



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
CENTRO DE GEOCIENCIAS

**GEOQUÍMICA Y MINERALOGÍA DE JALES EN MINA AURORA, XICHÚ,  
GUANAJUATO**

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
**MAestrÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

PRESENTA:  
**ÉRIK FABIÁN SALAS MEGCHÚN**

**DR. JAIME ALEJANDRO CARRILLO CHÁVEZ**  
CENTRO DE GEOCIENCIAS  
Director de tesis

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTORIAL

<b>Dr. Gilles Levesse</b>	Centro de geociencias
<b>Dr. Francisco Romero</b>	Instituto de geología
<b>Dr. Jaime Alejandro Carrillo</b>	Centro de geociencias
<b>Dr. Javier Castro Larragoitia</b>	PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
<b>Dr. Israel Razo Soto</b>	PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

MÉXICO, D. F. MARZO 2014



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco primeramente a la **Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)** y en especial al **Centro de Geociencias** por haberme aceptado en esta nueva etapa de formación académica.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por la beca otorgada durante la realización de este proyecto. Al proyecto **PAPIIT No. IN112311** denominado “Evaluación geoquímica ambiental de algunas zonas mineras de la Sierra Gorda, Querétaro-Guanajuato” por cubrir los gastos generados en esta investigación.

A mi asesor **Dr. Alejandro Carrillo Chávez** por sus enseñanzas, la facilidad en la realización de todas las actividades propuestas en pro de la investigación, por el tiempo en la dirección de esta tesis y su confianza. Al **Dr. Gilles Levesse** por sus comentarios y observaciones en el transcurso de la tesis. A mis sinodales **Dr. Francisco Romero, Dr. Israel Razo y Dr. Javier Castro** por correcciones en el trabajo de investigación. A todos los doctores que me impartieron clases.

A la **M.C. María Carolina Muñoz Torres** por todo el apoyo en mi paso dentro del “**Laboratorio de Geoquímicas de Agua**” y “**Laboratorio de Geoquímica Ambiental**”, sus conocimientos y consejos tuvieron gran importancia en mi investigación. A la **Dr. Marina Vega González** por su ayuda y confianza en el “**Laboratorio de Fluidos Corticales**”.

A todo el personal administrativo de CGEO, y en mención especial a la **Lic. Marta Pereda** por todo su apoyo en todo tipo de logística.

A mis compañeros de clases, estudios y convivios con los cuales he vivido gran cantidad de anécdotas: **Neto, Rodrigo, Norma, Avith, Luis, Gabi, Diego, Paulina, Paco, Daniele, Eliseo, Berlaine, Ángel, Rosi y muchos más.**

## **ÍNDICE GENERAL**

<b>I. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
I.1 Problemática ambiental de la minería	1
I.1.2 Problemática en México	6
I.3 Geoquímica y mineralogía de jales mineros	7
I.4 Antecedentes de caracterización de jales	11
<b>II. OBJETIVO Y JUSTIFICACIÓN</b>	<b>12</b>
II.1 Objetivo general	12
II.2 Objetivos particulares	12
II.3 Justificación	12
<b>III. GENERALIDADES</b>	<b>14</b>
III.1 Localización del área de estudio	14
III.2 Marco geológico	14
III.2.1 Geología Regional	15
III.3 Geología Local	15
III.3.1 Formación El Doctor (Kat Cz)	15
III.3.2 Formación Soyatal (Ktm Cz-Lu)	16
III.3.3 Conglomerado Polimíctico (Teo Cgp)	17
III.3.4 Cuerpos ígneos (Tpa qMZ)	17
III.4 Yacimiento mineral	18
III.4.1 Mina Aurora	18
<b>IV. METODOLOGÍA</b>	<b>20</b>
IV.1 Muestreo de jales	21
IV.2 Muestreo de suelos	23
IV.3 Muestreo de sedimentos	25
IV.4 Preparación de las muestras	27

<b>IV.5</b>	<b>Análisis químico de muestras</b>	<b>27</b>
IV.5.1	Digestión ácida (Método 4H1a1)	28
IV.5.2	Proceso de extracción secuencial	29
<b>IV.6</b>	<b>Identificación de minerales</b>	<b>31</b>
IV.6.1	Difracción de Rayos X	31
IV.6.2	Microscopio Electrónico de Barrido – EDS	31
IV.6.3	Modelación geoquímico	31
<b>V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>		<b>32</b>
<b>V.1</b>	<b>Geoquímica y mineralogía de jales mineros</b>	<b>32</b>
V.1.1	Caracterización de jales 1	32
V.1.1.1	Análisis de imágenes MED y espectros EDS	32
V.1.1.2	Difracción de rayos X	35
V.1.1.3	Concentración digestión ácida	37
V.1.1.4	Concentración extracción secuencial	39
V.1.2	Caracterización de Jales 2	42
V.1.2.1	Análisis de imágenes MED y espectros EDS	42
V.1.2.2	Difracción de rayos X	45
V.1.2.3	Concentración digestión ácida	47
V.1.2.4	Concentración extracción secuencial	49
V.1.3	Caracterización de Jales 3	52
V.1.3.1	Análisis de imágenes MEB y espectros EDS	52
V.1.3.2	Difracción de rayos X	57
V.1.3.3	Concentración digestión ácida	60
V.1.3.4	Concentración extracción secuencial	62
V.1.4	Caracterización de Jales 4	67
V.1.4.1	Análisis de imágenes MEB y espectros EDS	67
V.1.4.2	Difracción de rayos X	70
V.1.4.3	Concentración digestión ácida	72
V.1.4.4	Concentración extracción secuencial	73
V.1.5	Resultados por digestión ácida de jales	76
V.1.6	Resultados por extracción secuencial en jales	77
V.1.7	Resultados por difracción de rayos X	80
<b>V.2</b>	<b>Determinación geoquímica de sedimentos</b>	<b>81</b>
<b>V.3</b>	<b>Determinación geoquímica de suelos</b>	<b>82</b>
V.3.1	Recuperación de elementos en la técnica analítica	83
V.3.2	Concentración de Arsénico	87
V.3.3	Concentración de Cadmio	87
V.3.4	Concentración de Cobre	88
V.3.5	Concentración de Hierro	89
V.3.6	Concentración de Plomo	90
V.3.7	Concentración de Zinc	91

<b><i>VI. MODELADO GEOQUÍMICO</i></b>	<b><i>93</i></b>
<b><i>VII. CONCLUSIONES</i></b>	<b><i>98</i></b>
Jales mineros	98
Sedimentos	99
Suelos	99
Dinámica geoquímica	100
<b><i>VIII. BIBLIOGRAFÍA</i></b>	<b><i>101</i></b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Fuentes minerales de metales y metaloides (Blowes, 2003)	1
Tabla 2. Producción de minerales o productos en extracción minera (Lottermoser, 2010)	3
Tabla 3. Incidentes por jales minero alrededor del mundo (Lottermoser, 2010)	4
Tabla 4. Reacciones de oxidación de algunos minerales de sulfuros (Dold, 2005)	8
Tabla 5. Reacciones de neutralización de algunos minerales (Dold, 2005)	8
Tabla 6. Ejemplos de minerales secundarios post-minería en desechos de mina de sulfuros (Alpers et al. 1994; Nordstrom et al. 1999; Jambor et al. 2000a,b; Bigham et al. 2000)	10
Tabla 7. Ubicación en UTM de las muestras de jales, Xichú, Guanajuato	22
Tabla 8. Ubicación en UTM de las muestras de sedimentos, Xichú, Guanajuato	24
Tabla 9. Ubicación en UTM de las muestras de sedimentos, Xichú, Guanajuato	25
Tabla 10. Muestras de jales con valores extremos de As e intermedio en jales 3	29
Tabla 11. Proceso de extracción secuencial (Parviainen, 2009)	30
Tabla 12. Resultado de concentraciones de los metales en jales 1	37
Tabla 13. Concentración de elementos obtenidos por medio de la extracción secuencial en jales 1	40
Tabla 14. Resultado de concentraciones de los metales en jales 2	48
Tabla 15. Concentración de elementos obtenidos por medio de la extracción secuencial en jales 2	50
Tabla 16. Resultado de concentraciones de los metales en jales 3	61

Tabla 17. Concentración de elementos obtenidos por medio de la extracción secuencial en jales 3	63
Tabla 18. Resultado de concentraciones de los metales en jales 4	72
Tabla 19. Concentración de elementos obtenidos por medio de la extracción secuencial en jales 4	74
Tabla 20. Concentraciones máximas y mínimas de los elementos analizados en cada jal minero	76
Tabla 21. Concentraciones promedios de los elementos analizados en cada jal minero	76
Tabla 22. Porcentaje de recuperación de las concentraciones de elementos en extracción secuencial a partir de agua regia	79
Tabla 23. Minerales encontrados dentro de los jales mineros a partir de estudios de difracción rayos x	80
Tabla 24. Estadística de las concentraciones de los elementos en sedimentos	81
Tabla 25. Concentraciones totales de referencia de elementos para suelo con diferentes usos (SEMARNAT, NOM-147)	83
Tabla 26. Porcentaje de recuperación de los elementos analizados con relación al material de referencia 2710a “montana soil”	83
Tabla 27. Resultados de las concentraciones de los elementos en suelos	84
Tabla 28. Concentraciones de muestras de agua	97



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de la trayectoria del mineral a través de trituración, molienda y flotación (Dold, 2005).	4
Figura 2. Suelos utilizados para cultivos impactados por los jales de la mina Aurora, Guanajuato	13
Figura 3. Mapa de localización de zona de estudio, Xichú, Guanajuato, México	14
Figura. 4. Geología regional, carta geológico-minero Xichú F14-C36 (modificada del SGM)	16
Figura 5. Afloramiento de la Formación El Doctor en las orillas del río Xichú	17
Figura 6. Zona de estudio y zonas de afectación por residuos mineros, Xichú, Guanajuato.	20
Figura 7. Jales de la mina Aurora, Xichú, Guanajuato. A) Jales 1, b) Jales 2, c) Jales 3, d) Jales 4	21
Figura 8. Planta de beneficio mina Aurora, Xichú, Guanajuato	22
Figura 9. Muestreo de jales. A) Excavación parte superior de jales 1, b) Excavación en la pared de jales 4	23
Figura 10. Mapa de localización de muestras de suelos, Xichú, Guanajuato	24
Figura 11. Muestreo de suelo. A) Muestro de suelo aledaño al río Xichú en plantíos de cultivos, b) Muestreo de suelo cercano al río Xichú.	25
Figura 12. Mapa de localización de muestras de sedimentos, Xichú, Guanajuato	26
Figura 13. Muestreo de sedimento. A) sedimentos expuestos cuando hay baja de caudal del río xichú b) sedimentos dentro del río Xichú	26
Figura 14. Molido y tamizado de muestras de jales, sedimentos y suelos	27

Figura 15. Equipo de espectrofotometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES)	28
Figura 16. Imágenes y espectros obtenidos por microscopía electrónica de barrido de la muestra jales 1-6	32
Figura 17. Imágenes y espectros obtenidos por microscopía electrónica de barrido de la muestra jales 1-6 después del proceso de extracción secuencial	33
Figura 18. Imágenes y espectros obtenidos por microscopía electrónica de barrido de la muestra jales 1-2	34
Figura 19. Imágenes y espectros obtenidos por microscopía electrónica de barrido de la muestra jales 1-2 después del proceso de extracción secuencial	35
Figura 20. Difractograma de la muestra jales 1-2	36
Figura 21. Difractograma de la muestra jales 1-6	36
Figura 22. Variación a profundidad de las concentraciones de los elementos en jales 1	38
Figura 23. Distribución de las concentraciones de elementos en las fracciones de la extracción dentro de jales 1	40
Figura 24. Distribución en porcentaje de concentraciones de metales obtenidas en fases químicas dentro de jales 1	41
Figura 25. Imágenes y espectros obtenidos por Microscopía Electrónica de Barrido de la muestra jales 2-1	42
Figura 26. Imágenes y espectros obtenidos por Microscopía Electrónica de Barrido de la muestra jales 2-1 después del proceso de extracción secuencial	43
Figura 27. Imágenes y espectros obtenidos por Microscopía Electrónica de Barrido de la muestra jales 2-6	44

Figura 28. Imágenes y espectros obtenidos por Microscopía Electrónica de Barrido de la muestra jales 2-6 después del proceso de extracción secuencial	45
Figura 29. Difractograma de la muestra jales 2-1	46
Figura 30. Difractograma de la muestra jales 2-6	46
Figura 31. Variación a profundidad de las concentraciones de los elementos en jales 2	48
Figura 32. Distribución de las concentraciones de elementos en las fases químicas dentro de jales 2	50
Figura 33. Distribución en porcentaje de concentraciones de metales obtenidas en fases químicas dentro de jales 2	51
Figura 34. Imágenes y espectros obtenidos por Microscopía Electrónica de Barrido de la muestra jales 3-4	52
Figura 35. Imágenes y espectros obtenidos por Microscopía Electrónica de Barrido de la muestra jales 3-4 después del proceso de extracción secuencial	53
Figura 36. Imágenes y espectros obtenidos por Microscopía Electrónica de Barrido de la muestra jales 3-10	54
Figura 37. Imágenes y espectros obtenidos por Microscopía Electrónica de Barrido de la muestra jales 3-10 después del proceso de extracción secuencial	55
Figura 38. Imágenes y espectros obtenidos por Microscopía Electrónica de Barrido de la muestra jales 3-7	56
Figura 39. Imágenes y espectros obtenidos por mMicroscopía Electrónica de Barrido de la muestra jales 3-7 después del proceso de extracción secuencial	57
Figura 40. Difractograma de la muestra jales 3-4	58
Figura 41. Difractograma de la muestra jales 3-10	58

Figura 42. Difractograma de la muestra jales 3-7	59
Figura 43. Variación a profundidad de las concentraciones de los elementos en jales 3	61
Figura 44. Distribución de las concentraciones de elementos en las fases químicas dentro de jales 3	64
Figura 45. Distribución en porcentaje de concentraciones de metales obtenidas en fases químicas dentro de jales 3	66
Figura 46. Imágenes y espectros obtenidos por Microscopía Electrónica de Barrido de la muestra jales 4-1	67
Figura 47. Imágenes y espectros obtenidos por Microscopía Electrónica de Barrido de la muestra jales 4-1 después del proceso de extracción secuencial	68
Figura 48. Imágenes y espectros obtenidos por Microscopía Electrónica de Barrido de la muestra jales 4-3	69
Figura 49. Imágenes y espectros obtenidos por Microscopía Electrónica de Barrido de la muestra jales 4-3 después del proceso de extracción secuencial	70
Figura 50. Difractograma de la muestra jales 4-1	71
Figura 51. Difractograma de la muestra jales 4-3	71
Figura 52. Variación a profundidad de las concentraciones de los elementos en jales 4	73
Figura 53. Distribución de las concentraciones de elementos en las fases químicas dentro de jales 4	74
Cigura 54. Distribución en porcentaje de concentraciones de metales obtenidas en fases químicas dentro de jales 4	75
Cigura 55. Gráfica de concentraciones promedios de jales mineros	77

Figura 56. Porcentajes de concentraciones de elementos, en los cuatros jales, encontradas en las fases químicas obtenidas en la extracción.	78
Figura 57. Porcentajes de distribución en las concentraciones de los elementos en fases químicas dentro de los jales	78
Figura 58. Gráfica de concentraciones de metales (Cd, Cu, Fe, Pb y Zn) y metaloide (As) en las muestras de sedimentos del río Xichú	82
Figura 59. Gráfica de concentraciones de metales (cd, cu, fe, pb y zn) y metaloide (as) en las muestras de suelos (en dirección al flujo del río) en áreas de cultivos aledaños al río Xichú	86
Figura 60. Gráfica de comparación en concentraciones de As en suelos de Xichú, NOM-147 y promedio de la zona no afectada (Prom ZNA)	87
Figura 61. Gráfica de comparación en concentraciones de Cd en suelos de Xichú y el promedio de la zona no afectada (Prom ZNA)	88
Figura 62. Gráfica de comparación en concentraciones de Cu en suelos de Xichú, NOM-147 y promedio de la zona no afectada (Prom ZNA)	89
Figura 63. Gráfica de comparación en concentraciones de Fe en suelos de Xichú y promedio de la zona no afectada (Prom ZNA)	90
Figura 64. Gráfica de comparación en concentraciones de Pb en suelos de Xichú, NOM-147 y promedio de la zona no afectada (Prom ZNA)	91
Figura 65. Gráfica de comparación en concentraciones de Zn en suelos de Xichú y promedio de la zona no afectada (Prom ZNA)	92
Figura 66. Diagramas Eh – pH. Sistema a) $H_2O - SO_4^{2-} - AsO_4^{2-} - Fe^{3+} - K^+$ b) $H_2O - SO_4^{2-} - AsO_4^{2-} - Fe^{3+} - K^+ - Ca^{2+}$ .	94
Figura 67. Diagramas Eh – pH. Sistema a) $H_2O - SO_4^{2-} - AsO_4^{2-} - Fe^{2+} - K^+$ b) $H_2O - SO_4^{2-} - AsO_4^{3-} - Fe^{3+} - K^+ - Cu^{2+}$ .	95

## RESUMEN

Gran cantidad de depósitos minerales de sulfuros (tipo skarn) ocurren en la parte este de México (Sierra Madre Oriental). Históricamente estos depósitos han sido explotados desde el siglo XVI. Esta actividad minera ha generado millones de toneladas de desechos con un alto contenido de metales posiblemente tóxicos. Este estudio se enfoca en la geoquímica y la mineralogía de material de desechos en el área minera Xichú (Mina Aurora), Guanajuato. Los depósitos minerales procesados consisten de pirita, calcopirita, galena, esfalerita, arsenopirita y algunos minerales de As y Ag. Los desechos minerales contienen cantidades considerables de As, Fe, Pb, Zn y Cu en diferentes fases minerales, principalmente óxidos de Fe, (oxi)hidróxidos de Fe, sulfosales y minerales de sulfuros. El potencial de liberación y movilidad de los elementos generan un problema a la población local. Las reacciones REDOX producen acidez con un pH alrededor de 2 en lixiviados con alto contenido de metales. La mineralogía secundaria incluye goethita, hematita, ferrihidrita, jarosita, yeso entre otras. La dinámica geoquímica es controlada por la temporada de lluvia (junio a septiembre) junto con las altas tasas de evaporación. Estos factores producen un drenaje ácido y lixiviación de metales. Las reacciones REDOX y de disolución-precipitación controlan la movilidad de los metales pesados dentro del ambiente. El contenido de arsénico y metales pesados es cerca de 37% de Fe, 62 gr/Kg de As, 2.4 gr/Kg de Cu, 13 gr/Kg de Zn y 17 gr/Kg de Pb. Los experimentos de extracción secuencial indican que la mayoría de As, Fe y Pb están enlazados a sulfuros; Zn, Cu y Cd en fases solubles. Actualmente algunos charcos altamente evaporados tienen bajo pH (entre 2 y 3) y altas concentraciones de As y metales. El software geochemist's Workbench (Módulo Act2) fue usado para modelar las condiciones REDOX para las reacciones de disolución-precipitación que controlan la liberación y movilidad de As y metales hacia el ambiente. Se considera que la mayoría de los elementos están envueltos en un ciclo de disolución-precipitación en los jales y que son liberados lentamente hacia el ambiente.

## I. INTRODUCCIÓN

### I.1 Problemática ambiental de la minería

Desde la antigüedad, el hombre ha aprovechado los recursos naturales de su entorno para satisfacer sus necesidades de subsistencia, siendo históricamente relevantes los recursos minerales. Debido al desarrollo de la minería y de la metalurgia, el hombre dispuso de materiales y sustancias que le permitieron el desarrollo tecnológico que aún en nuestros días, determina las condiciones de vida (Landner et al. 2005). Actualmente, la mayoría de las actividades económicas primarias y secundarias dependen, en parte o casi por completo, de la disponibilidad de metales, metaloides y otras sustancias que son obtenidas de los cerca de 150 diferentes tipos de minerales de mena que son explotados y procesados en las más de 20,000 operaciones minero-metalúrgicas que existen alrededor del mundo (UNEP, 2000). La tabla 1 resume algunas de las principales fuentes de numerosos metales.

Tabla 1. Fuentes minerales de metales y metaloides (Blowes, 2003)

Elemento químico	Fuente mineral	Uso
<b>Aluminio</b>	Gibbsita [Al(OH) <sub>3</sub> ], Böhmita [AlO(OH)], Bauxita [Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ]	Transporte, empaquetado
<b>Antimonio</b>	Estibinita [Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub> ]	Recubrimiento de baterías, químico retardante de fuego.
<b>Arsénico</b>	Arsenopirita [FeAsS], Oropimento [As <sub>2</sub> S <sub>3</sub> ], Rejalgar [AsS]	Preservante de madera, pesticidas, farmacéutica
<b>Berilio</b>	Berilo [Be <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> Si <sub>6</sub> O <sub>18</sub> ]	Aleaciones de Be-Cu (telecomunicaciones)
<b>Bismuto</b>	Bismutinita [Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub> ]	Farmacéutica
<b>Cadmio</b>	Esfalerita [ZnS]	Baterías
<b>Cobalto</b>	Laterita [Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·3H <sub>2</sub> O], Linnaeita [Co <sup>2+</sup> Co <sup>3+</sup> <sub>2</sub> S <sub>4</sub> ]	Aleaciones con hierro
<b>Cobre</b>	Calcopirita [CuFeS <sub>2</sub> ], Bornita [Cu <sub>5</sub> FeS <sub>4</sub> ]	Tuberías, farmacéuticos, pigmentos
<b>Cromo</b>	Cromita [FeCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ]	Acero inoxidable
<b>Elementos de tierras raras (REE siglas en inglés)</b>	Bastnäsita [(Ce,La)(CO <sub>3</sub> )F]	Catalizadores químicos, catalizadores de automóviles, vidrio, cerámica
<b>Estaño</b>	Casiterita [SnO <sub>2</sub> ]	Recubrimiento de latas y contenedores; soldaduras
<b>Estroncio</b>	Celestina [SrSO <sub>4</sub> ]	Televisión, cerámica
<b>Galio</b>	Esfalerita [ZnS]	Aparatos electrónicos
<b>Germanio</b>	Esfalerita [ZnS]	Sistemas de fibra óptica

Tabla 1. Continuación

<b>Niobio</b>	Pirocloro $[(Na,Ca)_2Nb_2O_6(OH,F)]$	Aleaciones con acero, superaleaciones
<b>Hierro</b>	Hematita $[FeO]$ , Goethita $[\alpha-FeOOH]$ , Magnetita $[Fe_3O_4]$	Hierro y acero
<b>Indio</b>	Esfalerita $[ZnS]$	Electrónicos, pantallas LCD
<b>Itrio</b>	Bastnäsite $[(Ce,La)(CO_3)F]$	Fósforo
<b>Magnesio</b>	Magnesita $[MgCO_3]$	Aleaciones de Al, fundiciones
<b>Manganeso</b>	Pirolusita $[MnO_2]$ , Braunita $[Mn_2O_3]$	Aleaciones con acero
<b>Mercurio</b>	Cinabrio $[HgS]$	Electrólisis, baterías
<b>Molibdeno</b>	Molibdenita $[MoS_2]$	Aleaciones con hierro y acero
<b>Plata</b>	Argentita $[Ag_2S]$ , Polibasita $[(Ag,Cu)_{16}Sb_2S_{11}]$	Joyería, componentes electrónicos
<b>Plomo</b>	Galena $[PbS]$	Baterías, tuberías, soldaduras
<b>Níquel</b>	Laterita, Pentlandita $[(Ni,Fe)_9S_8]$	Acero y aleaciones no ferrosos
<b>Renio</b>	Molibdenita $[MoS_2]$	Catalizadores, super-aleaciones
<b>Silicio</b>	Cuarzo $[SiO_2]$	Aditivo de acero
<b>Talio</b>	Producto de depósitos de sulfuros de Cu-Zn-Pb	Materiales semiconductores, electrónicos
<b>Tantalio</b>	Columbita $[(Fe,Mn)Nb_2O_6]$ , Tantalita $[(Fe,Mn,Mg)Ta_2O_6]$	Componentes eléctricos
<b>Titanio</b>	Ilmenita $[FeTiO_3]$	Pigmentos
<b>Torio</b>	Monzanita $[(REE,Th)PO_4]$	Aplicaciones refractarias
<b>Tungsteno</b>	Scheelita $[CaWO_4]$ , Ferberita $[Fe^{2+}WO_4]$	Carburo de tungsten
<b>Vanadio</b>	Magnetita $[Fe_3O_4]$	Aditivo para acero
<b>Zinc</b>	Esfalerita $[ZnS]$	Recubrimiento, medicina, tubería, pintura
<b>Zircón</b>	Zircon $[ZrSiO_4]$	Revestimientos refractarios y ladrillos

La industria minera moderna es de gran importancia en la economía mundial ya que ofrece una gran diversidad de productos minerales para uso industrial y doméstico (Tabla 2). Además del desarrollo tecnológico de la minería, el incremento de la población ha generado una mayor extracción de metales a través de la minería lo cual aumenta los volúmenes de residuos año con año. Gordon et al. (2006) indica que si el consumo de cobre, zinc y platino por las naciones desarrolladas y no desarrolladas se igualan, los suministros no se terminarán de forma inmediata pero en un futuro lejano no se podrá satisfacer la demanda. Estudios sobre la extracción de metales han llevado a generar el término “pico de metal” el cual significa que la humanidad ha extraído más metal a la fecha que lo que existiría en las minas actuales. Aunque el término es controversial éste destaca el hecho que muchas de las minas más ricas han sido o están siendo explotados lo que lleva a utilizar depósitos más grandes con un grado bajo de baja ley (Hudson, 1999). Tales depósitos por consecuencia generan mayores desechos mineros considerando que por cada tonelada de metal extraído son usualmente generados órdenes de magnitudes



más de residuos (Lottermoser 2010). Así el daño relacionado por desechos mineros en la superficie de la Tierra, el cual ya es extenso, llegará a ser exacerbado.

Tabla 2. Producción de minerales o productos en extracción minera (Lottermoser, 2010)

Mineral o producto	Producción 1999	Producción 2006	Mineral o producto	Producción 1999	Producción 2006
<b>Antimonio</b>	0.122 Mt	0.134 Mt	<b>Asbestos</b>	1.93 Mt	2.3 Mt
<b>Trióxido de As</b>	38800 t	52700 t	<b>Barita</b>	5.66 Mt	7.96 Mt
<b>Bauxita</b>	127 Mt	178 Mt	<b>Bentonita</b>	9.82 Mt	11.7 Mt
<b>Berilio</b>	6210 t	4480 t	<b>Minerales de Bo</b>	6.37 Mt	4.26 Mt
<b>Cromita</b>	14 Mt	19.7 Mt	<b>Cemento</b>	1610 t	2560 t
<b>Cobalto</b>	29000 t	67500 t	<b>Feldespatos</b>	8.98 Mt	15.4 Mt
<b>Cobre</b>	12.6 Mt	15.1 Mt	<b>Fluorita</b>	4.51 Mt	5.33 Mt
<b>Oro</b>	2540 t	2460 t	<b>Grafito</b>	0.685 Mt	1.029 Mt
<b>Óxido de Fe</b>	990 Mt	1800 Mt	<b>Yeso</b>	106 Mt	12.5 Mt
<b>Plomo</b>	3.02 Mt	3.47 Mt	<b>Caolinita</b>	41.6 Mt	37.5 Mt
<b>Manganeso</b>	20.4 Mt	33.4 Mt	<b>Limo</b>	141 Mt	271 Mt
<b>Mercurio</b>	1800 t	1480 t	<b>Magnesita</b>	10.7 Mt	14.1 Mt
<b>Molibdeno</b>	0.123 Mt	0.185 Mt	<b>Mica</b>	0.304 Mt	0.342 Mt
<b>Níquel</b>	1.12 Mt	1.58 Mt	<b>Turba</b>	27.2 Mt	25.8 Mt
<b>Niobio-tantalio</b>	57100 t	67700 t	<b>Perlita</b>	1.85 Mt	1.81 Mt
<b>Platino</b>	379 t	518 t	<b>Fosfatos</b>	141 Mt	142 Mt
<b>Plata</b>	17700 t	20200 t	<b>Potasa</b>	25.7 Mt	29.1 Mt
<b>Estaño</b>	0.198 Mt	0.304 Mt	<b>Sales</b>	209 Mt	251 Mt
<b>Titanio</b>	4.17 Mt	6.7 Mt	<b>Arenas y gravas</b>	107 Mt	117 Mt
<b>Tungsteno</b>	31000 t	90800 t	<b>Sulfuro</b>	57.1 Mt	65.7 Mt
<b>Vanadio</b>	42200 t	56300 t	<b>Vermiculita</b>	0.534 Mt	0.518 Mt
<b>Zinc</b>	8.04 Mt	10 Mt			

Los residuos mineros, conocidos como jales, son generados durante los procesos de recuperación de metales a partir de minerales metalíferos tras moler las rocas originales que los contienen y mezclar las partículas que se forman con agua y pequeñas cantidades de reactivos químicos que facilitan la liberación de los metales (Fig. 1). La mayoría de los jales se encuentran en forma de lodos o de una mezcla líquida de materiales finos. Actualmente éstos son almacenados en pilas o presas cerca de las minas (INE). En algunos casos las presas pueden estar expuestas a la atmósfera o estar cubiertas por agua y/o vegetación (Lottermoser, 2010).

El diseño de las presas de jales es de suma importancia para incrementar la seguridad y prevenir el riesgo de ruptura o liberación de los residuos contenidos en ellos. Generalmente existe un incremento en la explotación de metales en las minas, a lo que se establece inicialmente, lo que generaría un aumento en la cantidad de residuos. Las presas deben estar capacitadas para un continuo aumento de su capacidad de almacenamiento. La estabilidad de la presa se debe considerar en todo momento,

incluyendo la etapa de cierre o clausura. Ello implica considerar todo tipo de eventos como el llenado del depósito, la posible erosión de las paredes, los derrumbes asociados con los ductos que transportan los jales al depósito; todo lo cual hace necesario el empleo de métodos de evaluación y manejo de riesgos (INE).

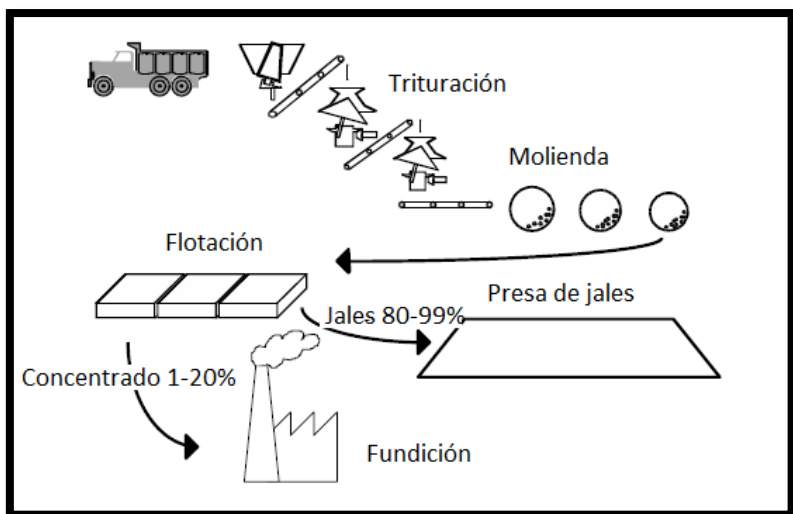


Figura 1. Diagrama de la trayectoria del mineral a través de trituración, molienda y flotación (Dold, 2005).

Jakubick et al. (2003) estimó que la producción de jales a mediados del siglo XX fue alrededor de 10,000 toneladas diarias mientras que para el 2000 dicha cantidad habría aumentado a cientos de miles de toneladas.

En los pasados 90 años, numerosos incidentes en las operaciones y estructuras de los jales mineros han sido documentado alrededor del mundo produciendo más de 100 incidentes (Lottermoser, 2010), en la tabla 3 se muestran los incidentes más importantes.

Tabla 3. Incidentes por jales minero alrededor del mundo (Lottermoser, 2010)

Fecha	Localización	Incidente	Cantidad de material liberado	Impacto ambiental y fatalidades
15-12-1928	Barahona, Chile	Licuefacción de estanques de jales de Cu durante un terremoto	4 Mt	54 decesos
1939	Cilfyndd Common, Gran Bretaña	Falla en estanques de residuos de carbón	0.18 Mt	Flujo dentro del río local
Diciembre 1939	Abercyan, Gran Bretaña	Licuefacción de estanques de residuos de carbón	Sin datos	Sin datos
1944	Aberfan, Gran Bretaña	Falla en estanques de residuos de carbón	Sin datos	Sin datos
25-02-1963	Louisville, EUA	Falla en los estanques de jales de carburos de calcio debido a la congelación de la pendiente aguas abajo	Sin datos	Sin datos
1965	El Cobre, Chile	Licuefacción de 11 tanques de jales durante un terremoto	2 Mt	250 decesos

Tabla 3. Continuación

<b>21-10-1966</b>	Aberfan, Gran Bretaña	Licuefacción de estanques de desechos de carbón después de intensas lluvias	Sin datos	144 decesos
<b>1966</b>	Texas	Flujo de jales por filtración excesiva	80,000-130,000 m <sup>3</sup> de yeso	Sin datos
<b>1967 y 1968</b>	Blackpool y Cholwich, Gran Bretaña	Falla en los tanques de jales de kaolinitas	Sin datos	Sin datos
<b>1970</b>	Mufulira, Zambia	Derrame de jales hacia trabajos subterráneos	1 Mt	89 mineros muertos
<b>1971</b>	Florida, EUA	Rotura de la presa de jales causados por la excesiva infiltración	0.8 Mt	Río Peace contaminado en una distancia de 120 km
<b>03-03-1985</b>	Veta de Agua, Chile	Falla en la pared de jales debido a licuefacción durante un terremoto	280,000 m <sup>3</sup>	Jales dentro de flujo por 5 km
<b>03-03-1985</b>	Cerro Negro, Chile	Falla en la pared de jales debido a licuefacción durante un terremoto	500,000 m <sup>3</sup>	Jales dentro de flujo por 8 km
<b>19-07-1985</b>	Stava, Italia	Falla en los estanque de jales de fluorita	200,000 m <sup>3</sup>	269 decesos, 2 poblaciones sepultadas
<b>1986</b>	Huangmeishan, China	Rotura en la pared de la presa	Sin datos	19 decesos
<b>Mayo de 1986</b>	Itabirito, Brasil	Rotura en la pared de la presa	100,000 m <sup>3</sup>	Jales dentro de flujo por 12 km
<b>19-01-1988</b>	Grays Creek, EUA	Falla en el estanque de jales	250,000 m <sup>3</sup>	?
<b>30-04-1988</b>	Jinduicheng, China	Rotura de la pared de estanque	700,000 m <sup>3</sup>	20 decesos
<b>1989</b>	Ok Tedi, Papúa Nueva Guinea	Colapso de un pila de desechos de roca y jales	170 Mt desperdicio de roca y 4 Mt de jales	Flujo dentro del río local
<b>Enero de 1992</b>	Luzon, Filipinas	Colapso de estanque de jales	80 Mt	Sin datos
<b>1993</b>	Marsa, Perú	Falla en estanque de jales por desbordamiento	Sin datos	6 decesos
<b>14-02-1994</b>	Olympic Dam, Australia	Filtración de jales de uranio al acuífero	5 millones de m <sup>3</sup>	Sin datos
<b>22-02-1994</b>	Merriespruit, Sudáfrica	Rotura de la pared de un estanque después de una tormenta	600,000 m <sup>3</sup>	17 decesos, severos daños a localidad
<b>19-08-1995</b>	Omai, Guyana	Falla en estanque de jales	4.2 millones de m <sup>3</sup> de jales con cianuro	80 km de río local declarado como zona de desastre ambiental
<b>02-12-1995</b>	Suriago del Norte, Filipinas	Falla en estanque después de un terremoto	50, 000 m <sup>3</sup>	12 decesos, contaminación costera
<b>25-04-1998</b>	Aznalcóllar, España	Falla en balsa de residuos	8 hm <sup>3</sup> de lodos y aguas ácidas	62 km del río Guadamar contaminado
<b>30-01-2000</b>	Baia Mare, Rumania	Fallas en la planta de operaciones y falla en el dique	100,000 m <sup>3</sup> de aguas residuales con cianuro	30 a 40 km de contaminación de ríos Tisza
<b>11-10-2000</b>	Ines, EUA	Falla de estanque de jales	950,000 m <sup>3</sup> de lodos de carbón dentro de corrientes locales	Contaminación de 120 km de río
<b>18-10-2000</b>	Nandan, China	Falla de estanque de jales	Sin datos	Al menos 15 decesos, 100 desaparecidos y más de 100 casas destruidas
<b>22-06-2001</b>	Sebastiao das Aguas Claras, Brasil	Falla de estanque de jales	Sin datos	Al menos 2 decesos

Tabla 3. Continuación

<b>27-08-2002</b>	San Marcelino, Filipinas	Falla de estanque de jales	Sin datos	Poblados inundados con desechos, contaminación de lagos y ríos
<b>03-10-2004</b>	Cerro Negro, Chile	Falla de estanque de jales	50,000 t de jales	Contaminación de ríos
<b>20-03-2004</b>	Malvesi, Francia	Falla de estanque de jales después de una tormenta	30,000 m <sup>3</sup> de líquidos y lodos	Contaminación de nitratos en arroyos
<b>30-11-2004</b>	Pinchi lake, Canadá	Colapso de estanque de jales	6000-8000 m <sup>3</sup> de roca y aguas residuales	Contaminación en un lago
<b>30-04-2006</b>	Miliang, China	Falla de estanque de jales	Sin datos	17 personas desaparecidas, cianuro liberado a ríos
<b>06-11-2006</b>	Nchanga, Zambia	Falla de estanque de jales	Sin datos	Contaminación de ríos
<b>08-09-2008</b>	Taoshi, China	Colapso de un reservorio de desechos	Sin datos	Al menos 254 decesos, destrucción de construcciones
<b>22-12-2008</b>	Kingston, EUA	Falla en la pared de estanque de jales	4.1 millones de m <sup>3</sup> de lodos	160 Ha sepultadas por lodos
<b>14-05-2009</b>	Huayuan Country, China	Falla de estanque de jales	Sin datos	3 decesos
<b>29-08-2009</b>	Karamken, Rusia	Falla de estanque de jales	Sin datos	1 deceso, destrucción de casas

Los países industrializados (EUA, Japón, parte de Europa) formularon leyes ambientales desde 1970's para controlar el manejo de las actividades mineras y el uso de sus residuos. Este proceso empezó recientemente (1990) para los países en desarrollo (Chile, Perú, Corea, Nigeria, etc.); (Jänicke et al. 1997).

### I.1.2 Problemática en México

La industrialización en México a través de la minería ha generado a lo largo del tiempo (desde principios del siglo XVI) una cantidad incuantificable de residuos y como consecuencia una problemática ambiental ya que no existía ninguna regulación y control ambiental sobre éstos.

Debido a la antigüedad de las actividades mineras, la cantidad de toneladas de jales en el país es incierto así como las condiciones que presenta y sus potenciales efectos ambientales los cuales se complican en razón de las características geológicas del sitio y la historia de extracción.

La producción minera en México se concentra en trece estados: Chihuahua, Jalisco, Michoacán, Zacatecas, Durango, Sonora, Coahuila, Guanajuato, San Luis Potosí, Hidalgo, Sinaloa, Colima y Guerrero (Carrillo, 2005). Como resultado de estas actividades mineras se estiman cientos de millones de toneladas de residuos de minas dispersos en los sitios aledaños al lugar de extracción del metal de importancia. No se conoce cuáles son las condiciones o propiedades que presentan estos sitios y tampoco el potencial de afectación que generan a los recursos naturales y el ambiente (Ramos, 2006). Los residuos mineros pueden llegar a contener elevadas concentraciones de elementos potencialmente tóxicos (EPT) como Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cobre (Cu), Cromo (Cr),

Hierro (Fe), Selenio (Se), Plomo (Pb), Zinc (Zn), etc. Al no existir medidas adecuadas de control y mitigación sobre los residuos éstos se pueden dispersar tanto por la acción del viento como por el impacto de las aguas de lluvia, y depositarse en suelos y ríos.

Se han reportado en nuestro país diferentes casos de contaminación de suelo como consecuencia de actividad mineras y metalúrgicas (Gutiérrez et al. 2007; Ogura et al. 2003; Castro et al. 2001; Razo et al. 2004). Existen también estudios de agua impactadas por metales pesados debido a los procesos de minería (Azcue et al. 1994; Cruz, 2013; Carrillo et al. 2000).

En el caso del distrito minero de Xichú (Mina Aurora), Guanajuato la explotación de minerales se registra a partir del siglo XVI, dejando alrededor de un millón de toneladas de materiales de desechos minerales dispersos dentro de la reserva natural Sierra Gorda donde existen cientos de pequeñas comunidades circundantes, con actividades de agricultura, que están expuestas a una posible contaminación de metales pesados. Hasta ahora no se ha desarrollado una valoración de geoquímica ambiental en el área de estudio.

En 2004 fue aprobada por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) la NOM-141-SEMARNAT 2003 que establece el procedimiento para caracterizar jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y post-operación de presa de jales la cual aplica para proyectos mineros a partir de la fecha de su publicación (DOF, 2004). Esto como respuesta a los problemas ambientales generados por actividades mineras previas. Por lo anterior, se deben realizar pruebas que permitan identificar el potencial generación de drenaje ácido de roca (DAR) y las concentraciones de EPT solubles, bajos las propiedades naturales de la superficie donde se encuentren (Gutiérrez et al. 2007).

Aun cuando existen formas diferentes para poder reciclar o reusar el material generado en los sitios mineros, la gran mayoría de éstos son simplemente almacenados (Lottermoser, 2011). Esto genera problemas de estabilidad física, dispersión de material, reactividad química de los residuos y la liberación de elementos potencialmente tóxicos (EPT) hacia aguas naturales, el mayor daño ambiental.

Es importante conocer el carácter geoquímico y mineralógico de los desechos sólidos de mina debido a que éstos determinan la naturaleza del drenaje ácido; la cantidad de contaminación; y el riesgo para la salud humana y los ecosistemas.

### **I.3 Geoquímica y mineralogía de jales mineros**

El drenaje ácido de roca (DAR) es el resultado de la interacción de la hidrósfera con los jales, a través del intemperismo sobre éstos, siendo ácido y con metales disueltos debido a la combinación de varios factores, entre ellos y uno de los más importantes la composición de los residuos. Los jales mineros generalmente están compuestos de sulfuros de hierro como piritita y pirrotita.

La oxidación de algunos sulfuros metálicos genera acidez, en contacto con agua y O<sub>2</sub>. Todas las reacciones de oxidación de sulfuros metálicos generan la liberación de elementos como Cd, Cu, Fe, Pb y Zn. La tabla 4 muestra algunas reacciones de oxidación de minerales de sulfuros metálicos como arsenopirita, calcopirita, pirita, etc. generan acidez a diferencia de otro como por ejemplo galena y esfalerita.

Tabla 4. Reacciones de oxidación de algunos minerales de sulfuros (Dold, 2005)

Minerales	Reacción de oxidación	Moles de H <sup>+</sup> liberados
Pirita*	$FeS_2 + \frac{7}{2}O_2 + H_2O \rightarrow Fe^{2+} + 2SO_4^{-2} + 2H^+$	2
Arsenopirita	$4FeAsS + 13O_2 + 6H_2O \rightarrow 4Fe^{2+} + 4SO_4^{-2} + 4H_2AsO_4^- + 4H^+$	4
	$FeAsS + \frac{7}{2}O_2 + 6H_2O \rightarrow Fe(OH)_3 + SO_4^{-2} + H_2AsO_4^- + H^+$	1
Calcopirita	$2CuFeS_2 + 4O_2 \rightarrow 2Cu^{2+} + Fe^{2+} + SO_4^{-2}$	-
	$2CuFeS_2 + \frac{17}{2}O_2 + H_2O \rightarrow 2Cu^{2+} + 2Fe(OH)_3 + 4SO_4^{-2} + 4H^+$	4
Galena	$PbS + 2O_2 \rightarrow Pb^{2+} + SO_4^{-2}$	-
Esfalerita	$ZnS + 2O_2 \rightarrow Zn^{2+} + SO_4^{-2}$	-

\* Una de las reacciones de la pirita encontrados en la literatura, inclusive a través de actividad bacteriana

Además también existen reacciones de neutralización y consumo de acidez. Los principales minerales que tienden a consumir acidez son los carbonatos y silicatos (Dold, 2005). La tabla 5 muestra algunas reacciones de minerales que neutralizan la formación de drenaje ácido.

