]	PN/PA
8.73	41.95	T	Cañada de agua	3.21	35.106	10.936
8.07	54.9	T	El Capricho	7.138	112.533	15.766
6.36	435	J	Columbina	37.103	42.383	1.142
7.89	43.3	T	San Gerónimo	0.338	30.62	90.726

**Tabla 16. Valores de la prueba de balance ácido-base (ABA). Cuando la relación PNN < 1.2 (NOM-141-SEMARNAT-2004). Tipo de residuo: T=Terrero; J=Jal.**

## 5.4 Identificación de fases sólidas y fenómenos geoquímicos

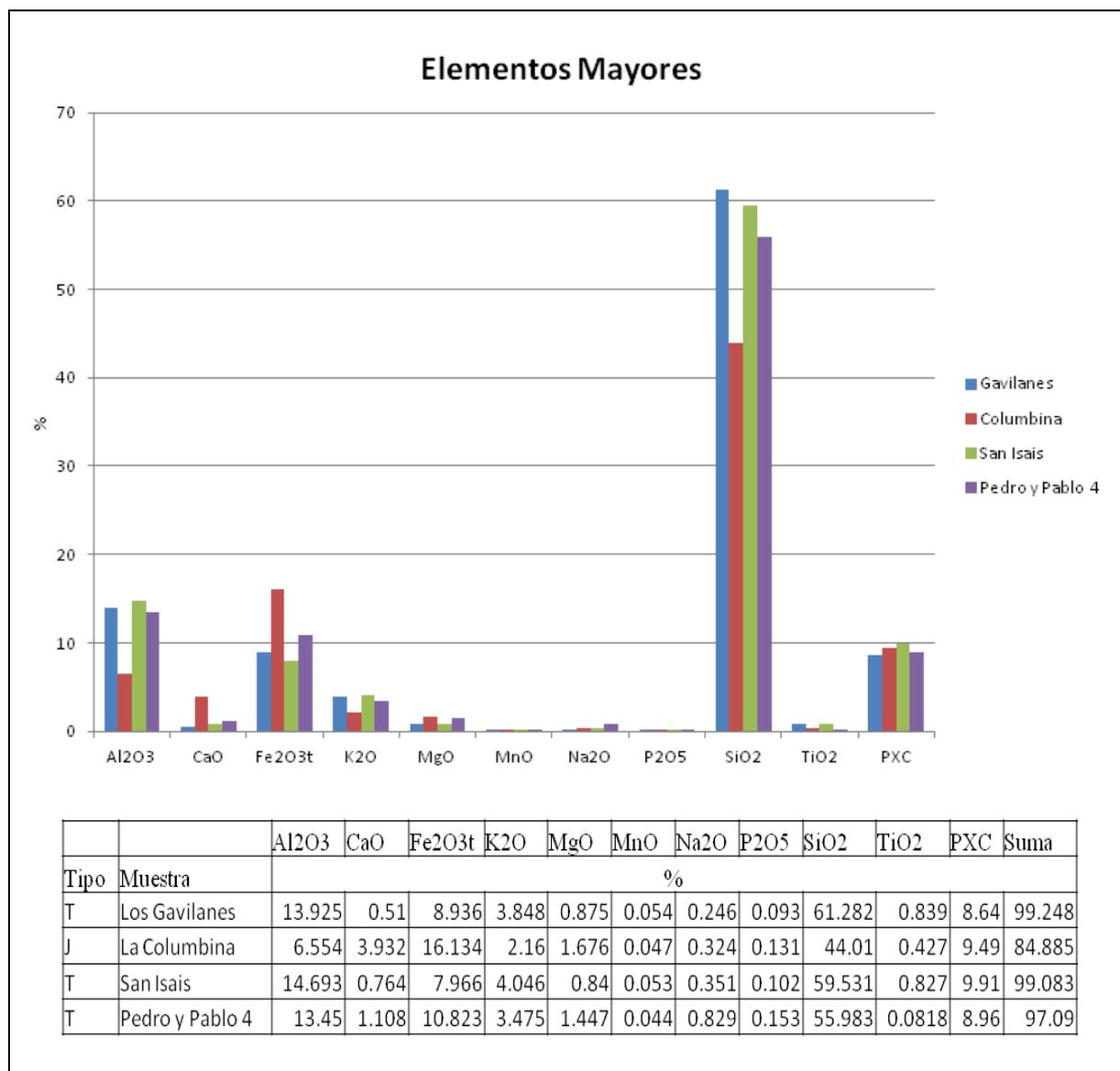
### 5.4.1 Concentración de elementos mayores

Se seleccionaron cuatro muestras para determinar las concentraciones totales de elementos mayores (EM). Las muestras se eligieron por sus altas concentraciones de arsénico, este análisis ayudo en la identificación mineralógica obtenida por el método de DRX.

Los resultados obtenidos para los elementos mayores (EM), se presentan como el porcentaje del óxido del elemento así: silicio ( $\text{SiO}_2$ ), titanio ( $\text{TiO}_2$ ), aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), manganeso ( $\text{MnO}$ ), calcio ( $\text{CaO}$ ), magnesio ( $\text{MgO}$ ), potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ ), sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), y fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ )(**Figura 15**).

De tal forma, en la **Figura 15**, podemos observar que estos residuos están dominados por la presencia de silicio como  $\text{SiO}_2$  (44.01-61.282). En proporción menor, destacan las

concentraciones de hierro como  $\text{Fe}_2\text{O}_{3t}$  (7.966-16.134), aluminio como  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (6.554-14.693) y en proporción muy inferior, la concentración de potasio como  $\text{K}_2\text{O}$  (2.16-4.046), calcio como  $\text{CaO}$  (0.51-3.932), magnesio como  $\text{MgO}$  (0.84-1.676), titanio como  $\text{TiO}_2$  (0.0818-0.839), sodio como  $\text{Na}_2\text{O}$  (0.246-0.829), fósforo como  $\text{P}_2\text{O}_5$  (0.093-0.153) y manganeso como  $\text{MnO}$  (0.044-0.054).



**Figura 15. Gráfica con la distribución del porcentaje de elementos mayores. Y en la parte inferior se observa la Tabla de los valores obtenidos por FRX. Tipo de residuo: T=Terrero; C=Ceniza y J=Jal**

### 5.4.2 Mineralogía

Los resultados de la composición mineralógica, determinada por Difracción de Rayos X (DRX), se presentan en la **Tabla 17**. En ella se puede observar que los residuos mineros denominados terreros y el jal, se caracterizan por el predominio de cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), jarosita [ $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ] y filosilicatos.

Tipo	Muestra	Fases Identificadas
J	Columbina	Cuarzo: $\text{SiO}_2$
		Jarosita: $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$
		Filosilicatos a $\sim 10\text{\AA}$ probablemente de tipo mica- illita.
T	Los Gavilanes	Cuarzo: $\text{SiO}_2$
		Jarosita: $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$
		Yeso: $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot \text{H}_2\text{O}$
		Filosilicatos a $\sim 10\text{\AA}$ probablemente de tipo mica-illita.
		Filosilicatos a $\sim 14- 15\text{\AA}$
		Filosilicatos a $\sim 7\text{\AA}$
T	Pedro y Pablo 4	Cuarzo: $\text{SiO}_2$
		Filosilicatos a $\sim 10\text{\AA}$ de tipo mica-illita
		Jarosita: $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$
		Yeso: $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot \text{H}_2\text{O}$
		Filosilicatos a $\sim 14- 15\text{\AA}$
		Trazas de feldespato de tipo plagioclasa intermedia: $(\text{Ca},\text{Na})(\text{SiAl})_4\text{O}_8$
T	San Isais	Cuarzo: $\text{SiO}_2$
		Jarosita: $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$
		Yeso: $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot \text{H}_2\text{O}$
		Filosilicatos a $\sim 10\text{\AA}$ de tipo mica-illita
		Filosilicatos a $\sim 14- 15\text{\AA}$
		Trazas de feldespato de tipo plagioclasa intermedia: $(\text{Ca},\text{Na})(\text{SiAl})_4\text{O}_8$
C	Tiro de Chi. La Ramona	Arsenolita: $\text{As}_2\text{O}_3$
C	1a Casa de Chi. Los Sn Juanes	Arsenolita: $\text{As}_2\text{O}_3$

**Tabla 17. Resultados mineralógicos de algunas muestras por DRX.**

Además de estos minerales, los cuales son considerados minerales secundarios, con excepción del cuarzo, se identificó yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) en los terreros.

