

03095



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
DIRECCIÓN GENERAL DE ESTUDIOS DE POSGRADO
PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
ENTIDAD: INSTITUTO DE GEOFÍSICA

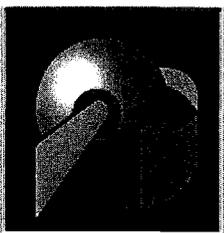
PROCESOS GEOQUÍMICOS QUE CONTROLAN LA
MOVILIDAD DE METALES Y METALOIDES EN JALES DE
SULFUROS METÁLICOS. "EL FRAILE", TAXCO-GUERRERO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
DOCTOR EN CIENCIAS

PRESENTA

FRANCISCO MARTÍN ROMERO



MÉXICO D.F. 2004

M. 335107



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

Autor: Dirección General de Bibliotecas de la
UNA en formato electrónico e impreso
Contenido de mi trabajo receptorial.

NOMBRE: Francisco H. Romero

FECHA: 19. sep. 2007

FIRMA: [Signature]

ESTA TESIS NO SALI
LA BIBLIOTECA

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a mi directora de tesis, Dra. María Aurora Amienta H. por el apoyo brindado durante la realización de esta investigación. De igual forma, al Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra, a la Dirección General de Estudios de Posgrado y a los proyectos CONACYT-SEMARNAT-2002-C01-0017 y DGAPA 104300.

Expreso mi agradecimiento a los miembros del jurado del Examen de Grado: Dr. José Luz González Chavez, Dra. Rosa Elva Rivera Santillán, Dr. Oscar Talavera Mendoza, Dr. Alejandro Carrillo Chavez, Dr. Francisco Querol Suñé, y Dr. Marcos Monroy Fernández. También, extendiendo mi agradecimiento a la Dra. Ofelia Morton Bermea, miembro del jurado de Exámenes Predoctorales y al Dr. Ramiro Rodríguez, miembro del Comité de Evaluación en la etapa predoctoral.

Reconozco que la realización de esta tesis fue posible gracias a la colaboración que recibí de muchas personas en los trabajos de campo y laboratorio. Por lo que agradezco la ayuda de los técnicos e investigadores de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM): Galia González, Iván Puente Lee, Patricia Santiago, Juan Carlos Cruz, Cecilia Salcedo, Rufino Lozano, Nora Cisneros, Olivia Cruz, Alejandra Aguayo y Carlos Linares. Así mismo les estoy muy agradecido a los ingenieros José de Jesús López, Fernando Wong, Héctor Solís y Raymundo Cordero de Industrial Minera México S.A. de C.V. (IMMSA).

De igual manera, reconozco que los comentarios e ideas valiosas surgidas en discusiones técnicas con la M en C Margarita Gutiérrez y el Dr. Mario Villalobos, del Grupo de Biogeoquímica Ambiental de la UNAM, contribuyeron a mejorar este trabajo.

De manera muy especial agradezco al Ing. Vidal Muhech Dip, Director Corporativo de Ingeniería y Construcción de Grupo México, ya que gracias a su apoyo decidido fue posible llevar a buen término este trabajo de tesis.

ÍNDICE

RESUMEN

ABSTRACT

I.	INTRODUCCIÓN	1-5
II.	ASPECTOS GEOGRÁFICOS Y GEOLÓGICO - MINEROS DE LA REGIÓN DONDE SE UBICA EL ÁREA DE ESTUDIO	
2.1	Descripción del área de estudio: Depósito de jales "El Fraile"	6-7
2.2	Contexto geográfico y geológico – minero	8-18
III.	EXPERIENCIA NACIONAL E INTERNACIONAL EN ESTUDIOS DE JALES DE SULFUROS METÁLICOS	
3.1	Identificación de los procesos geoquímicos que tienen lugar en los jales de sulfuros metálicos	19-26
3.2	Pruebas utilizadas para valorar y predecir el comportamiento de los jales con relación al peligro potencial que representan para el ambiente	27-31
IV.	METODOLOGÍA	
4.1	Muestreo	32-33
4.2	Preparación de muestras y análisis de laboratorio	33-44
V.	RESULTADOS	
5.1	Zonificación geoquímica de los jales "El Fraile"	45-49
5.2	Caracterización mineralógica	50-78
5.3	Caracterización geoquímica	79-109