Tabla 5. Reacciones de neutralización de algunos minerales (Dold, 2005)

Minerales	Reacción de neutralización
Calcita	$CaCO_3 + H^+ \leftrightarrow Ca^{2+} + HCO_3^-$
Silicatos	$MeAlSiO_4 + H^+ + 3H_2O \rightarrow Me^{x+} + Al^{3+} + H_4SiO_4 + 3OH^-$
	$2MeAlSiO_4 + 2H^+ + H_2O \rightarrow Me^{x+} + Al_2Si_2O_5(OH)_4$

\* Me = Ca, Na, K, Mg, Mn o Fe

Las aguas meteóricas que generan la oxidación de jales son modificadas en el proceso y se enriquecen en azufre y metales. A la salida del jal dicha solución se descarga e interactúa con los suelos o rocas encajonantes y/o se descargan a sistemas de flujos superficiales o subterráneos de agua. Las reacciones geoquímicas que se producen con los minerales de ganga o del encajonante del jal, carbonatos y/o silicatos, resultan en un incremento progresivo del pH de agua de poro y aumentando la atenuación de los metales disueltos. Sin embargo, elementos como el arsénico y selenio pueden estar presente en grandes concentraciones en aguas con alto pH.

El potencial de contaminación de los jales mineros es influenciado por muchos factores incluyendo la mineralogía primaria, geometría de las presas de jales, medidas de

remediación y condiciones físico-químicas prevalecientes. La formación de capas cementadas o hardpan puede contribuir a los procesos naturales de atenuación dentro de las presas de jales (Blowes et al. 1991; Graupner et al. 2007; Moncur et al. 2005) ya que contienen minerales secundarios de fierro que pueden adsorber y co-precipitar elementos trazas. Sin embargo, esas acumulaciones pueden ser transitorias, llevando subsecuentemente a la liberación de elementos potencialmente tóxicos. Jales que contengan pirrotita ( $Fe_{1-x}S$ ) tienden a formar capas cementadas en comparación a los que sean ricos en pirita ( $FeS_2$ ) debido a la mayor reactividad del primero (Alakangas et al. 2006).

Bajo ciertas condiciones climáticas ambientales puede ocurrir la dispersión de contaminantes por medios físicos (erosión, transporte eólico y pluvial), por su alteración (reacción y neoformación) y movilidad química (disolución y transporte en medio acuoso) que dan origen a una mineralogía secundaria (precipitación de fases minerales secundarias como óxidos, oxihidróxidos, sulfatos e hidroxisulfatos) (Nordstrom et al. 1999).

La clasificación propuesta por Jambor (1994) es usada para la descripción de la mineralogía de jales. El término “primario” es usado para designar la mineralogía completa del depósito aun siendo finamente triturado, molido y depositado en la pila de jales pero que se mantienen sin alteración. Minerales “secundarios” se forman dentro de los jales mineros como procesos de intemperismo químico. Minerales “terciarios” son típicamente precipitaciones de sales debido a la evaporación de agua de poro en el momento de extraer material de los jales por diversos propósitos, por ejemplo un plan de muestreo.

Los elementos liberados por la oxidación y disolución de los minerales primarios del depósito pueden ser incorporados a los minerales secundarios por precipitación, sorción e intercambio iónico o pueden ser removidos de las presas de jales como solución y pueden así contaminar las aguas superficiales o subterráneas (Boulet, 1997).

Una de las claves para el entendimiento de la reacción mineral-agua que pueda generar la problemática ambiental es la identificación de los minerales asociados a desechos de mina (Tabla 6). Tamaño de partícula, porosidad, área superficial, grado de cristalinidad y concentración de elementos trazas son también importantes ya que éstas características pueden controlar a largo plazo la estabilidad de los minerales y sus roles en la liberación de elementos potencialmente tóxicos a aguas y organismos. Técnicas convencionales, particularmente microscopía petrográficas, análisis de microsonda electrónica, microscopía de imagen y análisis electrónica de barrido, pueden ser útiles en la identificación de minerales y características de texturas (Jambor et al. 1998; Hudson et al. 1999). Raramente un solo método puede caracterizar a fondo los minerales en desechos de mina, especialmente cuando se esperan múltiples sistemas dentro de los jales mineros, por lo que muchos investigadores combinan técnicas como las anteriores para caracterizarlos (Hudson et al. 2005; Fawcett et al. 2011).

Tabla 6. Ejemplos de minerales secundarios post-minería en desechos de mina de sulfuros (Alpers et al. 1994; Nordstrom et al. 1999; Jambor et al. 2000a,b; Bigham et al. 2000)

Sulfatos		Jarosita	$KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$
<b>Sulfatos metálicos hidratados simples con cationes metálicos divalentes</b>		Natrojarosita	$NaFe_3(SO_4)_2(OH)_6$
<b>Mineral</b>	<b>Fórmula</b>	Jarosita hidronio	$(H_3O)Fe_3(SO_4)_2(OH)_6$
Poitevinita	$CuSO_4 \cdot H_2O$	Plumbojarosita	$PbFe_6(SO_4)_4(OH)_{12}$
<b>Grupo de Melantarita</b>		Alunita	$KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$
Melantarita	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	Jurbanita	$Al(SO_4)(OH) \cdot 5H_2O$
Boothita	$CuSO_4 \cdot 7H_2O$	Schwermannita	$Fe_8O_8(SO_4)(OH)_6$
Bieberita	$CoSO_4 \cdot 7H_2O$	Aluminita	$Al_2(SO_4)(OH)_4 \cdot 7H_2O$
Mallardita	$MnSO_4 \cdot 7H_2O$	Basaluminita	$Al_4(SO_4)(OH)_{10} \cdot 4H_2O$
<b>Grupo de Epsomita</b>		<b>Otros sulfatos e hidrosulfatos</b>	
Epsomita	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	Anglesita	$PbSO_4$
Morenosita	$NiSO_4 \cdot 7H_2O$	Barita	$BaSO_4$
Goslarita	$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	Estroncianita	$SrSO_4$
<b>Grupo de Hexahidrita</b>		Anhidrita	$CaSO_4$
Hexahidrita	$MgSO_4 \cdot 6H_2O$	Bassanita	$CaSO_4 \cdot 0.5H_2O$
Ferohexahidrita	$FeSO_4 \cdot 6H_2O$	Yeso	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
Chvalitecita	$MnSO_4 \cdot 6H_2O$	Thernardita	$Na_2SO_4$
Moorhouseita	$CoSO_4 \cdot 6H_2O$	Aphthitalita	$NaK_3(SO_4)_2$
Bianchita	$ZnSO_4 \cdot 6H_2O$	Voltaita	$K_2Fe_8Al(SO_4)_{12} \cdot 18H_2O$
<b>Grupo de Calcantita</b>		Tamarugita	$NaAl(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$
Calcantita	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	Konyaita	$Na_2Mg(SO_4)_2 \cdot 5H_2O$
Pentahidrita	$MgSO_4 \cdot 5H_2O$	Blödita	$Na_2Mg(SO_4)_2 \cdot 4H_2O$
Siderotil	$FeSO_4 \cdot 5H_2O$	Löwita	$Na_{12}Mg_7(SO_4)_{13} \cdot 15H_2O$
<b>Grupo Rozenita</b>		Eugsterita	$Na_4Ca(SO_4)_3 \cdot 2H_2O$
Rozenita	$FeSO_4 \cdot 4H_2O$	Syngenita	$K_2Ca(SO_4)_2 \cdot H_2O$
Starkeyta	$MgSO_4 \cdot 4H_2O$	Antlerita	$Cu_3(SO_4)(OH)_4$
Boyleita	$ZnSO_4 \cdot 4H_2O$	Brochantita	$Cu_4(SO_4)(OH)_6 \cdot 2H_2O$
<b>Grupo de Kieserita</b>		<b>Óxidos, hidróxidos y arsenatos</b>	
Kieserita	$MgSO_4 \cdot H_2O$	<b>Minerales de Fe</b>	
Szomolnokita	$FeSO_4 \cdot H_2O$	Goethita	$\alpha\text{-FeOOH}$
Gunningita	$ZnSO_4 \cdot H_2O$	Lepidocrocita	$\gamma\text{-FeOOH}$
<b>Sulfatos metálicos hidratados simples con cationes metálicos trivalentes</b>		Ferroxihita	$\delta\text{-FeOOH}$
Kornelita	$Fe_2(SO_4)_3 \cdot 7H_2O$	Akaganeita	$\beta\text{-FeOOH}$
Coquimbita	$Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$	Ferrihidrita	$Fe_5HO_8 \cdot 4H_2O$
Alunogeno	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 17H_2O$	<b>Minerales de Al</b>	
Rhomboclasa	$HFe(SO_4)_2 \cdot 4H_2O$	Gibbsita	$\gamma\text{-AlO(OH)}$
Butlerita	$FeSO_4(OH) \cdot 2H_2O$	Diaspora	$\alpha\text{-AlO(OH)}$
<b>Sulfatos metálicos hidratados divalentes-trivalentes</b>		<b>Minerales de Cu</b>	
Römerita	$Fe_3(SO_4)_4 \cdot 14H_2O$	Tenorita	$CuO$
<b>Grupo de Halotrichita</b>		Cuprita	$Cu_2O$
Halotrichita	$FeAl_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$	<b>Minerales de As</b>	
Pickeringita	$MgAl_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$	Escorodita	$FeAsO_4 \cdot 2H_2O$
Apjohnita	$MnAl_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$	Mansfeldita	$Al(AsO_4) \cdot 2H_2O$
Dietrichita	$(Zn, Fe, Mn)Al_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$	Rauenthalita	$Ca_3(AsO_4)_2 \cdot 10H_2O$
Bilinita	$Fe_3(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$	Arsenolita	$As_2O_3$
<b>Grupo de Copiapita</b>		Claudetita	$As_2O_3$
Copiapita	$Fe_5(SO_4)_6(OH)_2 \cdot 20H_2O$	<b>Minerales de Sb</b>	
Ferricopiapita	$Fe_5(SO_4)_6O(OH)_2 \cdot 20H_2O$	Cervantita	$Sb_2O_4$
<b>Hidrosulfatos de Fe y Al</b>		Valentinita	$Sb_2O_3$
Senarmontita	$Sb_2O_3$		



Tabla 6. Continuación

<b>*Carbonatos</b>		Hidrozinca	$Zn_5(CO_3)_2(OH)_6$
Calcita	$CaCO_3$	Auricalcita	$(Zn,Cu)(CO_3)_2(OH)_6$
Magnesita	$MgCO_3$	<b>Silicatos</b>	
Siderita	$FeCO_3$	Nacrita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$
Ankerita	$Ca(Fe,Mg)(CO_3)_2$	Kaolinita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$
Dolomita	$CaMg(CO_3)_2$	Crisocola	$CuSiO_3 \cdot 2H_2O$
Smithsonita	$ZnCO_3$	Planqueita	$Cu_8Si_8O_{22} \cdot 2H_2O$
Otavita	$CdCO_3$	Dioptasa	$Cu_6Si_6O_{18} \cdot 6H_2O$
Cerusita	$PbCO_3$	<b>Elementos nativo</b>	
Malaquita	$Cu_2(CO_3)_2(OH)_2$	Sulfuro nativo	S
Azurita	$Cu_3(CO_3)_2(OH)_2$	Cobre nativo	Cu

\* Por su fácil disolución y precipitación puede considerarse como minerales primarios o secundarios

#### I.4 Antecedentes de caracterización de jales

La geoquímica ambiental es relativamente nueva dentro de las ciencias naturales. Se hacen análisis geológicos, mineralógicos y de procesos químicos que introducen y controlan las concentraciones, reacciones y movilidad de elementos potencialmente tóxicos al ambiente (Plant et al., 2001; Hudson et al., 2011). La principal problemática ambiental asociada a los residuos mineros es la posible producción de drenaje ácido de mina por lo que se ha sido objeto de estudio para explicar su la relación con el transporte de metales pesados (principalmente As, Cu, Pb, Zn y Cd) y las altas concentraciones de éstos en agua superficial, agua subterránea y suelos (Boults et al. 1994; Sracek et al. 2004; Blowes et al. 2003; Alpers et al., 1994; Bowell, 1994; King, 1995; Haneberg et al., 1993; Fyfe, 1998; Larocque et al. 1998; Rosner, 1998).

Otros trabajos se han enfocado en la mineralogía y la caracterización química de los jales mineros (Ávila et al. 2008; Ekkose et al. 2004; Pirrie et al. 1997). También existen estudios sobre el impacto de los jales minero al ambiente (Bell and Donnelly 2006; Ripley et al. 1996) y el amplio rango de problemas sociales pertenecientes a éstos (Spitz et al. 2009). También hay investigaciones que se orientan a la caracterización de las superficies minerales en ambiente natural y sus efectos sobre la disolución de metales pesados (Carrillo et al. 1998; Duddley et al., 1988; Koretsky, 2000; Wuolo, 1986; Putnis et al. 2013).

Aun cuando en nuestro país la regulación de los jales mineros es reciente, se han desarrollado trabajos relacionados a la problemática ambiental generado por los residuos mineros. En México se han realizado estudios sobre el impacto de los jales mineros al ambiente considerando los factores geológicos, geoquímicos y mineralógicos dentro de ellos (Tovar et al. 2009; Carrillo et al. 2003; Moreno et al. 2009; Gutiérrez et al. 2007). La zona minera de Xichú, Guanajuato por ser un área antigua para la explotación de recursos minerales se han realizado estudios de enfoques geológicos y mineros (COREMI, 1978; COREMI, 1979; COREMI, 1991; COREMI 2003; SE, 2011). A la fecha no existen estudios de carácter ambiental.

## **II. OBJETIVO Y JUSTIFICACIÓN**

### **II.1 Objetivo general**

Evaluar el potencial de afectación ambiental de los jales en la zona del Valle del río Xichú.

### **II.2 Objetivos particulares**

Llevar a cabo un muestro ambiental de jales, sedimentos y suelos representativos de la zona.

Realizar la caracterización de la mineralogía primaria y secundaria asociada a los procesos de alteración y/o movilización de los metales.

Determinar las concentraciones de los metales (Cd, Cu, Fe, Pb y Zn) y metaloide (As) en jales, sedimentos y suelos.

Usar un modelo de extracción selectiva para el entendimiento de la movilización y retención de metales en jales mineros.

Determinar los procesos geoquímicos (precipitación y transporte) de los metales y metaloides en los jales mineros.

### **II.3 Justificación**

En el distrito minero de Xichú (Mina Aurora), Guanajuato la explotación de minerales se registra a partir del siglo XVIII (COREMI, 1978). Se estimó alrededor de un millón de toneladas de materiales de desechos minerales en las 4 presas de jales en la zona considerando la geometría de éstos a partir de su longitud, ancho, profundidad y pendiente. Estos materiales están dispersos a lo largo del valle del río Xichú dentro de la reserva natural de la Sierra Gorda. Existen comunidades que dependen del aprovechamiento del río Xichú, por ejemplo para el riego de cultivos (Fig. 2), por lo cual están son directamente expuestas a una posible contaminación derivadas del lixiviado de los jales.

La falta de conocimiento en las condiciones de los residuos y las posibles afectaciones potenciales al ambiente y a la población hace necesario realizar un diagnóstico y evaluación geoquímica ambiental en la región.



Figura 2. Suelos utilizados para cultivos impactados por los jales de la mina Aurora, Guanajuato

### III. GENERALIDADES

#### III.1 Localización del área de estudio

El área de estudio se localiza a 128 km. al noreste de la capital del Estado de Guanajuato, el municipio colinda con los estados San Luis Potosí y Querétaro, al norte y este respectivamente.

El municipio de Xichú se ubica entre las coordenadas 389870 a 406183 de latitud norte y 2380574 a 2343476 longitud oeste. Se divide en 56 comunidades, entre las cuales destacan las comunidades de Xichú, Paso de Guillermo, Las palomas, Los palos, Mesón de Santa Rosa, El milagro, El guamuchil, Casitas y El aguacate (EMDM).

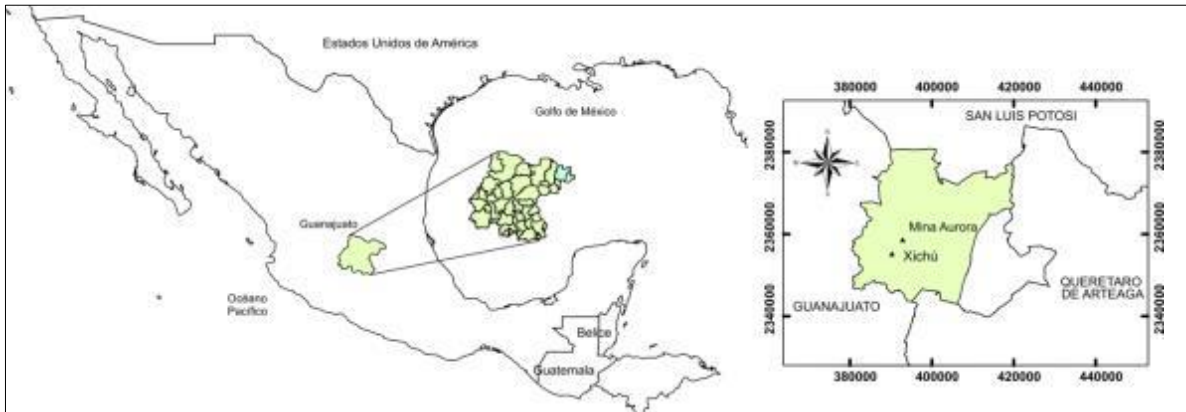


Figura 3. Mapa de localización de zona de estudio, Xichú, Guanajuato, México

#### III.2 Marco geológico

El municipio Xichú, está localizado en la provincia fisiográfica de la "Sierra Madre Oriental". Eguiluz et al. (2000) ubica a la Sierra Madre Oriental a partir de la Faja Volcánica Transmexicana y la proyecta en forma continua hacia el NW, internándose en la parte central de Coahuila y Chihuahua hasta la frontera norte de México, se extiende cerca de 800 km de longitud y de 80 a 100 km de amplitud.

La zona se caracteriza por una topografía abrupta, representada por sierras orientadas según un patrón de rumbo NW-SE y profundos valles con desniveles inferiores a 1000 m. La altura promedio sobre el nivel del mar del municipio de Xichú es de 1368 m. Sus mayores elevaciones son el Cerro del Guaricho de 2,300 m y los Cerros de la Yesca; Grande y Otates con 2,100 m. (COREMI, 2003).

El municipio de Xichú está situado en la cuenca hidrológica del río Pánuco y en su mayor parte se localiza dentro de las subcuentas del río Tamuín y río Santa María. La otra cuenca que cubre parte del municipio es la cuenca del río Moctezuma, donde se tiene la subcuenca Extoraz (CEAG, 2000). Por las características topográficas del municipio

discurren una gran cantidad de arroyos intermitentes de régimen torrencial. Los principales arroyos y ríos (CEAG, 2000) son Los principales ríos son Santa María, Xichú, La Salitrera, Catarina del Mezquital y Los Pablos.

### III.2.1 Geología Regional

Está representado por rocas sedimentarias depositadas durante el Cretácico Inferior (Formación El Doctor) y Superior (Formación Soyatal) en un ambiente marino (CEAG, 2000). A fines del Cretácico Inferior y principios del Terciario se inicia una etapa de tectonismo activo en el que se retiran los mares (regresión) y se generan grandes esfuerzos compresionales que pliegan y deforman a las rocas calcáreas (Orogenia Laramide); (CEAG, 2000). Las estructuras resultantes conforman una serie de anticlinales y sinclinales de flancos amplios, con echados suaves y ejes con una orientación predominante NW – SE, a su vez estas rocas fueron alteradas e intrusionadas por rocas ígneas, esto atestigua los eventos tectónicos durante el Terciario. Demant (1978), considera que este vulcanismo constituye la prolongación meridional del sistema volcánico Sierra Madre Occidental limitando la actividad del Eje Volcánico Transmexicano al Plio-Cuaternario.

Las rocas más antiguas (Cretácico) están representadas por bancos de calizas masivas y calizas con pedernal, correlacionable con diferentes facies de la caliza El Doctor (Albiaco-Cenomaniano), sobreyaciendo a estas facies se tiene una secuencia calcareoarcillosa correlacionable con la Formación Soyatal (Turoniano-Conaciano), posteriormente se tienen afectando todo el paquete sedimentario, cuerpos intrusivos de composición granítica principalmente, finalmente se tienen en algunas partes altas de la sierra, derrames volcánicos terciarios de andesita, riolitas y tobas riolíticas (COREMI, 1991)(Fig. 4).

## III.3 Geología Local

Las rocas que conforman la columna estratigráfica en el área de estudio inician desde el Cretácico superior hasta el Terciario. Se presenta la descripción de cada una de ellas.

### III.3.1 Formación El Doctor (Kat Cz)

Se describe en 4 facies que aunque consisten principalmente en calizas, puede ser cartografiado separadamente. Estas facies se denominan: La Negra, San Joaquín, Socavón y Cerro Ladrón (Wilson et al. 1955); (Fig. 5).

Dentro del área La aurora se ha distinguido principalmente la facie Cerro ladrón que consiste de calizas de estratificación gruesa y grano fino, de color que varía de gris claro a gris oscuro, comúnmente duras, en las cercanías de contacto con cuerpos intrusivos presentan muy silicificados y/o incipientemente marmorizados (COREMI, 1991).

Estas rocas son las más antiguas aflorantes en el área de estudio y se presentan como las calizas puras (“micritas”) de estratos medios a gruesos de 1 a 3 m., con estilolitas con una

potencia que se estima superior a los 1,200 m. ya que en el Cerro del oro hay un afloramiento de más de 1,000 m., de espesor y no aflora su base. (COREMI, 1981).

Al NW de Xichú, hacia el Cerro de la Yesca, la Formación El Doctor suprayace es discordancia angular a la Formación Trancas del Jurásico Superior y al N de Xichú en el anticlinal del Cerro del Oro se encuentra subyaciendo en forma concordante a la Formación Soyatal.

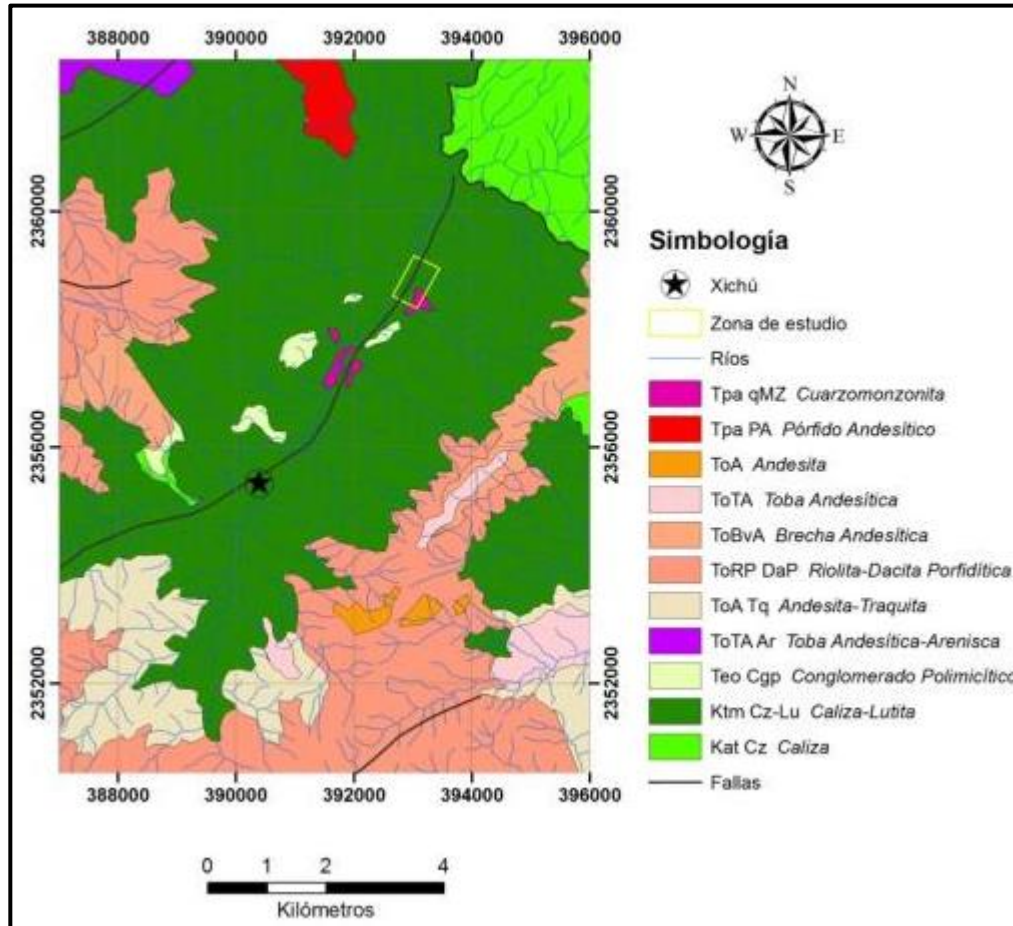


Figura. 4. Geología regional, carta geológico-minero Xichú F14-C36 (Modificada del SGM)

### III.3.2 Formación Soyatal (Ktm Cz-Lu)

White (1948) quien menciona que esta unidad “consiste en alternancia de caliza y lutita calcárea delgada, con aumento de las lutitas laminares hacia arriba; una gruesa sucesión de capas superiores consiste predominantemente en lutita y capas intercaladas de arenisca”.

En el área esta formación descansa concordantemente sobre las calizas El Doctor, está constituida hacia su parte inferior por estratos bien definidos de 10 a 30 cm de espesor de caliza gris oscura de grano fino, separados por intercalaciones de lutitas que comúnmente presentan tonos rojizos debido a intemperismo, la parte superior consiste

de calizas en capas de 20 a 40 cm de espesor en alternancia rítmica con lutitas calcáreas y limolitas que intemperizan en color ocre (COREMI, 1991).



Figura 5. Afloramiento de la Formación El Doctor en las orillas del río Xichú

### III.3.3 Conglomerado Polimíctico (Teo Cgp)

Se localiza en la parte central del área de estudio. Suprayace en discordancia angular a las Formaciones Soyatal e infrayace a las rocas volcánicas. Está constituido principalmente por fragmentos de caliza y del intrusivo que varían de 1 a 50 cm de diámetro. Están cementados con calcita, limonita y arcillas. En la parte central está silicificado y oxidado lo que le da una coloración roja. Su espesor es aproximadamente de 40 m (CORESMI 1978).

### III.3.4 Cuerpos ígneos (Tpa qMZ)

Existen cuatro afloramientos de cuerpos ígneos en el área. Todos los cuerpos tienen la misma composición cuarzo-monzonítica. El principal y con una mayor extensión localizado en las cercanías de la mina Aurora, teniendo un rumbo general NE-SW, de una dimensión aproximada de 4 km de largo por 400 m de ancho aproximadamente y tiene la estructura de un dique (COREMI, 1978). Su análisis petrográfico dio como resultado: color gris claro, textura holocristalina porfídica de grano medio, como minerales tiene cuarzo, microclina, andesina y oligoclasa, como accesorios ferromagnesianos alterados y

como secundarios: sericita, hematita y limonita. Presenta una coloración intensa debido a la oxidación.

Sobre el río Xichú hacia el norte del anterior afloramiento existe otro cuerpo de aproximadamente 500 m de largo por 200 m de ancho. En el cuerpo anterior no se observa ninguna obra minera o estructural que pudiera contener sulfuros (COREMI, 1978). En proximidad al arroyo de Mogotes, hacia el NE a 3 km en línea recta de Xichú, se localiza un afloramiento de 500 m<sup>2</sup>. Y el último y más pequeño de 100 m<sup>2</sup> localizado en el Arroyo de Don Pedro a 1 km hacia el norte de Xichú.

Además afloran dos clases de diques. Los primeros son andesíticos de textura holocristalina porfídica, con fenocristales de feldespato alterados, escasos cristales de cuarzo muy pequeños, biotita y magnetita en una matriz afanítica principalmente arcillosa. Están sericitizados, cloritizado y contienen hematita. Fueron emplazados en una zona de debilidad que continuo activa después de su intrusión produciendo fallas normales. Están sumamente fracturados, tienen espejos de falla y salbanda en sus respaldos (COREMI, 1978).

El otro tipo de diques está asociado con la mineralización en el alto o en el bajo son porfídicos que varían de cuarzomonzoníticos a granodioríticos de textura holocristalina y cuya mineralogía es la siguiente: cuarzo, microclina, andesina y oligoclasa. Están intensamente sericitizados y en menor proporción cloritizados. Presentan pirita, galena, esfalerita y contienen hematita, calcantita y yeso (COREMI, 1978).

### III.4 Yacimiento mineral

#### III.4.1 Mina Aurora

Se encuentra 4 km en línea recta al NE de la comunidad de Xichú. Estas minas posiblemente son conocidas desde antes de la conquista de México. En 1585 fue fundado el pueblo de Xichú con el nombre de minerales de San Francisco de Xichú (COREMI, 1978). Durante la colonia fueron explotadas las zonas de oxidación y únicamente extrajeron plata y oro (COREMI, 1978). A fines del siglo pasado ya existían los socavones Aurora y Palestina donde explotaron los sulfuros de plomo y zinc, así como plata y oro. A principios del siglo XX fueron trabajadas las siguientes obras La Aurora, socavón Palestina, San Fernando y Cabezadas (COREMI, 1978). La compañía ASARCO explotó estas minas durante la segunda guerra mundial hasta 1957 extrayendo los sulfuros de plomo, zinc, cobre y plata además de oro. Las principales obras de explotación de esta Compañía fueron las siguientes: Los Tiros números 1 y 2 y los niveles números 2, 70, 140 y 175 que fue el más profundo (COREMI, 1978).

Los cuerpos explotados por la Compañía ASARCO fueron:

Chimenea San Benito:	350 gr/ton Ag; 3,5% Pb
Chimenea San Enrique:	700 gr/ton Ag; 7% Cu
Cristo del alto:	390 gr/ton Ag; 3,5% Pb
Cristo del bajo:	390 gr/ton Ag; 3.5% Pb



También se encontraron leyes de muestras de un manto localizado al poniente de la entrada del socavón:

0.045% - 0.048% Cu  
12.125% - 10.125% Zn  
0.40% - 0.495% Pb  
592 gr/ton Ag - 457 gr/ton Ag  
0 gr/ton Au

Además se encontró valores de Fe, Mn, Ca, Cd, y trazas de Sb, Rb, Ti y Cr (COREMI, 1978).

Se realizaron estudios de los cuatros depósitos de jales con leyes del orden de 0.05% Cu; 0.32% Zn y 0.62% Pb (COREMI, 1978). Sin embargo, la información anterior es incompleta ya que no existe registro de la ubicación de las muestras, las condiciones del muestreo y si la información es puntual o un promedio.

La mineralización se encuentra en forma de mantos generalmente con espesores de 2 m. Los minerales de mena son: galena, esfalerita y calcopirita. La ganga está formada por los siguientes minerales: cuarzo, hematita, calcita, magnetita, minerales arcillosos y fluorita. Los mantos presentan estructuras de relicto donde se observa que el reemplazamiento prefirió los estratos de caliza y pizarra calcárea a los de pizarra, ya que entre las capas de caliza reemplazada existen bandas de arcillas negras con menos contenido de minerales metálicos (COREMI, 1978).

Los fluidos viajaron a través de zonas de debilidad como fracturas y plano de estratificación que también reemplazaron a la roca encajonante. La mineralización se encuentra cerca del contacto entre el cuerpo intrusivo cuarzomonzonítico con el miembro calcáreo de la Fm. Soyatal formando un skarn (COREMI, 1978).

El material intrusionado son calizas negras arcillosas y pizarras calcáreas con materia bituminosa que han sufrido metamorfismo. El espesor de sus estratos varía entre 10 y 25 cm. de espesor, presenta estructura "boudinage" en algunas y textura cristalina bandeada y cataclástica. Están interestratificadas con pizarras con abundante materia bituminosa de 1 a 3 cm. de potencia, generalmente. Se encuentran silicificadas, con pirita y están cruzadas por abundantes vetillas de calcita. Estas vetillas terminan bruscamente en las capas de lutita y son refractadas o continúan por los planos de estratificación (COREMI, 1978).

## IV. METODOLOGÍA

Se planteó un diseño de muestreo para evaluar el potencial de afectación de los jales al medio ambiente. Se obtuvieron muestras de jales, sedimentos y suelos.

Para el caso específico del muestreo en sedimentos y suelos la configuración de éstos se fundamentó en la distribución de los jales mineros y la dirección de confluencia del río Xichú con el río Catarina de mezquital formando 3 zonas diferentes de muestreo (Fig. 6). La primera zona denominada “zona afectada por jales” se encuentra a partir de los jales mineros hasta la confluencia de los ríos Xichú y Catarina de mezquital; la segunda zona llamada “Zona no afectada por jales” se encuentra en las orillas del río Catarina de mezquital hacia la confluencia con el río Xichú, consideramos las concentraciones de los elementos analizados (As, Cd, Cu, Fe, Pb y Zn) como el ruido natural de fondo de todo el área del valle de Xichú y que servirán como punto de comparación con las demás zonas. La “zona de mezcla” es la última área de muestreo, se ubica a partir de la unión de los ríos Xichú y Catarina de mezquital.

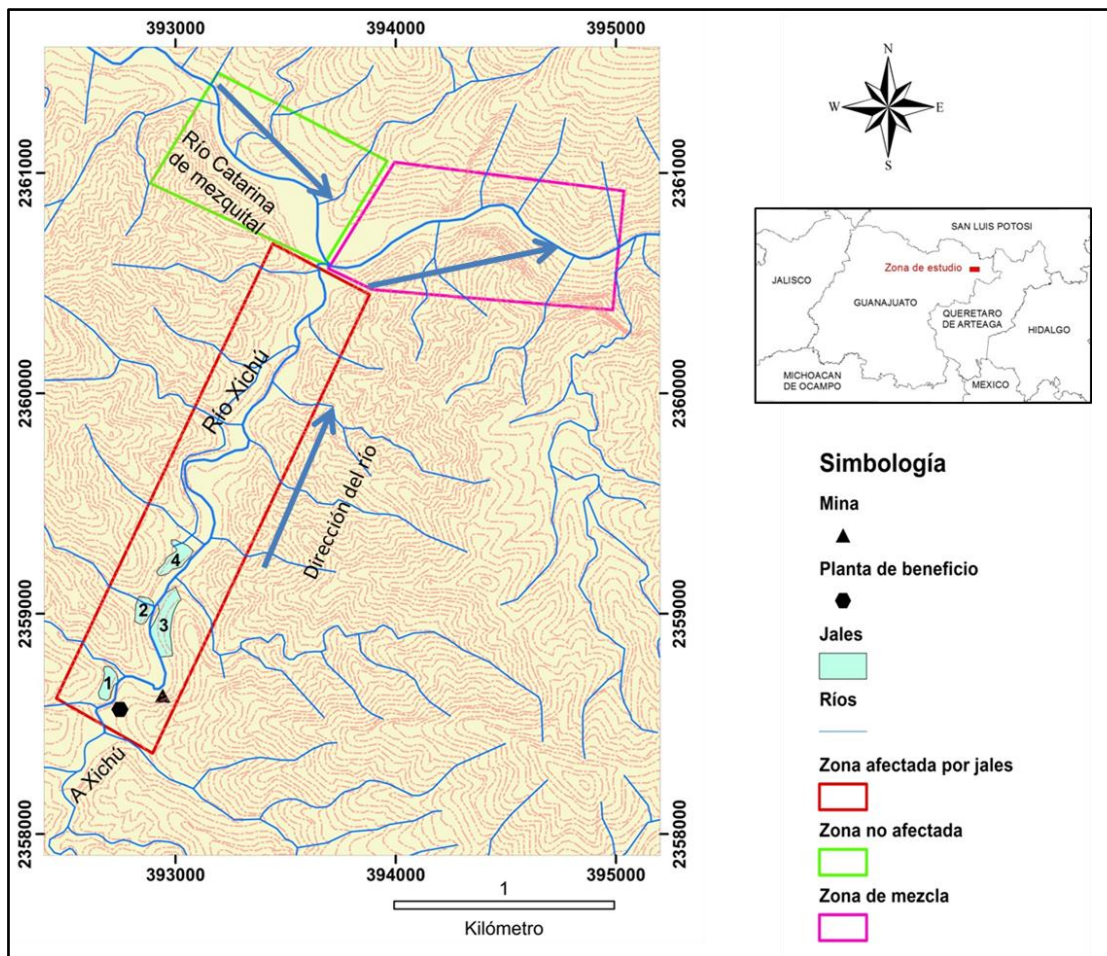


Figura 6. Zona de estudio y zonas de afectación por residuos mineros, Xichú, Guanajuato.

## IV.1 Muestreo de jales

En la zona de estudio existen 4 grandes depósitos de jales mineros dispersos cerca de la Mina Aurora, resultado de los trabajos realizados en dicha mina; se denominaron Jales 1, Jales 2, Jales 3 y Jales 4. Se asume la antigüedad de los jales en base a la distancia que presentan con relación a la planta de beneficio, mientras más cercano se considera más antiguo. Por lo anterior, la antigüedad de los jales va de jales 1 a jales 4 (Fig. 7). Existen residuos sólidos, probablemente jales, en la planta de beneficio de la mina (Fig. 8).

Se obtuvieron 47 muestras de jales en 33 puntos de muestreo que sirvieron para generar perfiles verticales sobre cada uno de los jales usando una distribución en relación a un cambio de color en ellos. Como se observa la Fig. 7, las fotos de campo indican capas en los jales de colores gris verdoso, amarillo claro y rojizo. Los colores pueden ser debido a los diferentes materiales extraídos en la mina. La tabla 7 indica la ubicación de las muestras de jales en la zona.



Figura 7. Jales de la mina Aurora, Xichú, Guanajuato. a) Jales 1, b) Jales 2, c) Jales 3, d) Jales 4

Tabla 7. Ubicación en UTM de las muestras de jales, Xichú, Guanajuato

Muestra	Coordenadas		Muestra	Coordenadas	
	Latitud	Longitud		Latitud	Longitud
Jales 1-1	392690	2358688	Jales 3-5	392950	2359017
Jales 1-2	392690	2358688	Jales 3-6	392948	2359013
Jales 1-3	392690	2358688	Jales 3-7	392941	2359009
Jales 1-4	392690	2358688	Jales 3-8	392935	2358995
Jales 1-5	392690	2358688	Jales 3-9	392935	2358995
Jales 1-6	392690	2358688	Jales 3-10	392935	2358995
Jales 1-7	392690	2358688	Jales 3-11	392935	2358995
Jales 2-1	392862	2359028	Jales 3-12	392978	2359108
Jales 2-2	392868	2359028	Jales 3-13	392988	2359126
Jales 2-3	392875	2359029	Jales 3-14	392999	2359138
Jales 2-4	392879	2359025	Jales 4-1	393040	2359281
Jales 2-5	392887	2359026	Jales 4-2	393039	2359274
Jales 2-6	392894	2359027	Jales 4-3	393041	2359264
Jales 3-1	392964	2359034	Jales 4-4	393051	2359256
Jales 3-2	392962	2359030	Jales 4-5	393051	2359256
Jales 3-3	392958	2359026	Jales 4-6	393051	2359256
Jales 3-4	392955	2359022			



Figura 8. Planta de beneficio mina Aurora, Xichú, Guanajuato

En la obtención de las muestras, se homogenizó la parte superficial (asumiendo una capa dura de óxidos e hidróxidos) con la parte interior de los jales. Se utilizó materiales de plástico para recolectar la muestra y así evitar la contaminación de la muestra. Se colectó cerca de 500 g por muestra, se guardaron en bolsas de plástico tipo “zip lock” y se etiquetaron para su transporte (Fig. 9).

Se tomaron 7 muestras para obtener el perfil del Jales 1 (Fig. 7a); 6 muestras en Jales 2 (Fig. 7b), 14 muestras para Jales 3 (Fig. 7c) y 6 muestras para jales 4 (Fig. 7d). La profundidad estimada de los jales 1, 2, 3 y 4 fue de 35 m, 18 m, 56 m y 38 m, respectivamente. No se realizó una reconstrucción mineralógica de los jales.



Figura 9. Muestreo de jales. a) Excavación parte superior de jales 1, b) Excavación en la pared de jales 4

## IV.2 Muestreo de suelos

Se tomaron 19 muestras de suelos en la zona de estudio (Fig. 10). El diseño de muestreo fue aleatorio, con la finalidad de ver si existe una posible afectación río abajo de los jales y tener valores de fondo río arriba. La tabla 8 indica la ubicación geográfica (UTM) de las muestras de suelo. Las muestras fueron tomadas en zonas de cultivos, pastizales y sobre el cauce del río Xichú los cuales pudieran representar puntos de potencial exposición para la población. Las muestras fueron tomadas a una profundidad de 10 cm removiendo todo tipo de material ajeno a los suelos. Se colectaron con una pala y bolsas de plástico, para evitar una contaminación de metales; y se etiquetaron para su transporte (Fig. 11).

Tabla 8. Ubicación en UTM de las muestras de sedimentos, Xichú, Guanajuato

Muestra	Coordenadas		Muestra	Coordenadas	
	Latitud	Longitud		Latitud	Longitud
Suelo 1	393053	2359211	Suelo 11	392692	2358745
Suelo 2	393037	2359202	Suelo 12	393181	2361380
Suelo 3	393028	2359192	Suelo 13	393172	2361385
Suelo 4	393008	2359189	Suelo 14	393100	2361339
Suelo 5	393186	2359344	Suelo 15	393066	2361349
Suelo 6	393193	2359363	Suelo 16	393659	2360438
Suelo 7	393096	2359379	Suelo 17	393675	2360411
Suelo 8	393096	2359386	Suelo 18	393675	2360403
Suelo 9	392673	2358721	Suelo 19	393665	2360388
Suelo 10	392661	2358690			

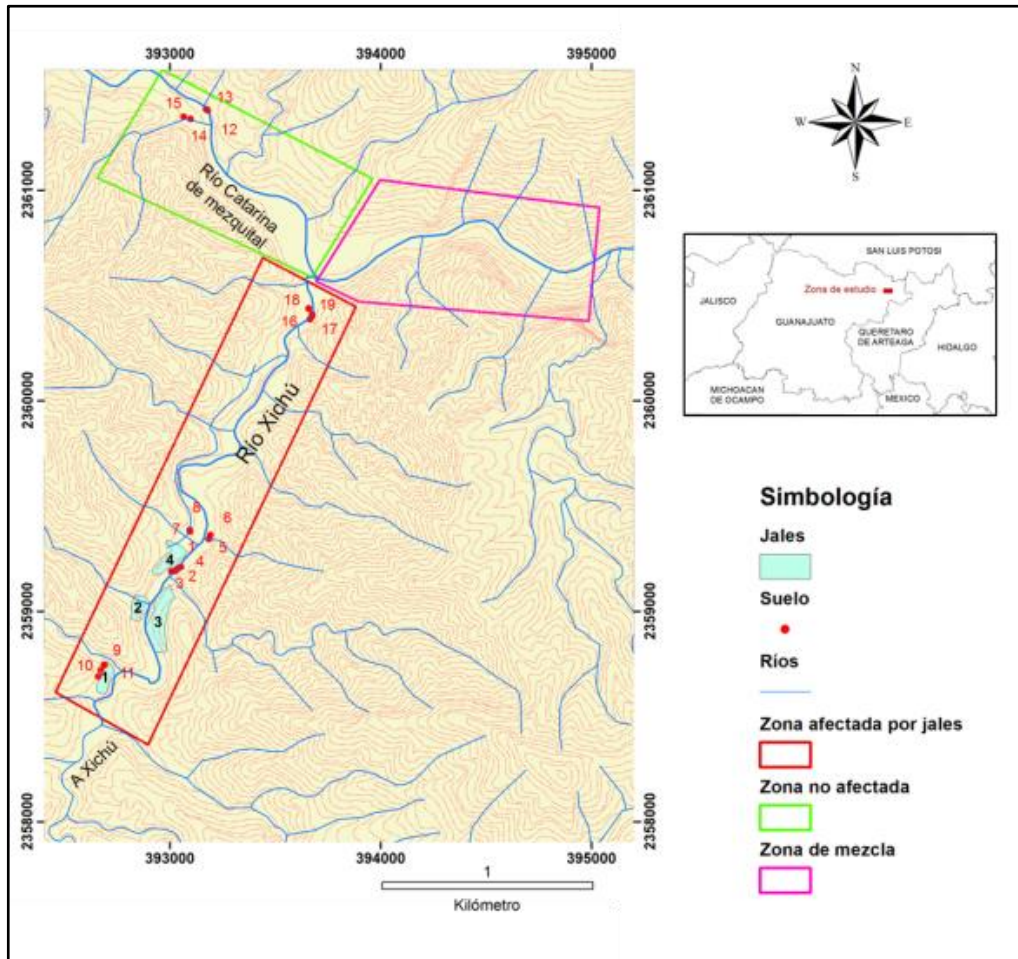


Figura 10. Mapa de localización de muestras de suelos, Xichú, Guanajuato



Figura 11. Muestreo de suelo. a) Muestro de suelo aledaño al río Xichú en plantíos de cultivos, b) Muestreo de suelo cercano al río Xichú.

### IV.3 Muestreo de sedimentos

Se tomaron 8 muestras sedimentos a lo largo del río Xichú (Fig. 12). La tabla 9 indica la ubicación del muestreo de sedimentos en la zona. Las muestras fueron tomadas a orillas del río introduciendo un tubo de material PVC (aproximadamente de 10 cm) y se etiquetaron para su transporte (Fig. 13).