Romero *et al* (2007 y 2010), menciona que el yeso y la jarosita son minerales secundarios que son propios de ambientes mineros donde se genera drenaje ácido.

En los resultados de las cenizas, el único mineral que se identificó fue arsenolita ( $\text{As}_2\text{O}_3$ ), que es un mineral muy soluble en un medio acuoso.

Es importante mencionar que en estas muestras, no se identificaron minerales primarios como pirita y arsenopirita, por DRX, los cuales son sulfuros metálicos que están reportados en la mineralogía del yacimiento. Esto nos puede indicar que dichos minerales se han oxidado y han dado origen a la liberación de elementos, con la posterior precipitación o co-precipitación de nuevos minerales (minerales secundarios).

O bien, quizá no están presentes en los residuos seleccionados porque están en muy poca cantidad y no es detectado por DRX, también a que pertenecen a épocas muy antiguas en las que se explotó la parte oxidada del yacimiento. Si se tuviera la presencia de minerales primarios en los residuos, quizá habría más residuos generadores de DA.

Así mismo, se realizaron también análisis por Microscopia Electrónica de Barrido acoplada a espectrómetro de rayos X por energía dispersa (MEB-EDS).

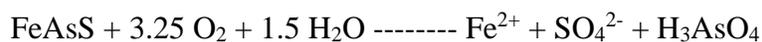
Los resultados de los análisis de las muestras denominadas cenizas, permitieron observar los cristales de arsenolita ( $\text{As}_2\text{O}_3$ ), en las muestras Tiro de chimenea La Ramona (**Figura 16a**) y 1ra casa de chimenea Los Sn Juanes, (**Figura 16b**).

### **5.5 Procesos geoquímicos identificados en los residuos de estudio e importancia de los minerales secundarios que se han formado.**

La formación de los minerales secundarios identificados en los residuos se puede explicar a través de los siguientes procesos geoquímicos:

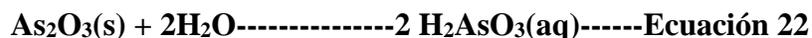
#### **5.5.1 Procesos de oxidación**

La oxidación de sulfuros metálicos, liberan protones ( $\text{H}^+$ ), sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y el ion férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ) a través de las siguientes ecuaciones:



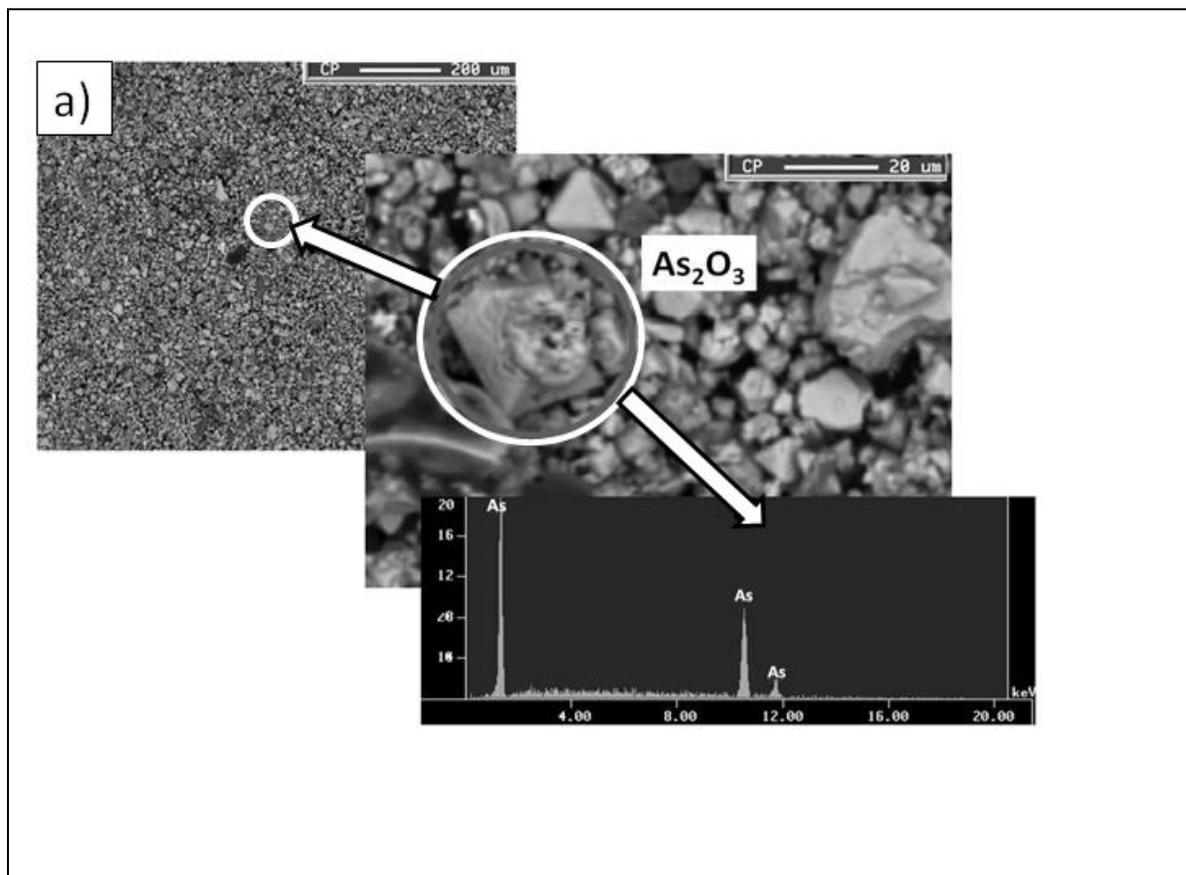
### 5.5.2 Proceso de interperismo hídrico

Para el caso de los residuos metalúrgicos (cenizas), el mineral identificado como arsenolita ( $\text{As}_2\text{O}_3$ ), se puede intemperizar, reaccionando con el agua y formando ácido arsenioso ( $\text{H}_2\text{AsO}_3^0$ ), a través de la siguiente reacción:



Debido a que la molécula de ácido arsenioso tiene carga neutra en un amplio rango de pH (de 1 a 9) y condiciones redox (-400 a 500mV), como se muestra en la **Figura 17**. Por lo tanto en las condiciones ambientales presentes en la zona de estudio, no es posible que sea retenido por alguna fase mineral, por ello, en los lixiviados de los residuos metalúrgicos analizados tenemos altas concentraciones solubles ( $668.8, 185.2$  y  $165.9 \text{mg L}^{-1}$ ), de arsénico (As).

Estas concentraciones geodisponibles (solubles), de As, podrían afectar al entorno de los pueblos más cercanos como en el suelo y el agua.