VI. DISCUSIÓN

6.1	Zonificación geoquímica en el depósito de jales “El Fraile”	110–111
6.2	Capacidad de generación potencial de drenaje ácido	111-112
6.3	Procesos geoquímicos que controlan la movilidad de los metales y metaloides potencialmente tóxicos (MMPT) en los jales “El Fraile”	112-140

VII. CONCLUSIONES

141-145

REFERENCIAS

146-155

APENDICES

Apéndice 1 Mineralogía general por difracción de rayos X del “talud” (1) y “vaso” (2) de la parte Fraile Norte en el depósito de jales “El Fraile, Taxco – Guerrero

Apéndice 2 Mineralogía general por difracción de rayos X del “talud” (1) y “vaso” (2) de la parte Fraile Sur en el depósito de jales “El Fraile, Taxco – Guerrero

Apéndice 3 Mineralogía general por DRX en jales grises (1) y oxidados (2) de diferente origen sobre el “talud” de la zona de oxidación de jales “El Fraile” en Taxco-Guerrero

Apéndice 4 Concentración total de elementos mayores (EM) en jales del Muestreo I y II, en el depósito de jales “El Fraile”, Taxco – Guerrero

Apéndice 5 Concentración total de metales y metaloides potencialmente tóxicos (MMPT) en jales del Muestreo I y II, en el depósito de jales “El Fraile”, Taxco – Guerrero

Apéndice 6 Exactitud de los métodos y técnicas de análisis en la determinación de las concentraciones totales de EM y MMPT en las muestras de jales del depósito “El Fraile”, Taxco – Guerrero

Apéndice 7 Lecturas diarias de pH del experimento de extracción para obtener el lixiviado a partir de las muestras sólidas de jales del depósito “El Fraile”, Taxco – Guerrero

Apéndice 8 Lecturas diarias de conductividad eléctrica (CE) del experimento de extracción para obtener el lixiviado a partir de las muestras sólidas de jales del depósito “El Fraile”, Taxco – Guerrero

Apéndice 9 Concentración “soluble” de EM y MMPT en los lixiviados obtenidos de las muestras sólidas de jales del depósito “El Fraile”, Taxco – Guerrero

Apéndice 10 Reproducibilidad de los experimentos de extracción para obtener los lixiviados a partir de muestras sólidas de jales en el depósito “El Fraile”, Taxco – Guerrero

Apéndice 11 Índices de Saturación (IS) para diferentes minerales en jales de la zona de oxidación del depósito de jales “El Fraile”, Taxco – Guerrero

Apéndice 12 Índices de Saturación (IS) para diferentes minerales en jales de la zona de transición del depósito de jales “El Fraile”, Taxco – Guerrero

Apéndice 13 Índices de Saturación (IS) para diferentes minerales en jales de la zona de jales inalterados del depósito de jales “El Fraile”, Taxco – Guerrero

LISTA DE FIGURAS:

Figura 1.1 Estrategia metodológica para estudiar los procesos geoquímicos que controlan la movilidad de los MMPT en los jales de sulfuros metálicos en El Fraile, Taxco – Guerrero.....página 5

Figura 2.1 Ubicación del depósito de jales “El Fraile”, Taxco-Guerrero.....página 7

Figura 2.2 Mapa y columna litológica de la región donde se ubica el área de estudio (Fuente: Monografía Geológico-Minera del Estado de Guerrero, CRM 1999).....página 12

Figura 4.1 Ubicación de sitios de muestreo en el depósito de jales “El Fraile”, Taxco – Guerrero.....página 34

Figura 5.1 Minerales opacos por microscopía óptica en la zona de jales inalterados del depósito de jales “El Fraile”, Taxco – Guerrero.....página 51

Figura 5.2 Feldespatos–K con diferente grado de alteración en la zona de oxidación del depósito de jales “El Fraile”, Taxco – Guerrero.....página 54

Figura 5.3a Minerales opacos por microscopía óptica en la capa “no compacta” de la zona de oxidación del depósito de jales “El Fraile”, Taxco- Guerrero.....página 55

Figura 5.3b Minerales opacos por microscopía óptica en la capa de hierro de la zona de oxidación del depósito “El Fraile”, Taxco- Guerrero.....página 56