Tabla 9. Ubicación en UTM de las muestras de sedimentos, Xichú, Guanajuato

Muestra	Coordenadas		Muestra	Coordenadas	
	Latitud	Longitud		Latitud	Longitud
<b>Sed 1</b>	393061	2359193	<b>Sed 5</b>	393638	2360528
<b>Sed 2</b>	393184	2361290	<b>Sed 6</b>	393193	2359343
<b>Sed 3</b>	393684	2360776	<b>Sed 7</b>	393193	2359363
<b>Sed 4</b>	393805	2360585	<b>Sed 8</b>	392641	2358555

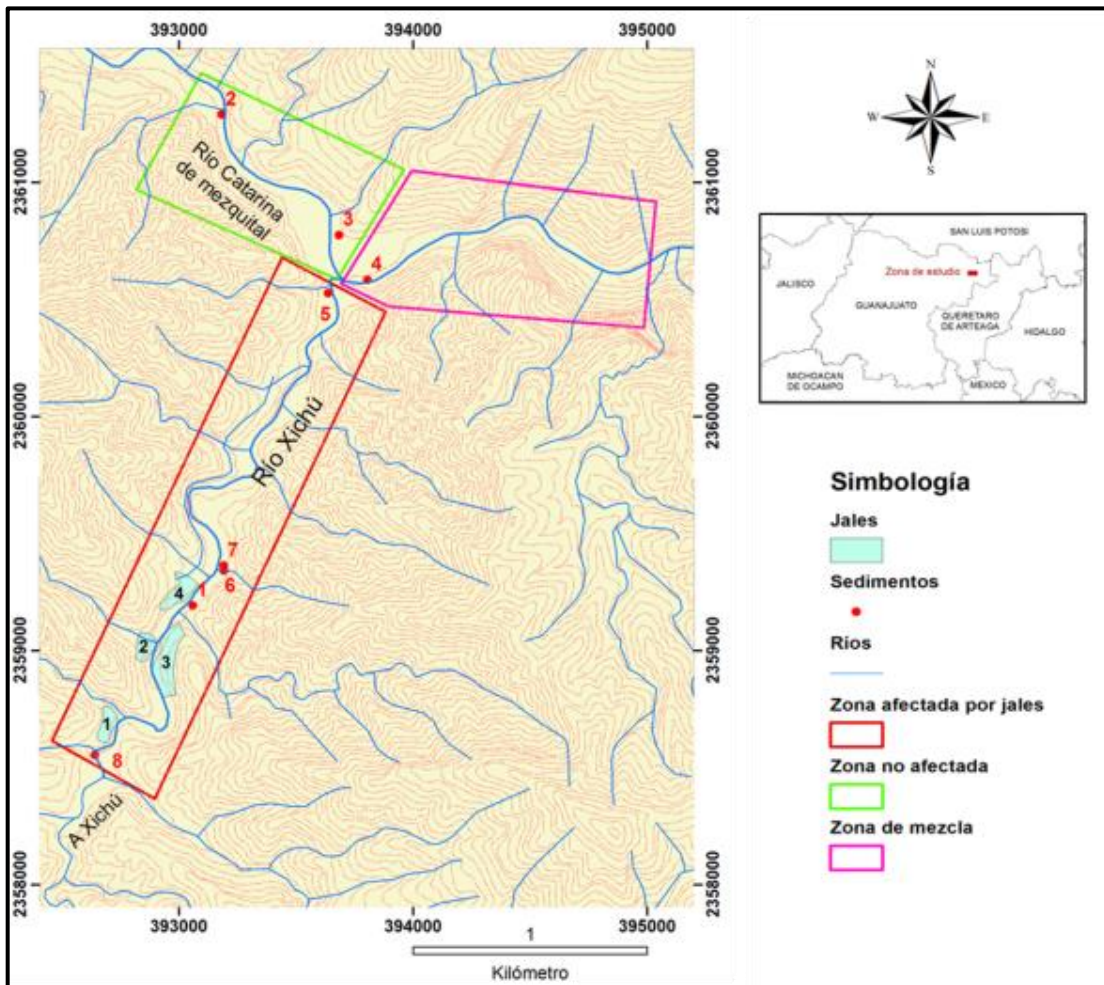


Figura 12. Mapa de localización de muestras de sedimentos, Xichú, Guanajuato



Figura 13. Muestreo de sedimento. a) Sedimentos expuestos cuando hay baja de caudal del río Xichú b) Sedimentos dentro del río Xichú



#### IV.4 Preparación de las muestras

Después de recolectar las muestras se llevaron al laboratorio para dejarlas secar en recipientes de porcelana dentro de un desecador a 50 °C para evitar la pérdida de elementos volátiles como el As (Belkin et al. 1993).

Debido a lo anterior, después del secado de las muestras, éstas se pulverizaron con un mortero de ágata y se homogenizaron para poder tamizarla a través de una malla #200 de tamices marca Montiel Inoxidables de México de acero inoxidable para evitar la contaminación por metales (Fig. 14).



Figura 14. Molido y tamizado de muestras de jales, sedimentos y suelos

#### IV.5 Análisis químico de muestras

En el estudio se utilizaron dos métodos distintos para la obtención de las concentraciones de los metales y metaloides (As, Cd, Cu, Fe, Pb y Zn) en las muestras, cada uno se fundamenta según la finalidad planeada.

Se usó una digestión ácida aplicando una modificación al método de la EPA 3051a para determinar las concentraciones totales de metales en las muestras. Este método disuelve todas las fracciones, excepto las más inertes como los silicatos, y puede ser considerado con una disolución “total-recuperable” para la mayoría de todos los elementos formadores de sulfuros.

También se realizó un procedimiento de extracción secuencial (Parviainen, 2009) como una herramienta para la detección de la movilización de los elementos y los procesos de retención, a través del fraccionamiento de los elementos analizados.

La determinación de las concentraciones de los elementos analizados fue en ambos casos realizado por medio de Espectrofotometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES) iCAP 6500 DUO de marca Thermo Elemental con plasma de Argón ( $\pm 10,000$  °C); (Fig 15).

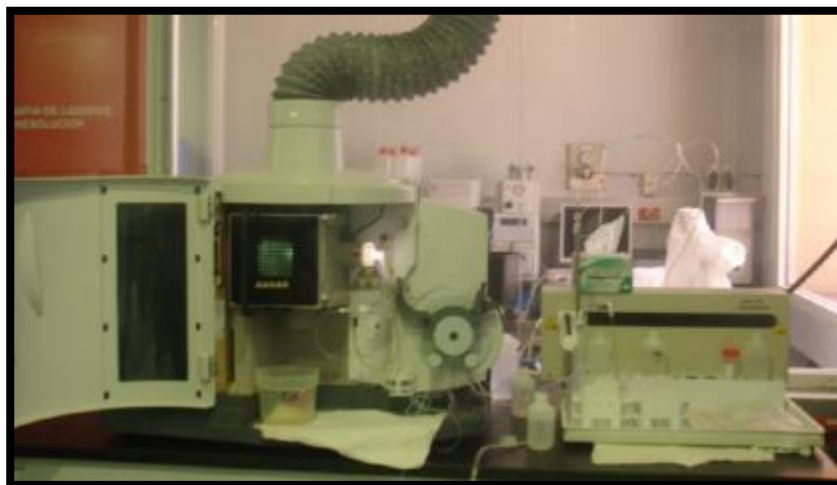


Figura 15. Equipo de espectrofotometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES)

#### IV.5.1 Digestión ácida (Método 4H1a1)

Se utilizó el método 4H1a1, una modificación del método 3051a de la EPA. La preparación para el análisis consistió en agregar 0.1 g de muestra en vasos de alta presión de Teflón (XP-1500) con agua regia (3ml HCl + 9ml de HNO<sub>3</sub>). Se usó una rampa de 10 min. para alcanzar una temperatura de 175 °C y mantenerla por 5 min. La solución producto de la digestión fue filtrada utilizando un papel filtro Whatman Ashless 42 (2.5 µm tamaño de poro) y se aforó a 50 ml con agua desionizada. A partir de estas soluciones se realizaron las determinaciones analíticas.

Todas las muestras se realizaron por duplicado además se aplicó el mismo tratamiento de las muestras a un material estándar de referencia “Montana Soil” 2710a y a blancos de reactivo para control de calidad del proceso de digestión. En todos los casos se trabajó en un margen de diferencia de  $\pm 20\%$  entre las concentraciones de recuperación de los materiales de referencia (Chen, 1997).

Para obtener la confiabilidad de la técnica antes mencionada, se realizó la determinación de los límites de detección (LD) y límites de cuantificación (LC) para cada analito, así como la determinación de la exactitud de los métodos a partir del material estándar de referencia utilizado. En todos los casos que fue necesario, las soluciones se diluyeron utilizando agua desionizada. Las curvas de calibración de cada analito se prepararon a partir de soluciones patrones certificadas.

#### IV.5.2 Proceso de extracción secuencial

Las muestras escogidas para someterse a una extracción secuencial fueron tomadas a partir de los resultados obtenidos en el proceso de digestión ácida. Se consideraron las muestras con mayores y menores concentraciones de As en cada jal minero además de agregar una muestra intermedia en Jales 3 debido a ser el de mayor volumen en relación a los demás jales (Tabla 10). El arsénico es conocido por ser altamente tóxico en humanos y animales. Ambos cationes  $As^{3+}$  y  $As^{5+}$  pueden causar similares efectos toxicológicos pero el primero es considerado como el más móvil y tóxico para organismos vivos (NRC, 1999).

Tabla 10. Muestras de jales con valores extremos de As e intermedio en Jales 3

Muestras de concentraciones de As				
<b>Mayor</b>	Jales 1-2	Jales 2-6	Jales 3-7	Jales 4-3
<b>Menor</b>	Jales 1-6	Jales 2-1	Jales 3-4	Jales 4-1
<b>Intermedio</b>	Jales 3-10			

En la tabla 11 se describen los pasos en el proceso de extracción. El primer paso inicia con la agitación de la muestra con agua desionizada para disolver minerales solubles como por ejemplo el yeso. En el segundo paso se utiliza acetato de sodio como reactivo para poder disolver iones adsorbidos e intercambiables en minerales como carbonatos. El tercer paso disuelve (Oxi) hidróxidos de Fe e hidróxidos de Mn amorfos utilizando oxalato de amonio. Los minerales de óxidos de Fe son disueltos en el cuarto paso utilizando como reactivos oxalato de amonio y acetato de sodio. Sulfuros primarios se extrajeron en el paso final usando clorato de potasio, ácido clorhídrico y ácido nítrico.

Después de cada paso, las soluciones son filtradas utilizando un papel filtro Whatman Ashless 42 y se aforó a 50 ml con agua desionizada para realizar su determinación química. Los restos del material de extracción fueron guardados, secados a temperatura ambiente y etiquetados para su posterior análisis mineralógico.

Tabla 11. Proceso de extracción secuencial (Parviainen, 2009)

Secuencia	Procedimiento	Minerales disueltos preferentemente	Referencias
<b>Etapa 1 “Soluble en agua”</b>	1.0 g de muestra en 50 mL de agua desionizada, agitado por 1 h a temperatura ambiente (TA)	Fracción soluble en agua, sulfatos secundarios, por ej. Yeso.	Dold (2003)
<b>Etapa 2. “Carbonatos intercambiables adsorbidos”</b>	Residuo etapa 1 + 20 mL de Acetato de Sodio (CH <sub>3</sub> COONa, pH 5), agitarse por 6 h TA.	Iones intercambiables adsorbidos, carbonatos	Hall et al. (1996)
<b>Etapa 3. “Oxi(hidróxidos) de Fe”</b>	Residuo etapa 2 + 20 mL 0.2 M Oxalato de Amonio (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , pH 3], agitarse por 1 h en oscuridad a TA.	Precipitados de Fe (III) amorfos, por ej. Schermanita, Ferrihidrita, Jarosita, Goethita, MnO <sub>2</sub>	Dold (2003)
<b>Etapa 4 “Óxidos de Fe”</b>	Residuo etapa 3 + 20 mL 0.2 M Oxalato de Amonio (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , pH 3] en agua a 80 °C por 2 h.	Precipitados de Fe (III) residual (Goethita, Jarosita) y óxidos primarios de Fe (II) (Magnetita, Hematita)	Dold (2003)
<b>Etapa 5 “Sulfuros”</b>	Residuos etapa 4 + 750 mg de KClO <sub>3</sub> (Clorato de Potasio) + 15 mL 12 M de HCl (Ácido clorhídrico) + 10 mL de 4 M de HNO <sub>3</sub> , en agua a 90 °C por 20 minutos.	Sulfuros primarios.	Hall et al. (1996) y Dold (2003)

## IV.6 Identificación de minerales

### IV.6.1 Difracción de Rayos X

En la tabla 10 se indican que muestras fueron analizadas por difracción de rayos X, considerando los niveles de concentración de As. En el caso particular de Jales 3 se consideró una muestra intermedia entre esos valores debido a sus dimensiones.

El proceso de estudio de DRX comienza con el montado y la compactación de la muestra en el portamuestra, para evitar la dispersión dentro del equipo; el estudio se realizó en un difractor MiniFlex marca Rigaku, con una configuración  $\theta 2\theta$ .

La resolución del equipo es de 2% en peso de los componentes de las muestras a analizar. Los parámetros utilizados fueron 30kV de voltaje, 5-80° de ángulo de barrido, a una velocidad de barrido de 0.02° a 2° por minuto, con radiación de cobre.

### IV.6.2 Microscopio Electrónico de Barrido – EDS

Las muestras que fueron analizadas por MEB se indican en la tabla 10. El tratamiento de las muestras fue el lavado previo del portamuestras utilizando acetona para remover cualquier residuo que existiera en él, después fue recubierto por una adhesivo de carbón de doble cara, se adhirió la cinta al portamuestras y se utilizó la otra cara para colocar la muestra. El equipo utilizado fue un microscopio de marca Hitachi tabletop microscopie TM-1000. En los espectros de EDS son realizados en software “SwiftED-TM BETA versión”.

### IV.6.3 Modelación geoquímica

El modelado geoquímico de los resultados obtenidos (a partir de la mineralogía encontrada) dentro de los jales mineros se realizaron usando el software Geochemis't Workbench (GWB); (Bethke, 1996) el cual se considera como un conjunto integrado de softwares y herramientas interactivas para resolver un amplio rango de reacciones químicas. La naturaleza integral de las herramientas del programa puede generar de balance de reacciones, figuras de constantes de equilibrio y realizar diagramas de actividades químicas (Eh-pH), esta información añade un mejor entendimiento para evaluar el comportamiento de los metales dentro del ambiente (Bethke, 1996).

Se utilizaron diferentes paquetes dentro del GWB, uno de ellos fue “Rxn” el cual, realiza automáticamente reacciones de balances químicas de diferentes compuestos, especies disueltas y gases; el otro paquete digital utilizado fue “Act2” con el cual se pueden calcular y graficar diagramas actividad-actividad. Esta clase de diagramas muestran la estabilidad de minerales y la predominancia de especies químicas en sistemas acuosos.

## V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### V.1 Geoquímica y mineralogía de jales mineros

#### V.1.1 Caracterización de jales 1

##### V.1.1.1 Análisis de imágenes MED y espectros EDS

De la muestra Jales 1-6, antes de cualquier tratamiento químico, se realizaron dos imágenes junto con sus espectros de EDS. La figura 16 muestran dos granos obtenidos a diferentes escalas y con algunas similitudes en los espectros de la muestra Jales 1-6.

La figura 16a es de un tamaño aproximadamente de 30  $\mu\text{m}$  con una cierta forma cristalina prismática. Al observar el espectro de EDS nos muestra una proporción relativa de  $\text{Fe} > \text{S}$  podría representar un grano de pirita (mineral de ganga presente en el yacimiento).

El grano representado en la figura 16b. es de aproximadamente de 15  $\mu\text{m}$ , con un brillo que contrasta al resto haciendo suponer un posible alto contenido de metales. Se le realizó un espectro de EDS dando como resultado un contenido similar en proporción de elementos al grano anterior  $\text{Fe} > \text{S}$ .

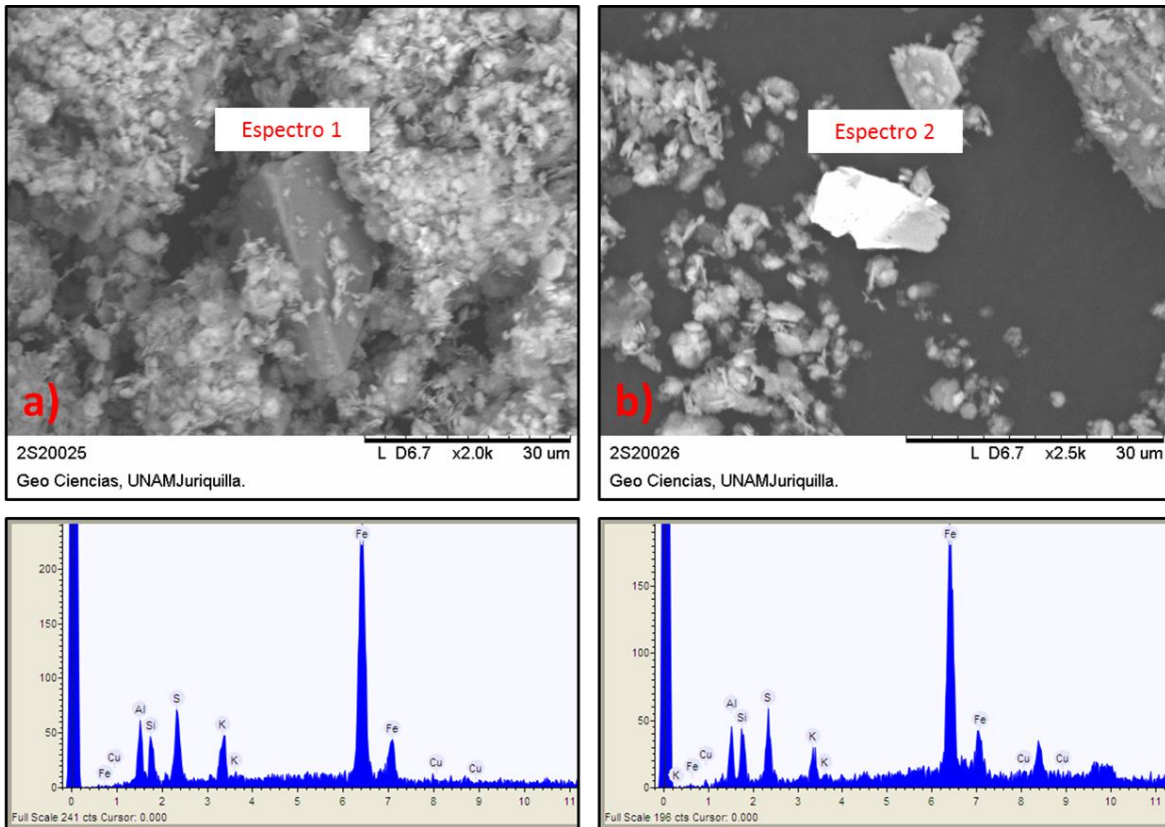


Figura 16. Imágenes y espectros obtenidos por Microscopía Electrónica de Barrido de la muestra Jales 1-6

La siguiente figura muestran granos encontrados por medio del MEB y los espectros EDS de cada uno de ellos dentro de los residuos de la muestra de Jales 1-6 después de la extracción secuencial. Se obtuvieron seis imágenes junto con sus espectros EDS.

La figura 17a presenta un grano con un tamaño aproximado de 80  $\mu\text{m}$ . Mediante su análisis de EDS se pudieron obtener relaciones en proporción como  $\text{Fe} > \text{S} > \text{Cu} > \text{Cd}$  lo que puede indicar la presencia de minerales primarios de ganga (pirita). La presencia de esos elementos podría inferir calcopirita en la muestra además de que el Cd podría estar en trazas en minerales de sulfuros como pirita o arsenopirita (Vaughn et al. 1978).

En el caso de la figura 17b la proporción de elementos obtenidos es de  $\text{Fe} > \text{S} > \text{Cu} > \text{As}$ . La relativa proporción de los metales y sulfuros podría indicar presencia de minerales como calcopirita. La presencia de estos elementos se puede inferir una baja recuperación en plantas de beneficio, además de minerales primario como pirita o arsenopirita. El grano de tamaño aproximado de 50  $\mu\text{m}$ .

En los demás espectros obtenidos también se obtuvieron elementos como Pb, Ba, Cl y Mo.

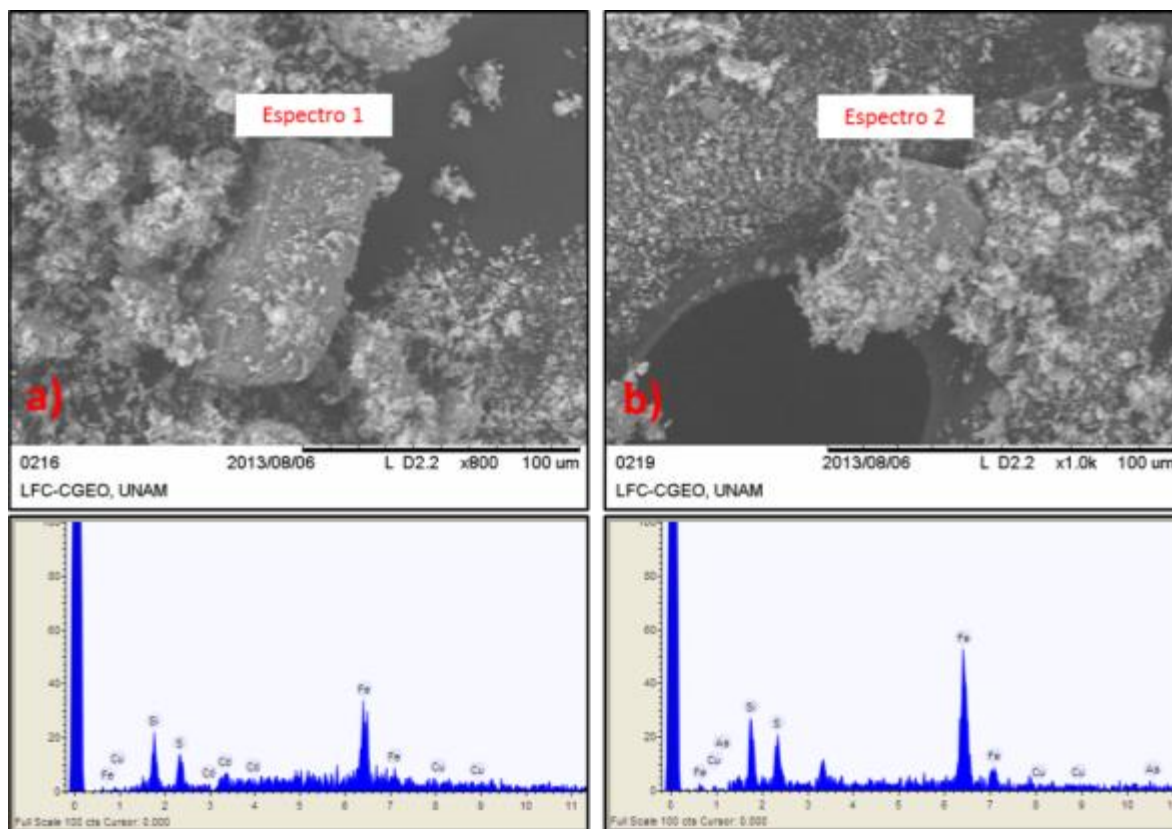


Figura 17. Imágenes y espectros obtenidos por Microscopía Electrónica de Barrido de la muestra Jales 1-6 después del proceso de extracción secuencial

La figura 18 muestra dos partículas con sus respectivos EDS de 7 imágenes y 9 espectros totales que se realizaron en la muestra Jales 1-2. La figura 18a da como resultado un grano de aproximadamente 20  $\mu\text{m}$ . En el espectro EDS realizado da información de altas

proporciones de elementos como  $Fe > S > Ca$ . La figura 18b muestra un grano de aproximadamente 30  $\mu m$  con alto contenido, en proporción, de  $Fe > Ca > S > Zn$ . El registro de Zn aunque en baja relación a los elementos anteriores, podría asumir la presencia de sulfuros de Zn como esfalerita (mineral de mena) e inferir que no fue removido en el proceso de beneficio.

En el resto de los espectros también se encontraron trazas de Pb y Sb. La relación con el Pb y S sería indicador de minerales de galena (mineral de mena). El Sb estaría en trazas dentro de minerales como galena, pirita, esfalerita (Vaughan et al. 1978).

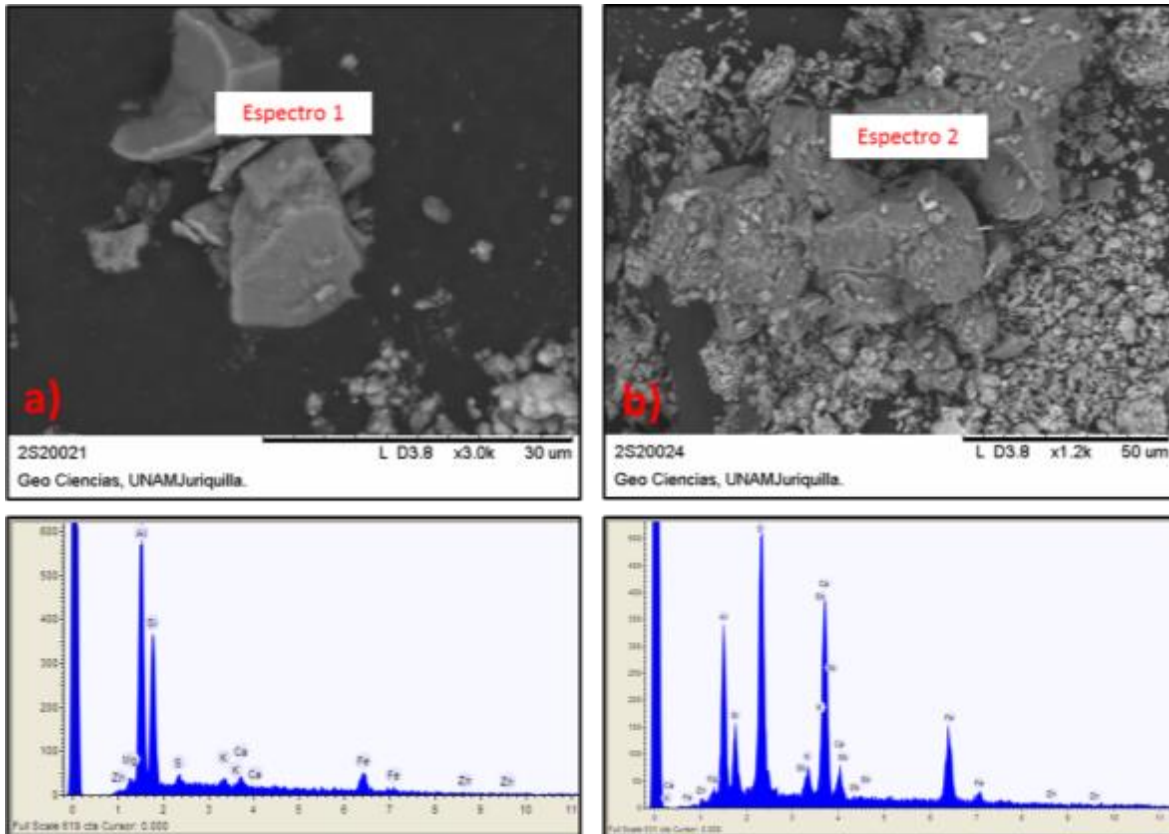


Figura 18. Imágenes y espectros obtenidos por Microscopía Electrónica de Barrido de la muestra Jales 1-2

Utilizando el residuo sólido después de hacer la extracción secuencial en la muestra Jales 1-2 se pudieron obtener cinco imágenes de granos y cinco espectros de EDS.

De manera específica la figura 19a muestra un grano con una proporción de  $Fe > S$  lo que indicaría presencia de sulfuros de Fe (principalmente pirita). También existe proporciones bajas, en relación a los elementos anteriores, de  $Zn > As$  considerando la presencia de minerales de mena como sulfuro de Zn (esfalerita) y ganga como sulfuros de As (arsenopirita). El tamaño del grano es de aproximadamente 100  $\mu m$ .

El espectro de la figura 19b muestra elementos en proporción de  $Fe > As > Pb$  aunque en bajas proporciones. La ausencia de S pueda indicar que esta partícula no sea un sulfuro y



estos elementos sean trazas dentro de algún otro mineral probablemente silicatos. El tamaño de la partícula es de aproximadamente de 40  $\mu\text{m}$ .

También se encontraron en el resto de los espectros metales como  $\text{Pb} > \text{Ag} > \text{Cd}$ . LA presencia de estos metales indicaría un bajo porcentaje de recuperación en proceso de beneficio de la mina. Los minerales que podrían estar asociados con los metales pesados podrían ser sulfuros y silicatos en trazas.

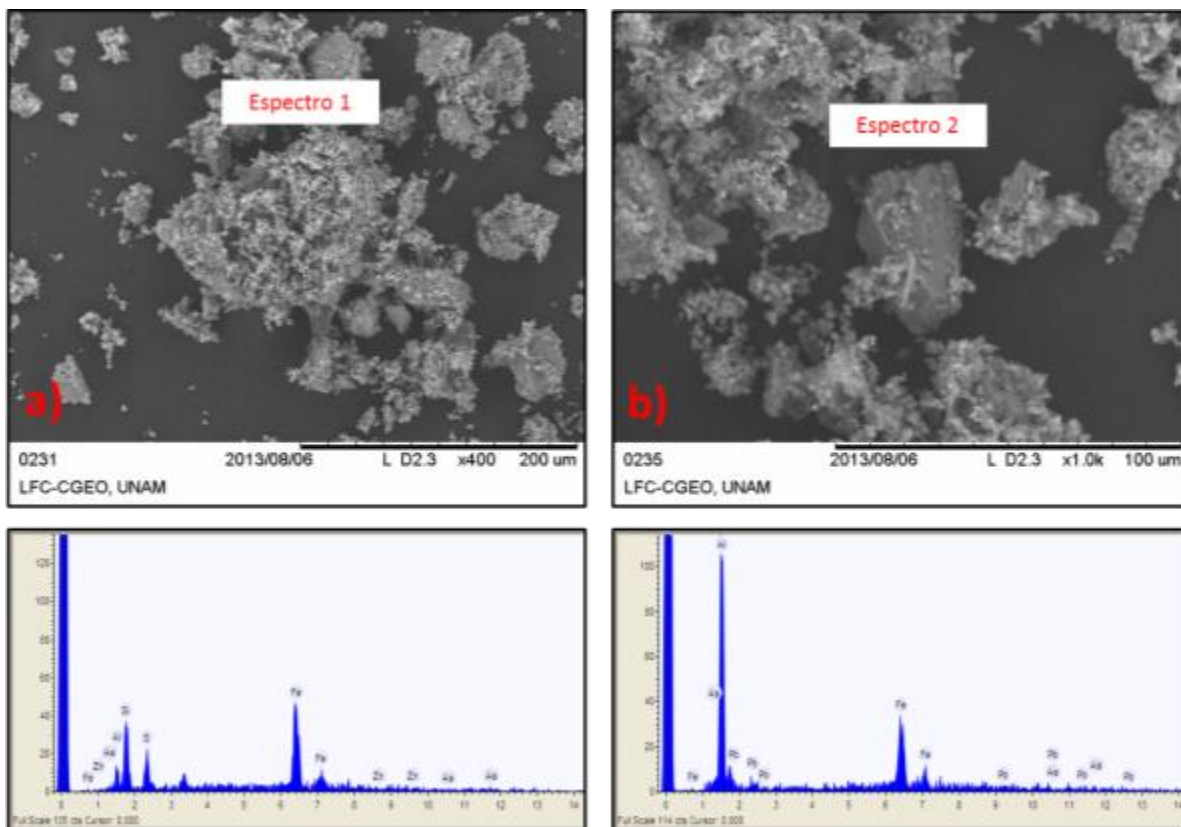


Figura 19. Imágenes y espectros obtenidos por Microscopía Electrónica de Barrido de la muestra Jales 1-2 después del proceso de extracción secuencial

### V.1.1.2 Difracción de rayos X

En Jales 1 se realizaron análisis de DRX generando 4 difractogramas tanto de la muestra Jales 1-2 (antes y después de la extracción) y Jales 1-6 (antes y después de la extracción).

La figura 20 muestra el espectro de la muestra Jales 1-2 antes de someterlo al proceso de extracción. Se observa la presencia de minerales como jarosita ( $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ); yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) y esfalerita ( $\text{ZnS}$ ) lo que puede indicar que los procesos de disolución juegan un papel importante para la liberación de iones como  $\text{K}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  para formar dichos minerales. La existencia de minerales aún de valor económico como la esfalerita indica que los procesos de beneficio en la mina no eran muy eficientes.

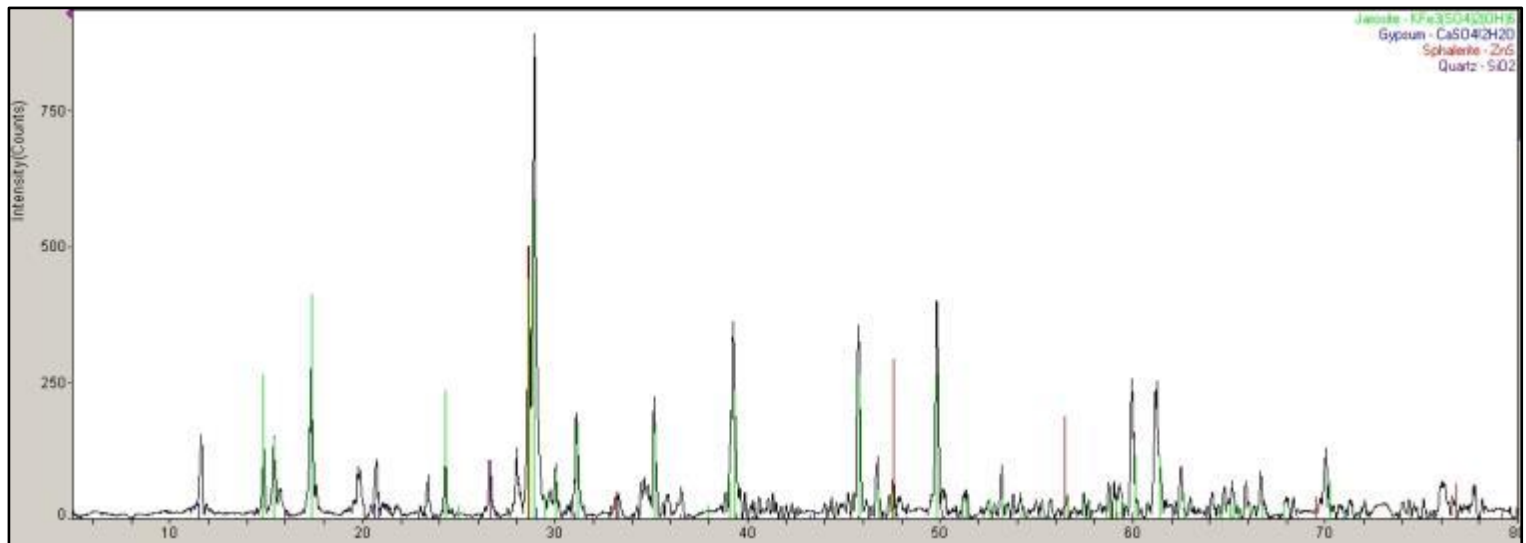


Figura 20. Difractograma de la muestra Jales 1-2

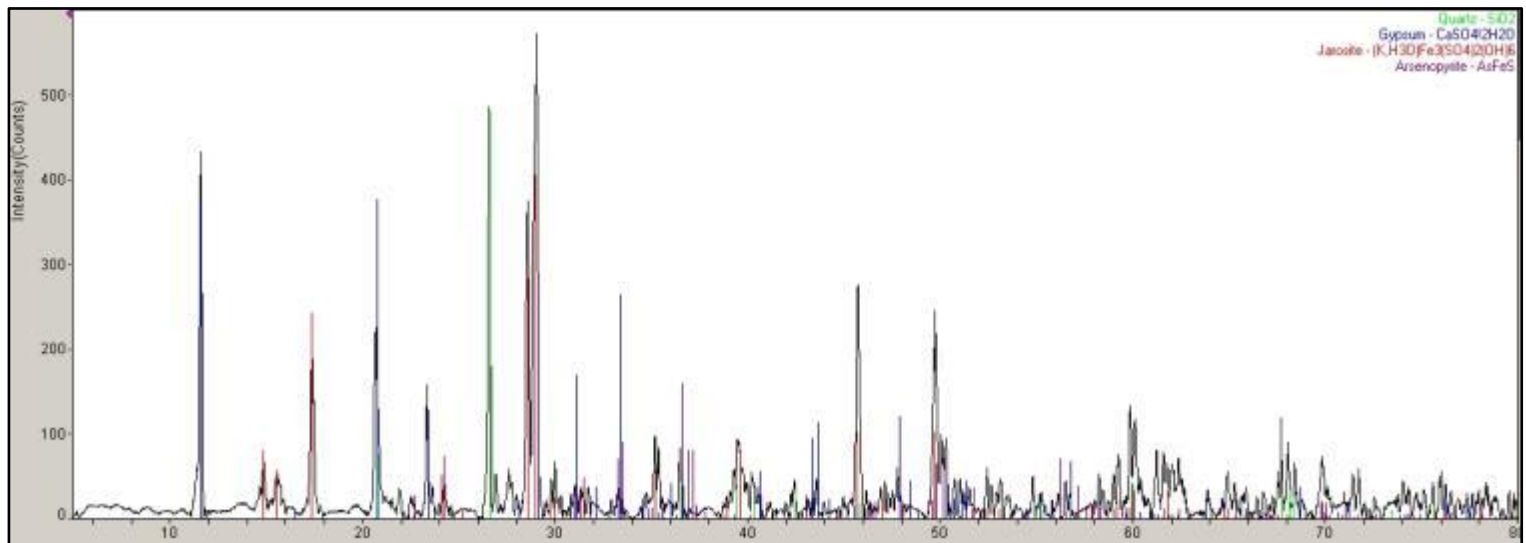


Figura 21. Difractograma de la muestra Jales 1-6

En general los minerales secundarios de sulfatos de Fe son de alta solubilidad, aunque en el caso de jarosita muestra disolución cinética relativamente baja.

La cuprita ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) aparece solamente en el difractograma de la muestra Jales 1-2, después de la extracción lo que pueda indicar que la disolución empobrece la concentración de algunos minerales y el “enriquecimiento” de otro como puede ser el caso del óxido de Cu.

En la figura 21 se puede observar el difractograma de la muestra Jales 1-6. Los minerales presentes en la figura son: jarosita ( $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ); yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) y arsenopirita ( $\text{AsFeS}$ ). Los primeros dos minerales son considerados como minerales secundarios los cuales se generan a través de procesos de disolución de iones y la mezcla con otros compuestos libres. La gran cantidad de arsénico obtenido en esta muestra (aproximadamente 62,000 mg/kg) se deba a la arsenopirita considerado como mineral primario.

El único mineral, exceptuando los minerales de ganga encontrados en la muestra Jales 1-2 (tabla 22) después del proceso de extracción fue la galena ( $\text{PbS}$ ). Puede considerarse que éste mineral no se extrajo y que su presencia se deba a un enriquecimiento por la disolución de otros minerales de la muestra. Es de considerar también que más del 97% del Pb extraído se encontró en la fase de sulfuros y que sus compuestos son en la mayoría insolubles (Kabata, 2007).

### V.1.1.3 Concentración digestión ácida

En la tabla 12 se presentan las concentraciones obtenidas en el análisis de 7 muestras distribuidas sobre el perfil de Jales 1.

Tabla 12. Resultado de concentraciones de los metales en Jales 1

mg/kg	As	Cd	Cu	Fe	Pb	Zn
Jales 1-1	14756.84	19.06	337.99	286271.88	3139.84	5284.71
Jales 1-2	62302.14	18.37	1834.91	318342.61	9168.51	4963.00
Jales 1-3	10832.39	207.10	2427.96	254910.74	7047.20	13289.63
Jales 1-4	29206.89	95.93	1469.82	227928.69	10795.98	6729.80
Jales 1-5	11383.35	233.19	2116.30	248940.71	5405.46	12328.56
Jales 1-6	7793.67	33.55	402.67	261636.47	2042.55	2251.66
Jales 1-7	9859.94	76.46	1076.59	182236.41	3659.84	8006.30
L.D. (mg/L)	0.0206	0.0148	0.0243	0.0155	0.0154	0.0138
L.C. (mg/L)	0.0686	0.0493	0.0810	0.0516	0.0513	0.0460

Las concentraciones reportadas en la tabla 12 presenta una amplia variación en las muestras de los jales, como se puede observar en la desviación estándar lo que indica una distribución asimétrica como consecuencia de los valores extremos que representan las concentraciones máximas aunque al comparar la media aritmética con la mediana no se observa un cambios significativo entre ambos (caso excepcional del As que casi duplica su valor en relación al promedio).

Todos estos altos valores obtenidos, excluyendo el Cd, tal vez son respuesta natural a una acumulación de estos elementos encontrados en la mineralogía de la zona. La baja concentración del Cd es probablemente respuesta que se encuentra en trazas dentro de otros minerales.

Para tener una mejor visualización de las variaciones de las concentraciones de los elementos con respecto a la profundidad se realizó la figura 22. La tendencia puede mostrar cierto incremento en los elementos hasta llegar los 25 metros de profundidad donde existe una disminución para al final elevar sus valores en la parte más profunda del jal. El caso del Fe en particular no muestra una tendencia de variaciones de concentraciones a profundidad. Así, las concentraciones se presentaron en el orden descendiente Fe>>As>Zn>Pb>Cu>>Cd. La presencia de una costra de minerales de óxidos, hidróxidos, etc. en el jal, ésta podría evitar el transporte de los elementos al exterior al convertirse en una capa “impermeable” que acumule la concentración de los metales y el As en la parte inferior debido a un proceso de infiltración anterior.

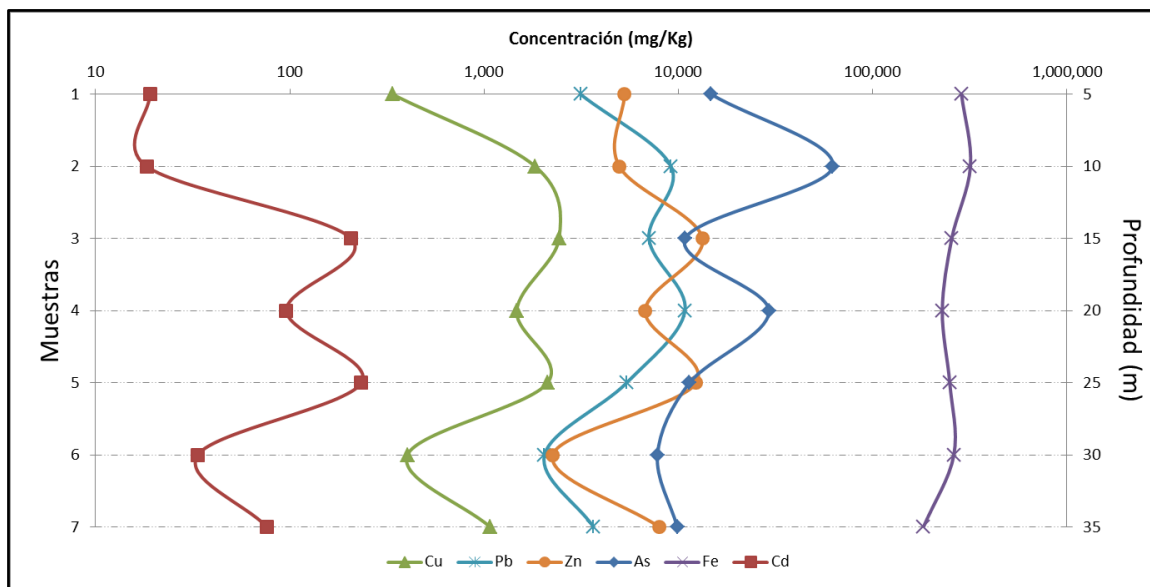


Figura 22. Variación a profundidad de las concentraciones de los elementos en Jales 1

#### V.1.1.4 Concentración extracción secuencial

La tabla 13 representa las concentraciones de los elementos obtenidos en la extracción de las muestras Jales 1-2 (mayor contenido de As en digestión total) y Jales 1-6 (Menor contenido de As en digestión total).

De manera general, considerando la sumatoria de los elementos en las dos muestras, los resultados indican que la mayor parte de los elementos extraídos están dentro de la cuarta (enlazado en óxidos de Fe) y quinta fracción (enlazado a sulfuros) en valores totales que van desde aproximadamente 78,000 mg/kg y 43,000 mg/kg, respectivamente. El resto de las sumatorias aproximadas en los demás elementos en las fracciones son las siguiente: Soluble 6,200 mg/kg, carbonatos 720 mg/kg y (oxi)hidróxidos de Fe 4,800 mg/kg.

La figura 23 Indica que en las muestras de Jales 1-2, la fracción soluble abarca las mayores concentraciones de los elementos Cd (32.77 mg/kg), Cu (647.5 mg/kg) y Zn (1656.5 mg/kg) mientras que las concentraciones mayores de As (17,025 mg/kg), Fe (21,940 mg/kg) y Pb (100.4 mg/kg) se encuentran en la fracción de sulfuros.