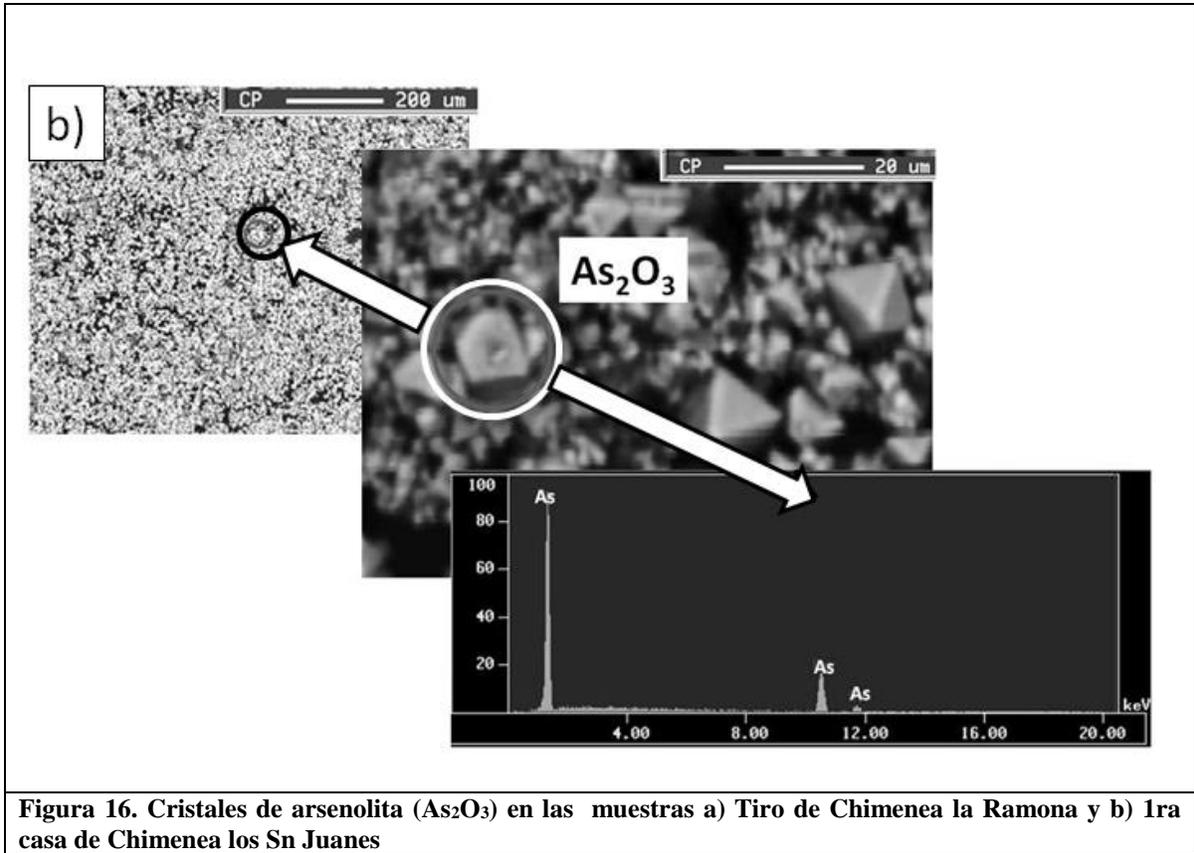


Figura 16. Cristales de arsenolita ( $As_2O_3$ ) en las muestras a) Tiro de Chimenea la Ramona y b) 1ra casa de Chimenea los Sn Juanes

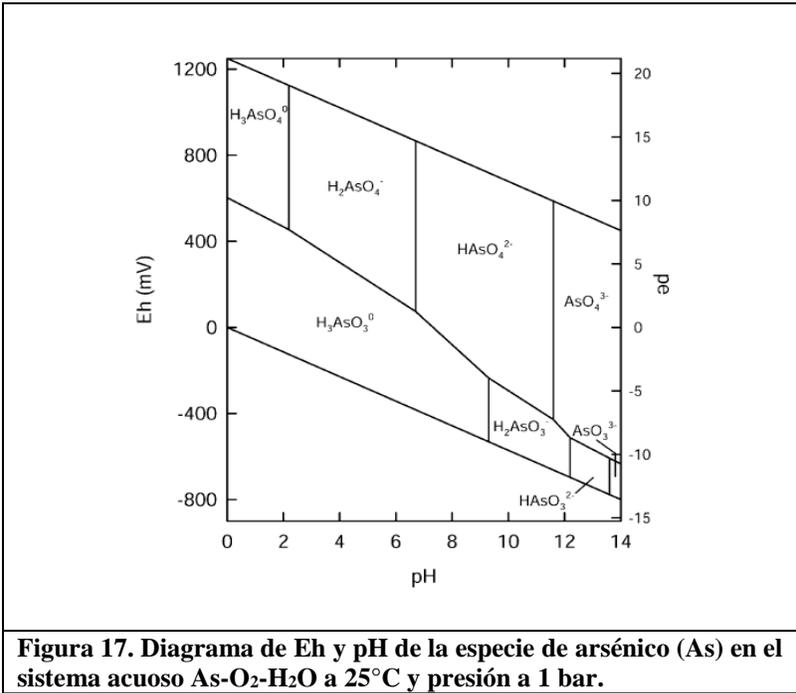


Figura 17. Diagrama de Eh y pH de la especie de arsénico (As) en el sistema acuoso  $As-O_2-H_2O$  a  $25^\circ C$  y presión a 1 bar.

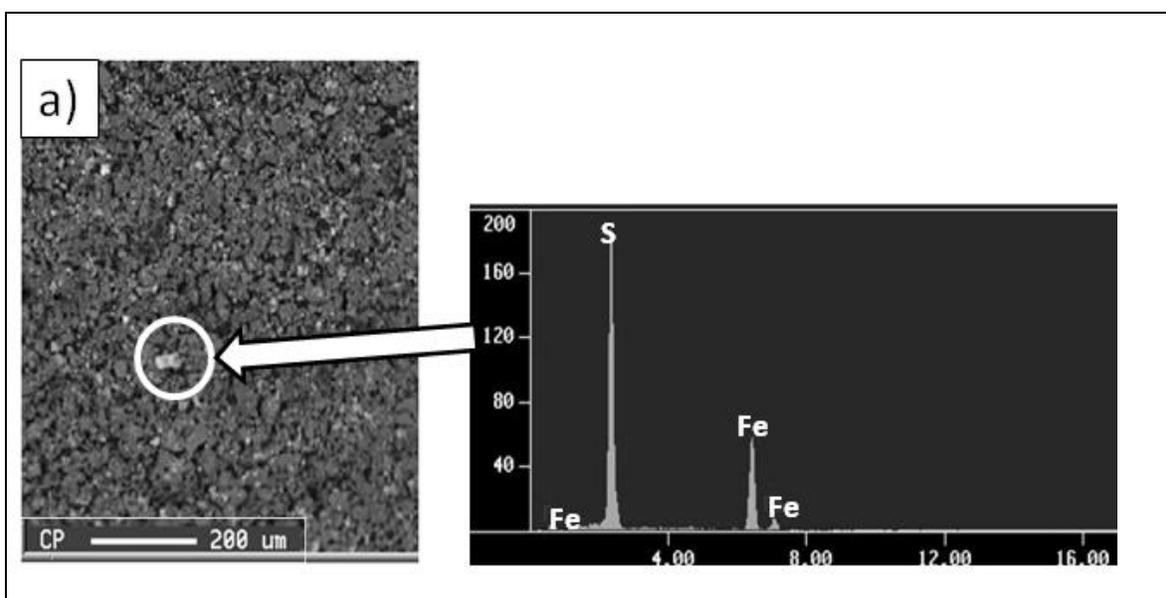
Para los residuos mineros (terreros y jal), las concentraciones geodisponibles de arsénico (As), no fueron relativamente altas (valor máximo 1.8155 y valor mínimo 0.009 mg L<sup>-1</sup>): esto se debe a que podría haber procesos que estén neutralizando la acidez producida por la pirita y/o arsenopirita. O tal vez, podría haber otras especies mineralógicas de arsénico pero que están retenidas en alguna fase mineral.