Las concentraciones menores de As (<L.C.), Cu (66.4 mg/kg) y Fe (<L.C.) se encuentran en las fracciones solubles y carbonatos; el Cd (<L.C.) se encuentra en los (oxi)hidróxidos y óxidos de Fe; Pb (<L.C.) en carbonatos, (oxi)hidróxidos y óxidos de Fe, mientras que el Zn (216.3 mg/kg) en (oxi)hidróxidos de Fe.

Para la muestra Jales 1-6, las concentraciones mayores del As (2699.5 mg/kg), Fe (35,435 mg/kg) y Pb (45.1 mg/kg) están en la fracción sulfuros; el Cd (14.1 mg/kg), Cu (109.1 mg/kg) y Zn (1,000 mg/kg) está dentro de la fracción soluble.

Las concentraciones menores de As (<L.C.) y Fe (<L.C.) están en la fracción soluble y carbonatos; el Cd (<L.C.) en (oxi)hidróxidos de Fe; Cu (1.6 mg/kg) y Zn (75.5 mg/kg) en carbonatos mientras que el Pb (<L.C.) en carbonatos, (oxi)hidróxidos y óxidos de Fe.

La figura 24 representa la distribución en porcentajes de las concentraciones de los elementos obtenidos durante la extracción secuencial en las muestras de Jales 1-2 y Jales 1-6. Los resultados indican que la mayoría de los elementos extraídos en el experimento se encuentran dentro de la fracción óxidos de Fe y en los sulfuros con aproximadamente 32.5% y 58.6%, respectivamente; lo que podría indicar que no existiera una fuerte posibilidad de movilización de estos metales en condiciones normales. El resto de las fracciones están en las siguientes proporciones: Soluble 4.7%, carbonatos 0.5% y (oxi)hidróxidos de Fe 3.7%.

Tabla 13. Concentración de elementos obtenidos por medio de la extracción secuencial en Jales 1

mg/kg	As		Cd		Cu		Fe		Pb		Zn		Total
	Jales 1-6	Jales 1-2	Jales 1-6	Jales 1-2	Jales 1-6	Jales 1-2	Jales 1-6	Jales 1-2	Jales 1-6	Jales 1-2	Jales 1-6	Jales 1-2	
<b>Soluble</b>	<L.C.	98.0	14.1	32.8	109.1	647.5	<L.C.	2683.5	0.4	2.2	1000.0	1656.5	6244
<b>Carbonatos</b>	<L.C.	<L.C.	3.1	9.0	1.6	66.4	<L.C.	143.5	<L.C.	<L.C.	75.5	427.6	727
<b>(Oxi)Hidróxidos de Fe</b>	276.9	353.4	<L.C.	<L.C.	38.6	131.1	1453.5	2223.5	<L.C.	<L.C.	177.6	216.3	4871
<b>Óxidos de Fe</b>	728.5	16720.0	1.6	<L.C.	29.0	276.5	9265.0	15950.0	<L.C.	<L.C.	76.7	246.4	43294
<b>Sulfuros</b>	2699.5	17025.0	10.1	16.2	80.7	205.8	35435.0	21940.0	45.1	100.4	372.5	252.0	78182
<b>L.D. (mg/L)</b>	0.5276		0.0059		0.0058		0.2213		0.0024		0.0002		
<b>L.C. (mg/L)</b>	1.9086		0.0196		0.0193		0.7376		0.0080		0.0006		

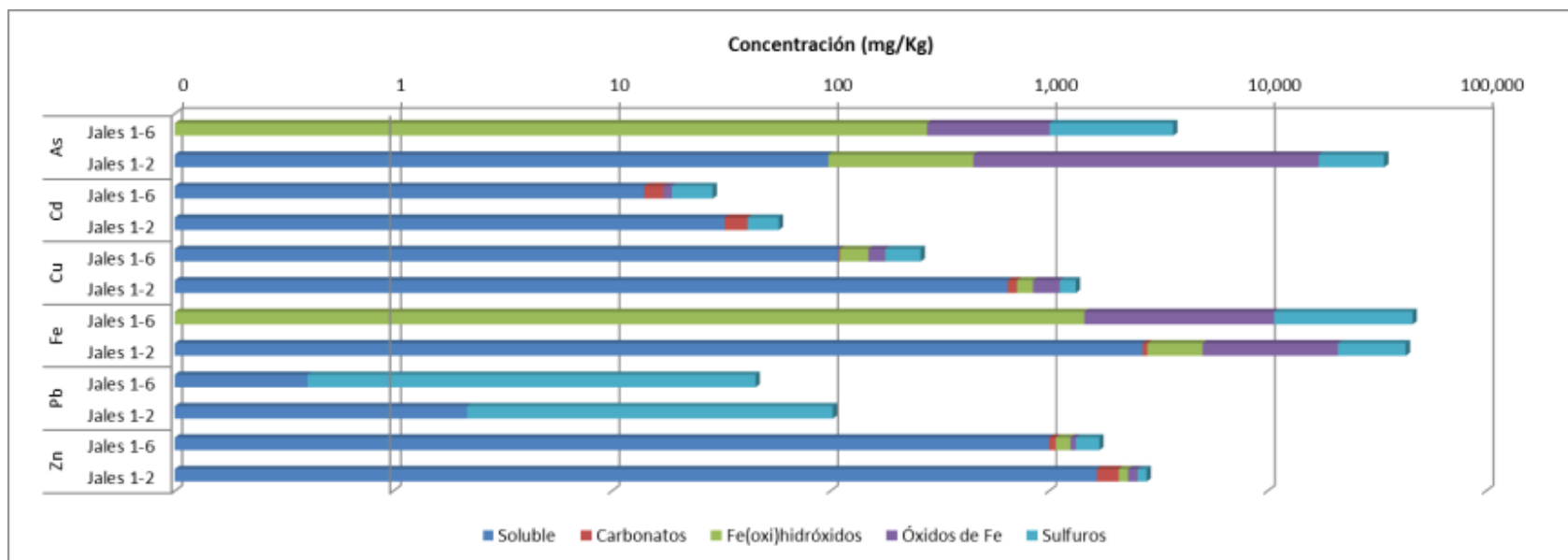


Figura 23. Distribución de las concentraciones de elementos en las fracciones de la extracción dentro de Jales 1

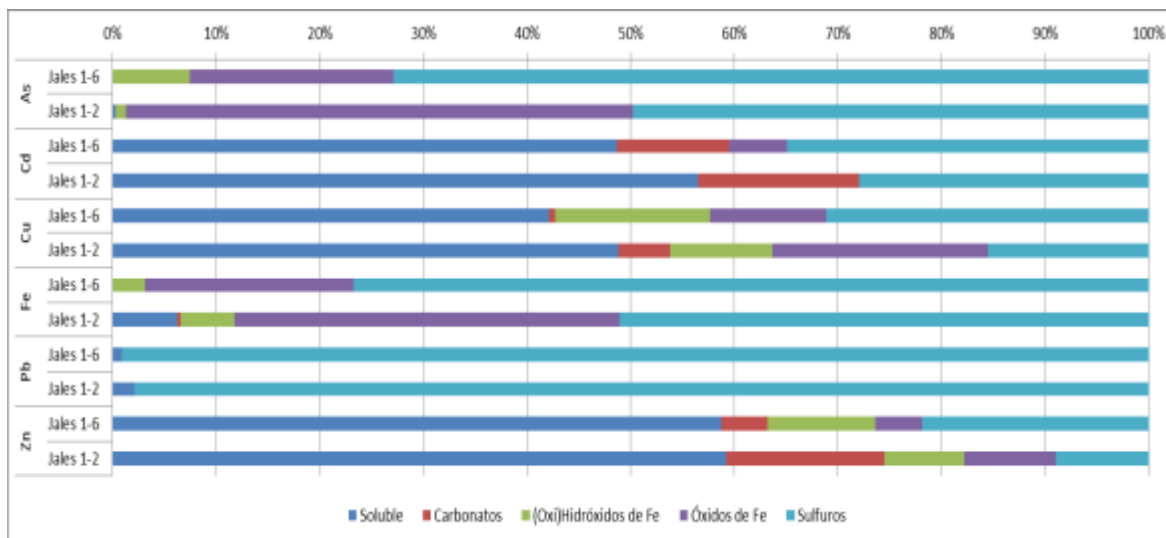


Figura 24. Distribución en porcentaje de concentraciones de metales obtenidas en fases químicas dentro de Jales 1

En la muestra jales 1-6 para elementos como As (72.9%), Fe (76.8%) y Pb (99.1%) en la fracción sulfuros es en la que se encuentran sus mayores porcentajes de concentraciones, mientras que en el caso de Cd (48.7%), Cu (42.1%) y Zn (58.7%) las máximas concentraciones están dentro de la fracción soluble.

En relación a la muestra anterior, la fracción soluble y carbonatos de los elementos As y Fe representan sus porcentajes menores (<L.C.), las concentraciones más bajas para el Cd (<L.C.) se ubica en (oxi)hidróxidos de Fe, el Cu (0.6%) y Zn (4.4%) sus concentraciones más bajas se dan en carbonatos mientras que el Pb (<L.C.) dentro de las fracciones carbonatos, (oxi)hidróxidos y óxidos de Fe muestra sus porcentajes más bajo.

La muestra jales 1-2, la cual representó la de mayor concentración de As en los Jales 1 según los resultados de la digestión ácida, indica que los elementos As (49.8%), Fe (51.1%) y Pb (97.9%) con porcentajes mayores se encuentran en la fracción sulfuros, en el caso de los porcentajes mayores de los elementos Cd (56.5%), Cu (48.8%) y Zn (59.2%) se encuentran en la fracción soluble.

Los porcentajes menores de la muestra anterior de los elementos As (<L.C.), Cu (5.0%), Fe (0.3%) están en la fracción de carbonatos, el elemento Cd (<L.C.) está en carbonatos y (oxi)hidróxidos de Fe, el Pb (<L.C.) en carbonatos, (oxi)hidróxidos y óxidos de Fe mientras que el Zn (7.7%) en (oxi)hidróxidos de Fe.

La alta concentración de As, Fe y Pb dentro de la fase de sulfuros puede ser representado por los minerales encontrados dentro de la DRX como son arsenopirita, jarosita, galena. El cadmio puede estar presente en mineral de esfalerita (como elemento traza) ya que no se encontró ninguna fase mineralógica en DRX para el Cd aunque sí estuvo presente en los estudios de EDS. El único mineral encontrado en DRX de composición de Cu fue cuprita, los resultados de EDS muestran S, Cu, Fe en proporciones variadas los que indicaría posiblemente la presencia de sulfuros de Cu o sulfatos de Cu. El Zn presente en esfalerita puede haber sido extraído de él y estar dentro de la fase soluble. La presencia

de Ca en los espectros pueda indicar presencia de calcita en la muestra aunque en bajas proporción en relación a los demás minerales. Esta minerales podría aun seguir actuando como neutralizador de la acidez dentro de los jales.

## V.1.2 Caracterización de Jales 2

### V.1.2.1 Análisis de imágenes MED y espectros EDS

Se analizó la muestra Jales 2-1 obteniendo un total de 5 imágenes de microscopía y 6 espectros de EDS. En la figura 25 se observan las formas representativas de los granos analizados y también los espectros en cada uno de ellos. Los tamaños de granos varían entre 50 y 100  $\mu\text{m}$ , ambos de forma prismática rectangular. La figura 25a presentó picos relativamente altos de Ca>S. También se detectaron concentraciones relativas de As aunque en menor relación a los anteriores. La presencia de As y S podrían indicar existencia de minerales como rejalgar ( $\text{AsS}$ ) u oropimento ( $\text{As}_2\text{S}_3$ ) (minerales encontrados en desechos mineros; Alpers et al. 1994; Lottermoser 2010).

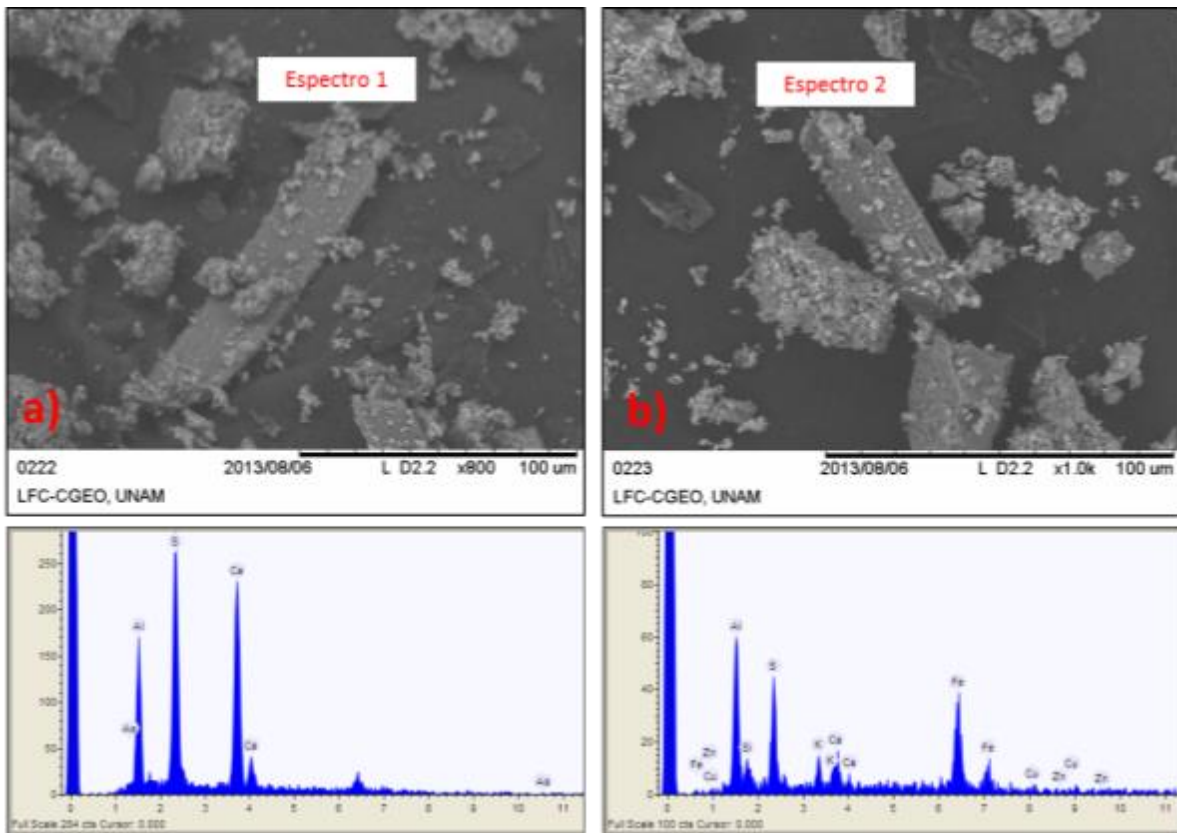


Figura 25. Imágenes y espectros obtenidos por Microscopía Electrónica de Barrido de la muestra Jales 2-1



El espectro de la figura 25b mostró la relación en proporción de Fe>S>Ca>Cu>Zn. La disposición d estos elementos podría indicar presencia de sulfuros de fierro (calcopirita, esfalerita) que puede indicar la baja eficiencia en los procesos de extracción en las plantas de beneficio.

En la figura 26 se observan imágenes de granos no tan afectador por el ataque químico de la digestión y espectros obtenidos en los residuos de la muestra de Jales 2-1 después de realizarle una extracción secuencial.

Se pudieron obtener 5 imágenes y 7 espectros de esta muestra, se representan dos granos en la figura 26a ambos con un tamaño que varía entre 20 y 50 µm. Las proporciones obtenidas entre los elementos de la figura 26b es Fe>S. No se pudieron detectar otros elementos lo que indicaría un buen proceso de extracción secuencial aun cuando el brillo intenso en la figura pudiese haber indicado presencia de metales.

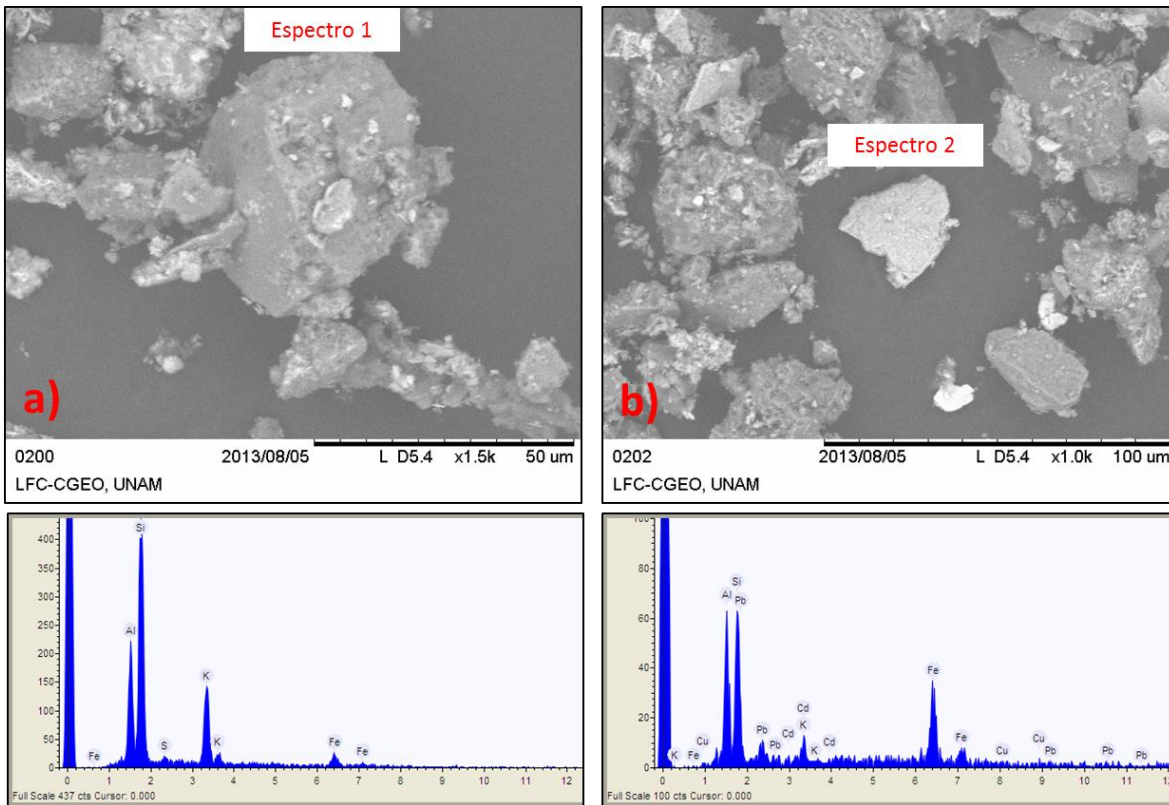


Figura 26. Imágenes y espectros obtenidos por Microscopía Electrónica de Barrido de la muestra Jales 2-1 después del proceso de extracción secuencial

La figura 27 muestran imágenes de partículas y sus espectros obtenidas en Jales 2-6. Se obtuvieron en total de 5 imágenes y 6 espectros de EDS. En la figura 27a se observan partículas, en ambos casos, de un tamaño de alrededor de 100 µm. Las proporciones de los elementos para la imagen 27b son: Fe>S>Cd>Pb>Zn; estas relaciones podrían indicar presencia de minerales de mena (calcopirita, esfalerita, galena), mineras ganga (pirita) además de trazas de Cd en minerales principalmente esfalerita. La presencia de Pb y Zn

podiera responder a una mala extracción en la planta de beneficio de la mina. La imagen 27b muestra en su espectro una distribución porcentual de  $Fe > Cu > Zn$ . En el resto de los espectros también se encontraron  $Ti > Mg$ .

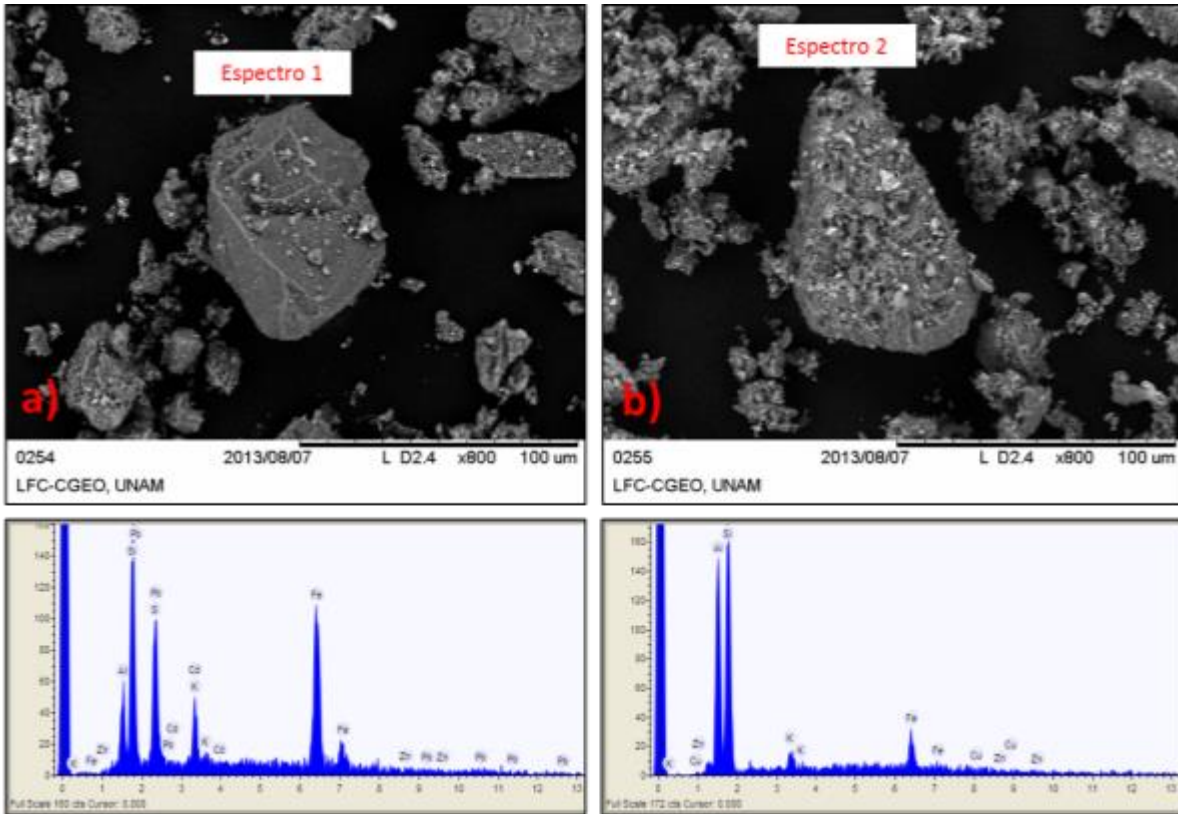


Figura 27. Imágenes y espectros obtenidos por Microscopía Electrónica de Barrido de la muestra Jales 2-6

La figura 28 muestran imágenes y espectros de las partículas obtenidas del residuo sólido de la extracción en la muestra Jales 2-6. Los granos varía de tamaño entre 50 y 30  $\mu m$  en la imagen 28a y 28b, respectivamente.

Se observa en la figura 28a un pico de Fe en mucho mayor proporción de S. En la imagen 28b la distribución de los elementos es tal que  $Fe > Mg > S$ . Los elementos analizados pueden indicar presencia de pirita, en relación con Fe y S mientras que el magnesio podría estar en trazas de otros minerales.

También se detectó elementos como  $Ca > Ti$  dentro de las muestra.

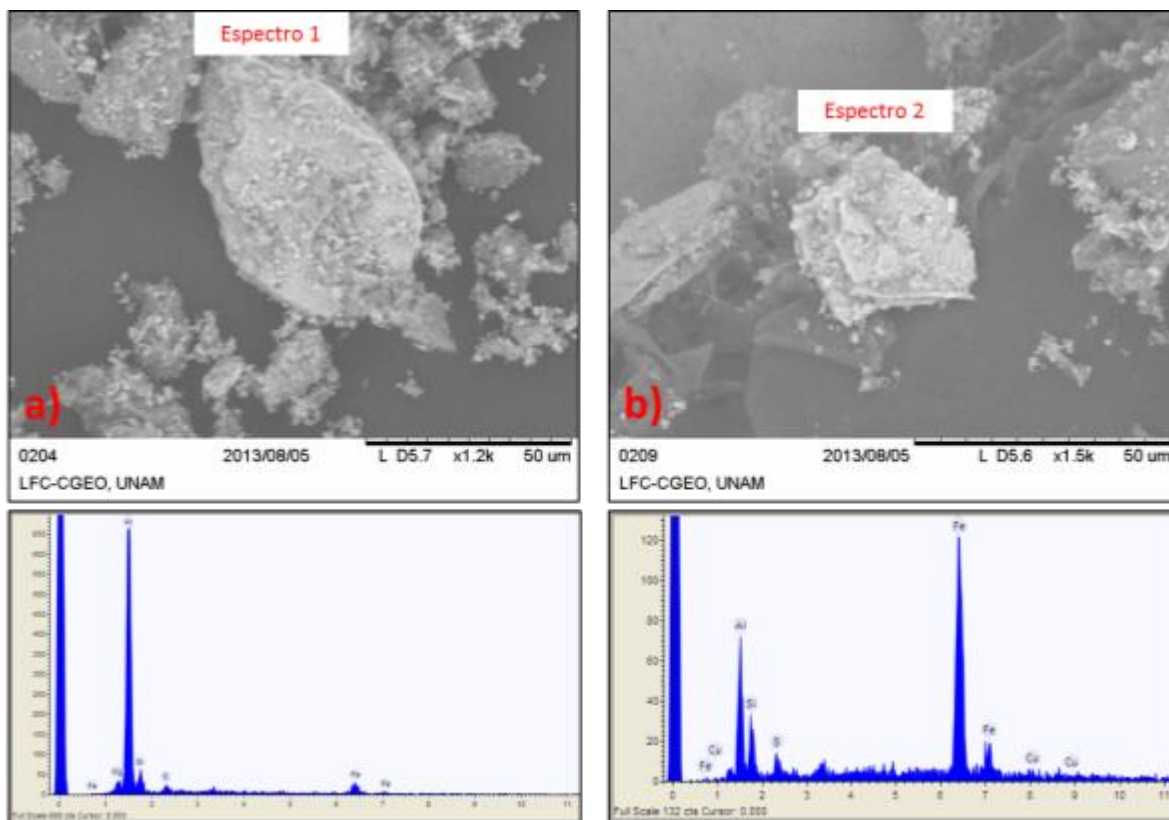


Figura 28. Imágenes y espectros obtenidos por Microscopía Electrónica de Barrido de la muestra Jales 2-6 después del proceso de extracción secuencial

### V.1.2.2 Difracción de rayos X

Se realizaron también 4 difractogramas a partir de las muestras (antes y después de la extracción) Jales 2-1 y Jales 2-6.

La siguiente figura (Fig. 29) muestra el espectro de Jales 2-1. El difractograma obtenido en la muestra indica la presencia de minerales como jarosita ( $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$ ), yeso ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ), cuprita ( $Cu_2O$ ) y magnetita ( $Fe_3O_4$ ). Las concentraciones, aproximadas, de elementos como Cu (500 mg/kg) y Fe (263,000 mg/kg) además de proceso de disolución de minerales primarios de ganga (feldespatos, calcita, etc) agregando iones como  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$  pueden dar como resultado las precipitaciones de los minerales anteriores.

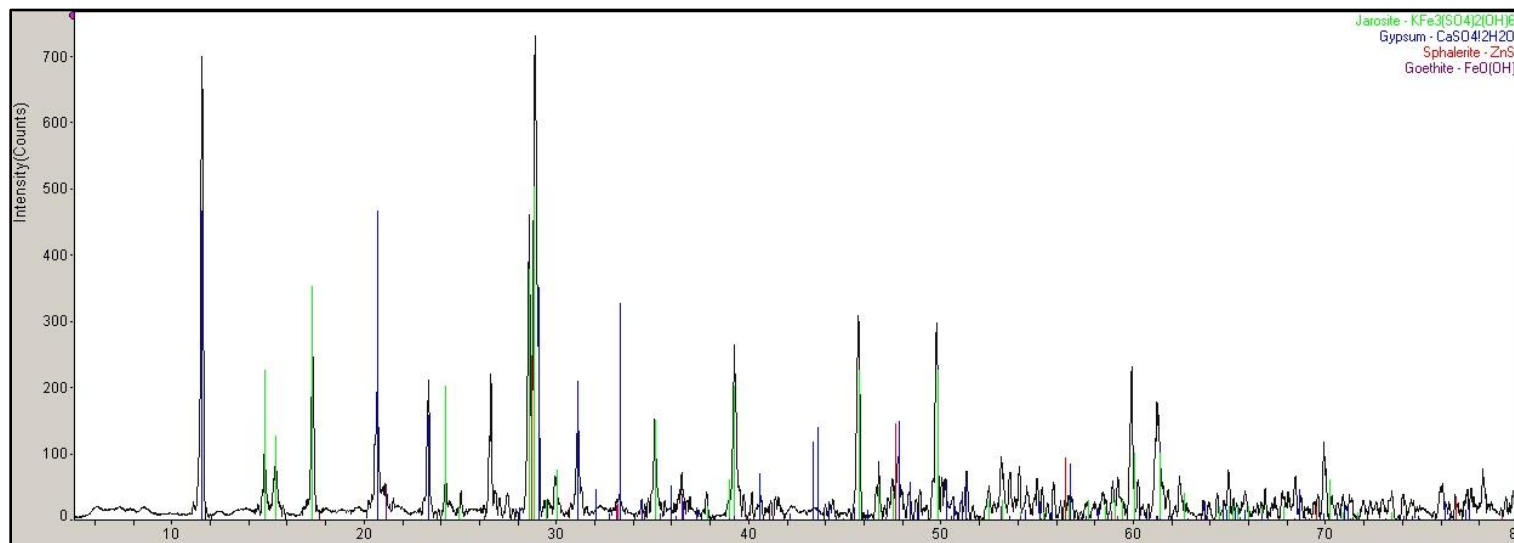


Figura 29. Difractograma de la muestra Jales 2-1

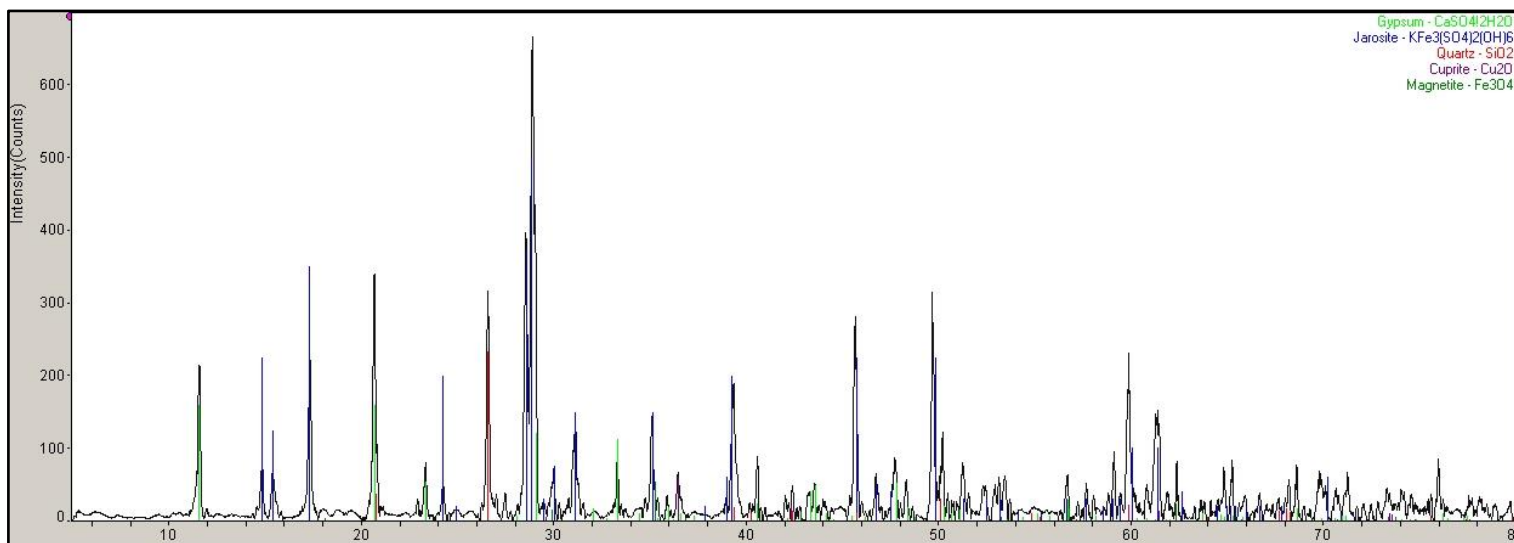


Figura 30. Difractograma de la muestra Jales 2-6

Se encontraron minerales como pirita ( $\text{FeS}_2$ ), cuprita ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) y hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) en el estudio de DRX en los residuos sólidos de la muestra Jales 2-1 después de la extracción. Considerar la gran concentración de Fe y S en la muestra y la baja disolución de los minerales de óxidos secundarios pudiese ser la respuesta a la presencia de los minerales encontrados.

La figura 30 representa el difractograma obtenido de la muestra Jales 2-6 antes de la extracción. Los minerales obtenidos son jarosita ( $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ), yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), esfalerita (Zns) y goethita [ $\text{FeO}(\text{OH})$ ].

La presencia de minerales secundarios como jarosita y goethita los cuales tienen un gran área superficial por lo que pueden absorber o co-precipitar con cantidades significativas de elementos trazas incluyendo metales y metaloides, estos precipitados pueden inmovilizar efectivamente los elementos en un drenaje ácido y funcionar como una atenuación natural (Lottermoser, 2010) pueden indicar condiciones de bajo pH (1.5 a 3) y alto contenido de sulfatos ( $>3000 \text{ mg/L}$ ) (Jambor et al. 2003).

El análisis de DRX sobre los residuos de la extracción en la muestra Jales 2-6 presentó minerales de jarosita ( $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ) y magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).

La disolución de minerales de aluminosilicatos, en este caso particular microclina, pudiera ser la fuente de  $\text{K}^+$  en el medio para la formación de jarosita. El mineral de magnetita pudiese no haber estado en suficiente cantidad para presentarse en el difractograma de la muestra anterior pero debido a la disolución de algunos minerales después de la extracción se puede observar. La meta-estabilidad de la jarosita puede provocar una nueva disolución y así como puede adsorbe metales un cambio en pH pudiera liberarlos en el sistema.

### V.1.2.3 Concentración digestión ácida

Las concentraciones de los elementos en el muestreo realizado en Jales 2 se muestra en la tabla 14.

Existe una gran diferencia en los valores extremos de las concentraciones, lo cual se puede identificar en la desviación estándar. Le promedio y la mediana de las muestras no se ven afectadas por estas variaciones en las concentraciones.

En la figura 31 nos indica la variación de las concentraciones de los elementos a profundidad dentro de Jales 2. Aunque no existen tendencias firmes para cada uno de los metales y As en la gráfica, se puede relacionar una similitud entre Cd, Cu y Zn donde existe una disminución en sus concentraciones hasta llegar a tal vez un punto de inflexión a la profundidad aproximada de 12 m para aumentar sus valores. El Pb muestra una tendencia de aumento hasta los 12 m y luego existe una disminución de él. El As mantiene un constante de crecimiento a profundidad. En relativa igualdad de concentraciones sin importar la profundidad se encuentra el Fe.

Tabla 14. Resultado de concentraciones de los metales en Jales 2

mg/kg	As	Cd	Cu	Fe	Pb	Zn
Jales 2-1	4963.52	24.06	503.44	211611.65	4352.82	1813.02
Jales 2-2	6111.21	33.15	364.95	263724.59	5314.73	3236.54
Jales 2-3	6267.91	35.13	383.78	268979.69	7531.50	2649.53
Jales 2-4	8517.45	11.44	309.37	254015.37	10816.19	1255.77
Jales 2-5	7600.03	40.41	437.65	250647.87	3878.97	3023.72
Jales 2-6	10536.34	61.51	553.65	273513.55	4827.44	5290.77
L.D. (mg/L)	0.0230	0.0025	0.0088	-	-	0.0092
L.C. (mg/L)	0.0767	0.0083	0.0293	-	-	0.0307

Todos los elementos muestran un cierto incremento en sus concentraciones hacia la profundidad aun cuando existen algunas variaciones en su recorrido. La forma descendente de las concentraciones de los metales y el As se describe de la siguiente manera: Fe>>As>Pb>Zn>Cu>>Cd.

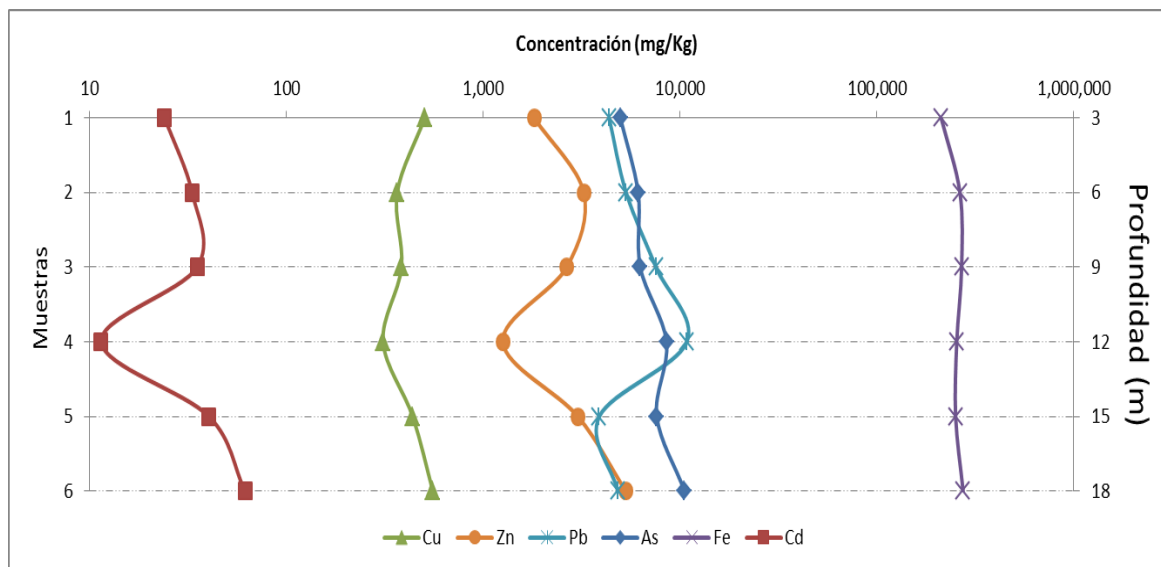


Figura 31. Variación a profundidad de las concentraciones de los elementos en Jales 2

#### V.1.2.4 Concentración extracción secuencial

Las concentraciones de los elementos obtenidos en la extracción secuencial de las muestras Jales 2-1 (Menor contenido de As en digestión total) y Jales 2-6 (Mayor contenido de As en digestión total) están contenidos en la tabla 15.

Considerando las sumatorias de todos los elementos en las dos muestras dentro de las cinco fracciones en la extracción podemos saber de forma general que la concentración mayor de los elementos está dentro de la fracción sulfuros (aproximadamente 51,900 mg/kg). La fracción soluble contiene 5,800 mg/kg, en carbonatos existe 88.5 mg/kg, la fracción (oxi)hidróxidos de Fe tiene un valor de 4,200 mg/kg mientras que en óxidos de Fe se concentra 23,900 mg/kg.

La figura 32 representa las concentraciones de las muestras Jales 2-1 y Jales 2-6. En la muestra Jales 2-1 las concentraciones mayores de As (1,731 mg/kg), Fe (17,742.5 mg/kg) y Pb (11.5 mg/kg) están dentro de la fracción sulfuros, mientras que en los metales Cd (9.2 mg/kg), Cu (129.5 mg/kg) y Zn (1,622.5 mg/kg) la fracción soluble contiene sus valores máximos.

La fracción soluble y carbonatos contienen las concentraciones menores de As (<L.C.), los valores menores de Cd (<L.C.) están dentro de (oxi)hidróxidos de Fe, óxidos de Fe y sulfuros, las concentraciones menores de Cu (6.7 mg/Kg), Fe (<L.C.) y Zn (68.7 mg/kg) están en carbonatos mientras que el Pb (<L.C.) en solubles, carbonatos y (oxi)hidróxidos de Fe.

La muestra Jales 2-6 tiene la misma distribución de los elementos en cuanto a la ubicación de sus concentraciones mayores a la muestra anterior: el As (2,783 mg/kg), Fe (28,780 mg/kg) y Pb (85.3 mg/kg) están dentro de la fracción sulfuros y Cd (27.8 mg/kg), Cu (241.8 mg/kg) y Zn (1,622.5 mg/kg) en fracción solubles.

Las concentraciones menores de los elementos están distribuidas de la siguiente forma: As (<L.C.) en soluble y carbonatos; Cd (<L.C.) en (oxi)hidróxidos de Fe, óxidos de Fe y sulfuros; Cu (<L.C.), Fe (<L.C.) y Zn (9.5 mg/kg) en carbonatos mientras que el Pb (<L.C.) en carbonatos, (oxi)hidróxidos de Fe y óxidos de Fe.

Tabla 15. Concentración de elementos obtenidos por medio de la extracción secuencial en Jales 2

mg/kg	As		Cd		Cu		Fe		Pb		Zn		Total
	Jales 2-1	Jales 2-6	Jales 2-1	Jales 2-6	Jales 2-1	Jales 2-6	Jales 2-1	Jales 2-6	Jales 2-1	Jales 2-6	Jales 2-1	Jales 2-6	
<b>Soluble</b>	<L.C.	<L.C.	9.2	27.8	129.5	241.8	2383.0	452.3	<L.C.	1.0	978.0	1622.5	5845.0
<b>Carbonatos</b>	<L.C.	<L.C.	2.1	1.5	6.7	<L.C.	<L.C.	<L.C.	<L.C.	<L.C.	68.7	9.5	88.5
<b>(Oxi)Hidróxidos de Fe</b>	275.2	185.4	<L.C.	<L.C.	32.2	28.6	1860.5	1690.0	<L.C.	<L.C.	110.6	88.9	4271.4
<b>Óxidos de Fe</b>	551.5	727.5	<L.C.	<L.C.	24.4	41.0	10362.5	12067.5	2.5	<L.C.	82.8	132.2	23991.8
<b>Sulfuros</b>	1731.0	2783.0	<L.C.	<L.C.	93.2	45.0	17742.5	28780.0	111.5	85.3	114.8	473.1	51959.2
<b>L.D. (mg/L)</b>	0.5276		0.0059		0.0058		0.2213		0.0024		0.0002		
<b>L.C. (mg/L)</b>	1.9086		0.0196		0.0193		0.7376		0.0080		0.0006		

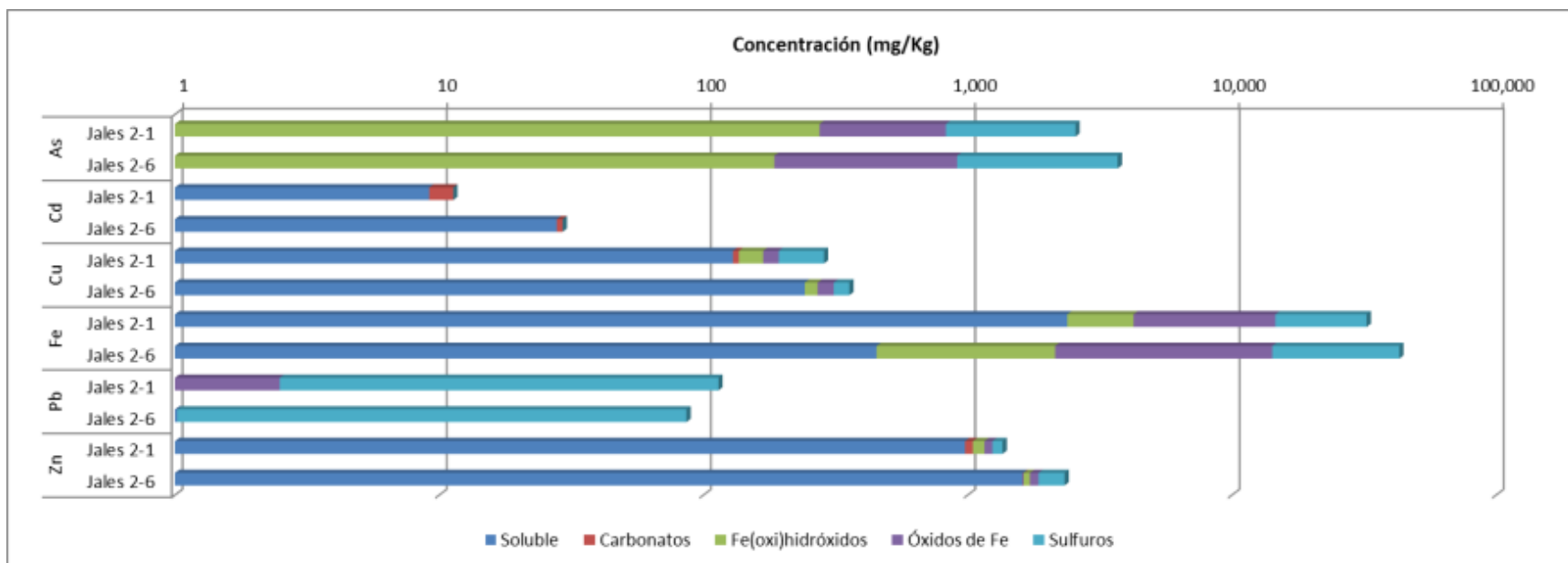


Figura 32. Distribución de las concentraciones de elementos en las fases químicas dentro de Jales 2



Se representa la distribución en porcentajes de las concentraciones de los elementos obtenidos en el proceso de extracción de las muestras Jales 2-1 y Jales 2-6 en la figura 33. La fracción sulfuro contiene el 60.3% del total de las concentraciones de los elementos. El resto de los porcentajes es el siguiente: Soluble 6.8%, carbonatos 0.1%, (oxi)hidróxidos de Fe 5.0% y óxidos de Fe 27.8%. Aun cuando la mayoría de los elementos está dentro de las fracciones menos móviles las cantidades dentro de una fase móvil es a considerar altas.

En la muestra Jales 2-1 los mayores porcentajes de los elementos el As (67.7%), Fe (54.8%) y Pb (97.8%) están dentro de los sulfuros; Cd (81.2%), Cu (45.3%) y Zn (72.2%) se encuentran en la fracción soluble.

Los porcentajes más bajos de los elementos están distribuidos de la siguiente manera: As (0.0%) soluble y carbonatos; Cd (0.0%) en (oxi)hidróxidos de Fe, óxidos de Fe y sulfuros; Cu (2.3%), Fe (0.0%) y Zn (5.1%) en carbonatos; mientras que el Pb (0.0%) en soluble, carbonatos y (oxi)hidróxidos de Fe.

Las muestra de jales 2-6, la cual representa la de mayor concentración de As en Jales 2 según la digestión ácida, indica que los porcentajes mayores de As (75.3%), Fe (66.9%) y Pb (98.8%) están dentro de la fracción sulfuros mientras que para Cd (95.0%), Cu (67.8%) y Zn (69.8%) están en la fracción soluble.

Los porcentajes menores de los elementos de las muestras anteriores se distribuyen de la siguiente forma: As (0.0%) soluble y carbonatos; Cd (0.0%) (oxi)hidróxidos de Fe, óxidos de Fe y sulfuros; Cu (0.0%), Fe (0.0%) y Zn (0.4%) en carbonatos; Pb (0.0%) en carbonatos, (oxi)hidróxidos de Fe y óxidos de Fe.

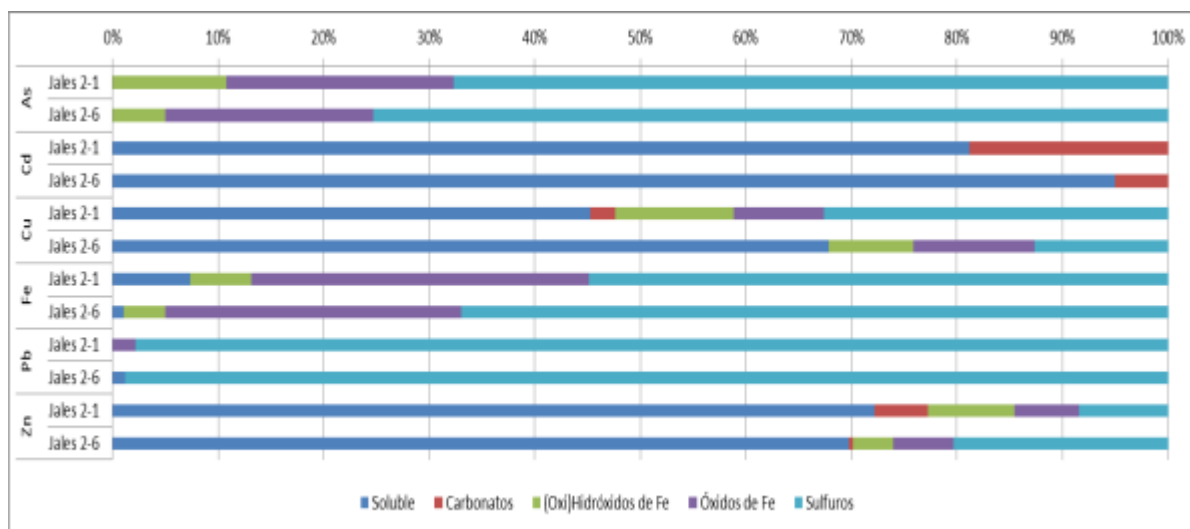


Figura 33. Distribución en porcentaje de concentraciones de metales obtenidas en fases químicas dentro de Jales 2

Las concentraciones de As y Fe dentro de las fases de sulfuros pueden encontrarse dentro de los minerales pirita, hematita, jarosita, piritita y magnetita detectados dentro en la DRX. Además los estudios de EDS indican la presencia de S, Mg, Cu, Ca y Pb lo que correspondería a otros minerales detectados como ortoclasa, microclina y yeso. No se encontraron minerales de Pb por medio de DRX pero que estuvo presente en los espectros de EDS junto con S lo que indicaría la presencia de galena que probablemente tuvo baja intensidad en los difractogramas. El Ca encontrado dentro de los espectros de EDS indicaría la posible presencia de calcita, mineral primario y/o secundario que puede ayudar en el proceso de neutralización dentro de los jales. En la fase soluble se detectaron mayormente los elementos de Cd, Cu y Zn. Éstos pueden estar dentro de trazas en otros minerales y la presencia de S en estudios de EDS puede indicar presencia de sulfatos con estos elementos.

### V.1.3 Caracterización de Jales 3

#### V.1.3.1 Análisis de imágenes MEB y espectros EDS

En la figura 34 se observan partículas obtenidas en la muestra Jales 3-4. Los granos varían de 20 a 60  $\mu\text{m}$  (34a y 34b, respectivamente). Los espectros de cada una de las imágenes indican una proporción de elementos de Fe>S>As. Probablemente se encuentren formando minerales como pirita y arsenopirita (minerales del yacimiento dentro de la mina Aurora). Además de los minerales anteriores se han registrado presencia de rejalgar (AsS) y oropimento ( $\text{As}_2\text{S}_3$ ) (Alpers et al. 1994; Lottermoser 2010). Además existe presencia de Zr en la muestra Jales 3-4.

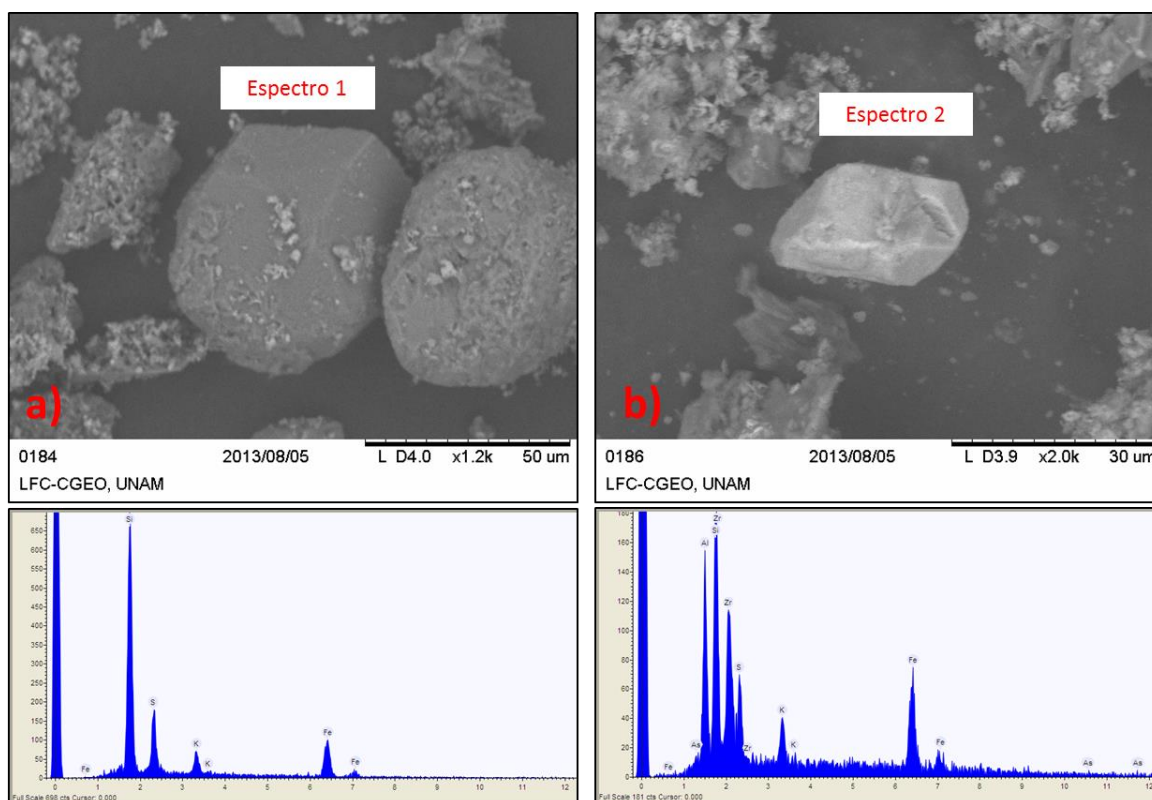


Figura 34. Imágenes y espectros obtenidos por Microscopía Electrónica de Barrido de la muestra Jales 3-4

Los imágenes de partículas y espectros EDS de los residuos de la extracción de la muestra Jales 3-4 son representados en la figura 35. La figura 35a y 35b muestran granos varían entre 30 a 70  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Los resultados de los espectros obtenidos en las partículas muestran una proporción en los elementos de  $\text{Fe} > \text{S} > \text{Cd} > \text{Pb} > \text{As} > \text{Cu}$ . Los metales anteriores junto con el As pueden indicar presencial de minerales primario tanto de mena (galena, calcopirita) y de ganga (pirita, arsenopirita). Estos minerales pueden contener las trazas de Cd. El Mo también está presente en la muestra y podría estar formando molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ) ya que estudios previos (Alpers et al. 1994; Lottermoser 2010) lo registran en los desechos mineros.

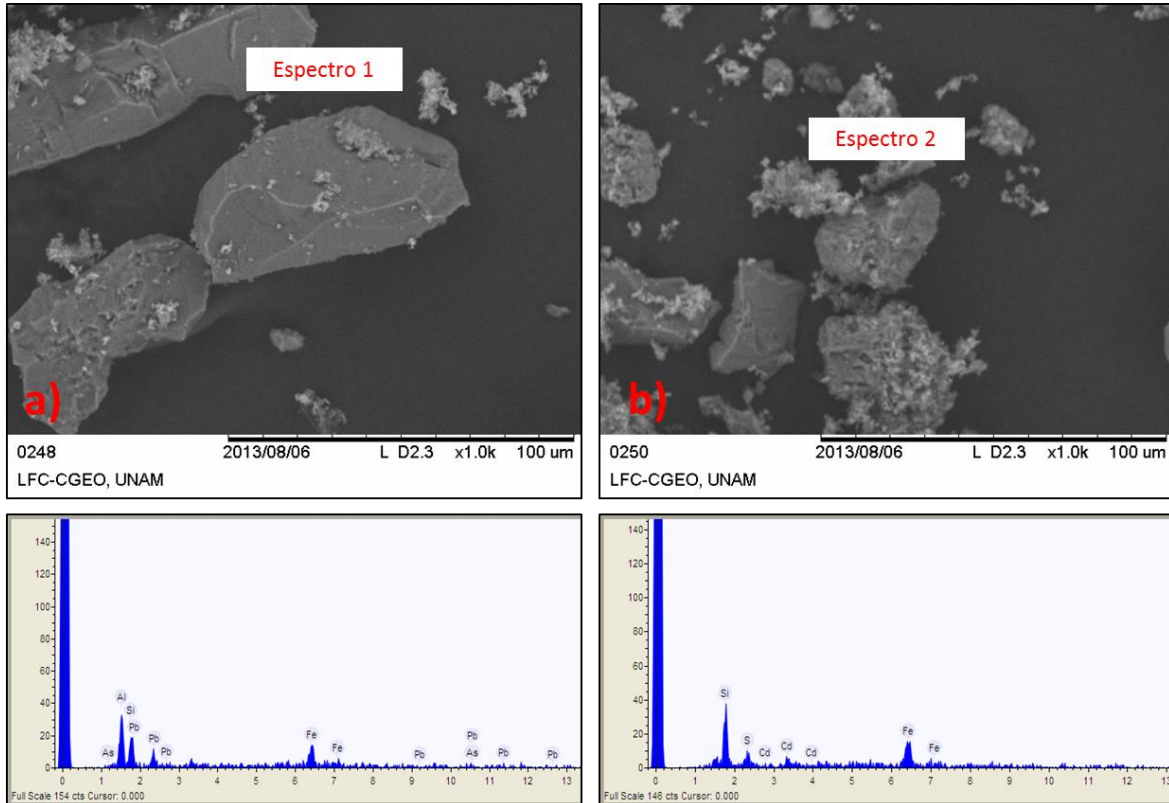


Figura 35. Imágenes y espectros obtenidos por Microscopía Electrónica de Barrido de la muestra Jales 3-4 después del proceso de extracción secuencial

De la muestra Jales 3-10 se obtuvieron un total de 6 imágenes de partículas y 8 espectros de EDS. Se mostrarán dos granos representativos de la muestra junto a sus espectros. En la figura 36a la partícula tiene aproximadamente un tamaño de 20  $\mu\text{m}$  mientras que 36b es de 50  $\mu\text{m}$ . Los espectros obtenidos sobre la muestra nos muestran una proporción de elemento tal que  $\text{Fe} > \text{S} > \text{Ca} > \text{As} > \text{Zn}$ . La presencia de estos minerales como esfalerita (como minerales de mena) de pirita y arsenopirita (como ganga). La presencia de estos elementos dentro de los jales indicaría una pobre recuperación de los metales de extracción. Existe también presencia de Cu lo que puede indicar la existencia de sulfuros de cobre como calcopirita, bornita, etc. en la muestra.

Las relaciones de todos los elementos puede también inferir presencia de minerales como bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ), enargita ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ ), rejalgar ( $\text{AsS}$ ) y oropimento ( $\text{As}_2\text{S}_3$ ) como se ha estudiado en jales mineros (Alpers et al. 1994; Lottermoser 2010).

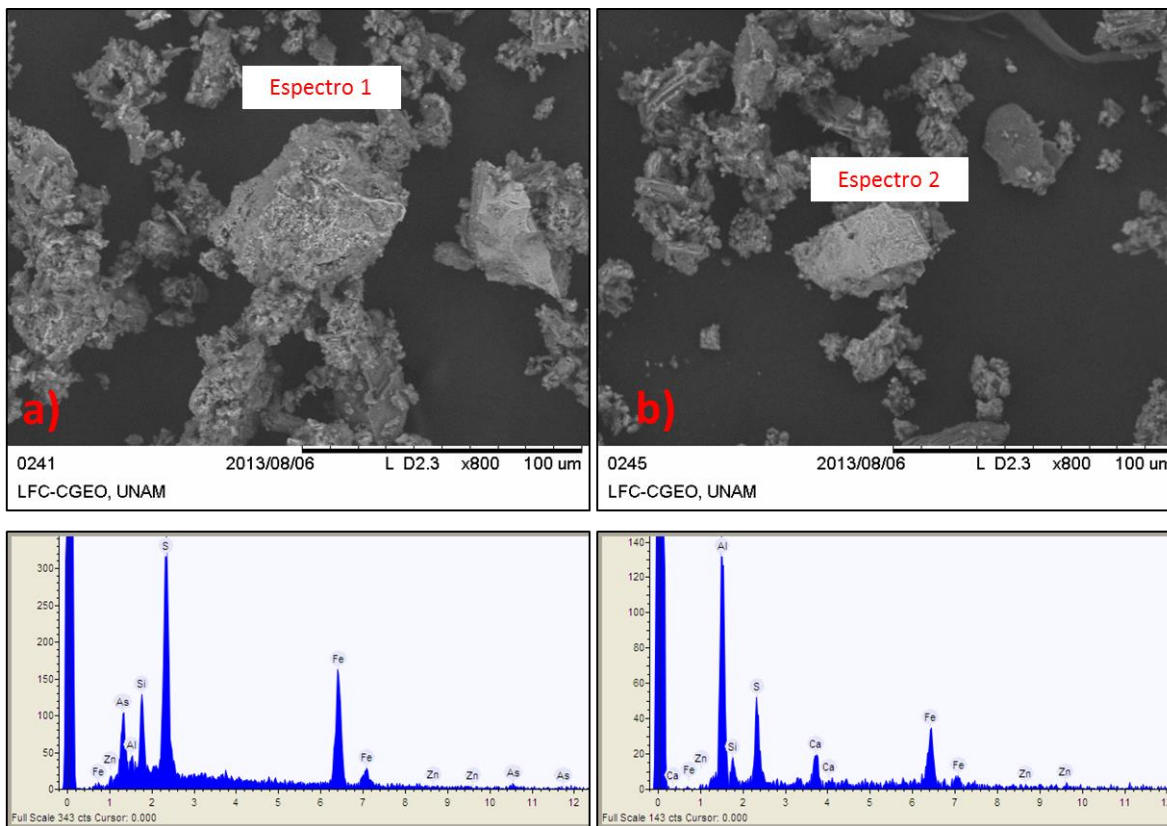


Figura 36. Imágenes y espectros obtenidos por Microscopía Electrónica de Barrido de la muestra Jales 3-10

De los residuos obtenidos en la extracción de Jales 3-10 se obtuvieron dos imágenes de microscopía y 5 espectros EDS. La figura 37 muestra parte de la información anterior. Los espectros arrojaron las proporciones de los siguiente elementos:  $\text{Fe} > \text{S}$ . Estos elementos pueden indicar presencia de pirita y además de referir que la extracción secuencial empobreció la muestra con metales y As. El tamaño de las partículas varían de 50 a 80  $\mu\text{m}$  (37a y 37b, respectivamente).

Existe también Mo en los espectros dentro de la muestra, aunque no existe referencia de minerales de Mo dentro del yacimiento en la mina Aurora estudios sobre desechos mineros sugieren presencia de molibdenita (Alpers et al. 1994; Lottermoser, 2010).

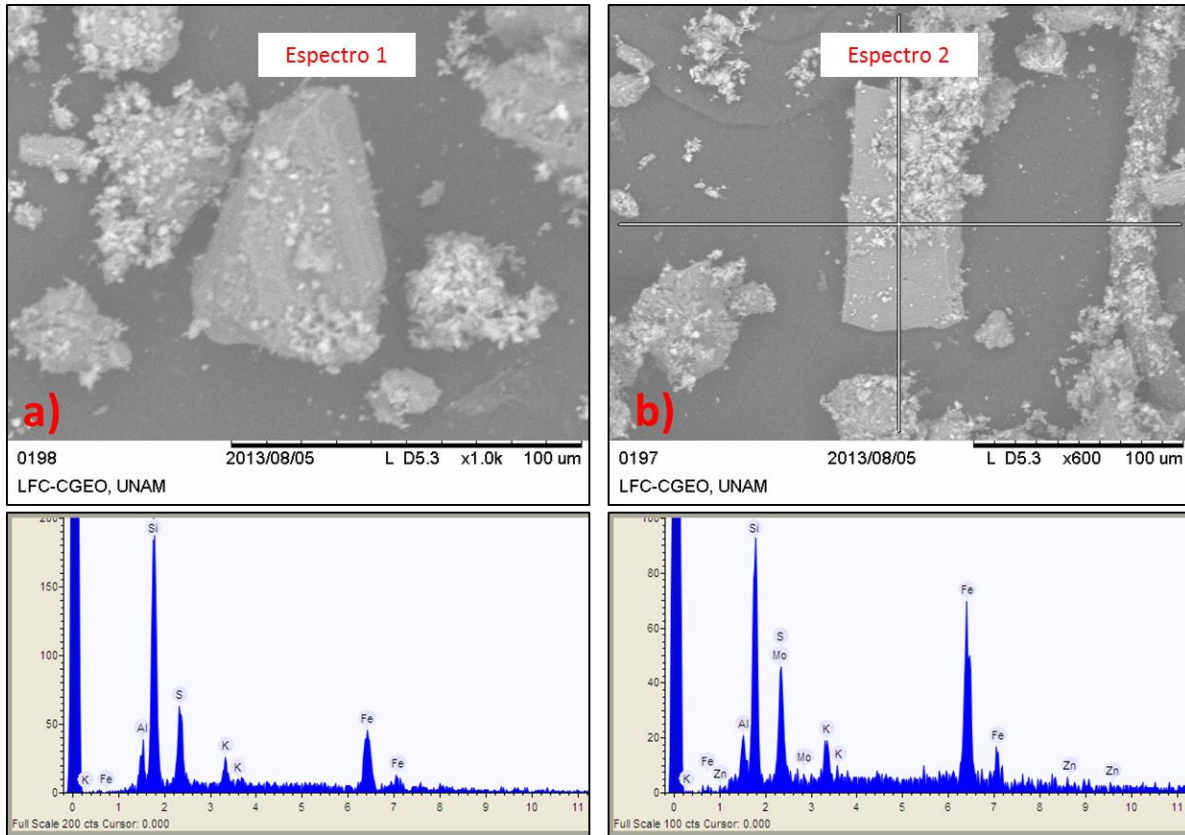


Figura 37. Imágenes y espectros obtenidos por Microscopía Electrónica de Barrido de la muestra Jales 3-10 después del proceso de extracción secuencial

En la muestra de Jales 3-7 se obtuvieron 6 espectros de EDS y 4 imágenes de partículas. Los granos de la figura 38a y 38b son de aproximadamente 40 y 10  $\mu\text{m}$ , respectivamente. La figura 38b muestra un brillo que podría contrastar por la presencia de metales en él aunque los espectros obtenidos son indican que las proporciones correspondientes son  $\text{Fe} > \text{S}$  sin algún otro elemento además se puede observar el grano que fue atacado por los compuesto químico en la extracción secuencial. La relación encontrada de elementos puede indicar presencia de pirita.

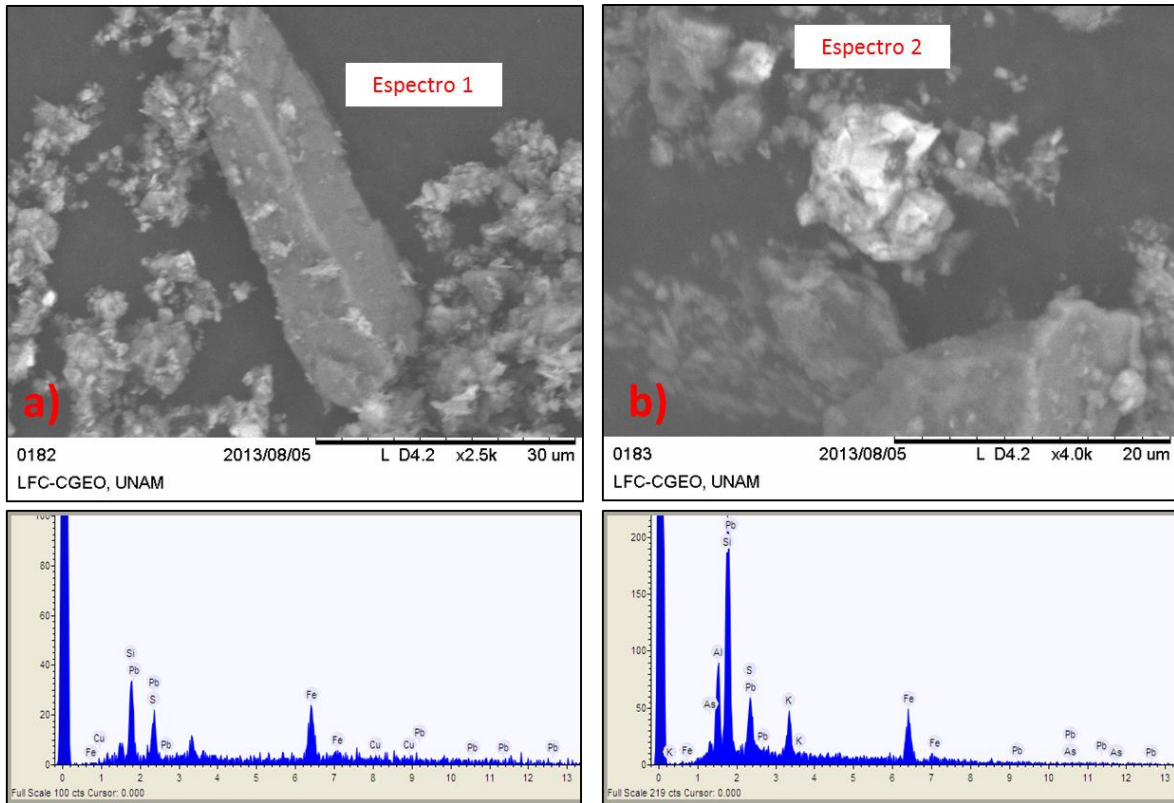


Figura 38. Imágenes y espectros obtenidos por Microscopía Electrónica de Barrido de la muestra Jales 3-7

A los residuos obtenidos de la extracción de la muestra Jales 3-7 se les analizaron por medio de MEB y espectros de EDS dando como resultado la presencia de relativa de Fe>S>Pb>As>Zn>Cd. La figura 39 muestra las imágenes de dos partículas y sus gráficas de espectros de la muestra; de manera total se realizaron 6 espectros EDS y 4 imágenes.

La relación de los elementos indicaría presencia de minerales de sulfuros (probablemente pirita, arsenopirita, galena, esfalerita) y el Cd como traza principalmente dentro de la esfalerita. Existe también presencia de Cu lo que posiblemente infiere calcopirita. El tamaño de partícula de 39a y 39b varían de 100 a 50  $\mu\text{m}$ , respectivamente.

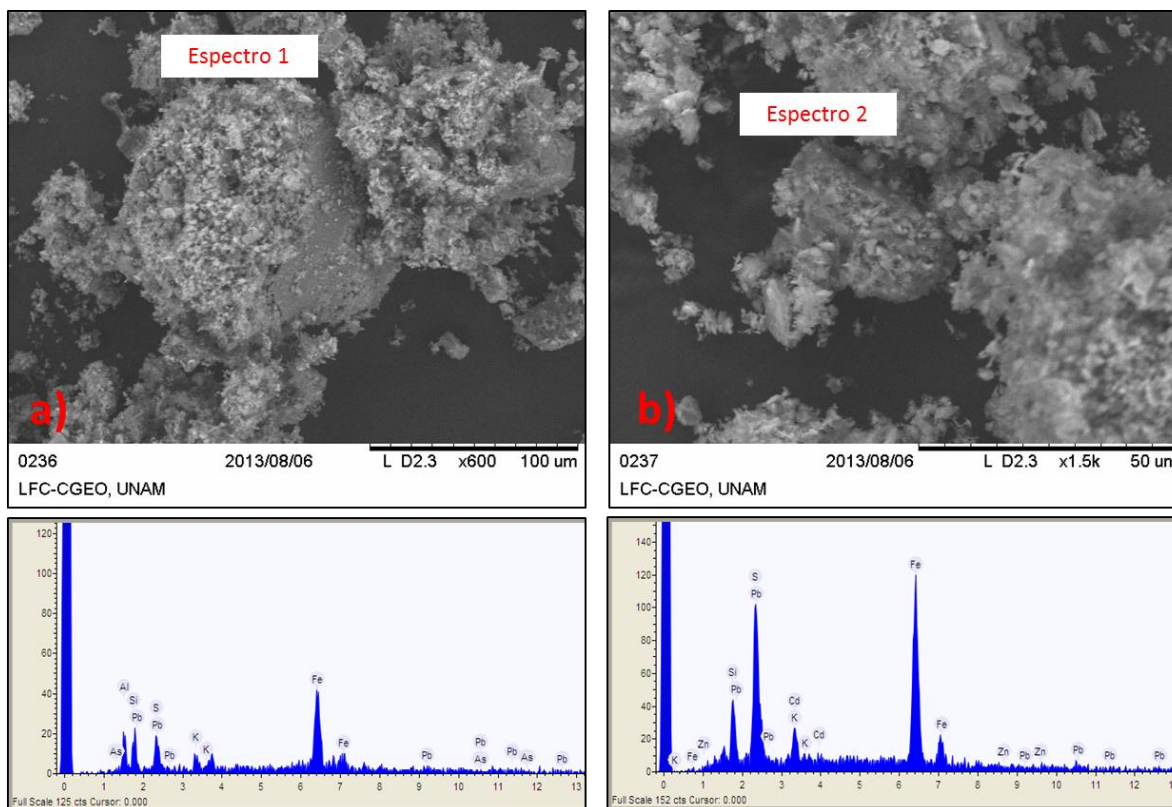


Figura 39. Imágenes y espectros obtenidos por Microscopía Electrónica de Barrido de la muestra Jales 3-7 después del proceso de extracción secuencial

### V.1.3.2 Difracción de rayos X

Se realizaron las extracciones de tres muestras de Jales 3 (Jales 3-4, Jales 3-7, Jales 3-10) de las cuales se consideró generar difractogramas de cada una de ellas considerando los residuos después de la extracción. No existe difractograma del residuo de la extracción de la muestra Jales 3-10 debido a que no hubo material sólido.

La figura 40 indica la presencia de minerales como jarosita ( $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$ ), yeso ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) y esfalerita ( $ZnS$ ) dentro de la muestra Jales 3-4. La disolución de cationes en los jales a través de minerales de aluminosilicatos pudiera ser la fuente de elementos para formar minerales secundarios como jarosita y yeso. Debido a la alta y relativa solubilidad de yeso y jarosita, respectivamente, su presencia puede estar fuertemente relacionada a condiciones áridas (Lottermoser, 2010) tal como en la zona de Xichú, lo que indicaría que aun cuando puedan adsorber elementos trazas la liberación de ellos sería rápidamente influenciada por alguna precipitación en la zona.

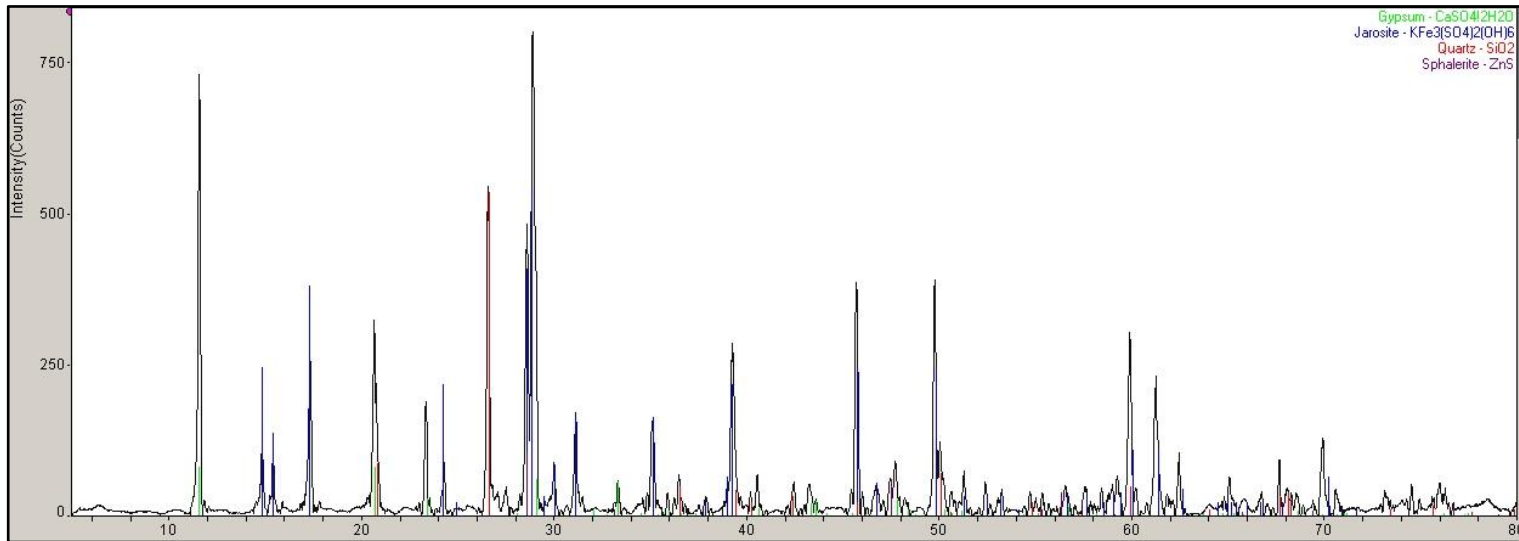


Figura 40. Difractograma de la muestra Jales 3-4

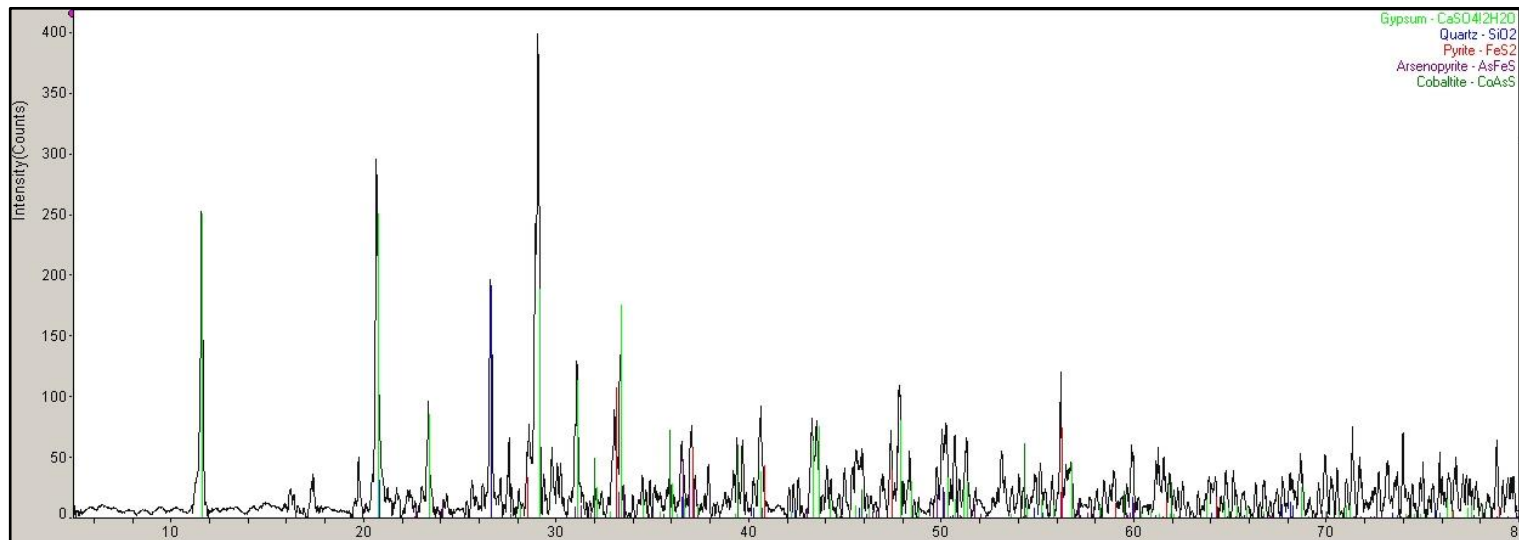


Figura 41. Difractograma de la muestra Jales 3-10



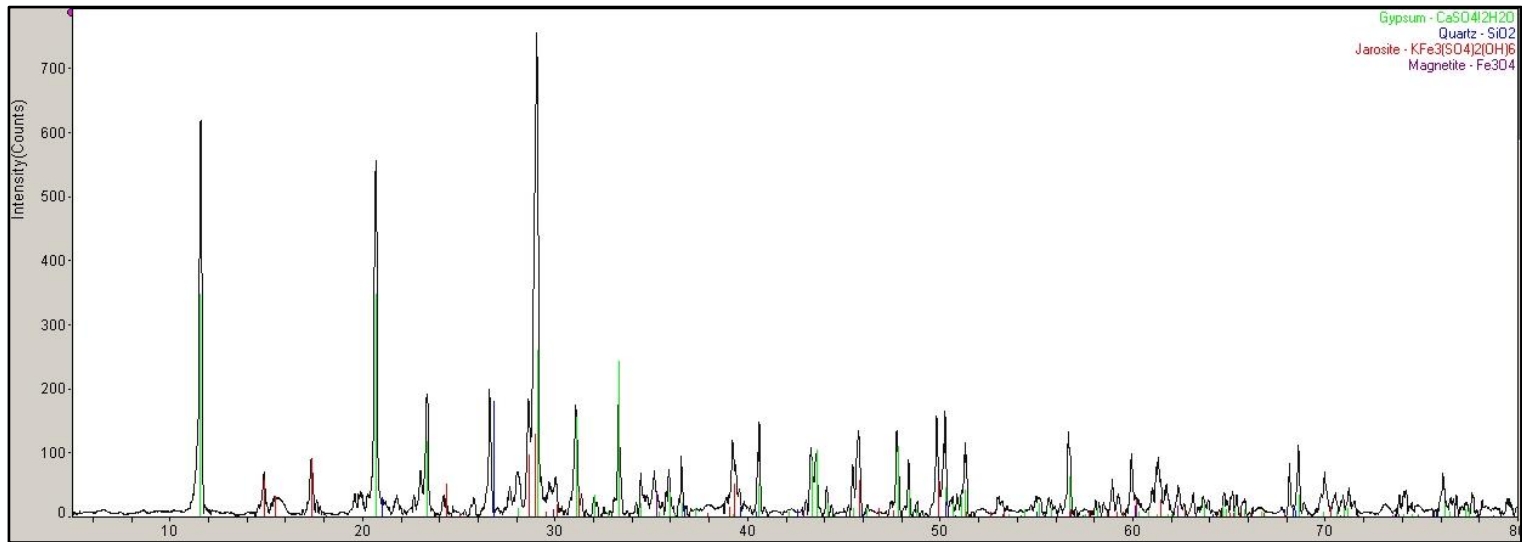


Figura 42. Difractograma de la muestra Jales 3-7

Los minerales encontrados después de la extracción de la muestra Jales 3-4 son jarosita ( $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$ ), esfalerita ( $ZnS$ ) y goethita [ $FeO(OH)$ ].

Como se había expresado en la extracción de la muestra Jales 3-10 no hubo residuo sólido para poder realizar un difractograma por lo que solo existe estudio de DRX de la muestra.

La figura 41 indica la presencia de minerales, en la muestra Jales 3-10, como yeso ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ), pirita ( $FeS_2$ ), arsenopirita ( $AsFeS$ ) y cobaltita ( $CoAsS$ ). La gran concentración aproximada de Fe (210,000 mg/kg) y As (17,000 mg/kg) en la muestra junto con el S que se considera “natural” debido a la geología de la zona y sus residuos puedan indicar la presencia de los minerales de arsenopirita y pirita. La presencia de estos minerales indica también la posible disolución de estos minerales considerando que la movilización en el caso de As se da en ambientes de bajo pH y ambiente oxidante (Lottermoser, 2010).

La presencia de yeso en la muestra indica que su disolución generaría ninguna acidez al medio y que puede limitar la solubilidad del As debido a la sustitución del arsénico por sulfatos como en jarosita y yeso además de carbonatos como en calcita (Lottermoser, 2010).

Los minerales presentes en la figura 42 son los encontrados en el análisis de DRX en la muestra Jales 3-7. Se presentaron jarosita ( $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$ ), yeso ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) y magnetita ( $Fe_3O_4$ ). A excepción de magnetita la cual presenta una baja solubilidad en condiciones ambientales la jarosita y el yeso pueden presentar una disolución de sus iones siendo fuente de sulfatos, calcio e hierro. La presencia de  $Fe^{3+}$ , gracias a la disolución de jarosita, puede aumentar la oxidación de pirita y generar acidez dentro del medio.

En el análisis de la muestra de los residuos después de la extracción secuencial de Jales 3-7 no existe la presencia de minerales ajenos a la ganga del yacimiento, lo que puede indicar una alta disolución o empobrecimiento de minerales de sulfuros. Al contrario de los sulfuros puede haber “enriquecimiento” de silicatos que pudiesen tener una gran intensidad de sus difractogramas “opacando” cualquier otro mineral presente.

### V.1.3.3 Concentración digestión ácida

La tabla 16 indica las concentraciones de los elementos en el perfil de Jales 3. Las mayores concentraciones de los elementos se dan en la parte media-baja del perfil. Los resultados muestran una gran desviación estándar para cada elemento en contradicción a los valores de promedio y la mediana que tienen valores cercanos.

La figura 43 muestra las variaciones de las concentraciones de los metales a profundidad. No se aprecia una tendencia general para todos los elementos, aunque existen ciertos rasgos a considerar. Se puede observar un incremento en los valores de los elementos en el segundo tercio de la sección en el caso de Cd, Cu y Zn caso contrario de Pb, As y Fe. En el último tercio se invierte la tendencia semejando a un decremento de Cd, Cu y Zn mientras que se aumentan las concentraciones de Pb, As y Fe.

Tabla 16. Resultado de concentraciones de los metales en Jales 3

mg/kg	As	Cd	Cu	Fe	Pb	Zn
Jales 3-1	9818.20	23.90	957.43	114015.19	7947.34	3469.96
Jales 3-2	7643.22	43.67	919.82	211227.76	12905.10	4061.24
Jales 3-3	9889.98	38.87	631.32	196847.34	7244.98	3260.05
Jales 3-4	2329.62	35.95	568.86	150650.50	4472.11	2529.50
Jales 3-5	7485.04	42.17	1023.02	197995.80	3743.76	2540.02
Jales 3-6	10769.06	31.64	1178.28	189730.89	5428.92	2099.03
Jales 3-7	38631.14	77.31	753.49	130636.21	7607.71	5248.00
Jales 3-8	9259.52	56.64	844.75	140817.31	4829.41	4692.73
Jales 3-9	4510.26	71.54	1068.92	56611.91	669.07	11180.29
Jales 3-10	17224.52	83.04	1636.61	210537.01	5210.92	8554.73
Jales 3-11	5430.32	21.72	615.67	235725.14	4551.48	1186.06
Jales 3-12	6101.59	10.18	473.89	222783.25	6522.97	1347.52
Jales 3-13	30553.13	29.08	938.03	292666.25	14945.85	2867.75
Jales 3-14	10925.99	38.32	566.46	370733.93	6968.15	3508.59
L.D. (mg/L)	0.0206	.0148	0.0243	0.0155	0.0154	0.0138
L.C. (mg/L)	0.0686	0.0493	0.0810	0.0516	0.0513	0.0460

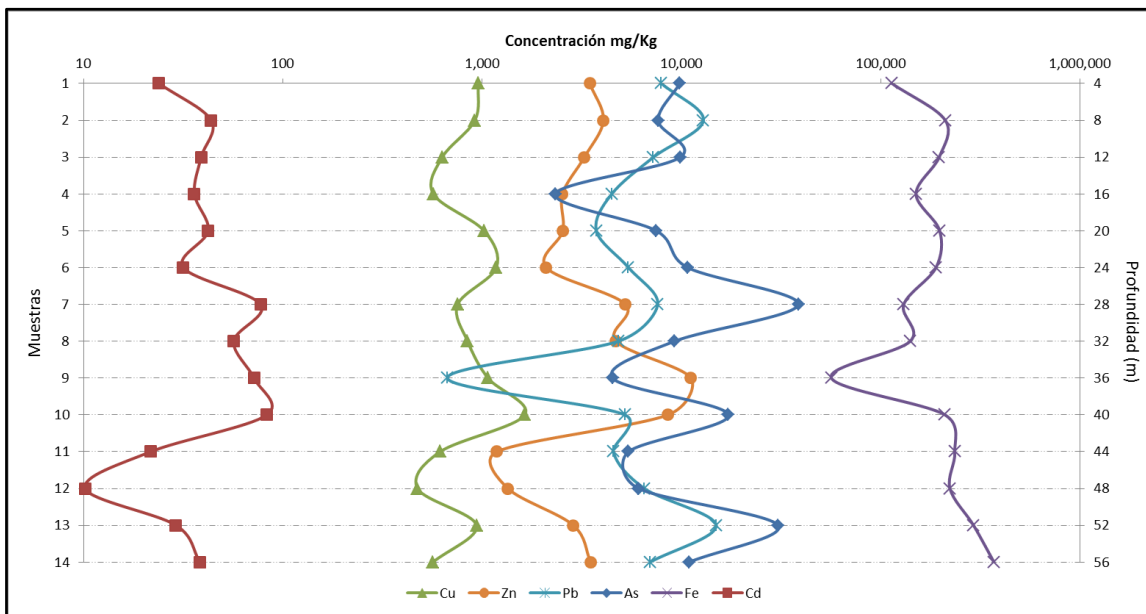


Figura 43. Variación a profundidad de las concentraciones de los elementos en Jales 3

De manera general los elementos As, Cd, Fe y Zn aumentan sus concentraciones en la parte final de la sección con respecto a la superficie, mientras que Cu y Pb la tendencia es contraria. De la siguiente manera se expresan las concentraciones de los elementos: Fe>>As>Pb>Zn>Cu>>Cd.