### 5.5.2 Procesos de neutralización

La disolución de la calcita (CaCO<sub>3</sub>), o minerales ricos en calcio (Ca<sup>2+</sup>), consume la acidez (H<sup>+</sup>) liberada por la oxidación de los sulfuros metálicos. La liberación de Ca<sup>2+</sup>, en presencia de los sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) liberados por la oxidación de sulfuros metálicos, produce la precipitación de yeso (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O), como se muestra en la siguiente reacción química:



El yeso fue debidamente identificado por la técnica de DRX en las muestras denominadas terreros. Este es un mineral indicador de los procesos de oxidación y neutralización que ocurren en los residuos mineros. En algunos residuos, mediante DRX se detectaron partículas que podrían interpretarse como pirita y arsenopirita (**Figura 18a** y **Figura 18b**), lo cual podría sugerir que estos minerales (sulfuros metálicos) en los terreros no se han oxidado totalmente y eso disminuye la acidez del residuo.



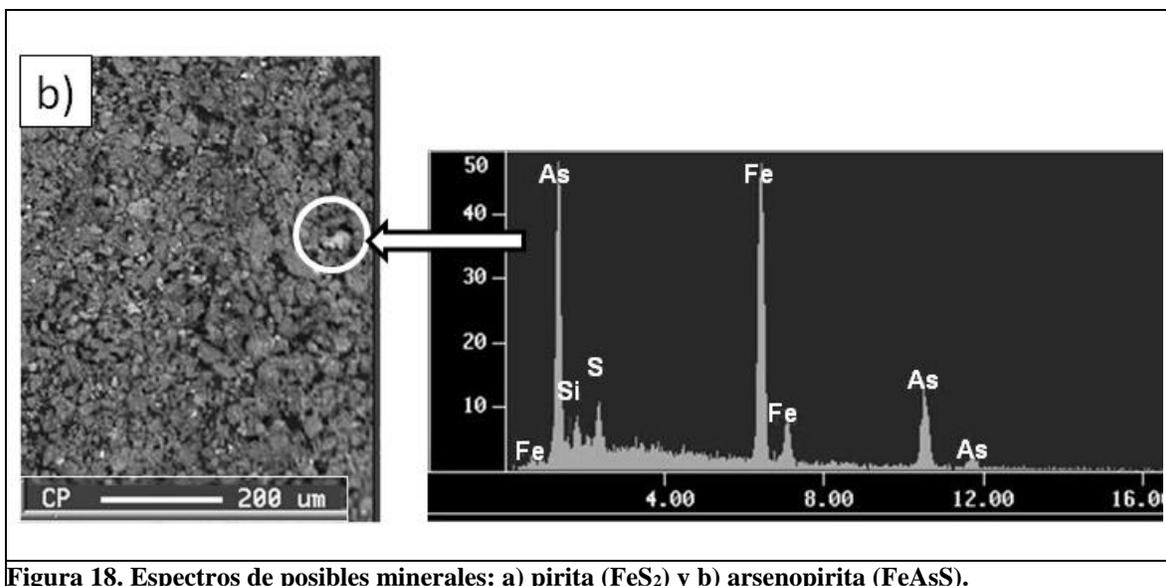
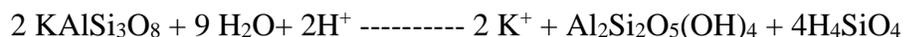


Figura 18. Espectros de posibles minerales: a) pirita ( $\text{FeS}_2$ ) y b) arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ).

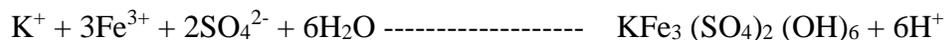
Durante los procesos de oxidación-neutralización se favorece la precipitación de minerales secundarios como los oxi-hidróxidos de Fe, jarosita, yeso y arcillas, los cuales pueden retener, vía sorción, a los elementos potencialmente tóxicos (Levy et al., 1997; Holmstrom y Ohlander, 2001).

### 5.5.3 Procesos de retención

Por otra parte, la alteración de feldespatos potásicos ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ), por acción de los protones, libera iones ( $\text{K}^+$ ), y ocurre la precipitación de la caolinita de acuerdo a la siguiente reacción:

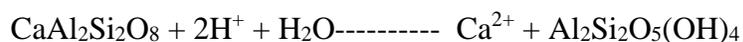


Los iones  $\text{K}^+$  en presencia de  $\text{Fe}^{3+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  tienden a precipitar como jarosita y esto contribuye a mantener condiciones ácidas de acuerdo con la siguiente reacción reportada por McGregor *et al* (1998).



La jarosita fue identificada por DRX en las muestras de los residuos terreros y jal. La presencia de la jarosita es importante desde el punto de vista ambiental, ya que es uno de los controles más importantes en la movilidad de EPT (Lin 1997; McGregor *et al.* 1998; Romero *et al* 2007).

Así mismo, al alterarse los minerales primarios, como feldespatos, tendremos la presencia de minerales secundarios como filosilicatos (arcillas). Las características principales de un filosilicato, son: forma de su estructura y tamaño de grano (muy fino, inferior a 2µm).

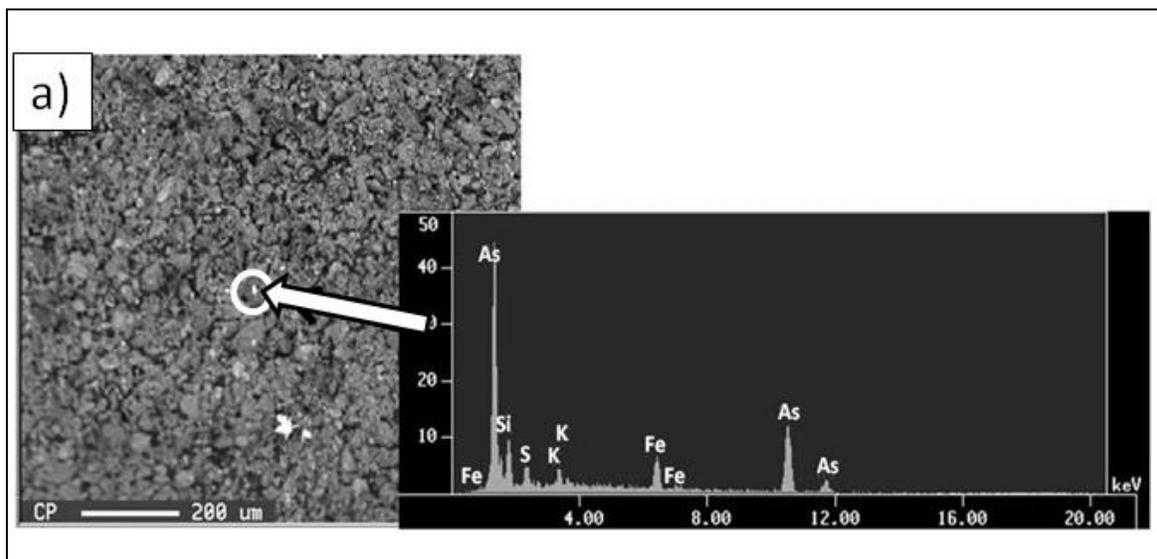


En un estudio realizado por Manning y Goldberg, (1997), reportan la adsorción de arseniatos en superficies de minerales de arcilla (caolinita, illita, montmorillonita). Por lo cual estos minerales secundarios ayudan a la retención de EPT.