#### V.1.3.4 Concentración extracción secuencial

Las concentraciones de los metales y As obtenidas en la extracción secuencial de las muestras Jales 3-4 (Menor concentración de As en digestión total), Jales 3-10 (Concentración intermedia de As en digestión total) y Jales 3-7 (Mayor concentración de As en digestión total) están expresadas en la tabla 17.

Haciendo una sumatoria de los elementos por cada fracción de extracción de las tres muestras, los resultados indican que en sulfuros se encuentra la mayor concentración de los metales y As (aproximadamente 99,300 mg/kg). En las diferentes fracciones se tienen las siguientes concentraciones aproximadas acumuladas: Soluble (33,400 mg/kg), carbonatos (1,200 mg/kg), (oxi)hidróxidos de Fe (15,300 mg/kg), óxidos de Fe (47,700 mg/kg).

La figura 44 indica que en la muestra Jales 3-4, los elementos As (621.8 mg/kg), Fe (12,195 mg/kg) y Pb (116.6 mg/kg) tienen sus concentraciones mayores en la fracción sulfuros mientras que Cd (23.8 mg/kg), Cu (236.3 mg/kg) y Zn (1,551.5 mg/kg) se encuentran en la fracción soluble.

En el caso de las concentraciones menores de los elementos en cada paso de la extracción la distribución es la siguiente: As (<L.C.) y Pb (<L.C.) en carbonatos y (oxi)hidróxidos de Fe; Cd (<L.C.) en (oxi)hidróxidos de Fe, óxidos de Fe y sulfuros; Cu (5.3 mg/kg) y Fe (<L.C.) en carbonatos mientras que el Zn (83.4 mg/kg) en sulfuros.

La muestra Jales 3-10 en relación a la distribución de las concentraciones mayores de los elementos es igual a la muestra anterior: As (3,861.5 mg/kg), Fe (40,400 mg/kg) y Pb (425.8 mg/kg) en fracción sulfuros mientras que Cd (46.8 mg/kg), Cu (1,209 mg/kg) y Zn (5,340 mg/kg) en soluble.

Las distribución de las concentraciones menores de los elementos en las diferentes fracciones se describe de la siguiente manera: As (<L.C.), Cu (24.2 mg/kg) y Fe (<L.C.) en carbonatos; Cd (<L.C.) en (oxi)hidróxidos de Fe, óxidos de Fe y sulfuros; Pb (<L.C.) en carbonatos y (oxi)hidróxidos de Fe mientras que Zn (296.4 mg/kg) en óxidos de Fe.

Las concentraciones mayores de los elementos en la muestra Jales 3-7 están distribuidas de la misma manera que las anteriores: As (18,215 mg/kg), Fe (21,865 mg/kg) y Pb (214.9 mg/kg) en fracción sulfuros mientras que Cd (31.2 mg/kg), Cu (342.6 mg/kg) y Zn (1,621 mg/kg) en soluble.

Las concentraciones menores de los elementos en las fracciones se encuentra distribuidas de la siguiente forma: As (<L.C.) en soluble y carbonatos; Cd (<L.C.) en (oxi)hidróxidos y óxidos de Fe; Cu (18.6 mg/kg) y Fe (<L.C.) en carbonatos; Pb (<L.C.) en carbonatos, (oxi)hidróxidos de Fe y óxidos de Fe mientras que Zn (184.1 mg/kg) en óxidos de Fe.

Tabla 17. Concentración de elementos obtenidos por medio de la extracción secuencial en Jales 3

mg/kg	As			Cd			Cu		
	Jales 3-4	Jales 3-10	Jales 3-7	Jales 3-4	Jales 3-10	Jales 3-7	Jales 3-4	Jales 3-10	Jales 3-7
<b>Soluble</b>	128.6	788.3	<L.C.	23.8	46.8	31.2	263.6	1209.0	342.6
<b>Carbonatos</b>	<L.C.	<L.C.	<L.C.	4.3	7.4	6.2	5.3	24.2	18.6
<b>(Oxi)Hidróxidos de Fe</b>	<L.C.	2585.0	722.5	<L.C.	<L.C.	<L.C.	35.2	152.3	88.9
<b>Óxidos de Fe</b>	219.2	3605.0	12065.0	<L.C.	<L.C.	<L.C.	34.6	64.8	71.8
<b>Sulfuros</b>	621.8	3861.5	18215.0	<L.C.	<L.C.	12.9	59.6	184.9	105.6
<b>L.D. (mg/L)</b>	0.5726			0.0059			0.0058		
<b>L.C. (mg/L)</b>	1.9086			0.0196			0.0193		

Tabla 17. Continuación

mg/kg	Fe			Pb			Zn			Total
	Jales 3-4	Jales 3-10	Jales 3-7	Jales 3-4	Jales 3-10	Jales 3-7	Jales 3-4	Jales 3-10	Jales 3-7	
<b>Soluble</b>	2911.5	17525.0	1620.5	0.7	3.1	4.0	1551.5	5340.0	1621.0	33410.9
<b>Carbonatos</b>	<L.C.	<L.C.	<L.C.	<L.C.	<L.C.	<L.C.	201.7	624.0	346.4	1238.0
<b>(Oxi)Hidróxidos de Fe</b>	1270.0	6990.0	2580.0	<L.C.	<L.C.	<L.C.	146.1	456.8	304.0	15330.6
<b>Óxidos de Fe</b>	10437.5	9700.0	10940.0	16.0	9.2	<L.C.	87.7	296.4	184.1	47731.0
<b>Sulfuros</b>	12195.0	40400.0	21865.0	116.6	425.8	214.9	83.4	567.5	389.8	99319.0
<b>L.D. (mg/L)</b>	0.2213			0.0024			0.0002			
<b>L.C. (mg/L)</b>	0.7376			0.0080			0.0006			

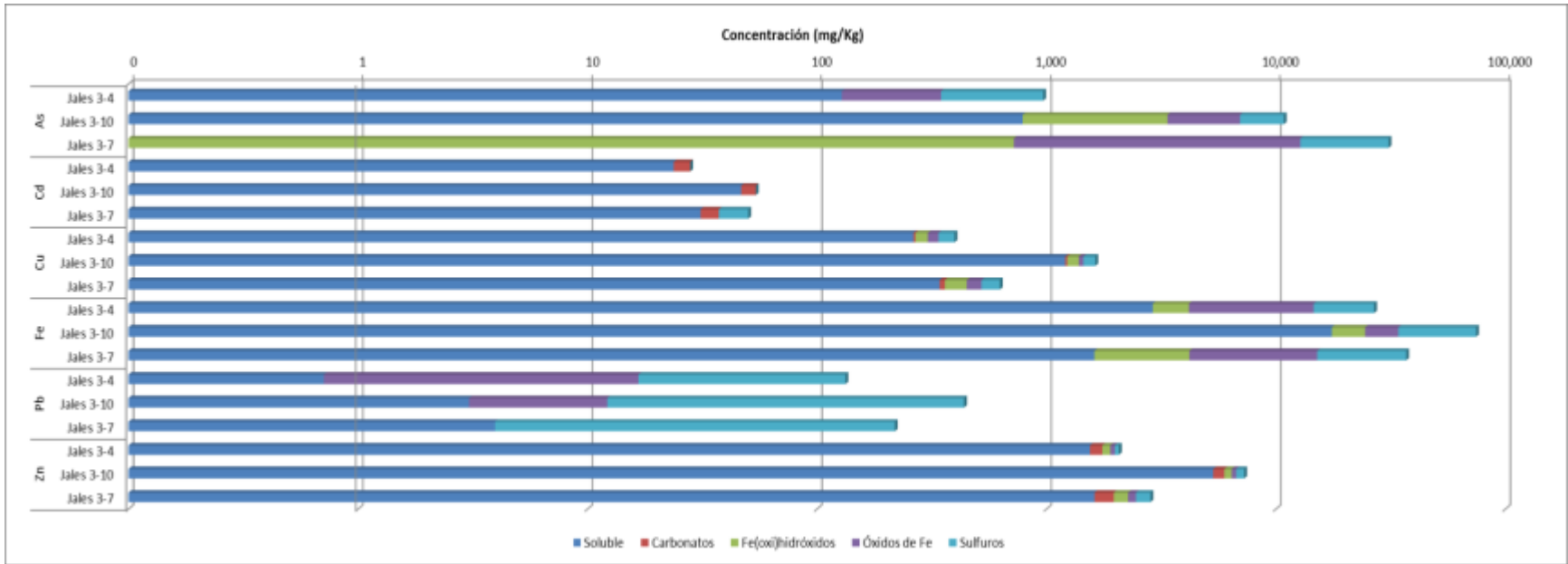


Figura 44. Distribución de las concentraciones de elementos en las fases químicas dentro de Jales 3

La figura 45 representa la distribución en porcentajes acumulados de las concentraciones de los elementos en las diferentes fases de la extracción de las muestras de Jales 3-4, Jales 3-10 y Jales 3-7. Los resultados indican que las mayores proporciones de los elementos se encuentran en la fracción óxidos de Fe y sulfuros con porcentajes de 24.2% y 50.4%, respectivamente. El resto de los porcentajes se distribuyen en: Fracción soluble 17.0%, carbonatos 0.6% y (oxi)hidróxidos de Fe 7.8%.

La distribución de los elementos en la fracción sulfuros, con los mayores porcentajes de concentración, en las tres muestras (Jales 3-4, Jales 3-10 y Jales 3-7) son iguales con los siguientes valores respectivos para cada elemento: As (64.1%, 35.6% y 58.8%), Fe (45.5%, 54.1% y 59.1%) y Pb (87.5%, 97.2% y 98.2%). Caso similar en la fracción soluble donde se encuentran los mayores porcentajes de los elementos Cd, Cu y Zn para cada uno de las muestras. La distribución de estos porcentajes respectivos a las muestras es la siguiente: Cd (84.8%, 86.3% y 62.0%), Cu (66.2%, 73.9% y 54.6%) y Zn (74.9%, 73.3% y 57.0%).

Los porcentajes menores en las muestras Jales 3-4 de los elementos As (0.0%) y Pb (0.0%) se encuentran en las fracciones carbonatos y (oxi)hidróxidos de Fe; el Cd (0.0%) en (oxi)hidróxidos de Fe, óxidos de Fe y sulfuros; Cu (1.3%) y Fe (0.0%) en carbonatos mientras que el Zn (4.0%) en sulfuros.

En la muestra Jales 3-10 los porcentajes menores de los elementos se distribuyen de la siguiente forma: As (0.0%), Cu (1.5%) y Fe (0.0%) en carbonatos; Cd (0.0%) en (oxi)hidróxidos de Fe, óxidos de Fe y sulfuros; Pb en carbonatos y (oxi)hidróxidos de Fe mientras que Zn (4.1%) en óxidos de Fe.

La distribución de los porcentajes menores en la muestra 3-7 para cada elemento es la siguiente: As (0.0%) en carbonatos y (oxi)hidróxidos de Fe; Cd en (oxi)hidróxidos de Fe y óxidos de Fe; Cu (3.0%) y Fe (0.0%) en carbonatos; Pb (0.0%) en carbonatos, (oxi)hidróxidos de Fe y óxidos de Fe mientras que el Zn (6.5%) en óxidos de Fe.

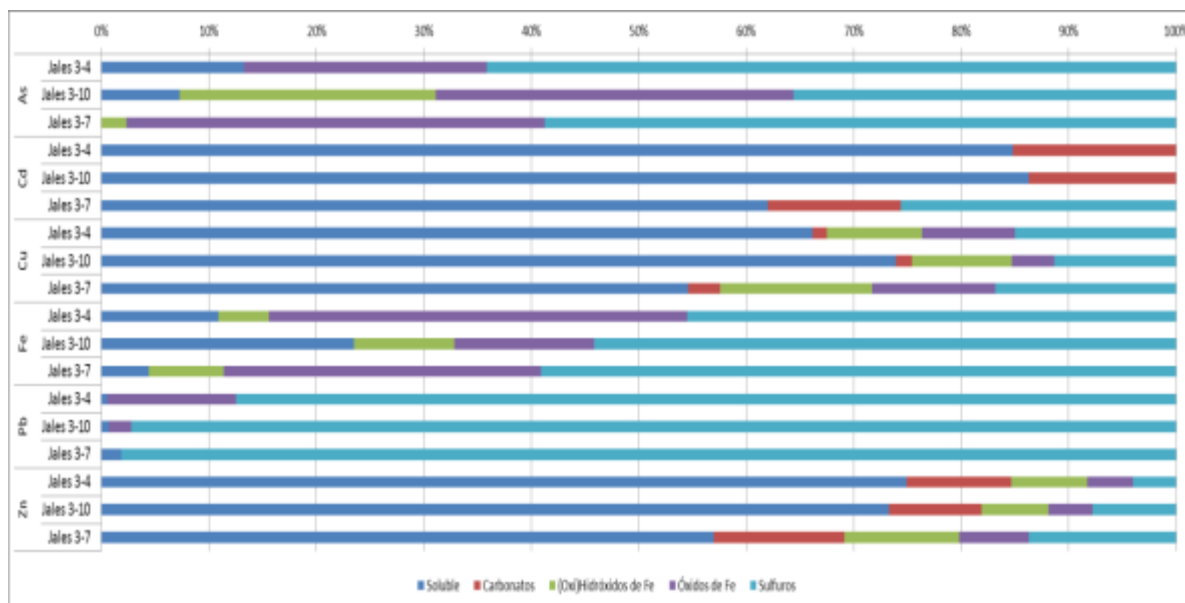


Figura 45. Distribución en porcentaje de concentraciones de metales obtenidas en fases químicas dentro de Jales 3

La presencia de minerales como arsenopirita, y pirita en DRX indican la fuente de las concentraciones de As y Fe en fase de sulfuros. No se detectaron minerales de Pb dentro de DRX pero en los análisis de EDS se obtuvieron relaciones altas entre S y Pb lo que representaría la presencia de galena en el jal.

El Cd, Cu y Zn se encuentran mayormente en la fase de solubles dentro de este jal. El Cd puede encontrarse en trazas de esfalerita así como el Zn dentro de este mineral y que puede haber sido detectado en la primera etapa de la extracción aunque la su presencia en DRX antes y después de la extracción puede indicar que los reactivos no pudieron disolver completamente a este metal. No se detectaron minerales de Cu por medio de DRX aunque la presencia de Cu, S, Fe en los espectros de EDS puede indicar la existencia de sulfuros de Cu (calcopirita).



## V.1.4 Caracterización de Jales 4

### V.1.4.1 Análisis de imágenes MEB y espectros EDS

Se realizaron 8 espectros de EDS y 6 imágenes en la muestra de Jales 4-1, en ellos se presentan cantidades relativamente abundantes de Fe>Ca>S>Mg>As lo que podría indicar presencia de minerales tanto de mena como de ganga. Las partículas en la figura 46a y 46b muestran un tamaño que varía de 30 a 50 µm. La relación de los elementos anteriores puede indicar presencia de minerales como magnetita, pirita y arsenopirita.

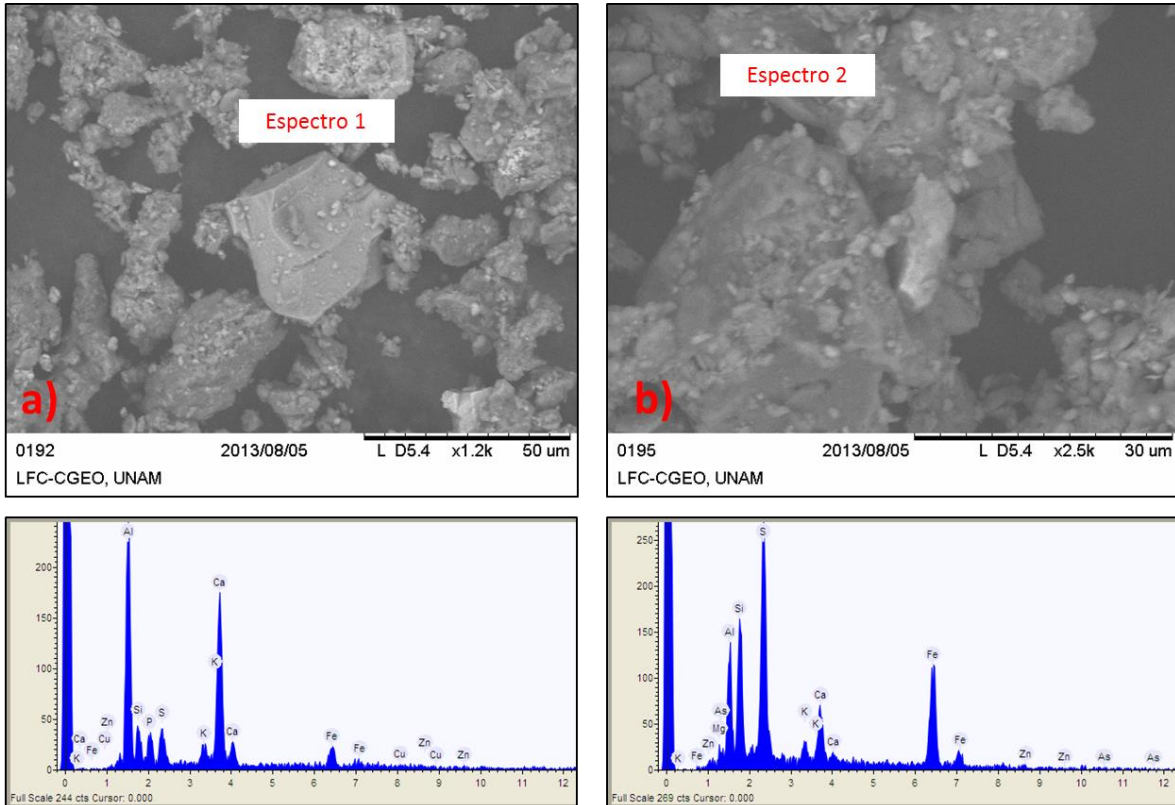


Figura 46. Imágenes y espectros obtenidos por Microscopía Electrónica de Barrido de la muestra Jales 4-1

También se realizaron imágenes y espectros de los residuos de la extracción en la muestra Jales 4-1. En total se obtuvieron 11 espectros de EDS y 5 imágenes. La figura 47 muestra dos granos obtenidos en MEB y sus correspondientes espectros, las muestras presentan formas de alteración. La relación de elementos obtenidos en Fe>S>Cu>Zn>As>Pb. Estos elementos pueden estar presentes en minerales como galena, arsenopirita, pirita y calcopirita. Las partículas varían de tamaño entre 70 y 100 µm (47a y 47b, respectivamente). También en el resto de los espectros se cuantificaron pequeños porcentajes de Ca. Además de los minerales mencionados anteriormente estudios en jales mineros indican posible presencia de minerales como bornita, enargita, rejalgar y oropimente (Alpers et al. 1994; Lottermoser, 2010).

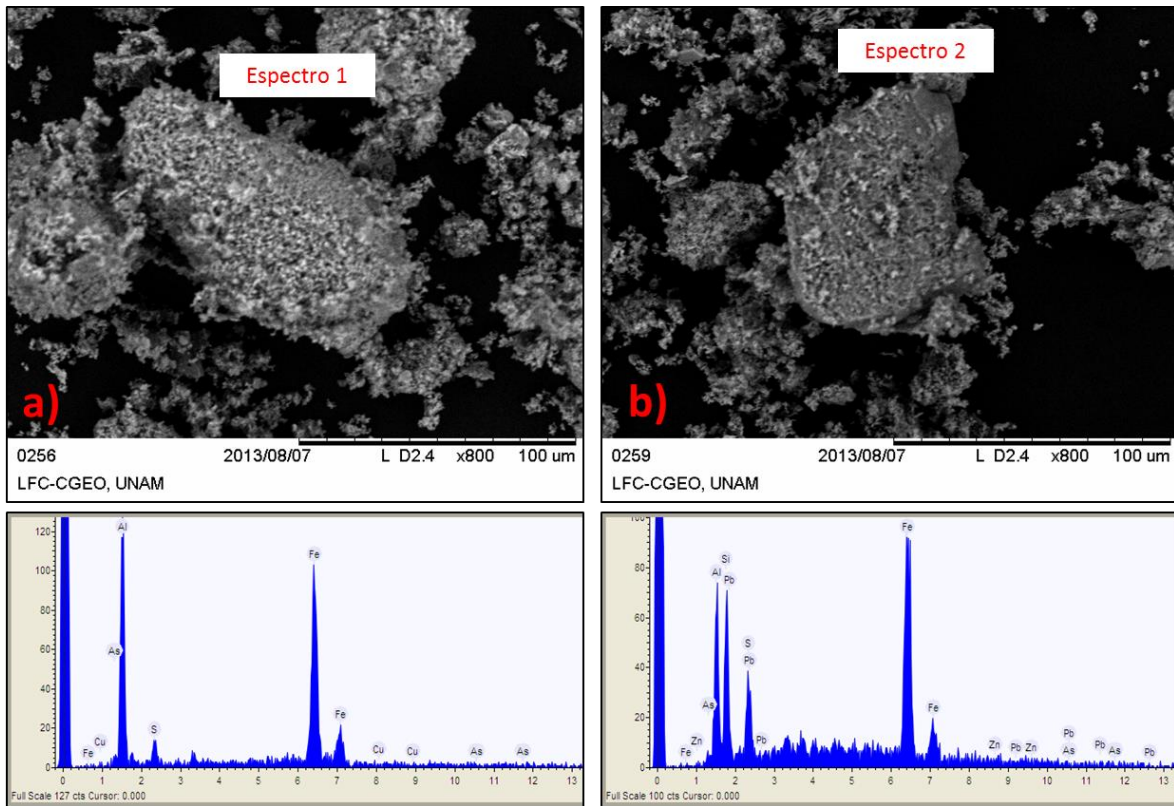


Figura 47. Imágenes y espectros obtenidos por Microscopía Electrónica de Barrido de la muestra Jales 4-1 después del proceso de extracción secuencial

Además de la muestra anterior se obtuvieron también imágenes de microscopía y espectros EDS en Jales 4-3. En total se realizaron 9 espectros de EDS y se generaron 6 imágenes de granos. La figura 48 muestra partículas de tamaño aproximado entre 30 y 100 µm (48a y 48b, respectivamente). Los espectros muestran elementos en proporción relativa de Fe>S>Zn>Cu>As. La presencia de estos elementos indica existencia de minerales de sulfuros tanto de mena como de ganga además de la baja recuperación de extracción en las planta de beneficio de la mina. También se obtuvo pequeñas cuantificaciones de Br en alguno de los espectros analizados.

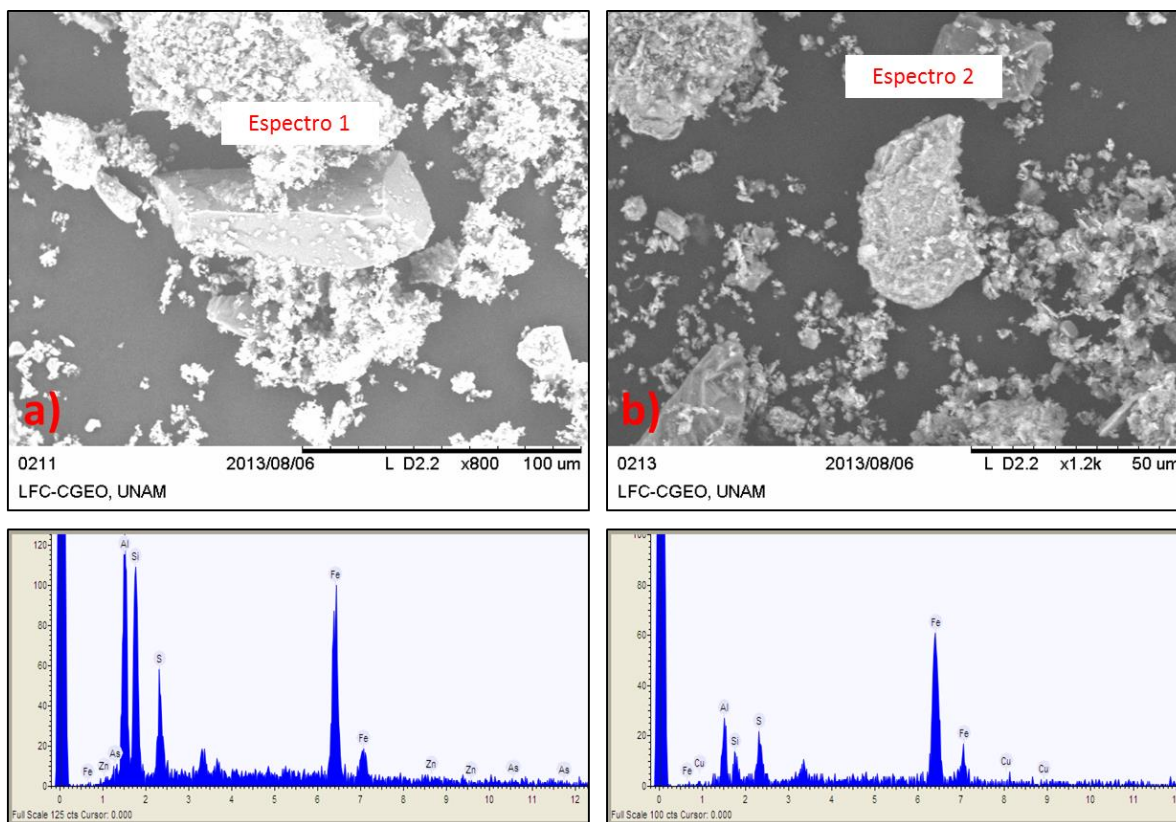


Figura 48. Imágenes y espectros obtenidos por Microscopía Electrónica de Barrido de la muestra Jales 4-3

También se hizo microscopía a los residuos obtenidos en la extracción de la muestra Jales 4-3. Se realizaron un total de 4 espectros de EDS y 4 imágenes de partículas dentro de la muestra donde en la figura 49 se representan algunos granos que varían en tamaños de entre 50 y 200  $\mu\text{m}$  (49a y 49b, respectivamente). Los espectros muestran elementos en proporción relativa de  $\text{Fe} > \text{S} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Zn} > \text{Cd} > \text{Pb}$ . se obtuvieron los seis elementos que se analizaron a lo largo de estudio y que indicarían la presencia de minerales de mena y ganga como son los sulfuros (galena, esfalerita, arsenopirita, pirita) mientras que el Cd puede estar como traza en los minerales.

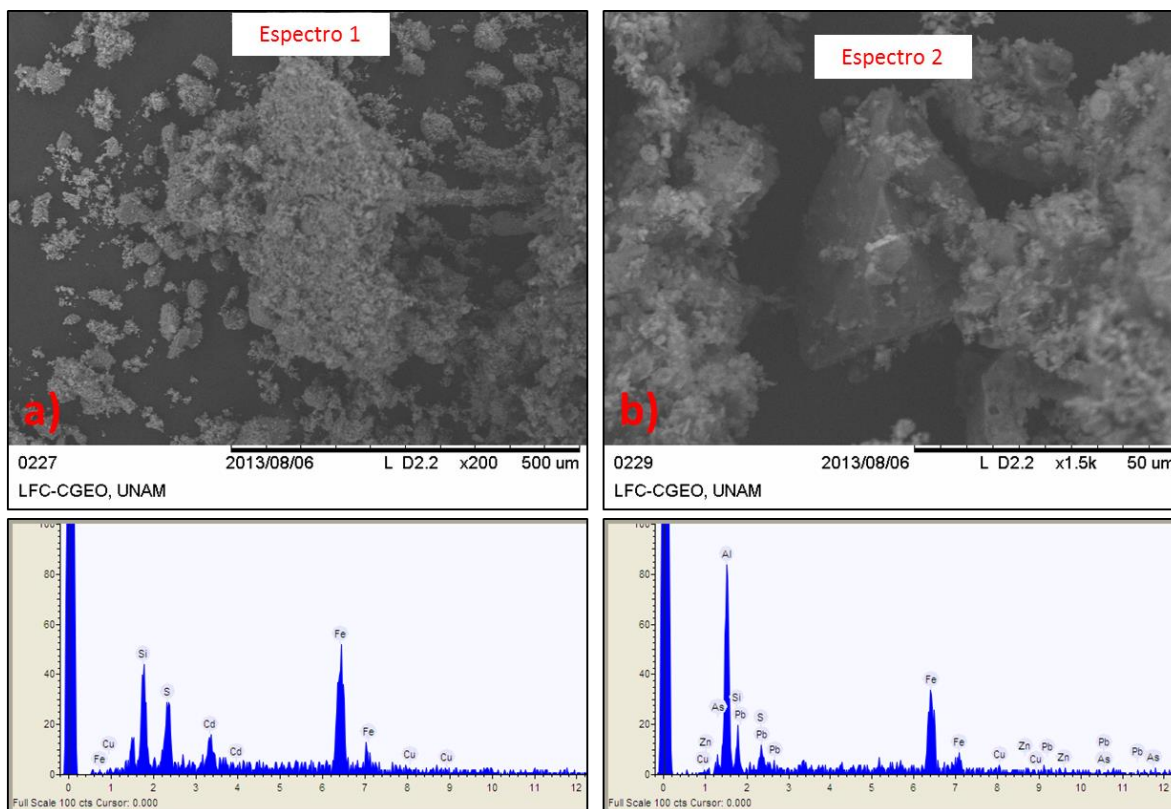


Figura 49. Imágenes y espectros obtenidos por Microscopía Electrónica de Barrido de la muestra Jales 4-3 después del proceso de extracción secuencial

#### V.1.4.2 Difracción de rayos X

Los minerales encontrados, por medio de DRX, de la muestra Jales 4-1 son: pirita ( $\text{FeS}_2$ ) y esfalerita ( $\text{ZnS}$ ). La presencia de ambos concuerda con la paragénesis del yacimiento. El alto contenido aproximado de Fe (35,000 mg/kg) y Zn (2,000 mg/kg) junto a la gran concentración de S “inherente” a la geología serían los justificantes para su presencia.

Como resultado de los análisis de DRX sobre los residuos obtenidos en la extracción de la muestra Jales 4-1 (fig. 50), se obtuvieron minerales como jarosita y magnetita. La jarosita podría ser respuesta a la presencia de iones de  $\text{K}^+$  que han ingresado al sistema por la disolución de minerales como ortoclasa (mineral encontrado en la muestra de Jales 4-1). La ausencia de magnetita en la muestra Jales 4-1 indicaría que el grado de intensidad de reflexión no fue suficiente para reflejar su espectro en el difractograma pero al disolver algunos minerales, con el proceso de extracción, la magnetita pudo estar presente.

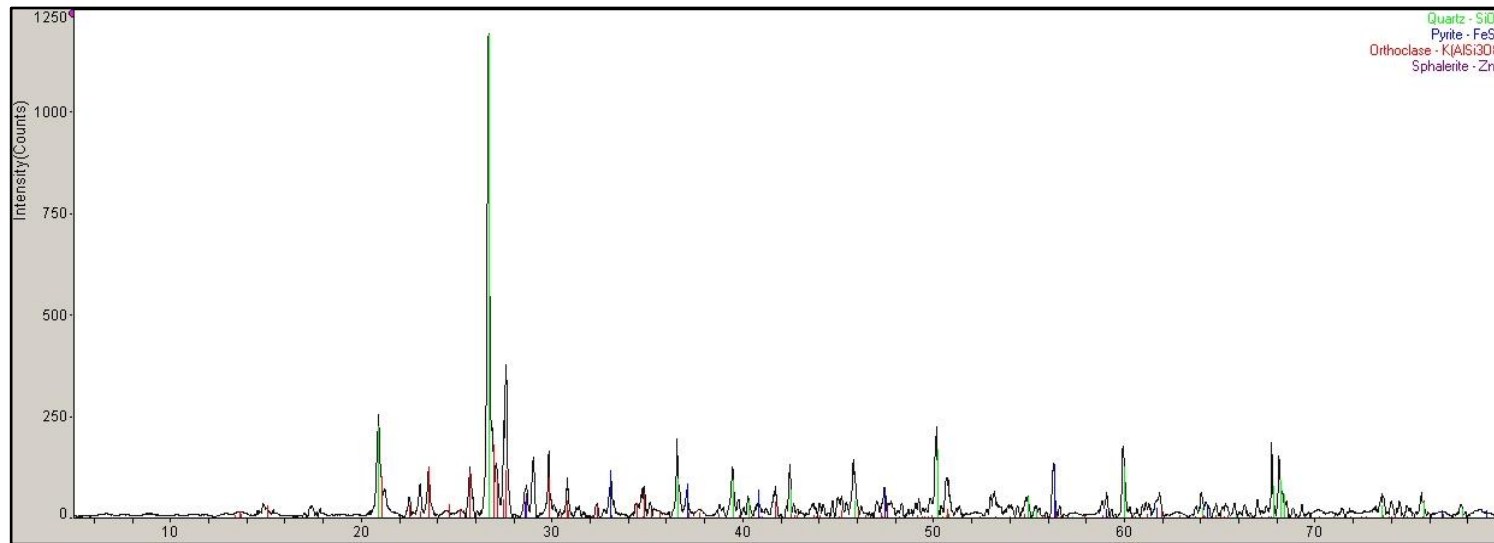


Figura 50. Difractograma de la muestra Jales 4-1

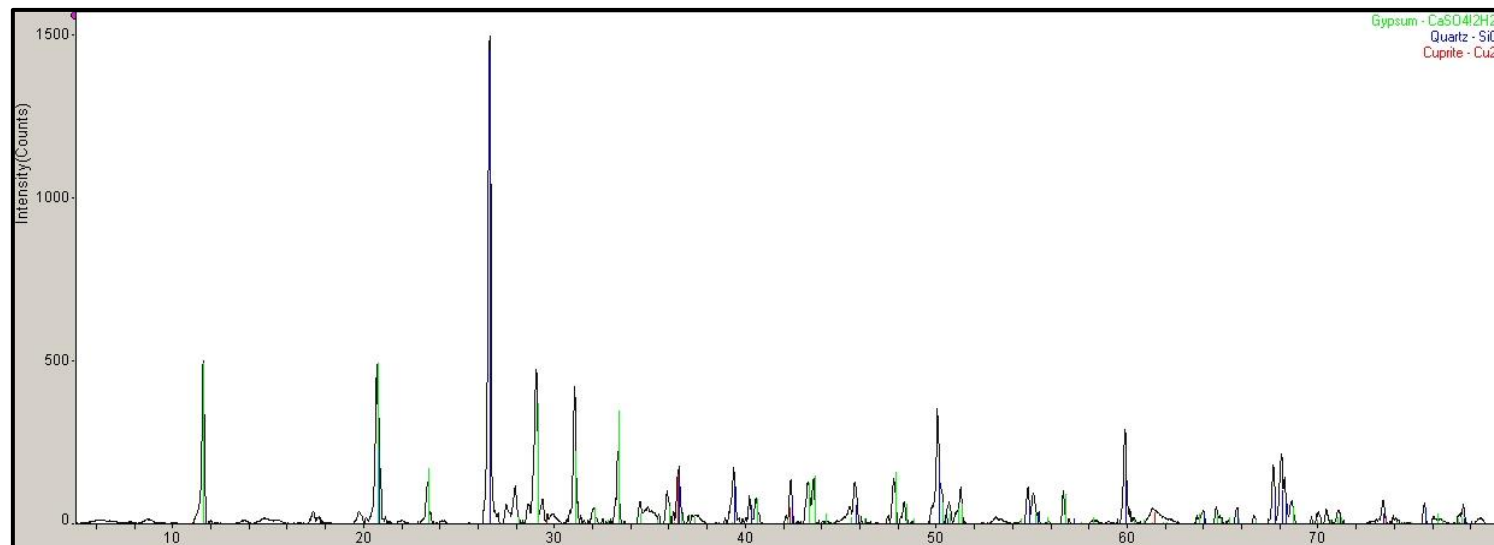


Figura 51. Difractograma de la muestra Jales 4-3

El difractograma de la muestra Jales 4-3 antes de la extracción está representada por la figura 51, en ella se encuentra minerales como yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) y cuprita ( $\text{CuS}_2$ ). Después de la extracción sobre la muestra Jales 4-3 el mineral que apareció fue la cuprita (omitiendo a minerales primarios de aluminosilicatos).

La presencia de yeso pueda indicar la disolución de calcita (si es que existirá remanente) para ser fuente de  $\text{Ca}^{2+}$  en el medio. La existencia de cuprita antes y después de la extracción pueda indicar la alta presencia de Cu en la muestra y la alta resistencia del sulfuro a ser atacado por los reactivos.

#### V.1.4.3 Concentración digestión ácida

Las concentraciones de los elementos en jales 4 que se reportan en la tabla 18. Se observa una gran variación entre los valores, esto se verifica con la desviación estándar.

La figura 52 muestra las variaciones de las concentraciones de los elementos a profundidad dentro de Jales 4. En la primera mitad del perfil Cd, Cu y Zn muestran un decremento en sus concentraciones mientras que Pb y As tienden a aumentar; el Fe mantiene casi en su totalidad un incremento a lo largo del perfil. Después de pasar por la mitad de la sección los elementos Cd, Cu y Zn muestran una tendencia a aumentar sus concentraciones y Pb y As a una pequeña disminución.

Tabla 18. Resultado de concentraciones de los metales en Jales 4

mg/kg	As	Cd	Cu	Fe	Pb	Zn
<b>Jales 4-1</b>	1753.43	30.87	603.14	35399.28	1512.41	2033.70
<b>Jales 4-2</b>	13344.35	40.23	558.98	118515.95	6346.91	4565.51
<b>Jales 4-3</b>	16054.99	3.70	188.37	266887.22	8740.02	1679.98
<b>Jales 4-4</b>	6804.06	49.70	396.31	258008.59	10418.95	4199.66
<b>Jales 4-5</b>	6227.10	125.58	916.77	327518.50	17426.35	8758.50
<b>Jales 4-6</b>	6235.84	42.11	758.49	271266.49	6240.17	3823.22
<b>L.D. (mg/L)</b>	0.0206	0.0148	0.0243	0.0155	0.0154	0.0138
<b>L.C. (mg/L)</b>	0.0686	0.0493	0.0810	0.0516	0.0513	0.0460

De manera general todos los elementos aumentan sus concentraciones en la parte final de la sección con respecto a la superficie. De la siguiente manera se expresan las concentraciones de los elementos de manera descendiente: Fe>>As>Pb>Zn>Cu>>Cd.

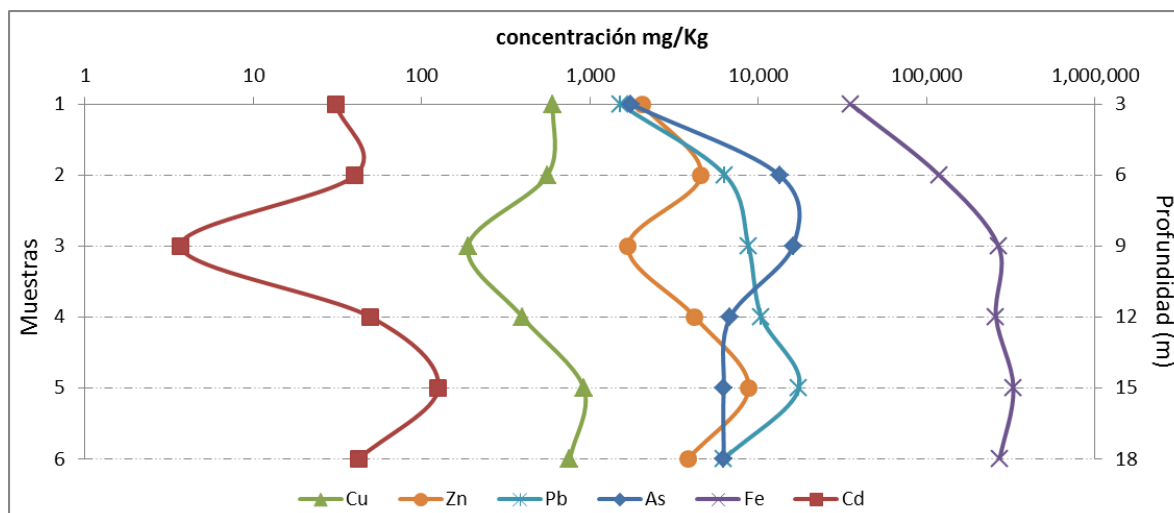


Figura 52. Variación a profundidad de las concentraciones de los elementos en Jales 4

#### V.1.4.4 Concentración extracción secuencial

La tabla 19 representa las concentraciones de los elementos obtenidos en la extracción de las muestras Jales 4-1 (Menor contenido de As en digestión total) y Jales 4-3 (Mayor contenido de As en digestión total).

Considerando la sumatoria de las concentraciones de los elementos por cada fracción y total en las extracciones se puede observar que la mayor parte se encuentra en la fracción de sulfuros (aproximadamente 49,300 mg/kg). Las concentraciones aproximadas de los elementos en las siguiente fracciones se distribuyen en: soluble 224.7 mg/kg, carbonatos 2,900 mg/kg, (oxi)hidróxidos de Fe 3,700 mg/kg y óxidos de Fe 12,000 mg/kg.

La figura 53 indica que en la muestra de Jales 4-1 la mayor concentración de As (462.7 mg/kg) se encuentran en la fase de óxidos de Fe; el Cd (10.8 mg/kg), Fe (3,902.5 mg/Kg) y Pb (68.4 mg/kg) en sulfuros mientras que en el caso de Cu (228.3 mg/kg) y Zn (734.5 mg/kg) se encuentran en la fracción (oxi)hidróxidos de Fe.

Las concentraciones menores dentro de esta muestra de los elementos As (<L.C.), Cd (<L.C.), Cu (8.9 mg/kg), Fe (129 mg/kg), y Pb (<L.C.) se encuentran en la fracción soluble mientras que el Zn (71.4 mg/kg) en carbonatos.

La muestra Jales 4-3 contiene sus concentraciones mayores de todos los elementos, a excepción del Cd el cual no registró ningún valor, en la fracción de sulfuros, As (7,140 mg/Kg), Cu (60.1 mg/kg), Fe (36,995 mg/kg), Pb (332.5 mg/kg) y Zn (38.2 mg/kg).

La distribución de las concentraciones menores de cada elemento es la siguiente: As (<L.C.) y Pb (<L.C.) en fracción soluble, carbonatos y (oxi)hidróxidos de Fe; Cu (<L.C.) y Zn (0.5 mg/kg) en carbonatos y Fe (<L.C.) en fracción soluble y carbonatos.

Tabla 19. Concentración de elementos obtenidos por medio de la extracción secuencial en Jales 4

mg/kg	As		Cd		Cu		Fe		Pb		Zn		Total
	Jales 4-1	Jales 4-3	Jales 4-1	Jales 4-3	Jales 4-1	Jales 4-3	Jales 4-1	Jales 4-3	Jales 4-1	Jales 4-3	Jales 4-1	Jales 4-3	
<b>Soluble</b>	<L.C.	<L.C.	2.1	0.7	8.9	2.1	129.0	<L.C.	<L.C.	<L.C.	74.1	8.7	224.7
<b>Carbonatos</b>	284.5	<L.C.	8.2	0.2	16.3	<L.C.	2571.0	<L.C.	22.2	<L.C.	71.4	0.5	2974
<b>(Oxi)Hidróxidos de Fe</b>	126.0	<L.C.	4.4	0.1	228.3	2.2	1821.0	872.5	0.7	<L.C.	734.5	4.1	3793.6
<b>Óxidos de Fe</b>	462.7	2629.0	3.4	0.7	138.0	19.3	1096.0	7020.0	6.8	2.0	599.5	34.3	12010.9
<b>Sulfuros</b>	<L.C.	7140.0	10.8	5.8	113.9	60.1	3902.5	36995.0	68.4	332.5	391.0	348.2	49362.3
<b>L.D. (mg/L)</b>	0.5726		0.0059		0.0058		0.2213		0.0024		0.0002		
<b>L.C. (mg/L)</b>	1.9086		0.0196		0.0193		0.7376		0.0080		0.0006		

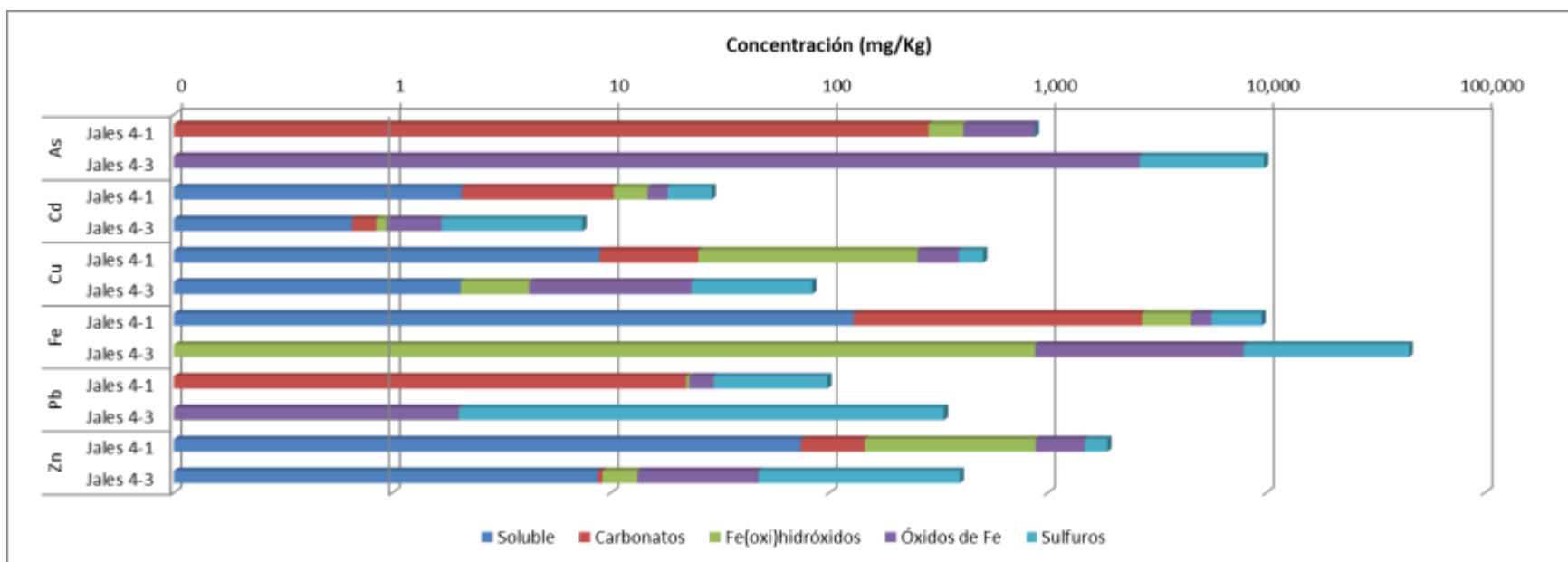


Figura 53. Distribución de las concentraciones de elementos en las fases químicas dentro de Jales 4



La distribución en porcentajes acumulados de los elementos en las muestras Jales 4-1 y Jales 4-3 en cada fase de la extracción es representada en la figura 54. Los resultados indican que en la fracción sulfuros es donde existe el mayor porcentaje acumulado (72.2%). Los porcentajes correspondiente a las diferentes fases son las siguientes: Fracción soluble 0.3%, carbonatos 4.4%, (oxi)hidróxidos de Fe 5.5% y óxidos de Fe 17.6%.

En la muestra jales 4-1 los porcentajes mayores de los elementos se encuentran distribuidas de la siguiente forma: As (53.0%) en óxidos de Fe; Cd (37.2%), Fe (41.0%) y Pb (69.8%) en sulfuros; Cu (45.2%) y Zn (39.3%) en (oxi)hidróxidos.

Los porcentajes menores en la muestra anterior de los elementos se distribuyen principalmente en la fracción soluble(As 0.0%, Cd 7.2%, Cu 1.8%, Fe 1.4% y Pb 0.0%) y carbonatos (Zn 3.8%).

En la muestra Jales 4-3 la fracción sulfuros contiene los porcentajes mayores de todos los elementos: As 73.1%, Cu 71.9%, Fe 82.4%, Pb 99.4% y Zn 88.0%; el Cd no registró concentración alguna. Los porcentajes menores de As (0.0%) y Pb (0.0%) están en fracción soluble, carbonatos y (oxi)hidróxidos de Fe; Cu (0.0%) y Zn (0.1%) en carbonatos y Fe (0.0%) dentro de fracción soluble y carbonatos.

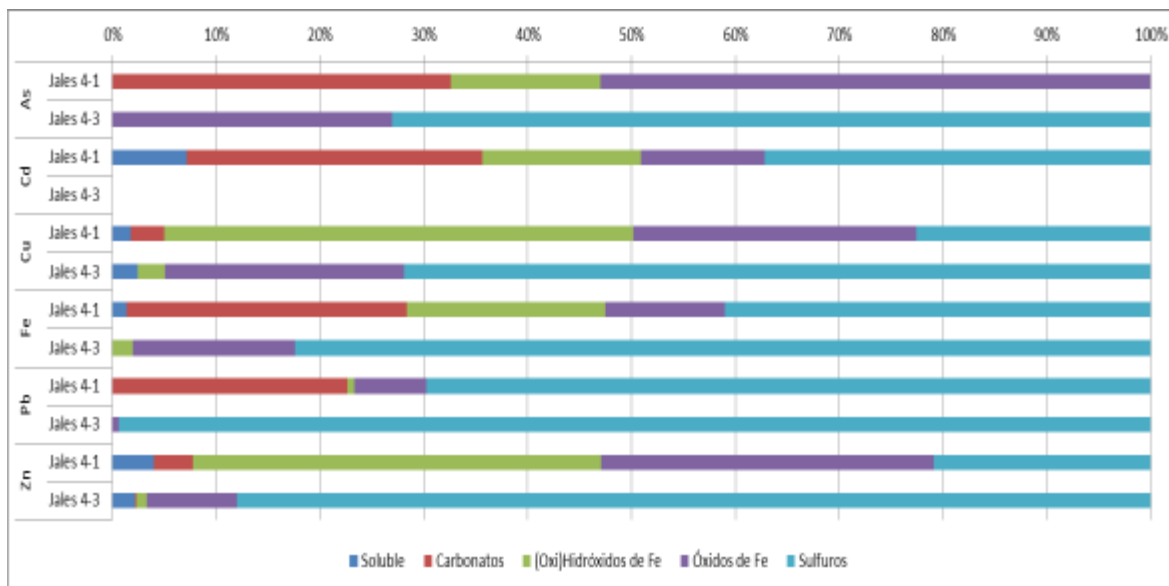


Figura 54. Distribución en porcentaje de concentraciones de metales obtenidas en fases químicas dentro de Jales 4

Las diferentes fases en las que se encuentran los elementos en las dos muestras de jales 4 indicarían una variedad de minerales dentro de éstos. En el caso de los sulfuros que contiene a As, Cu, Cd, Fe, Pb y Zn. Corresponderían su presencia en minerales como pirita y esfalerita. Además de lo anterior en los análisis de EDS se encontró relaciones de S, As, Fe, Cu, Pb lo que podría indicar presencia de minerales con baja intensidad en los estudios de DRX, o poca cantidad, como puede ser calcopirita, arsenopirita, galena.

### V.1.5 Resultados por digestión ácida de jales

Se obtuvieron las concentraciones de metales pesados en los diferentes jales de la zona minera de Xichú, en la tabla 20 se muestra los valores máximos y mínimos de cada uno.

Tabla 20. Concentraciones máximas y mínimas de los elementos analizados en cada jal minero

mg/kg		As	Cd	Cu	Fe	Pb	Zn
<b>Máximo</b>	Jales 1	62302.14	233.19	2427.96	318342.61	10795.98	13289.63
	Jales 2	10536.34	61.51	553.65	273513.55	10816.19	5290.77
	Jales 3	38631.14	83.04	1636.61	370733.93	14945.85	11180.29
	Jales 4	16054.99	125.58	916.77	327518.50	17426.35	8758.50
<b>Mínimo</b>	Jales 1	7793.67	<L.D.	337.99	182236.41	2042.55	2251.66
	Jales 2	4963.52	11.44	309.37	211611.65	3878.97	1255.77
	Jales 3	2329.62	<L.D.	473.89	56611.91	669.07	1186.06
	Jales 4	1753.43	3.70	188.37	35399.28	1512.41	1679.98

Se destaca que en Jales 1 se obtuvieron los mayores valores en elementos como As, Cd, Cu y Zn mientras en Fe y Pb se encuentran en Jales 3. En Jales 4 se puede encontrar las menores concentraciones de As, Cu y Fe, el Pb y Zn se encuentran en Jales 3 y el Cd en Jales 1 y 3.

La tabla 21 muestra las concentraciones promedios de los elementos en los jales a partir de los resultados obtenidos por medio de la digestión ácida (asistido por horno de microonda). Comparando los resultados promedios con los valores reportados en COREMI 1978 para los metales Cu (0.05%), Pb (0.62%) y Zn (0.32%) están por debajo de los valores encontrados en este estudio.

Tabla 21. Concentraciones promedios de los elementos analizados en cada jal minero

mg/kg	As	Cd	Cu	Fe	Pb	Zn
<b>Promedio</b>						
<b>Jales 1</b>	20876.46	92.32	1380.89	254323.93	5894.20	7550.52
<b>Jales 2</b>	7332.74	34.28	425.47	253748.79	6120.28	2878.23
<b>Jales 3</b>	12183.69	42.42	869.75	194355.61	6646.27	4038.96
<b>Jales 4</b>	8403.30	48.70	570.34	212932.67	8447.47	4176.76

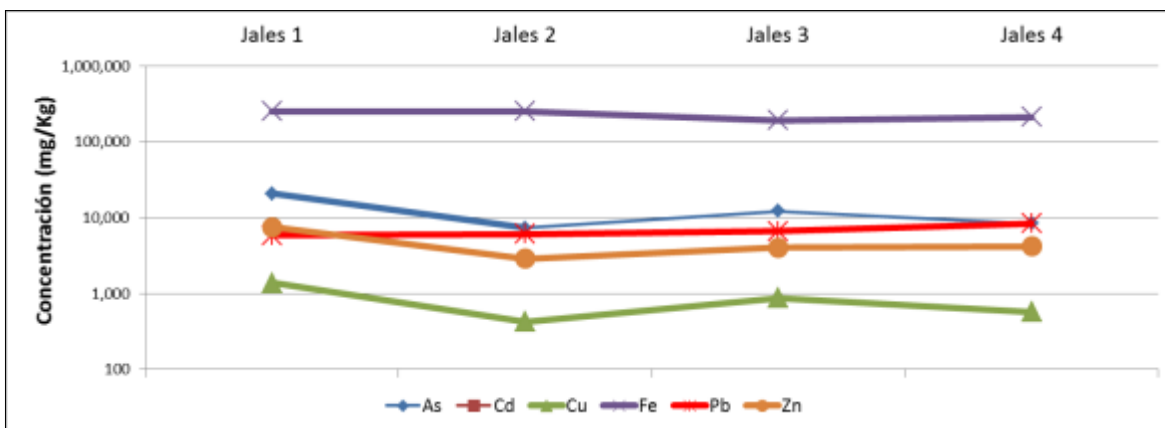


Figura 55. Gráfica de concentraciones promedios de jales mineros

La figura 55 indica las concentraciones promedio de los jales 1 (más antigua) hasta Jales 4 (más reciente). Aunque no existe una clara tendencia en todos los metales puede observarse algunas características: hay cierta disminución en las concentraciones de los metales entre el más antiguo (Jales 1) al más reciente (Jales 4), a excepción del Pb. También se observa que en la mayoría de los promedios de los elementos (a excepción del Fe) los valores más pequeños se encuentran en las muestras de Jales 2 (el más pequeño en dimensión) éste serviría como un punto de inflexión dado que existe un leve incremento de las concentraciones a partir de él.

#### V.1.6 Resultados por extracción secuencial en jales

La Fig. 56 se representa el porcentaje total de los resultados de la extracción secuencial de las muestras que corresponde a cada fase mineral extraída. Al realizar la sumatoria se pudo observar la distribución en porcentaje de las fases químicas en los 4 jales. Los resultados muestran que solubles 26.5%, carbonatos 4.7%, (oxi)hidróxidos de Fe 7.5%, óxidos de Fe (14.9%) y sulfuros 46.5%. Lo que indica que un alto porcentaje de los elementos extraídos se encuentra en una fase de sulfuros. Se debe considerar que los jales seguirán expuesto a intemperismo por lo que la oxidación de algunos minerales podría movilizar los elementos.

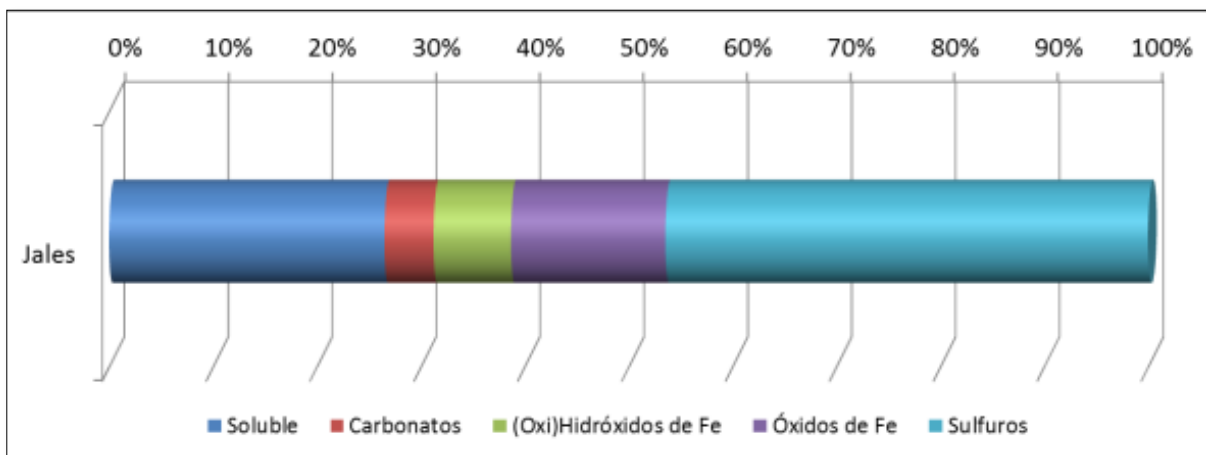


Figura 56. Porcentajes de concentraciones de elementos, en los cuatros jales, encontradas en las fases químicas obtenidas en la extracción.

En la fig. 57 se puede observar la distribución de las concentraciones, de todos los jales, por elemento analizado. Los elementos As (61.1%), Fe (63.8%) y (96.3%) se encontraron en la fase de sulfuros mientras que Cd (57.2%), Cu (43.9%) y Zn (50.8%) dentro de la fase soluble. Aun cuando en la gráfica anterior se observó que la fase soluble está en menor proporción a los sulfuros, estos pequeños porcentajes encontrados en fases móviles pueden ser valores que pueden asumirse como un riesgo ambiental. Más adelante podrá relacionarse estos resultados obtenidos con los minerales en DRX y los elementos trazas encontrados en MEB.

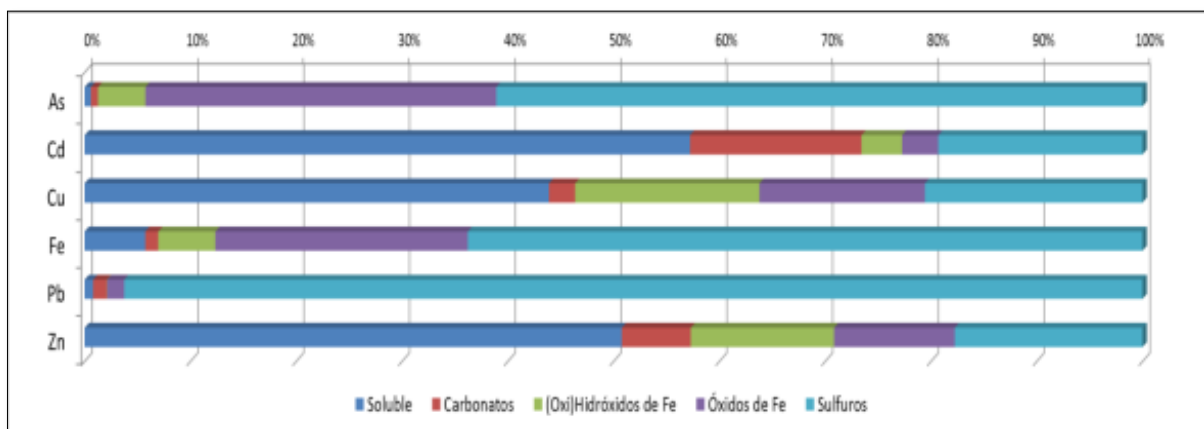


Figura 57. Porcentajes de distribución en las concentraciones de los elementos en fases químicas dentro de los jales

El alto contenido de Fe, en comparación con los otros elementos analizados, y el mayor porcentaje de sulfuros dan respuesta a la mineralogía (pirita) obtenida por DRX. La

presencia de aún alto contenido de sulfuros podría indicar que existiría aún procesos de oxidación con lo cual una posible generación de acidez por estas reacciones químicas.

Se realizó una comparativa entre los métodos de digestión ácida (asistido por horno de microondas) y extracción secuencial. La comparación se basó en el promedio de las concentraciones obtenidas, por elementos, de todo el fraccionamiento en la extracción secuencial y el promedio de las mismas muestras por el proceso de digestión ácida. La tabla 22 resume el promedio de las concentraciones totales de las muestras considerando ambos métodos.

Se interpreta como un total-recuperable del 100% a las concentraciones de los elementos obtenidas en la digestión ácida. Considerando lo anterior, cuando se compararon los resultados del procedimiento de digestión con el promedio total, de los elementos, en la extracción secuencial. La extracción fue mayor al 65% en los elementos a excepción del Fe y Pb en los cuales se obtuvieron 19% y 3%, respectivamente.

La baja recuperación se deba probablemente en que la extracción secuencial no exista una disolución tan eficiente como en la digestión por medio de agua regia donde se pueden parcialmente disolver algunos silicatos, por ejemplo biotita (presentes en la mineralogía obtenida por medio de DRX y en trabajos anteriores (COREMI, 1978)), y tener mayor eficiencia en la “recuperación” de las concentraciones de los elementos analizados (Parviainen, 2009).

Debido a que no se realizó una comparación entre diferentes métodos de extracción, se asume que la extracción utilizada por Hall y Dold son las óptimas para obtener las mejores recuperaciones.

Tabla 22. Porcentaje de recuperación de las concentraciones de elementos en extracción secuencial a partir de agua regia

Elementos extraídos	Método 1 Digestión ácida (agua regia) mg/kg	Método 2 Extracción secuencial (suma de las 5 etapas) mg/kg	Relación entre la digestión ácida y la extracción secuencial en %
As	161,589.37	97,608.75	60.41
Cd	350.00	289.05	82.59
Cu	7,045.13	5,477.96	77.76
Fe	1,859,214.49	357,273.70	19.22
Pb	47,934.47	1,570.85	3.28
Zn	34,364.37	22,647.94	65.91

La distribución general de las fases químicas dentro de cada jal así como los resultados obtenidos por medio de DRX y MEB serán descritos y analizados posteriormente.

V.1.7 Resultados por difracción de rayos X

Usando el mismo criterio de selección de muestras a las extracciones, se analizaron por medio de difracción de rayos X las muestras con las concentraciones extremas de As en los análisis de digestión ácida.

Se obtienen difractogramas de las muestras antes de cualquier proceso químico en ellos y después de la secuencia de extracción para observar la mineralogía presente en relación a la intensidad de la cristalografía de cada mineral, en lo que se obtuvieron un total de 17 espectros de rayos X.

Se tomarán como referencia los minerales primarios de sulfuros y/o óxidos, secundarios como sulfatos y (oxi)hidróxidos. La presencia en las muestras de algunos minerales primarios de silicatos no estarán incluidos en las descripciones. Los minerales primarios de silicatos encontrados en las muestras fueron: Cuarzo (SiO<sub>2</sub>), ortoclasa y microclina (KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>), muscovita (KAl<sub>2</sub>(Si<sub>3</sub>Al)O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>) y anortita (CaAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>). Los minerales anteriormente identificados concuerdan con la geología de la zona y parte de estudios anteriores (COREMI, 1978).

La tabla 23 resume los resultados de los minerales descritos anteriormente. La presencia de minerales como esfalerita antes y después de la extracción puede deberse alta resistencia de estos sulfuros ante los reactivos en la extracción. Sin embargo, existe la posibilidad que este mineral junto a la jarosita no hayan sido disueltos completamente en ninguna etapa de la extracción. La esfalerita pudo haber sido extraída en la fase soluble de la extracción y liberar Zn en grandes cantidades pero al tener gran presencia de este mineral en el yacimiento es posible que no haya podido extraerse completamente. Algunas fases menores de plumbojarosita fueron detectados en DRX pero éstas se empalman con el difractograma de jarosita por lo que no fue considerado con anterioridad.

Tabla 23. Minerales encontrados dentro de los jales mineros a partir de estudios de difracción rayos X

Muestra		Minerales	Muestra		Minerales
<b>Antes de la extracción</b>	<b>Jales 1-2</b>	Jarosita Yeso Esfalerita Goethita	<b>Después de la extracción</b>	<b>Jales 1-2</b>	Cuprita *(Esfalerita) *(Jarosita)
	<b>Jales 1-6</b>	Jarosita Yeso Arsenopirita		<b>Jales 1-6</b>	Galena
	<b>Jales 2-1</b>	Jarosita Yeso Magnetita Cuprita		<b>Jales 2-1</b>	Pirita Hematita *(Cuprita)
	<b>Jales 2-6</b>	Jarosita Yeso Esfalerita Goethita		<b>Jales 2-6</b>	Magnetita *(Jarosita)

Tabla 23. Continuación

<b>Antes de la extracción</b>	<b>Jales 3-4</b>	Jarosita Yeso Esfalerita	<b>Después de la extracción</b>	<b>Jales 3-4</b>	Goethita *(Jarosita) *(Esfalerita)
	<b>Jales 3-7</b>	Jarosita Yeso Magnetita		<b>Jales 3-7</b>	**
	<b>Jales 3-10</b>	Yeso Pirita Arsenopirita Cobaltita		<b>Jales 3-10</b>	***
	<b>Jales 4-1</b>	Pirita Esfalerita		<b>Jales 4-1</b>	Jarosita Magnetita
	<b>Jales 4-3</b>	Yeso Cuprita		<b>Jales 4-3</b>	*(Cuprita)

\* Minerales no totalmente disueltos

\*\* No existió análisis

\*\*\* Solamente minerales primarios de ganga

## V.2 Determinación geoquímica de sedimentos

Los sedimentos fueron muestreados dentro de la zona minera de Xichú y las concentraciones de los metales pesados se expresan en la tabla 24. La ubicación de los sedimentos (Fig. 58) es a lo largo del río Xichú, río Catarina de mezquital y en la zona de confluencia de ambos.

Tabla 24. Resultados de las concentraciones de los elementos en suelos

mg/kg	As	Cd	Cu	Fe	Pb	Zn
<b>Sed 1</b>	1161.97	2.55	119.24	42313.20	686.70	525.23
<b>Sed 2</b>	<L.C.	<L.C.	15.15	29516.52	12.01	80.21
<b>Sed 3</b>	<L.C.	<L.C.	15.15	28148.50	11.99	80.01
<b>Sed 4</b>	<L.C.	<L.C.	17.98	29080.03	15.86	90.21
<b>Sed 5</b>	92.73	0.32	29.83	23169.81	76.41	155.86
<b>Sed 6</b>	<L.C.	<L.C.	2.97	17023.27	7.72	51.88
<b>Sed 7</b>	<L.C.	<L.C.	15.04	28737.39	15.31	80.52
<b>Sed 8</b>	<L.C.	<L.C.	0.00	17166.59	5.53	47.80
<b>L.D. (mg/L)</b>	0.0083	-	0.0028	0.0031	0.0025	0.0009
<b>L.C. (mg/L)</b>	0.0277	-	0.0093	0.0103	0.0083	0.0030

Las muestras Sed 2 y Sed 3 que están dentro de la zona no afectada, mantienen una cierta igualdad en sus concentraciones y se consideran los valores de ruido natural de fondo.

Considerando el ruido natural de fondo (Sed 2 y Sed 3) se puede observar que las muestras dentro de la zona afectada por jales, a excepción de Sed 1 y Sed 5, no están siendo impactadas por los jales mineros. En la muestra Sed 1 se encuentran todas las concentraciones mayores de todos los elementos analizados. Cabe mencionar que fue la única muestra que estuvo espacialmente debajo de un jal minero (Jales 4) siendo influenciado por éste y dando como consecuencia sus altos valores. La muestra Sed 5 se ubica a orillas del río Xichú en cercanía de la confluencia con el río Catarina de mezquital.

La zona de mezcla está representada por una sola muestra Sed 4. Los valores de esta muestra tiende a aumentar con relación a la muestras Sed 2 y Sed 3 (zona no afectada por jales) y disminuir con respecto a la muestra Sed 5 (zona afectada por jales) lo que puede implicar que la mezcla de los ríos en cierto momento está aportando concentraciones de los elementos hacia los sedimentos.

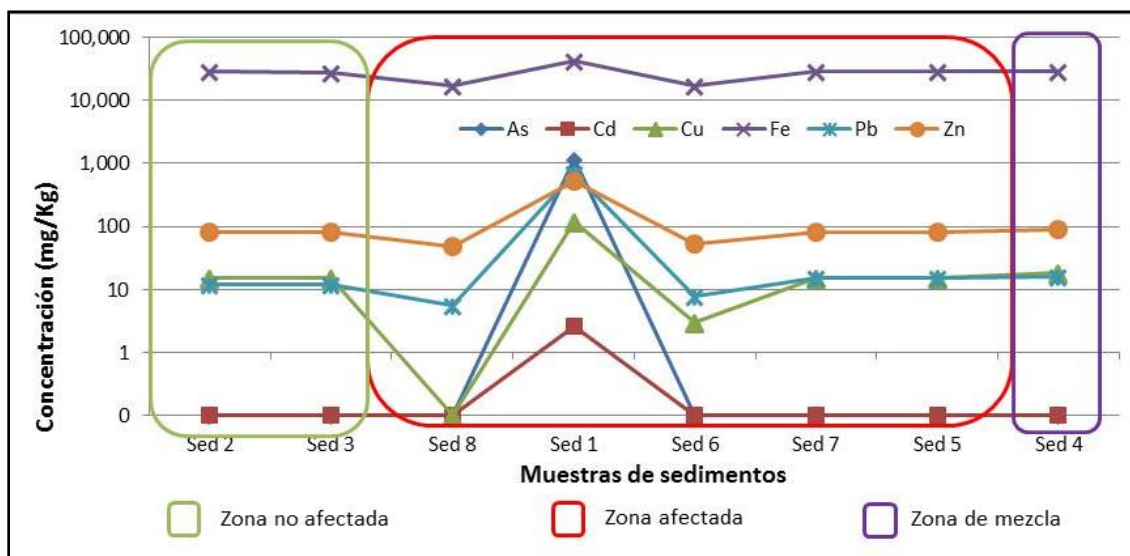


Figura 58. Gráfica de concentraciones de metales (Cd, Cu, Fe, Pb y Zn) y metaloide (As) en las muestras de sedimentos del río Xichú

### V.3 Determinación geoquímica de suelos

Algunos metales pesados en los suelos son micronutrientes que están presentes en relativamente bajas concentraciones, aunque también pueden ser tóxicos si se superan ciertos límites. En la Tabla 25 se presentan las concentraciones totales de As, Cd y Pb que se establecieron en nuestro país como valores de referencia para la remediación de suelos contaminados con metales y metaloides a través de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (DOF, 2007) que servirán de referencia con respecto a las



concentraciones obtenidas en las muestras de suelo en la zona. Debido al uso de suelo en el valle de Xichú las concentraciones de referencia serán los valores de uso agrícola.

Tabla 25. Concentraciones totales de referencia de elementos para suelo con diferentes usos (SEMARNAT, NOM-147)

Contaminante	Uso agrícolas/residencial/comercial (mg/kg)	Uso industrial (mg/kg)
<b>Arsénico</b>	22	260
<b>Cadmio</b>	37	450
<b>Plomo</b>	400	800

### V.3.1 Recuperación de elementos en la técnica analítica

El material estándar de referencia (SRM) 2710a “Montana Soil” fue utilizado como control de calidad de los procesos de digestión y de cuantificación. En la tabla 25 Se presentan los promedios de recuperación obtenidos del análisis del material 2710a para cada uno de los elementos analizados.

El porcentaje de recuperación (tabla 26) para la digestión ácida por agua regia de los elementos analizados es aceptable en base al criterio establecido  $\pm 20\%$  (Chen, 1997).

Tabla 26. Porcentaje de recuperación de los elementos analizados con relación al material de referencia 2710a “Montana Soil”

Elemento	LD (mg/L)	LC (mg/L)	Recuperación (%)
<b>As</b>	0.0202	0.0673	92 $\pm$ 8
<b>Cd</b>	0.0127	0.0423	83 $\pm$ 16
<b>Cu</b>	0.0150	0.0045	104 $\pm$ 10
<b>Fe</b>	0.0649	0.2314	104 $\pm$ 20
<b>Pb</b>	0.0134	0.0447	91 $\pm$ 4
<b>Zn</b>	0.0116	0.0389	93 $\pm$ 17

La tabla 27 indica las concentraciones de los metales y As en las muestras de suelo por medio de las digestiones. Las muestras se ubican en zonas de cultivos y en cercanías al río Xichú además de estar después de los jales mineros en la dirección del flujo del río.

En el muestreo de suelo no se consideró la zona de mezcla debido a que todas las muestras se obtuvieron en zonas de cultivos y debido a que en la zona de mezcla de los ríos no existe evidencia actual o anterior de uso de suelo por cultivos.

Las mayores concentraciones de los elementos se encuentran dentro de las muestras Suelo 10 y Suelo 6. La muestra de Suelo 10 tiene todos los valores mayores de los metales y metaloide a excepción del Pb que se encontró en Suelo 6. Las concentraciones menores están en la muestra de Suelo 12.

Tabla 27. Resultados de las concentraciones de los elementos en suelos

mg/kg	As	Cd	Cu	Fe	Pb	Zn
Suelo 1	95.76	<L.C.	<L.C.	39753.38	68.59	148.49
Suelo 2	107.37	<L.C.	<L.C.	42182.76	122.89	111.69
Suelo 3	71.44	<L.C.	<L.C.	30690.62	91.53	163.89
Suelo 4	80.73	<L.C.	<L.C.	29420.53	91.40	163.64
Suelo 5	267.17	<L.C.	73.82	41209.52	474.74	609.48
Suelo 6	1634.20	41.52	310.44	58105.61	3379.63	3826.86
Suelo 7	213.85	<L.C.	79.61	22828.75	373.17	930.63
Suelo 8	224.91	<L.C.	<L.C.	23298.14	120.56	121.80
Suelo 9	1382.87	<L.C.	407.11	48095.74	1887.85	2076.27
Suelo 10	4708.62	77.92	530.14	84318.11	2823.51	4449.23
Suelo 11	917.40	<L.C.	181.25	43152.90	905.68	1104.03
Suelo 12	<L.C.	<L.C.	<L.C.	17128.21	<L.C.	46.27
Suelo 13	<L.C.	<L.C.	<L.C.	25775.41	<L.C.	89.79
Suelo 14	<L.C.	<L.C.	<L.C.	20619.32	<L.C.	62.11
Suelo 15	<L.C.	<L.C.	<L.C.	27901.97	<L.C.	78.71
Suelo 16	196.17	<L.C.	57.66	37197.40	332.24	632.89
Suelo 17	52.09	<L.C.	<L.C.	35379.12	58.54	125.28
Suelo 18	70.65	<L.C.	<L.C.	34178.10	74.74	134.13
Suelo 19	188.08	<L.C.	71.79	46385.68	376.12	604.21
L.D. (mg/L)	0.0289	0.0208	0.0242	0.1897	0.0224	0.0228
L.C. (mg/L)	0.0963	0.0693	0.0807	0.6323	0.0747	0.0760

Las muestras desde Suelo 1 a 11 y de Suelo 16 a 19 se encuentran dentro de la zona afectada por jales (Fig. 59). Como se ha dicho la muestra de Suelo 10 y Suelo 6 son las de concentraciones mayores las cuales se ubican a unos metros de Jales 1 en la parte superior de éste y aproximadamente a 100 metros de Jales 4 río abajo, respectivamente.

Las muestras que se encuentran en la zona afectada por jales presentan ciertas oscilaciones de concentraciones en el transcurso del río.

En la zona no afectada se encuentran las muestras de Suelo 12, 13, 14, 15. En la gráfica se puede observar como las concentraciones de las muestras marcan la inexistencia de una tendencia de aumento sino que las concentraciones de los elementos mantienen valores

similares entre ellos y en menor proporción con respecto a las muestras ubicadas en la parte que denominamos zona afectada.

De forma general se puede observar una sensible disminución de las concentraciones de los metales de la zona afectada hacia la zona no afectada por lo que se podría considerar que en determinado momento los jales podrían aportar cierta concentración de metales al suelo, aunque también se puede considerar la existencia de algunos químicos que pudiesen utilizarse en el cultivo como los fertilizantes (Galán et al. 2008).

Partiendo de la zona no afectada como el ruido natural de fondo de las concentraciones de toda el área, se realizó un promedio de las concentraciones de los elementos de las 4 muestras dentro de esta zona (Prom ZNA) para compararlos con los valores obtenidos en el resto de las muestras (Fig. 58). Los resultados obtenidos serán discutidos por elemento comparados con las concentraciones de los metales dentro de las NOM-147. Para una mejor visualización de estos datos se generaron las siguientes figuras 60-65.

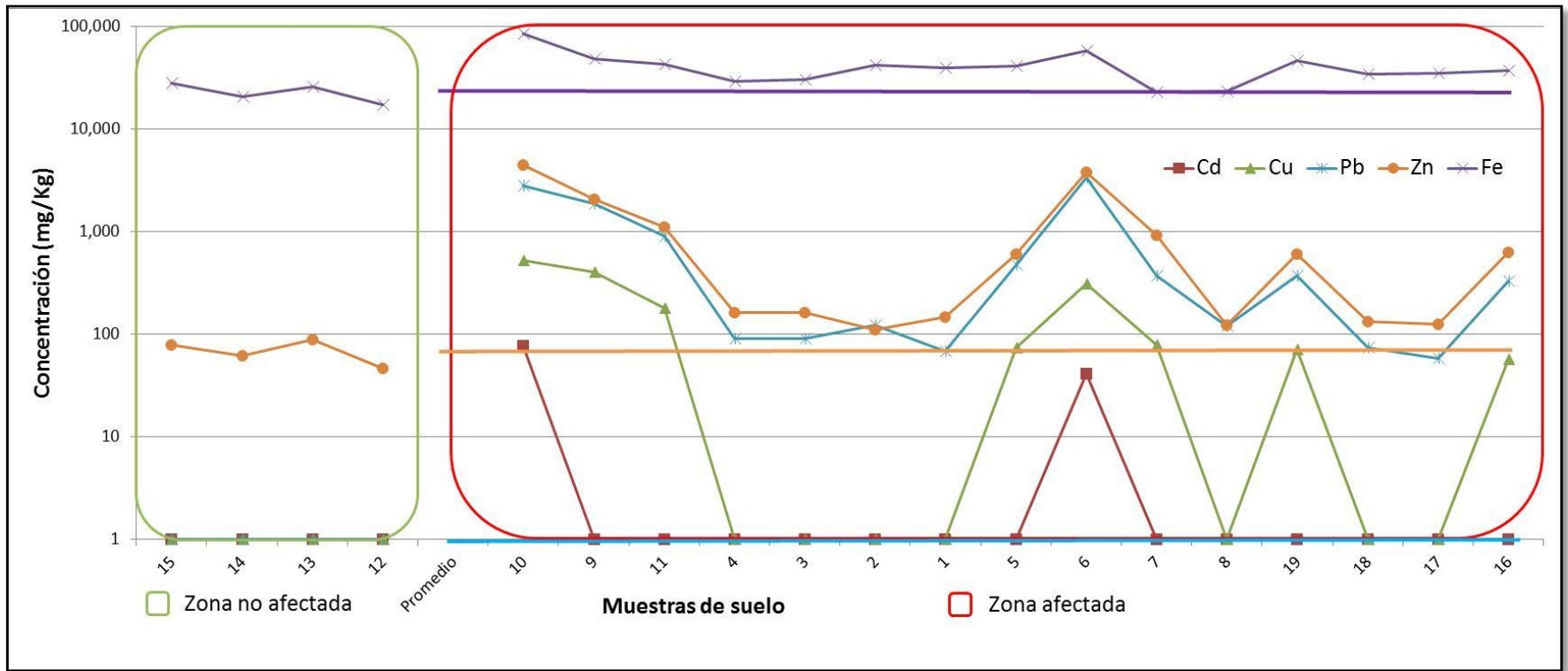


Figura 59. Gráfica de concentraciones de metales (Cd, Cu, Fe, Pb y Zn) y metaloide (As) en las muestras de suelos (en dirección al flujo del río) en áreas de cultivos aledaños al río Xichú

### V.3.2 Concentración de Arsénico

En la figura 60 se pueden observar las líneas de concentración de las muestra de suelo en la zona del valle de Xichú junto con los valores de la NOM-147 y el promedio de las concentraciones del ruido natural de fondo del área (zona no afectada).

Los resultados indican que todas las muestras dentro de la zona no afectada están por debajo de la NOM-147 lo que podría considerarse como “suelos no contaminados”. La comparación de las muestras de suelo de la zona afectada por jales con los límites de la NOM-147 indica que todas superan ese umbral de concentración y que podrían establecerse como “suelos contaminados”.

Para poder establecer si los “suelos contaminados” son resultados de una contaminación de fuente natural o antropogénica se comparó el Prom ZNA contra las muestras de suelo del valle de Xichú. Se observa que las concentraciones de los suelos de Xichú están por encima del Prom ZNA lo que indicaría que los valores obtenidos de As están siendo impactados por fuente antropogénicas.

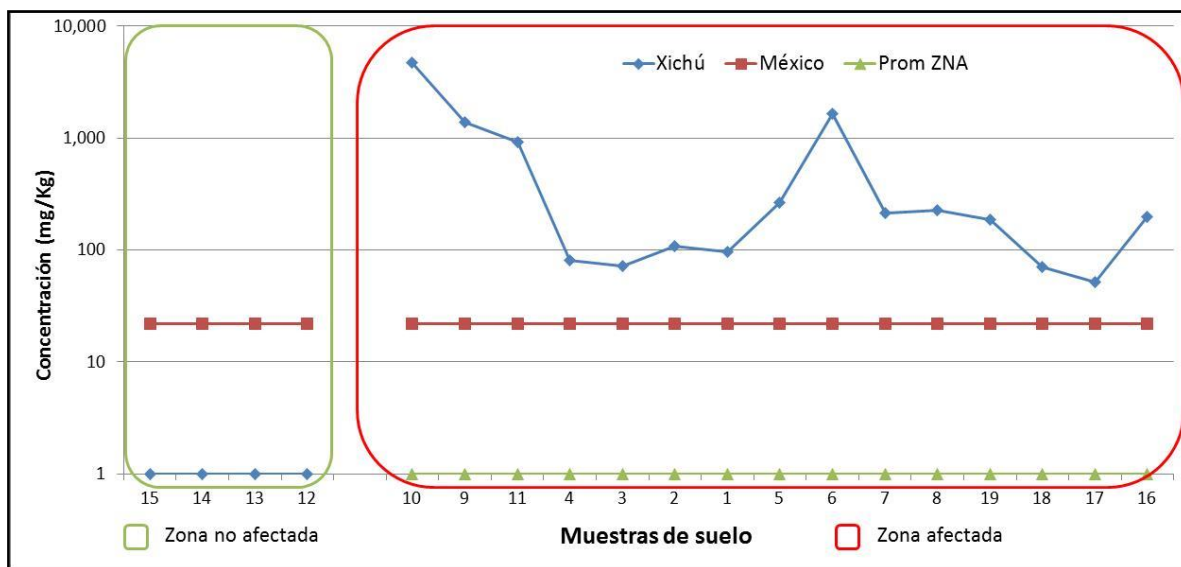


Figura 60. Gráfica de comparación en concentraciones de As en suelos de Xichú, NOM-147 y promedio de la zona no afectada (Prom ZNA)

### V.3.3 Concentración de Cadmio

Las concentraciones de los elementos analizados en el estudio, el Prom ZNA y los valores límites de la NOM-147 se representan en la figura 61. Los resultados muestran que los suelos dentro de la zona no afectada pueden considerarse “suelos no contaminados” debido a que sus concentraciones están por debajo de la NOM-147. De la zona afectada

por jales solamente las muestras Suelo 10 y 6 están por encima de la NOM-174 por lo que pueden considerarse como “suelos contaminados”.

Para distinguir si las concentraciones obtenidas en los suelos tienen un fuente natural o de origen antropogénica se comparó el Prom ZNA (considerada como el ruido natural de fondo del área) con respecto a las muestras de suelo la zona afectada. Las muestras Suelo 6 y 10 están por encima de los valores por lo que podría considerarse que han sido impactadas por una fuente antropogénica.

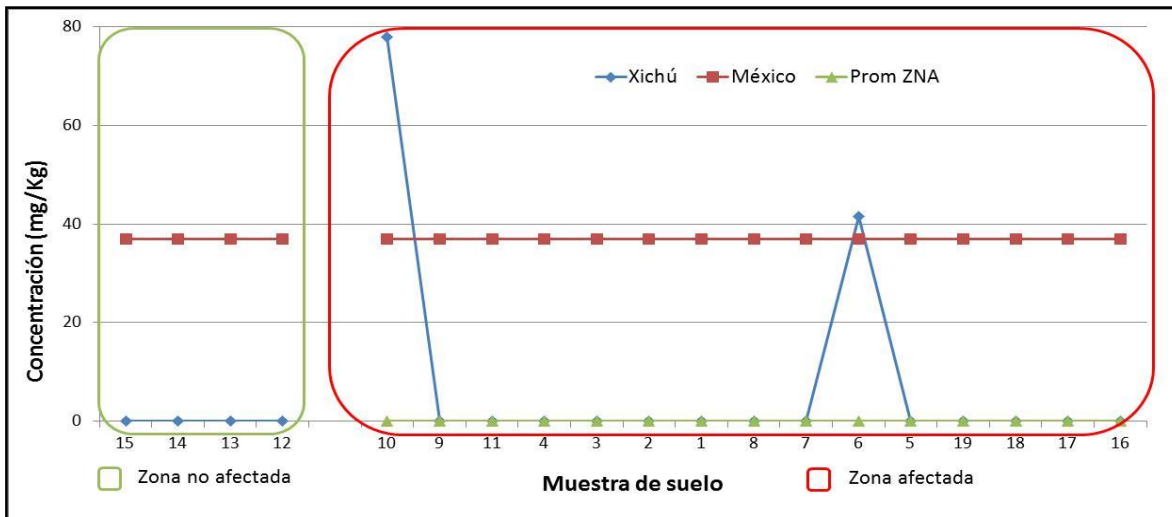


Figura 61. Gráfica de comparación en concentraciones de Cd en suelos de Xichú y el promedio de la zona no afectada (Prom ZNA)

### V.3.4 Concentración de Cobre

La figura 62 muestra las concentraciones de cobre en el suelo dentro de la zona de estudio (tabla 21). Para el de México SEMARNAT no tiene definido rangos de concentraciones de Cu para el establecimiento de un suelo contaminado.

Con lo anterior, la comparativa que se realizó fue entre las muestras dentro de la zona afectada por jales y los valores de ruido natural para precisar si existe una contribución antropogénica en las concentraciones de las muestras de suelo. Los resultados indicarían que existe una aportación de metales de los jales hacia algunas muestras del suelo.

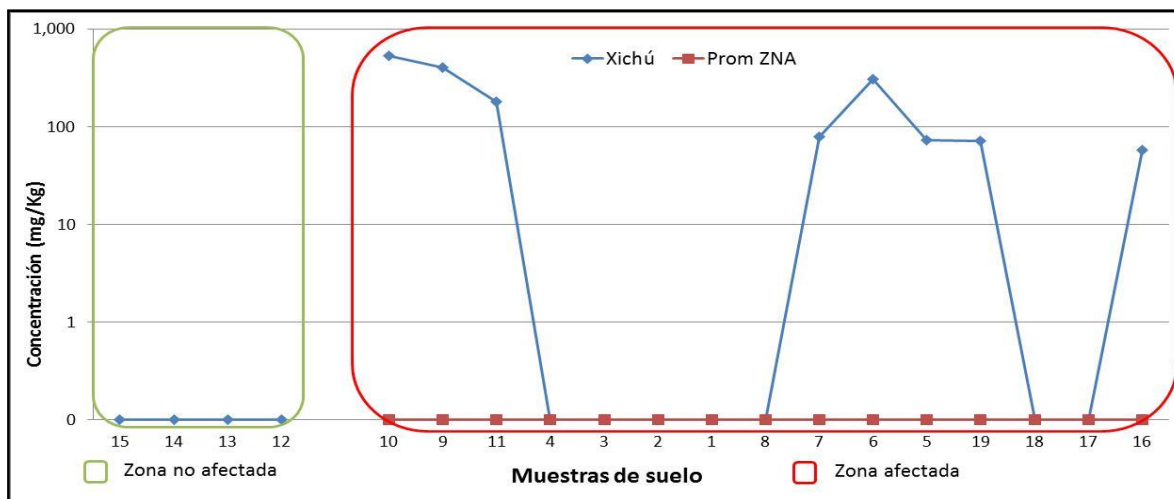


Figura 62. Gráfica de comparación en concentraciones de Cu en suelos de Xichú, NOM-147 y promedio de la zona no afectada (Prom ZNA)

### V.3.5 Concentración de Hierro

Las concentraciones de hierro obtenidos en las muestras de suelo se observan en la figura 63. En la NOM-147 no existe un valor límite de concentración de hierro para poder establecer un sitio de suelo contaminado.

Se realizó una comparación entre las concentraciones de las muestras de suelo entre la zona afectada por jales y los valores Prom ZNA. Los resultados indican que las muestras de suelo de la zona afectada por jales tienen mayores concentraciones de los elementos analizados en todas las muestras, exceptuando Suelo 7. A partir de lo anterior podemos considerar que el suelo de esta zona ha sido impactada por una fuente antropogénica, los jales mineros.