#### 5.5.4 Fases solidas que controlan la movilidad de arsénico (As), plomo (Pb) y antimonio (Sb).

Los análisis por Microscopía Electrónica de Barrido acoplada con espectrometría de Rayos X por energía dispersa (MEB-EDS) permitieron identificar que, en los residuos terreros y jal, el arsénico está retenido en partículas con porcentaje de Fe-K-S-As. Así mismo, se identificó, por esta misma técnica, que las partículas con porcentaje de Fe-S-Pb-As están reteniendo al As, Pb y Sb, (**Figura 19**). De acuerdo con los espectros MEB-EDS, hay tres distintas partículas que contienen estos elementos: (a) Fe-As-K-S, (b) Fe-As-K-S-Sb y (c) Fe-As-Pb-K-Sb.

Estas observaciones realizadas en MEB-EDS para el caso de los terreros y el jal, sugieren que la movilidad de As podría estar regulándose por la presencia de partículas de As-K-Fe-S (**Figura 19a**) formadas como fases secundarias. Especulamos que estas partículas corresponden a jarosita ( $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ).



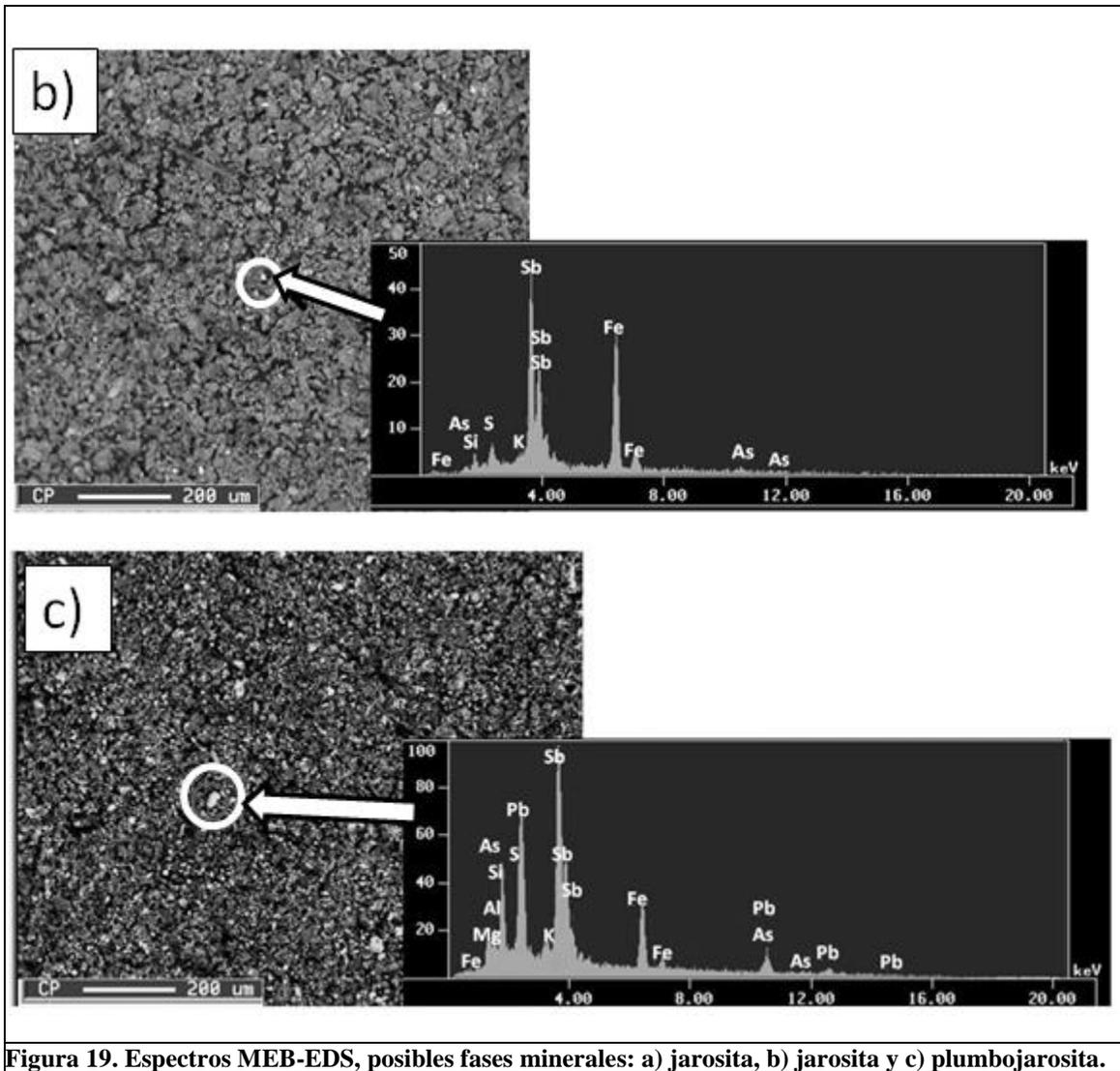


Figura 19. Espectros MEB-EDS, posibles fases minerales: a) jarosita, b) jarosita y c) plumbojarosita.

De igual manera, en las muestras (terceros y jal) analizadas, la movilidad de Sb (otro metaloide como As), podría estar controlada también por la presencia de partículas de Sb-K-Fe-S-As (**Figura 19b**). Por último, la movilidad de Pb estaría controlada por la presencia de Pb-Sb-K-Fe-S-As (**Figura 19c**), se especula que esta partícula es plumbojarosita ( $\text{PbFe}_6(\text{SO}_4)_4(\text{OH})_{12}$ ).

### **5.5.5 Minerales secundarios y su relación con la movilidad del arsénico (As), plomo (Pb) y antimonio (Sb).**

Los resultados obtenidos indican que las concentraciones geodisponibles (solubles) de los EPT, en los lixiviados de los residuos (terreros y jal), son inferiores a los LMP.

A pesar de las altas concentraciones totales de As, Pb y Sb, las concentraciones geodisponibles son relativamente bajas en varias muestras (terreros y jal) ya que los valores no superan el LMP por la NOM-157, esto nos podría indicar que existe una retención en las fases sólidas de EPT, que podrían interpretarse como algunos procesos de atenuación natural, lo que hace que disminuyan las concentraciones geodisponibles de EPT en los residuos.

Un posible mecanismo que explique la atenuación natural del As podría ser su retención en la jarosita ( $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ), la cual fue debidamente identificado por la técnica de DRX. Varios autores (Foster, 1998; Paktunc y Dutrizac, 2003; Asta et al, 2009) han reportado la retención de As en minerales del grupo de la jarosita debido al intercambio aniónico entre As (V) de los lixiviados y el sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), de la estructura cristalina de la jarosita.