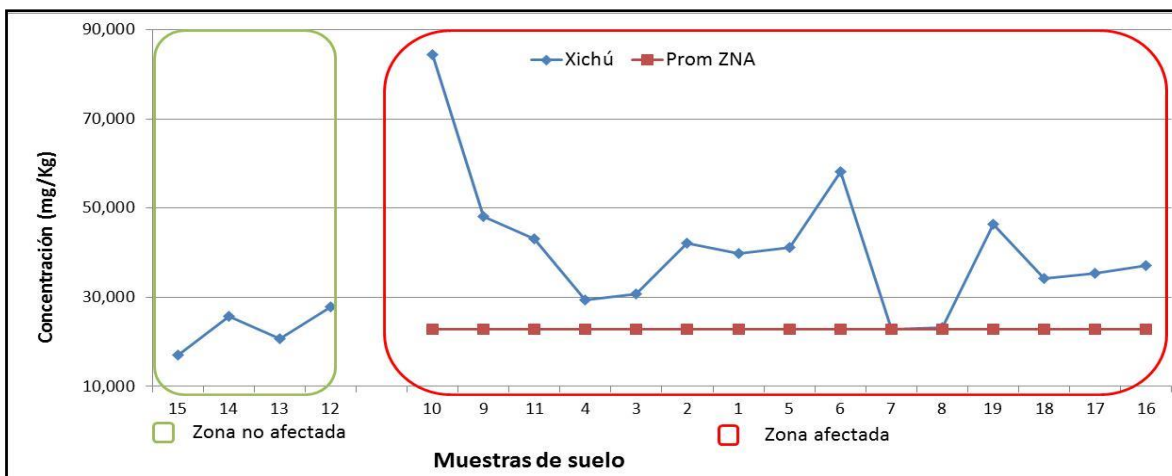


Figura 63. Gráfica de comparación en concentraciones de Fe en suelos de Xichú y promedio de la zona no afectada (Prom ZNA)

### V.3.6 Concentración de Plomo

Las concentraciones de las muestras de Suelo de Xichú (tabla 21) están representadas en la figura 64 junto con los valores de la NOM-147 y Prom ZNA.

Los resultados indican que la zona no afectada por jales están por debajo de los valores límites en la NOM-147. Comparando las concentraciones de las muestras entre la zona afectada y la NOM-147 nos muestra que los suelos que podrían establecer como “suelos contaminados” serían los Suelos 10-9-11-6-5.

La comparación entre Prom ZNA y muestras de suelo de Xichú nos podría indicar si las concentraciones obtenidas pudiesen tener una fuente antropogénica o natural. Con lo anterior, se observa que todas las concentraciones de las muestras dentro de la zona afectada por jales están por encima del valor natural de fondo en el área lo que indicaría un posible impacto de fuente antropogénica.



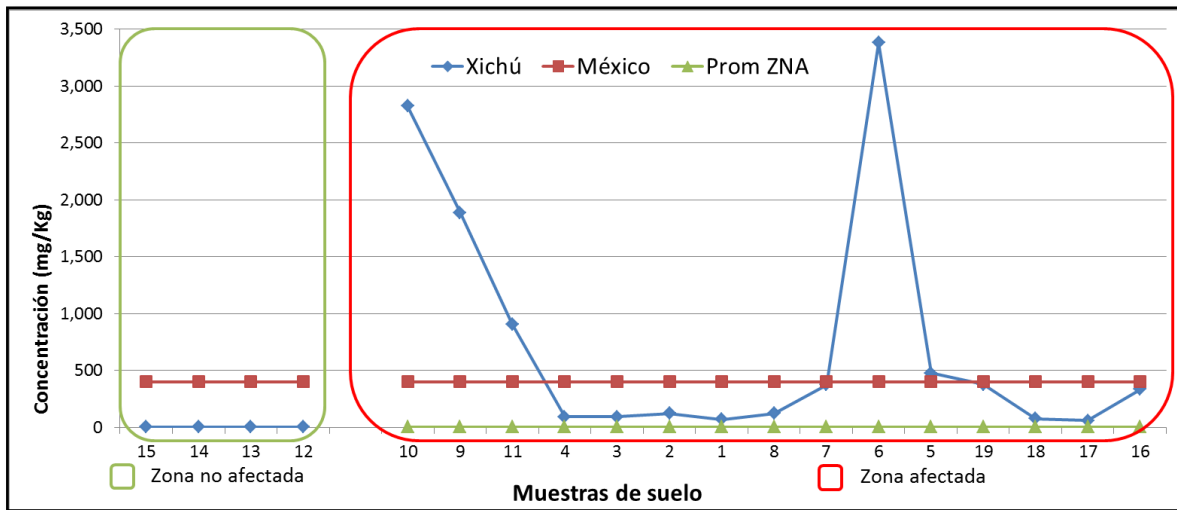


Figura 64. Gráfica de comparación en concentraciones de Pb en suelos de Xichú, Nom-147 y promedio de la zona no afectada (Prom ZNA)

### V.3.7 Concentración de Zinc

La figura 65 representa las concentraciones de las muestras de suelo obtenidas en la zona de estudio (Tabla 21), la relación con los valores normativos encontrados en la tabla 10 y los valores naturales de fondo. Se observa que en México no existen límites de concentraciones de Zn para declarar suelos contaminados debido a diferentes usos.

La comparativa entre las concentraciones natural (Prom ZNA) y las muestras de suelo de Xichú nos indicaría si existen un aporte antropogénico hacia el valle. Los resultados todas las muestras en la zona afectada están por encima del Prom ZNA lo que refiere a un aporte antropogénico (jales mineros) hacia el suelo.

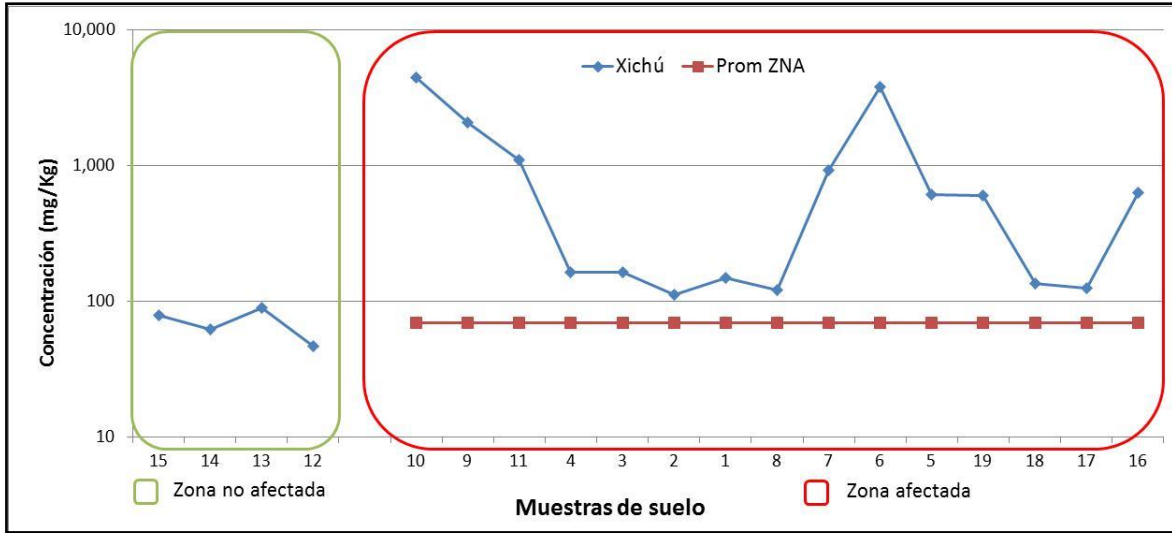


Figura 65. Gráfica de comparación en concentraciones de Zn en suelos de Xichú y promedio de la zona no afectada (Prom ZNA)

## VI. MODELADO GEOQUÍMICO

El modelado geoquímico es una herramienta muy útil para evaluar las condiciones físico-químicas de los desechos de minas así como los controladores sobre la movilidad de los metales pesados.

Se realizaron diagramas geoquímicos de tipo pH (actividad del H<sup>+</sup>) Vs Eh (actividad de e<sup>-</sup>). Con estos diagramas se muestran la estabilidad de los minerales y la predominancia de especies acuosas las cuales cubrirían las condiciones físico-químicas que se presentan en los jales.

Los datos utilizados se asumen a partir de condiciones ideales, no reales, debido a que con los resultados obtenidos en la investigación no se mostraron los campos de minerales presentes. Debido a lo anterior, el análisis del modelado se realizó a partir la mineralogía obtenido por DRX para así tratar de reproducir las condiciones presentes en la corteza de los jales.

La figura 66 muestra diagramas pH vs Eh de un sistema H<sub>2</sub>O - SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> - AsO<sub>4</sub><sup>-2</sup> - Fe<sup>3+</sup> - K<sup>+</sup> y H<sub>2</sub>O - SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> - AsO<sub>4</sub><sup>-2</sup> - Fe<sup>3+</sup> - K<sup>+</sup> - Ca<sup>2+</sup>, respectivamente (65a y 65b) con las condiciones establecidas.

a)

T = 25 °C

P = 1.013 bar (1 atm)

Actividad H<sub>2</sub>O = 1

Actividad SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> = 10<sup>-3</sup>

Actividad Fe<sup>+2</sup> = 10<sup>-3</sup>

Actividad AsO<sub>4</sub><sup>-2</sup> = 10<sup>-3</sup>

Actividad K<sup>+</sup> = 10<sup>-6</sup>

Sin considerar: Rejalgar, oropimento, troleita, pirrotita.

b)

T = 25 °C

P = 1.013 bar (1 atm)

Actividad H<sub>2</sub>O = 1

Actividad SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> = 10<sup>-2</sup>

Actividad Fe<sup>+2</sup> = 10<sup>-3</sup>

Actividad H<sub>2</sub>AsO<sub>4</sub><sup>-</sup> = 10<sup>-3</sup>

Actividad K<sup>+</sup> = 10<sup>-6</sup>

Actividad Ca<sup>+2</sup> = 10<sup>-2</sup>

Sin considerar: Rejalgar, oropimento, troleita, pirrotita.

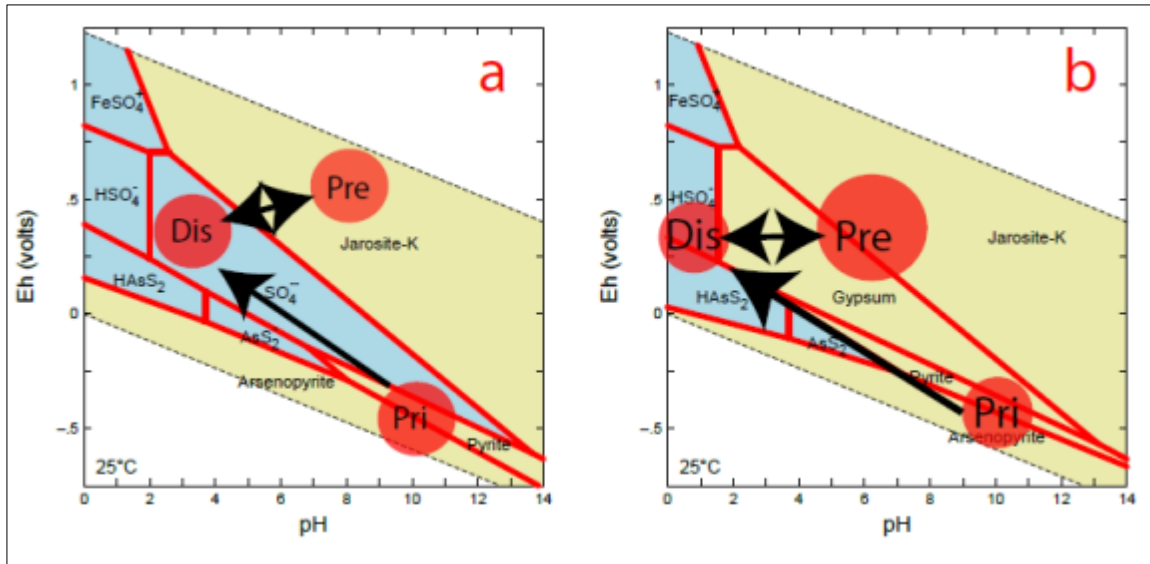


Figura 66. Diagramas Eh – pH. Sistema a)  $\text{H}_2\text{O} - \text{SO}_4^{2-} - \text{AsO}_4^{2-} - \text{Fe}^{3+} - \text{K}^+$  b)  $\text{H}_2\text{O} - \text{SO}_4^{2-} - \text{AsO}_4^{2-} - \text{Fe}^{3+} - \text{K}^+ - \text{Ca}^{2+}$ .

- Pri = primario, Dis = disolución, Pre = precipitación

El diagrama representado en la figura 66a muestra los compuestos sólidos y las fases acuosas según el sistema utilizado asumiendo su presencia dentro de los pilas de desechos. El círculo en la parte inferior derecha indica las condiciones (inestables) de sulfuros (pirita y arsenopirita) considerados primarios en los jales y registrados en los estudios de DRX. Considerando que los jales mineros en las cercanías del río Xichú se encuentran constituidas por una costra exterior, formada por la precipitación de óxidos de Fe; (oxi)hidróxidos de Fe; jarosita, yeso así como fases menores de carbonatos y fases de óxidos, generados por la oxidación de la pirita al ser expuesta a intemperismo además de la rápida precipitación de minerales secundarios. Esta cobertura disminuye la susceptibilidad de los minerales a un continuo intemperismo y disolución por lo que debajo de la costra existirá una gran presencia de minerales primarios y óxidos metálicos (Lottermoser, 2010). La interacción de los minerales en superficie de los jales al ser expuesto al agua y a las mismas condiciones atmosféricas esos sulfuros primarios (pirita, arsenopirita y otros) se puede llegar a disolver generando una acidez moviendo las condiciones del sistema hacia la parte izquierda del diagrama Eh-pH y bajo condiciones oxidantes (moviendo hacia la parte superior el diagrama), representado por el círculo de disolución.

Una vez en solución, los metales y los sulfatos alcanzan rápidamente la saturación (debido a una fuerte evaporación) y llegan a precipitar minerales (jarosita, yeso y otras fases menores, no indicados en el diagrama como carbonatos de Cu y algunos óxidos) que se muestran en el círculo de precipitación. La dirección de las flechas muestra que las reacciones son reversibles entre las fases minerales sólidas secundarias y las fases acuosas. Este proceso es controlado por las lluvias temporales (lluvias de tipo monzón) y alta radiación solar generando una alta evaporación presentes en la zona de estudio.

En el diagrama Eh-pH de la figura 66b fue modelado a partir del sistema  $\text{H}_2\text{O} - \text{S} - \text{As} - \text{Fe}$  donde se muestran los campos de estabilidad de diferentes compuestos sólidos y en fase

acuosas. Las condiciones tomadas para formular el diagrama nos muestra la pirita y arsenopirita en el campo reductor tomadas como minerales primarios (círculo "pri"), en el cambio de condiciones indicado por la flecha hacia la disolución se da en condiciones oxidantes lo que generaría de acidez, liberación de cationes como As y Fe además de formarse sulfatos. Al llegar al punto de saturación del medio se generaría precipitación de minerales secundarios como jarosita (obteniendo el potasio derivado de los minerales primarios como los aluminosilicatos) además de la precipitación de yeso (obteniendo el calcio a partir de las calizas presentes en la zona). Las flechas reversibles vistas entre las zonas de disolución y precipitación indican el ciclo geoquímico presente en la superficie de los jales, este ciclo está básicamente controlado por las lluvias y el período de evaporación.

La figura 67 muestra diagramas pH vs Eh de un sistema  $H_2O - SO_4^{2-} - AsO_4^{2-} - Fe^{2+}$  y  $H_2O - SO_4^{2-} - AsO_4^{2-} - Fe^{3+} - K^+ - Cu^{2+}$ , respectivamente (66a y 66b) con las condiciones establecidas.

a)

T = 25 °C

P = 1.013 bar (1 atm)

Actividad  $H_2O = 1$

Actividad  $SO_4^{2-} = 10^{-3}$

Actividad  $Fe^{2+} = 10^{-6}$

Actividad  $AsO_4^{3-} = 10^{-3}$

Actividad  $K^+ = 10^{-6}$

Sin considerar: Ferrita Ca, Ferrita Mg, bornita, escorodita.

b)

T = 25 °C

P = 1.013 bar (1 atm)

Actividad  $H_2O = 1$

Actividad  $SO_4^{2-} = 10^{-1}$

Actividad  $Fe^{3+} = 10^{.72}$

Actividad  $AsO_4^{3-} = 10^1$

Actividad  $K^+ = 10^{-2}$

Actividad  $Cu^{2+} = 10^{-10}$

Sin considerar: Escorodita, Ferrita Cu, magnetita, melanterita, FeO (c), CuFeO (c).

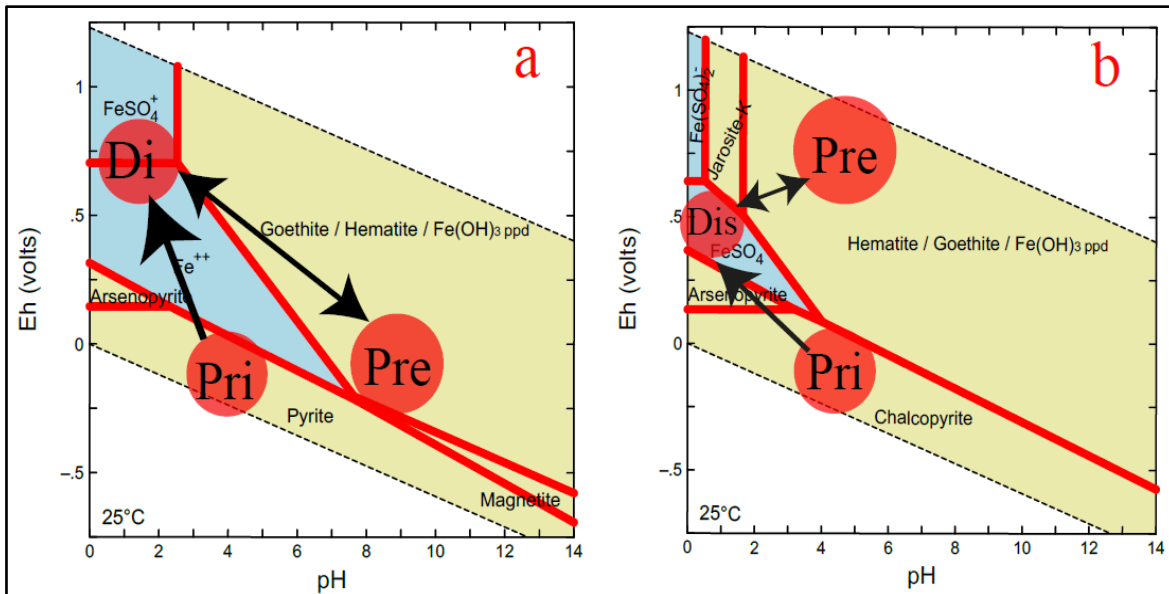


Figura 67. Diagramas Eh – pH. Sistema a)  $H_2O - SO_4^{2-} - AsO_4^{2-} - Fe^{2+} - K^+$  b)  $H_2O - SO_4^{2-} - AsO_4^{3-} - Fe^{3+} - K^+ - Cu^{2+}$ .

El diagrama de la figura 67a representa un sistema formado de S-As-Fe-K-H<sub>2</sub>O asumiendo la presencia de ellos dentro de los jales mineros. Las condiciones iniciales se considera a partir de los minerales encontrados dentro del estudio por medio de la DRX y los trabajos previos de la zona (arsenopirita y pirita), denominados primarios, mostrados por el círculo “pri”. El cambio de las condiciones iniciales provoca un sistema más oxidante debido a la oxidación de los sulfuros primarios. Este proceso REDOX provoca acidez al sistema agregado metales disueltos y sulfatos (se observa con la flecha que se dirige de los círculos “pri” a “dis”) que llegado a la saturación de los compuestos existe una precipitación de minerales secundarios como goethita, hematita, compuesto precipitados de Fe(OH)<sub>3</sub>, magnetita entre otros. La dirección de las flechas muestra que el proceso disolución-precipitación es de condición reversible en el sistema entre las fases sólidas y las fases acuosas.

El proceso general es controlado por las lluvias temporales en la zona lo que provoca la oxidación de los sulfuros primarios además de la alta radiación lo que generaría una evaporación y precipitación de los minerales.

La figura 67b representa un sistema S-As-Fe-K-H<sub>2</sub>O-Cu mostrando campos de mineralogía primaria (círculo pri), las fases acuosas (círculo dis) y las precipitaciones generadas por el cambio de las decisiones en el sistema (círculo pre).

La oxidación de los minerales primario (calcopirita y arsenopirita) provocan que el sistema dirija sus condiciones a la oxidación, se generan fases acuosas, se generan soluciones de algunos cationes y aniones (como sulfatos). El sistema llega a una saturación provocando la precipitación de minerales secundarios como por ejemplo los que se tienen en el diagrama (goethita, hematita y precipitados de Fe(OH)<sub>3</sub>). Las fases de precipitados junto con las fases sólidas son condiciones reversibles representados por las flechas en ambos sentidos. El sistema también es controlado por los procesos de disolución-precipitación.

Debido a la antigüedad de los jales y a la costra que los encapsula, la mayoría de las reacciones químicas se dan en superficie. El escurrimiento parece total aunque existe filtración a través de los jales y que puede producir drenaje ácido de roca. La tabla 28 indican las concentraciones de dos “charcos” de agua justo después de una tormenta (muestra 1) y otra después de un tiempo de evaporación (muestra 2). Los valores de concentraciones encontrados son altos para cada elemento analizado. Se observa también como a través del proceso de evaporación la acumulación de las concentraciones de los elementos aumenta.

Tabla 28. Concentraciones de muestras de agua

<b>Muestra de agua</b>	<b>As</b>	<b>Cd</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>Pb</b>	<b>Zn</b>
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	16.704	22.24	102.02	325.6	<l.c.	627.6
2	186.02	36.14	269.6	2218	<l.c.	1070.6
Recuperación (%)	95	96	101	92	95	92
L.D. (mg/L)	0.0176	0.0125	0.0139	0.0217	0.0150	0.0127
L.C. (mg/L)	0.0587	0.0417	0.0463	0.0723	0.0500	0.0423

## VII. CONCLUSIONES

La utilización de los diferentes métodos de estudios analíticos y mineralógicos en la investigación arrojaron información necesaria para poder caracterizar los jales mineros y, en menor parte, el suelo y los sedimentos circundantes a la zona y a lo largo del río Xichú.

Los resultados obtenidos en el estudio evidenciaron un impacto por las actividades antropogénicas a través de la minería (jales mineros) en las concentraciones de los metales y As en las muestras de suelos y sedimentos.

### Jales mineros

Las concentraciones máximas de los elementos estudiados por medio de la digestión ácida en la investigación dieron como resultado una distribución tal que Jales 1 contiene las mayores cantidades de As, Cd, Cu y Zn, Jales 3 lo fue para Fe y Jales 4 tuvo las mayores en Pb.

En general todos los elementos aumentan su concentración a manera que incrementa la profundidad en todos los jales mineros, exceptuando para As y Fe en Jales 1 y Cu, Pb y Zn en Jales 3.

En relación a las concentraciones de los elementos obtenidos por la extracción secuencial se obtuvo la siguiente relación de las fases químicas (considerando la suma de cada elemento) sulfuros (46.5%) > solubles (26.5%) > óxidos de Fe (14.9%) > (oxi)hidróxidos de Fe (7.5%) > carbonatos (4.7%).

Para el caso particular de cada elemento se estableció que As (61.1%), Fe (63.8%) y Pb (96.3%) se encuentran dentro de la fase de sulfuros mientras que Cd (57.2%), Cu (43.9%) y Zn (50.8%) están en la fase de solubles.

Aun cuando existen grandes cantidades de sulfuros, las reacciones de óxido-reducción en los jales pueden generar problemas ya que pueden ser liberados metales pesados al ambiente a través de la generación de drenaje ácido. Así como existen minerales que producirían acidez a través de reacciones de oxidación, se encontraron minerales primarios y secundarios como muscovita, anortita, ortoclasa, microclina, yeso y jarosita que podrían neutralizar la acidez dentro de los jales. Además de estos minerales, la presencia de elementos en los estudios de EDS como Ca, Mg, K, Si y Al podrían indicar la existencia de otros minerales en fases menores como silicatos y carbonatos.

Los estudios de DRX concluye la alta presencia de minerales de sulfuros que concuerdan con grandes concentraciones de los elementos en esa fase química a través de la extracción secuencial.

Elementos encontrados en los estudios de EDS pueden indicar la presencia de éstos en minerales en trazas o en otras fases menores que no pudiesen ser detectados en los difractogramas.



## Sedimentos

Las mayores concentraciones obtenidas de los análisis de los elementos en los sedimentos fueron encontradas en la muestra Sedimento 1 ubicada en las laderas de Jales 4. La muestra con menores concentraciones fue Sedimento 8, a excepción de Fe que se encontró en menores cantidades en Sedimento 6, la cual se ubica a unos metros antes de Jales 1.

Los valores aproximados para las máximas concentraciones fueron: As 1,100 mg/kg; Cd 2 mg/kg; Cu 119 mg/kg; Fe 42,000 mg/kg; Pb 686 mg/kg y Zn 525 mg/kg.

Las concentraciones aumentan conforme las muestra recorren río abajo a los jales mineros. También los resultados muestran que la zona de mezcla está impactada por los jales mineros.

Las bajas concentraciones de los elementos en los sedimentos con relación a los valores tan altos de la fuente (jales mineros) podrían indicar la poca estacionaridad de los elementos en este material. Las épocas de lluvias podrían ser la vía por la que los elementos son transportados y acumulados en la parte de la confluencia de los ríos. La mezcla de ambos aguas provoca la dilución de las concentraciones de los elementos.

## Suelos

La relación de las concentraciones de los elementos con respecto a su distribución geográfica estuvo acorde a los esperados antes de los estudios analíticos. Las muestras de suelo (Suelo 1 a Suelo 11 y Suelo 16 a Suelo 19) que se ubicaron en dirección río abajo, después de los jales mineros, en promedio mostraron mayores valores a diferencia del resto de las muestras (Suelo 12 a Suelo 15) localizadas en las orillas del río Catarina de mezquital en la denominada "zona no afectada".

La muestra de suelo 10 contienen las mayores concentraciones de los metales, a excepción del Pb, y del As. Los valores aproximados obtenidos en la muestra son las siguientes: As 4,700 mg/kg; Cd 77 mg/kg; Cu 530 mg/kg; Fe 84,000 mg/kg y Zn 4,400 mg/kg. En relación a la concentración mayor de Pb en el suelo, ésta se encontró en la muestra Suelo 6 con un valor aproximado de 3,300 mg/kg.

Se compararon las concentraciones promedios de los elementos de las muestras de suelo con el promedio de las concentraciones de la zona afectada y también con valores de referencia en México para determinar sitios contaminados (As, Cd y Pb).

Generalmente todas las concentraciones de los elementos en las muestras de suelo estuvieron por encima del promedio obtenido en la zona no afectada. Lo anterior podría indicar un impacto antropogénico y considerar el suelo de valle de Xichú un sitio afectado por los jales mineros. En la comparación de la normativa de México con las concentraciones de los suelos de Xichú, el As estuvo por encima de esos valores de referencia, Cd en las muestra de Suelo 9 y Suelo 6 mientras que el Pb con valores mayores en Suelo 5, Suelo 6, Suelo 9, Suelo 10 y Suelo 11.

## Dinámica geoquímica

La dinámica de disolución y precipitación de los minerales están controlados por las temporadas de lluvias y una alta tasa de evaporación en la zona. Estos procesos generan en la superficie de los jales minero una capa de fases óxidas mineralógicas dejando en el interior la existencia de minerales como sulfuros, óxidos y carbonatos. La mineralogía en superficie se consideraría secundaria tomando ejemplos como jarosita, hematita, goethita, ferrihidrita, yeso y carbonatos. Esta capa superficial disminuye la susceptibilidad de los minerales al intemperismo. También hay que considerar que las altas concentraciones de los elementos en las muestras de agua antes y después de una tormenta, indicaría que si existiría la lixiviación de los metales y del As aun cuando existe la costra superficial en los jales. De esta información obtenida en la geoquímica y mineralogía se plantearía que los elementos de los jales mineros son liberados al ambiente de forma bastante lenta.

El modelado nos muestra como la mineralogía primaria bajo un cambio oxidante en el sistema genera una fase de solución de cationes y aniones. Al momento de alcanzar la saturación existe una precipitación de minerales secundarios en diferentes condiciones de Eh-pH. Este último se considera un ciclo reversible debido a los procesos disolución-precipitación.

## VIII. BIBLIOGRAFÍA

- Alakangas L., Öhlander B. 2006. Formation and composition of cemented layers in low-sulphide mine tailings, Laver, Northern Sweden. *Environ. Geol.* 50:809–819.
- Alpers, C.N., Blowes, D.W., Nordstrom, D.K., Jambor, J.L. 1994. Secondary minerals and acid mine-water chemistry. En: Jambor, J.L., Blowes, D.W. *Environmental Geochemistry of Mine Wastes*. Mineralogical Association of Canada Short Course Volume 22: 247-270.
- Ávila, P.F., Ferreira da Silva, E., Salgueiro, A.R., Farinha, J.A. 2008. Geochemistry and Mineralogy of Mill Tailings Impoundments from the Panasqueira Mine (Portugal): Implications for the Surrounding Environment. *Mine Water. Environ.* 27:210–224.
- Azcue J.M., Mudroch A., Rosa F., and Hall G. E. M. 1994. Effects of abandoned gold mine tailings on the arsenic concentrations in water and sediments of Jack of Clubs Lake, BC. *Environ. Technol.* 15, 669–678.
- Belkin, H. E., Sparck, H. M. 1993. Mercury, arsenic, antimony, and selenium contents of sediment from the Kuskokwim River, USA. *Environmental Geology* 22, 106-110.
- Bell FG, Donnelly LJ (2006) *Mining and its impact on the environment*. Taylor Francis, London
- Bethke, C.M., 1996. *Geochemical Reaction Modeling*. Oxford University Press. 397 pp.
- Bigham, J.M., Nordstrom, D.K. 2000. Iron and aluminium hydroxysulfates from acid sulfate waters. En: Alpers, C.N., Jambor, J.L., Nordstrom, D.K. (eds) *Sulfate minerals: crystallography, geochemistry and environmental significance*, vol 40. Mineralogical Society of America, Washington, DC, pp 351–403 (Reviews in mineralogy and geochemistry).
- Blowes, D.W., Reardon, E.J., Jambor, J. L., Cherry, J. A. 1991. The formation and potential importance of cemented layers in inactive sulfide mine tailings. *Geochim. Cosmochim. Acta* 55:965–978.
- Blowes, D.W., Ptacek, C.J., Jambor, J.L., Weisener, C.G., 2003. The geochemistry of acid mine drainage. In: Lollar, B.S. (Ed.), *Environmental Geochemistry, Treatise on Geochemistry*, vol. 9. Elsevier, pp. 149–204.
- Boulton, S., Collins, N.D., White, K.N., Curtis, C.D. 1994. Metal transport in a stream polluted by acid mine drainage—the Afon Goch, Anglesey, UK. *Environ. Pollut.* 84:279–284.
- Boulet, M. 1997. A comparative mineralogical and geochemical study of sulphide mine-tailings at two sites in New Mexico, USA. Tesis.

- Bowell, R.J., 1994. Sorption of arsenic by iron oxides and oxyhydroxides in soils. *Appl. Geochem.* 9, 279 – 286.
- Carrillo, A., Drever, J.I., 1998. Adsorption of arsenic by natural aquifer material in the San Antonio – El Triunfo mining area, Baja California. *Environ. Geol.* 35 (4), 251 – 257.
- Carrillo, A., Drever, J.I. and Gonzalez, M. 2000. Arsenic content and groundwater geochemistry of the El Trinufo-Carrizal and San Antonio-Los Planes aquifers, southernmost Baja California, Mexico: Contaminant plumes from a mining area. *Environmental Geology* v.39, n.11, p.1295-1303.
- Carrillo, A., Morton., Gonzáles, E., Rivas, H., Oesler, G., García, V., Hernández, E., Morales, P., Cienfuegos, E. 2003. Environmental geochemistry of Guanajuato Mining Distric, Mexico. *Ore geology reviews* 23 (2003) 277-297.
- Carrillo, R. 2005. Niveles de contaminación de los suelos y las plantas. En: González, M.C. Pérez, J., y Carrillo, R. Eds. *El sistema planta-microorganismo-suelo en áreas contaminadas con residuos de minas*, pp. 161 Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México.
- Castro, J., Kramar, U., Viera, D.F., Hernández, P.M., 2001. Dispersión de residuos mineros en distritos históricos y recientes. XXIV Convención Internacional de la asociación de ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México (Corona-Esquivel y Gómez-Godoy, eds.), AIMMGM A.C., Acapulco, México. 404 pp.
- CEAG (Comisión Estatal del Agua de Guanajuato), 2000. Sinopsis del estudio de prospección hidrogeológica del acuífero de Xichú, Guanajuato.
- Chen, M. 1997. Research quality assurance plan for background concentration of trace metals in Florida surface soils. QAPP 960117. Soil Water Sci. Dep., Univ. Florida, Gainesville, FL.
- COREMI (Consejo de Recursos Minerales), 1978. Estudio geológico – geoquímico de detalle del área de Xichú, Guanajuato. Gerencia de estudios especiales. Depto. de estudios especiales. Archivo técnico.
- COREMI (Consejo de Recursos Minerales), 1978. Estudio geológico – geoquímico regional del área de Xichú, Guanajuato. Gerencia de estudios especiales. Depto. de estudios especiales. Archivo técnico.
- COREMI (Consejo de Recursos Minerales), 1979. Verificación de anomalías geoquímicas regionales del área de Xichú. Gerencia de estudios especiales. Depto. de estudios especiales. Archivo técnico.

- COREMI (Consejo de Recursos Minerales), 1981. Informe geológico minero plumbo-zincífero complementario proyecto Xichú, Guanajuato. Gerencia de exploración geológica. Residencia de Guanajuato. Archivo Técnico.
- COREMI (Consejo de Recursos Minerales), 1991. Informe geológico regional preliminar del área la Aurora, Zona Xichú, Mpio. de Xichú, Guanajuato. Subgerencia zona centro. Residencia Guanajuato. Archivo técnico.
- COREMI (Consejo de Recursos Minerales), 2003. Inventario físico de los recursos minerales del municipio de Xichú, Guanajuato. Dirección de minas Guanajuato.
- Cruz, O. 2013. Distribución de metales pesados y arsénico en jales, suelos, sedimentos y agua de la zona minera de Maconí, Querétaro. Tesis.
- Demant, A. 1978. Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. Univ. Nal. Autón. México. Inst. de geología, Revista, vol. 2, núm 2 (1978), p 172-187.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). 2004. 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 pos-operación de presas de jales: México, D.F.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). 2007. Norma oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo, hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.
- Dold, B. 2003. Speciation of the most soluble phases in a sequential extraction procedure adapted for geochemical studies of copper sulphide mine waste. *J Geochem Explor* 80:55–68.
- Dold, B. 2005. Basic concepts in environmental geochemistry of sulfide mine-waste. En: *Mineralogía, geoquímica y geomicrobiología para el manejo ambiental de desechos mineros. XXIV Curso Latinoamericano de Metalogenia*, 22 (pp. 1-36). Lima, Perú: UNESCO-SEG.
- Duddley, L., McLean, J., Sims, R., Jurinak, J., 1988. Sorption of copper and cadmium from the water-soluble fraction of an acid mine waste by two calcareous soils. *Soil Sci.* 145 (3), 207 – 214.
- Eguiluz, S., Aranda, M., Marrett, R., 2000. Tectónica de la Sierra Madre Oriental, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, v. LIII, (2000) 1-26.
- EMDM. Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México. Estado de Guanajuato. Municipio de Xichú.

- Ekosse, G., Van Den Heever, D.J., De Jager L., Totolo, O. 2004. Mineralogy of Tailings Dump around Selebi Phikwe Nickel-Copper Plant, Botswana. *J. Appl. Sci. Environ. Mgt.* Vol. 8 (1) 37-44.
- Fawcett, S.E., Jamieson, H.E. 2011. The distinction between ore processing and post-depositional transformation on the speciation of arsenic and antimony in mine waste and sediment. *Chemical Geology* 283: 109-118.
- Fyfe, W.S., 1998. Toward 2050: the past is not the key to the future—challenges for the science of geochemistry. *Environ. Geol.* 33 (2/3), 92 – 95.
- Galán, E., Fernández, J.C., González, I., Aparicio, P., Romero, A. 2008. Influence of geological setting on geochemical baselines of trace elements in soils. Application to soils of south-west Spain. *Journal of Geochemical Exploration*, 98, 89-106.
- Gordon, R.B., Bertram, M., Graedel, T.E. 2006. Metal stocks and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Science* 103: 1209-1214.
- Graupner, T., Kassahun, A., Rammlmair, D., Meima, J.A., Kock, D., Furche, M., Fiege, A., Schippers, A., Melcher, F. 2007. Formation of sequences of cemented layers and hardpans within sulfidebearing mine tailings (mine district Freiberg, Germany). *Appl Geochem* 22:2486–2508.
- Gutiérrez, R.M., Romero, F., González, H.G. 2007. Suelos y sedimentos afectados por la dispersión de jales inactivos de sulfuros metálicos en la zona minera de Santa Bárbara, Chihuahua, México.
- Hall, G., Vaive, J.E., Beer, R., Hoashi, M. 1996. Selective leaches revisited, with emphasis on the amorphous Fe oxyhydroxide phase extraction. *J. Geochem. Explor.* 56:59–78.
- Haneberg, W.C., Auston, G.S., Brabvold, L.A., 1993. Soil lead distribution at an abandoned smelter in Socorro, New Mexico. *Environ. Geol.* 2, 90 – 95.
- Hudson, K.A., Schell, C., Macklin, M.G. 1999. Mineralogy and geochemistry of alluvium contaminated by metal mining in the Rio Tinto area, southwest Spain. *Applied Geochemistry* 14: 1015-1030 pp.
- Hudson, K.A., Jamieson, H.E., Charnock, J.M., Macklin, M.G. 2005. Arsenic speciation in waters and sediment of ephemeral floodplain pools, Rios Agrio–Guadamar, Aznalcollar, Spain. *Chemical Geology* 219: 175-192.

- Hudson, K. Jamieson, H. and Lottermoser, B. 2011. Mine wastes: past, present and future. *Elements*, v. 7, pp. 375-380.
- INE. Instituto Nacional de Ecología. Manejo ambiental de los relaves o jales mineros.
- Jakubick, A., McKenna, G. 2003. Stabilisation of tailings deposits: international experience. *Mining and the Environment III*, Sudbury, Ontario, Canada, 25-28 May, 2003, pp 1-9.
- Jambor, J.L. 1994. Mineralogy of sulfide-rich tailings and their oxidation products. Jambor, J.L., Blowes, D.W. (eds.): *Short Course Handbook on Environmental Geochemistry of Sulfide Mine Waste*. Mineralogical Association of Canada, Nepean, v. 22, p. 59-102.
- Jambor, J.L., Blowes, D.W. 1998. Theory and applications of mineralogy in environmental studies of sulfide-bearing mine wastes. Cabri, L.J., Vaughan, D.J. (eds): *Modern Approaches to Ore and Environmental Mineralogy*. Mineralogical Association of Canada, vol. 27, pp. 367–401.
- Jambor, J.L., Blowes, D.W., Ritchie, A.I.M. 2003. Environmental aspects of mine wastes. *Short course handbook*, vol 31, Mineralogical Association of Canada, Nepean.
- Jänicke, M., Weidner, H. 1997. National environmental policies. A comparative study of capacity-building. Springer, Berlin, 320 pp.
- Kabata, A., Mukherjee B., 2007. Trace elements from soils to human. Ed. Springer.
- King, T.V., 1995. Environmental considerations of active and abandoned mine lands: lessons from Summitville, Colorado. *USGS Bull.*, 2220.
- Koretsky, C., 2000. The significance of surface complexation reactions in hydrologic systems: a geochemist's perspective. *J. Hydrol.* 230, 127 – 171.
- Landner, L., Reuther, R., 2005. Metals in Society and in the Environment. En: *Environmental Pollution Vol. 8*. Brian J. Alloway y Jack T. Trevors (Eds.). Kluwer Academic Publishers, 406 pp.
- Larocque, A.C.L., Rasmussen, P.E., 1998. An overview of trace metals in the environment, from mobilization to remediation. *Environ. Geol.* 33 (2/3), 85 – 91.
- Lottermoser, B.G. 2010. *Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts*, Third Edition. Springer, Berlin, Heidelberg, 400 pp.
- Lottermoser B.G. 2011. Recycling, reuse and rehabilitation of mine wastes. *Elements* 7: 405-410.
- Moncur, M.C., Ptacek, C.J., Blowes, D.W., Jambor, J.L. 2005. Release, transport and attenuation of metals from an old tailings impoundment. *Appl. Geochem.* 20:639–659.

- Moreno, R., Barbason, L., Coreño, O. 2009. Neoformación mineralogical en residuos mineros (jales) del distrito minero Zimapán, Estado de Hidalgo, México. *Minería y Geología*, vol. 25, núm. 2, pp. 1-31.
- NRC (National Research Council). 1999. Arsenic in drinking water. Natl. Acad. Press., Washington, DC.
- Nordstrom, Alpers. 1999. Geochemistry of acid mine waste. Plumlee, G.S., Logsdon, M.J., Eds. Reviews, En *Economic Geology, The environmental geochemistry of ore deposits. Parte A: Processes, techniques and health issues*, v. 6A, p.p. 133-160.
- Ogura, T., Ramírez, J., Arroyo, M.Z., Hernández, M.S., Palafox, P.J., García de Alba, H.L., Quintus, F. 2003. Companies extract Hg from surface soil contaminated by ancient mining industries. *Water, Air and Soil Pollution*. 148: 167–177.
- Parviainen, A. 2009. Tailings Mineralogy and Geochemistry at the Abandoned Haveri Au–Cu Mine, SW Finland. *Mine Water Environ* (2009) 28:291–304.
- Pirrie, D., Camm, G.S., Sear, L.G., Hughes, S.H. 1997. Mineralogical and geochemical signature of mine waste contamination, Tresillian River, Fal Estuary, Cornwall, UK. *Environmental Geology* 29 (1/2).
- Plant, J., Smith, D., Smith, B., Williams, L., 2001. Environmental geochemistry at the global scale. *Appl. Geochem.* 16, 1291 – 1308.
- Putins, C. and Ruiz-Agudo, E. 2013. Where minerals react with the environment. *Elements*, v. 9, pp. 177-182.
- Ramos, Y., Siebe, C. 2006. Estrategia para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un distrito minero: estudio de caso en el Distrito de Guanajuato, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 23 (1) 54-74.
- Razo, I., Carrizales, L., Castro, J., Díaz, F., Monroy, M. 2004. Arsenic and heavy metal pollution of soil, water and sediments in a semi-arid climate mining área in Mexico. *Water, Air, and Soil Pollution* 152: 129-152.
- Ripley EA, Redmann RE, Crowder AA (1996) *Environmental effects of mining*. St Lucie Press, Delray Beach.
- Rosner, U., 1998. Effects of historical mining activities on surface water and ground-water—an example from northwest Arizona. *Environ. Geol.* 33 (4), 224 – 230.
- SE (Secretaría de Economía), 2011. Panorama minero del estado de Guanajuato.
- SGM (Servicio Geológico Mexicano). *Léxico Estratigráfico de México*.



- Spitz K, Trudinger J (2009) Mining and the environment. CRC Press, Boca Raton
- Sracek, O., Choquette, M., Gelinas, P., Lefebvre. R., Nicholson, R.V. 2004. Geochemical characterization of acid mine drainage from a waste rock pile, Mine Doyon, Quebec, Canadá. *J. Contam. Hydrol.* 69:45–71.
- Tovar, M. R., Barbanson, L., Coreño, A. O. 2009. Neoformación mineralógico en residuos mineros (jales) del distrito minero Zimapán, estado de Hidalgo, México. *Minería y Geología*, vol. 25, núm. 2, abril-junio, 2009. pp. 1-21.
- UNEP (United Nations Environment Programme), 2000. Mining and sustainable development II. Challenges and perspectives, *Industry and Environment*, 23, 95 p.
- Vaughan, D.J., Craig, J.R. 1978. Mineral chemistry of metal sulfides. Cambridge Earth Science Series, Cambridge University Press, Cambridge.
- White, D.E., 1948, Antimony Deposits of Soyatal District, State Of Queretaro, Mexico: United State Geological Survey Bulletin, 960-b, 35-175.
- Wilson, B.W., Hernández, J.P., Meave, E., 1955. Un banco calizo del Cretácico en la parte oriental del estado de Querétaro, México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 18, 1-10.
- Wuolo, R.W., 1986. Laboratory studies of arsenic adsorption in alluvium contaminated with gold-mine tailings along Whitewood Creek, Blackhills, South Dakota. MSc Thesis. South Dakota School of Mines. 162 pp.