Finalmente, otro posible mecanismo para explicar la atenuación natural de As, Sb y Pb podría ser la precipitación de la beudantita ( $(\text{PbFe}_3[\text{SO}_4][\text{AsO}_4][\text{OH}]_6)$ ), que es estable en medio ácido. Aunque la beudantita no fue identificada por la técnica de DRX su precipitación ha sido reportada como un mecanismo eficiente para el control de la movilidad del As y Pb en ambientes mineros bajo condiciones ácidas (Roussel et al., 2000; Romero et al., 2007 y 2010, y Morales 2010).

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Conclusiones

La oxidación de minerales de sulfuro en los residuos mineros denominados como terreros y jal del distrito minero San Antonio-El Triunfo (actualmente inactivo) ha liberado altas concentraciones totales de elementos potencialmente tóxicos (EPT). El arsénico (As), plomo (Pb) y antimonio (Sb) son los tres EPT de mayor preocupación ambiental en el área de estudio, teniendo en cuenta las altas concentraciones totales de estos elementos. Sin embargo, a pesar de las altas concentraciones totales de estos elementos, en los residuos, sus lixiviados se caracterizan por concentraciones solubles (geodisponibilidad) bajas.

Por otra parte, en los residuos de chimenea denominados como cenizas, existen altas concentraciones de arsénico (As), cadmio (Cd), plomo (Pb) y antimonio (Sb). Para las concentraciones geodisponibles de estos EPT, se determinaron concentraciones relativamente altas de As, Cd y Sb, principalmente. Las concentraciones de As se deben a la presencia del mineral arsenolita que tiene una alta solubilidad en agua.

Además algunas muestras, tanto en los residuos de chimenea y algunos terreros, los valores de pH indican que actualmente algunos de ellos tienen potencial de generación de drenaje ácido (DA), debido a que presentan valores de  $\text{pH} \leq 4$ . Los valores de pH de entre 4-7 en los residuos podrían indicar que actualmente están generando drenaje ácido, pero en los residuos con valores de pH superiores de 7 se considera que actualmente no son generadores potenciales de acidez. Los resultados de la prueba de balance ácido-base del jal, indica que en el futuro este residuo podría generar DA, aunque esto no necesariamente quiera decir que tenga EPT geodisponibles.

El comportamiento de los EPT y los análisis mineralógicos indican que el principal mecanismo que controla la movilidad de arsénico (As), bario (Ba), plomo (Pb) y antimonio (Sb), es la generación y precipitación de minerales secundarios como yeso y jarosita.

Con base en los objetivos planteados, se podría decir que los residuos dominados terreros y el jal, no son tan peligrosos ya que presentan altas concentraciones totales de algunos EPT, pero en la prueba del lixiviado no presentan altas concentraciones geodisponibles de los EPT.

Por otra parte los residuos denominados cenizas son peligrosos ya que se identificó el mineral arsenolita, el cual podría transportarse por aire y contaminar los pueblos cercanos con concentraciones. Así mismo la geodisponibilidad de arsénico es alta y podría movilizarse a los acuíferos cercanos

## 6.2 Recomendaciones

La información obtenida de los residuos mineros con base en valorarlos con varios análisis y pruebas, se recomienda proponer medidas alternativas para la estabilización y rehabilitación de las zonas donde se encuentran dichos residuos.

Con respecto a los residuos (cenizas), los cuales presentan altas concentraciones totales de algunos elementos potencialmente tóxicos (EPT), y además altas concentraciones geodisponibles. Se recomienda cuantificar el material que está en las chimeneas y lo más pronto posible tratarlo. Como por ejemplo se podría tratar de oxidar con permanganato de potasio ( $\text{KMnO}_4$ ) al arsénico (III) de la arsenolita a arsénico (V), ya que el arsénico (V) es menos peligroso que el arsénico (III).

Además con respecto a las concentraciones de EPT como en algunos residuos que no se consideran peligrosos como los terreros y jal, yo recomendaría realizar la prueba cinética de celdas húmedas, con el fin de pronosticar si al momento de la disminución del pH, estos residuos en el futuro podrían liberar EPT. Y en los residuos peligrosos tratar de quitar dicho residuo sin afectar el medio ambiente, y colocarlos en otro lugar.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Appelo, C.A.J y Postma, D. 1993. *Geochemistry groundwater and pollution*. A.A. Balkema. Rotterdam, pp 551.
- Arias-Arce, V., Rosa-Coronado, F., Puente-Santibáñez, D., Lovera-Dávila, D., 2005, Refractoriedad de Concentrados Auríferos: Revista del Instituto de Investigación FIGMMG, 8(16), 5-14.
- Armienta, M.A., Rodríguez, R. and Cruz, O. 1997a. Arsenic content in hair of people exposed to natural arsenic polluted groundwater at Zimapán, Mexico, *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 59, pp. 583-589.
- Armienta, M.A., Villaseñor, G., Rodríguez, R., Ongley, L.M., Mango, H., 2001, The role of arsenic-bearing rocks in groundware pollution at Zimapan Valley, Mexico: *Environ. Geol.* 40 (4-5), 571-781.
- Asta, M.P, Cama J, Martínez M, Gimenez J 2009. Arsenic removal by goethite and jarosite in acidic conditions and its environmental implications. *J Hazard Mat* 171: 965-972.
- Bain, J.G., Blowes, D.W., Robertson, W.D., Frind, E.O., 2000, Modelling of sulfide oxidation with reactive transport at a mine drainage site. *Journal of Contaminant Hydrology*, vol 41 (1-2), pp. 23-47.
- Blowes, D.W. and Jambor, L.L 1990. The pore-water geochemistry and the mineralogy of the vadose zone of sulfide tailing, Waite A mullet, Quebec, Canada. *Applied Geochem.*, 5 (3) : 327-346.
- Blowes, D.W., C.J. Ptacek, J. Jurjover, 2003, Mill tailings: Hidrogeology and geochemistry in environmental aspects of mine waste, Ed. J.L. Jambor, D.W Blowes and A.I.M. Ritche, short course series, vol. 31, *Mineralogical of Canada*, Vancouver British Columbia, Series Editor Robert Raeside, pp. 96-116.
- Bothe, J., Brown, P., 1999. Arsenic immobilization by calcium arsenate formation. *Envirom. Sci. Technol.*, 33, 3806-3011.
- Bowell, R.J., 1994. Sorption of arsenic by iron oxides and oxyhydroxides in soils. *Appl. Geochem.* 9. Pp 279-286.

- Camero P.H., 2000, Encapsulamiento concurrente de la pirita en presas de relaves. Potosí-Bolivia. Curso Internacional de maestría en medio ambiente “Técnicas ambientales”.
- Carrillo, A., 1996. Environmental geochemistry of the San Antonio-El Triunfo mining area, southernmost Baja California Peninsula Mexico. Ph. D. Thesis. Department of Geology and Geophysics, University of Wyoming, Laramie, Wyoming, USA, 186 p.
- Carrillo, A. and J.I. Drever., 1997. Environmental assessment of the potential for arsenic leaching into groundwater from mine wastes in Baja California Sur, Mexico. Department of Geology and Geophysics, University of Wyoming, Laramie, Wyoming, USA.
- Carrillo, A. and Drever, J. I., 1998a Adsorción of arsenic by natural aquifer material in the San Antonio- El Triunfo mining area, Baja California, México. *Environmental Geology*, vol. 35, pp. 251-257.
- Carrillo, A., Drever, J. I., 1998, Environmental assessment of the potential for arsenic leaching into groundwater from mine wastes in Baja California Sur, Mexico: *Geofísica Internacional*, 37(1), 35-39.
- Carrillo-Chavez, A., Drever J.J., Martinez M., 2000. Arsenic content and ground water geochemistry of the San Antonio-El Triunfo, Carrizal and Los Planes aquifers in southernmost Baja California, México *Environmental Geology*, vol. 39, pp.1295-1303.
- Carrillo-González R. 2005. Niveles de contaminación de los suelos y las plantas. En: González-Chávez M.C. Pérez-Moreno J. y Carrillo-González R. Eds. *El sistema planta-microorganismo-suelo en áreas contaminadas con residuos de minas*, pp. 161 Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México.
- Carrillo, A., Huyck H (1997) A genetic model for the los Uvares gold deposit, Baja California Sur, Mexico. *Geofis. Int.* 36: 111-119.
- Castro-Larragoitia, J., Krama, U., & Puchelt, H. (1997). 200 years of mining activity at La Paz/San Luis Potosí/Mexico-Consequences for environmental and geochemical exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 58, 81-91.

- Comisión Nacional del Agua (CNA), 2009, Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea, acuífero Los Planes, estado de Baja California Sur, Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos, México D.F., México, 29 pp.
- Compañía Minera Pitalla, S. A. de C. V., 2011, Proyecto minero “San Antonio”, Baja California Sur, México, 26 pp.
- Compañía Minera Pitalla, S. A. de C. V., 2012, Informe preventivo: Proyecto de exploración minera directa “Texcalama”, San Antonio, Municipio de La Paz, Baja California Sur, 192 pp.
- Costello, C., 2003. Acid mine drainage: Innovative treatment technologies. Washington. D.C., United State Environmental Protection Agency, Technology Innovation office, pp. 52.
- Dold, B., 2002, Basic concepts of environmental geochemistry of sulfide mine waste, curso de posgrado, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Faure, G. 1980. Principles and applications of inorganic geochemistry. Macmillan Publishing Company, Canada.
- Fetter, C.W., 1993. Contaminant Hydrogeology. Macmillan Publishing Company, N.Y.
- Foster, A.L., Brown, G.E., Tingle, T.N. and Parks, G.A., 1998, Quantitative arsenic speciation in mine tailings using X-ray adsorption spectroscopy. American Mineralogist, 83 (5-6), 553-568.
- Frost, R.F., Griffin, R.A., 1976. Effect of pH on adsorption of arsenic and selenium from landfill leachate by clay minerals.
- Fuller CC, Davis J.A. Waychunas GA 1993. Surface chemistry of ferrihydrite: Part2. Kinetics of arsenate adsorption and coprecipitation. Geochimistry Cosmochim Acta 57: 2271-2282.
- Gálvez, V., 1922, Exploración en la Península de Baja California, Instituto Geológico de México, Boletín Núm. 39, 108 pp.
- Goldberg, S., D.L. Suarez and R.A. Glaubig. 1988. Factors affecting clay dispersion and aggregate stability of air zone soils. Soil Sci. 146: 317-325.
- Gomez-Arroyo S., M.A. Armienta., J. Cortes-Eslava y R. Villalobos-Pietrini; Sister-Chromatid Exchanges in Vivia-Faba Induced by Arsenic-Contaminated drinking

- water from Zimapán Hidalgo, Mexico. Mutation research genetic toxicology and Enviromental Mutagenesis: 394, 1-7 (1997).
- Goldberg, S. 1986. Chemical modeling of arsenate adsorption on aluminium and iron oxide minerals. *Soil Sci Am J* 50: 1154-1157.
- Gutiérrez-Ruiz, M. E., Moreno-Turrent, M., 1995, Los residuos en la minería mexicana, en Garfias-y Ayala F. J., Barojas-Weber, L. (eds), *Residuos peligrosos en México: D. F., México, Inédita, S. A., 37-44.*
- Gutiérrez-Ruiz, M., Romero, Francisco M., González-Hernández, Galia, 2007, Suelos y sedimentos afectados por la dispersión de jales inactivos de sulfuros metálicos en la zona minera de Santa Bárbara, Chihuahua, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 24(2), pp. 170-184.
- Holmstrom H. and Ohlander B. 2001. Layers rich in Fe and Mn oxihydroxides formed at the tailing pond water interface a possible trap for trace metals in flooded mine tailing, *J. Geochem. Exploration* 74: 189.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2011, Anuario estadístico. Baja California Sur, ed. 2011 (en línea), actualización: 23 de agosto de 2012, <<http://www3.inegi.org.mx/sistemas/productos/default.aspx?c=265&s=inegi&upc=702825201913&pf=Prod&ef=&f=2&cl=0&tg=13&pg=0>>, consulta: 05 de julio de 2013
- Jambor, J.L and D.W. Blowes, 1994, *Shot Course Handbook in Environmental Geochemistry of Sulfide Mine Wastes*, Mineralogical Association of Canada, Cahpter 3, 4, 9 y 10, pp. 58-292.
- Jennings SR, Dollhops DJ, Inskep WP. 2000. Acid production from sulfide minerals using hydrogen peroxide weathering. *Appl Geochem* 15: 235-243.
- Johnson R.H., Blowes, D.W., Robertson, W.D., and Jambor, J.L., 2000, The hydrogeochemistry of the Nickel Rim mine tailing impoundment, Sudbury, Ontario: *J. Contam. Hydrol.* 41 (1-2), 49-80.
- Joo-Sung, A., Young-Seog, P., Ju-Yong, K., Kyoung-Woong, K., 2005, Mineralogical and geochemical characterization of arsenic in abandoned mine tailings of Korea: *Environmental Geochemistry and Healt*, 27, 147-157.

- Jung, M.C., 2001. Heavy metal contamination of soils and waters in and around the Imcheon Au-Ag mine, Korea. *Applied Geochemistry*. 16 (11-12), pp 1369-1375.
- Kwang-Koo, K., Kyoung-Woong, K, Ju-Yong, K., In S. K., Young-Wook C., Jeong-Sik M., 2001, Characteristics of tailings from the closed metal mines as potential contamination source in South Korea: *Environmental Geology*,41, pp. 358-364.
- Lawrence, R.W., 1990, Prediction of the behavior of mining and processing wastes in the environment, in western regional symposium on mining and mineral processing waste proceeding, May 30 June 1, Berkeley, California. Littleton, Colorado, USA, American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers and Society for mining metallurgy and Exploration, Inc., pp. 115-121.
- Lawrence, R.W., Wang, Y., 1997, Determination of neutralization potential in the prediction of acid rock drainage: Fourth international conference on acid rock drainage. Vancouver, BC. Canada.
- Levy et al., 1997 D.B. Levy, K.H. Curtis, W.H. Casey and P.A. Rock, A comparison of metal attenuation in mine residue and overburden material from an abandoned copper mine. *Appl. Geochem.* 12, 203.
- Lin, Z., 1997, Mobilization and retention of heavy metals in mill-tailings from Garpenberg sulfide mines, Sweden: *Sci. Total Environ.* 198, 13-31.
- Lizárraga-Mendiola L.G., 2008. Afectación de una presa de jales de sulfuros masivos a la hidrogeoquímica de los escurrimientos superficiales aledaños.
- Lottermoser, B. G., 2010, Tailings, in *Mine Wastes Characterization, Treatment, Environmental Impacts*: Springer Berlin Heidelberg New York, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 205-241.
- Luna, L.C., 2011. Barreras geoquímicas para el control de drenaje ácido en jales de una mina de hierro. Posgrado en Ciencias de la Tierra UNAM.
- Manning, B.A., and S. Goldberg. 1997a. Arsenic (III) and arsenic (V) adsorption on three California soils. *Soil Sci.* 162: 886-895.
- Manning, B.A., and S. Goldberg. 1997b. Adsorption and stability of arsenic (III) at the clay mineral-water interface. *Environ. Sci. Technol.* 31: 2005-2011.
- Martínez, F.M.A., 1998. Contenido de Arsénico en el Agua subterránea de la Zona Minera de San Antonio, B.C.S., México: *Relación de los Yacimientos Minerales y Obras*

- Mineras. Tesis de Licenciatura en Geología. Universidad Autónoma de Baja California Sur. 62 pp.
- McGregor, R.G., Blowes, D.W., Jambor, J.L., Robertson, W.D., 1998, The solid-phase controls on the movility of heavy metals at the copper cliff tailings area, Sudbury, Ontario, Canada: *Contam Hydrol* 33, 247-271.
- Mejía, J., Carrizales, L., Rodríguez, V. M., Jiménez-Capdeville, M. E., Díaz-Barriga, F., 1999, Un método para la evaluación de riesgos para la salud en zonas mineras: *Salud Pública de México*, 41(2), 132-140.
- Mendoza-Amézquita, E., Armienta-Hernández, M. A., Ayora, C., Soler, A., Ramos-Ramírez, E., (2006), Potencial lixiviación de elementos traza en jales de las minas La Asunción y Las Torres, en el Distrito Minero de Guanajuato, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 23(1), 75-83.
- Moncour, M.C., C. J. Ptacek, D. W. Blowes and J. L Jambor, 2005, Release, Transport and Attenuation of Metals From and Old Tailings Impoundment, *Applied Geochemistry*, vol. 20, num. 3, pp. 639-659.
- Monroy, M., Díaz-Barriga, F., Razo, I., Carrizales, L., 2002, Evaluación de la contaminación por arsénico y metales pesados (Pb, Cu, Zn) y análisis de riesgo en salud en Villa de la Paz – Matehuala, S.L.P., San Luis Potosí, México, Instituto de Metalurgia, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Nota Informativa,
- Morales-Arredondo J.I 2010. Estudios comparativos de la peligrosidad de jales en dos zonas mineras de México: implicaciones ambientales. Tesis de Maestría , posgrado de Ciencias de la Tierra, UNAM.
- Morin, K.A., Hutt, N.M., 1997, *Envirotnmental geochemistry of minesite drainage: practical and case studies*, MDAG Publishing.
- Naranjo-Pulido, A., H. Romero-Schmidt, L. Mendez-Rodríguez, B. Acosta-Vargas & A. Ortega-Rubio, 2002. Soil arsenic contamination in the Cape Region, B.C.S., Mexico. *Journal of Environmental Biology*, 23(4), 347-352.
- Naranjo, A. 2004. Estudio de la contaminación por arsénico en agua, suelo y plantas de la región del Cabo en Baja California Sur, Mexico. Tesis de Maestría, UNAM, Mexico.

- Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización.
- Norma Oficial Mexicana 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 postoperación de presas de jales.
- Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.
- Norma Oficial Mexicana NOM-157-SEMARNAT-2009, Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros.
- Paktunc D, Dutrizac J.E., 2003. Characterization of arsenate for sulfate substitution in synthetic jarosite using X-ray diffraction and X-ray absorption spectroscopy, *The Canadian Mineralogist*, 41, 905-919.
- Puga, S., Sosa, M., Lebgue, T., Quintana, C., Campos, A., 2006, Contaminación por metales pesados en suelo provocada por la industria minera: *Ecología Aplicada*, 5(1,2), 149-155.
- Posada-Ayala, I. H., 2011, *Geoquímica ambiental del Distrito Minero San Antonio, sedimentos de los arroyos de la cuenca de San Juan de los Planes y plataforma continental de Bahía La Ventana, BCS, México: La Paz, BCS, México, Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Tesis de Maestría*, 211 pp.
- Richter, C. Bernd and Kreitler, W Charles. *Geochemistry Techniques for identifying source of groundwater salinization*.
- Ridgway, J., Flight, D.M.A., Martiny, B., Gomez-Caballero, A., Macías-Romo, C., Grealley, K., 1995, Overbank sediments from central Mexico: an evaluation of their use in regional geochemical mapping and in studies of contamination from modern and historical mining: *Applied Geochemistry* 10 (1), 97-109.
- Romero, F.M., 2000. *Interacción de aguas contaminadas con arsénico con rocas calizas de Zimapan, Hidalgo*.

- Romero-Díaz, A., García-Fernández, G., 2007, Contaminación por erosión eólica e hídrica de las áreas limítrofes a la antigua zona minera de La Unión - Cartagena: Revista Murciana de Antropología, 14, 77-96.
- Romero, F. M, Armienta, M. A; Gonzales, G.H., 2007. Solid-phase control on the mobility of potentially toxic elements in an abandoned lead/zinc mine tailing impoundment, Taxco, Mexico. Applied Geochemistry. 22, pp 109-127.
- Romero, F. M., Armienta, M. A., Gutiérrez, M. E., Villaseñor, G., 2008, Factores geológicos y climáticos que determinan la peligrosidad y el impacto ambiental de jales mineros: Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 24 (2), 43 – 54.
- Romero, F. M., Gutiérrez-Ruíz, M., 2010, Estudio comparativo de la peligrosidad de jales en dos zonas mineras localizadas en el sur y centro de México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 62(1), 43-53.
- Romero – Guadarrama, J. A., 2011, Geoquímica de As, Hg, Pb y Zn y mineralogía en sedimentos superficiales de la cuenca de drenaje del Distrito Minero El Triunfo, B. C. S., México: La Paz, Baja California Sur, México, Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Tesis de Maestría, 98 pp.
- Rouseel C., Neel C. y Bril H. (2000). Minerals controlling arsenic and lead solubility in an abandoned gold mine tailing. Sci. Total Environ. 263, 209-219.
- Seal, Robert R. II and Jane M. Hammarstrom, 2003. Geoenvironmental models of mineral deposits: Examples from massive sulfide and gold deposits in environmental aspects of mine waste, Ed J.L. Jambor, D.W. Blowes and A.I.M. Rutchier, short course series, vol. 31, Mineralogical Association of Canada, Vancouver British Columbia, Series Editor Robert Raeside, pp. 11-50.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 1996, Carta Geológico-Minera, San Antonio F12-B13, escala 1:50,000: Pachuca, Hidalgo, México, 1 mapa con texto
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2000, Carta Geológico-Minera, San Juan de Los Planes F12-B14, escala 1:50,000: Pachuca, Hidalgo, México, 1 mapa con texto
- Servicio Meteorológico Nacional (CNA), 2012, Reporte del Clima en México, Reporte Anual, México D.F., México, 23 pp.
- Sun, X. and H.E. Doner, 1998, Adsorption and oxidation of arsenite on goethite. Soli Science, 163, pp. 278-287.

- Van Der Hoek, E., Bonouvrie, P., Comans, N., 1994. Sorption of As and Se on mineral components of fly ash: relevance for leaching processes. *Applied Geochemistry*. Vol 9, pp. 403-412.
- Volke-Sepúlveda, T., Solórzano-Ochoa, G., Rosas-Domínguez, A., Izumikawa, C., Encarnación-Aguilar, G., Velasco-Trejo, J. A., Flores Martínez, S., 2003, *Remediación de sitios contaminados por metales provenientes de jales mineros en los distritos de El Triunfo-San Antonio y Santa Rosalía, Baja California Sur: D. F., México, Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental, Informe Final*, 37 pp.
- Xu, H., Allard, B., Grimvall, A., 1991. Affects of acidification and natural organic materials on the mobility of arsenic in the environment. *Water, air and soil pollution*. Vol 57-58, pp. 269-278.