Figura 5.4a Mineralogía de detalle por DRX en muestras concentradas ($\theta < 40 \mu\text{m}$) de la zona de jales inalterados del “talud” (1) de la parte Fraile Norte y del “vaso” de la parte Fraile Sur (2) del depósito de jales “El Fraile”, Taxco-Guerrero.....página 58

Figura 5.4b Partículas inalteradas y ricas en MMPT en la zona de jales inalterados (muestra M8) del depósito de jales “El Fraile”, Taxco-Guerrero.....página 59

Figura 5.5 Mineralogía de detalle por difracción de rayos X en muestras concentradas ($\theta < 40 \mu\text{m}$) de la capa de “no compacta” de la zona de oxidación en el “talud” de la parte Fraile Norte (1) y de la parte Fraile Sur (2) del depósito de jales “El Fraile”, Taxco-Guerrero.....página 61

Figura 5.6 Partículas ricas en MMPT en la capa “no compacta” de la zona de oxidación del “talud” Fraile Norte (muestra M5 y M13): (a) y (b) beudantita y (c) plumbojarosita.....página 62

Figura 5.7 Microanálisis de oxihidróxidos de Fe por MEB-EDS en la capa “no compacta” de la zona de oxidación del “talud” Fraile Norte (Muestra M5).....página 63

Figura 5.8: Partículas ricas en MMPT en la capa “no compacta” con pH cercano al neutro de la zona de oxidación del “talud” Fraile Norte (Muestra M15): partícula 1 carbonato de plomo y partícula 2 carbonato de zinc.....página 64

Figura 5.9: Partículas ricas en MMPT en la capa “no compacta” de la zona de oxidación del “vaso” Fraile Norte (Muestra M10).....página 64

Figura 5.10 Microanálisis de oxihidróxidos de Fe por MEB-EDS en la capa “no compacta” de la zona de oxidación del “vaso” de Fraile Norte (Muestra M10).....página 65

Figura 5.11 Partículas ricas en MMPT (beudantita) en la capa “no compacta” de la zona de oxidación del “talud” Fraile Norte (Muestra M19).....página 65

Figura 5.12 Partículas ricas en MMPT (plumbojarosita) en la capa “no compacta” de la zona de oxidación del “vaso” Fraile Sur (M24).....página 66

Figura 5.13 Mineralogía de detalle por difracción de rayos X en muestras concentradas ($\theta < 40 \mu\text{m}$) de la capa “compacta” (capa de Fe) de la zona de oxidación del “talud” de la parte Fraile Norte (1) y de la parte Fraile Sur (2) del depósito de jales “El Fraile”, Taxco-Guerrero.....página 68

Figura 5.14 (a) Partículas ricas en MMPT asociadas a beudantita y (b) partículas asociadas a jarosita-K en la capa compacta (capa de Fe) de la zona de oxidación del “talud” Fraile Norte (Muestras M2).....página 69

Figura 5.15 Microanálisis de oxihidróxidos de Fe por MEB-EDS en la capa compacta (capa de Fe) de la zona de oxidación del “talud” de Fraile Norte (Muestra 22).....página 69

Figura 5.16 (a) Partículas ricas en MMPT asociadas a la beudantita y (b) partícula asociada a jarosita-K en la capa compacta (capa de Fe) de la zona de oxidación del “talud” Fraile Sur (M21).....página 70

Figura 5.17 Estructura cristalina de la beudantita.....página 73

Figura 5.18 Distribución de MMPT en la muestra M21.....página 74

Figura 5.19 (a) Patrón de difracción electrónica 1 y (b) microfotografía 1 de alta resolución.....página 75

Figura 5.20 (a) Patrón de difracción electrónica 2 y (b) microfotografía 2 de alta resolución.....página 76

Figura 5.21 Concentración total de Fe en % (elemento asociado al principal mineral generador de drenaje ácido) y de Al, Ca, K, Mg y Na, en % (elementos asociados a minerales neutralizadores de drenaje ácido): (a) Grupo de “Jales A” y (b) Grupo de “Jales B”página 82

Figura 5.22 Concentraciones totales (mg/kg) de elementos asociados a los principales sulfuros metálicos en el depósito de jales “El Fraile”, Taxco – Guerrero: (a) Grupo de “Jales A” y (b) Grupo de “Jales B”página 83

- Figura 5.23a** Concentraciones totales de elementos asociados a minerales productores potenciales de drenaje ácido en las diferentes zonas identificadas en el depósito de jales “El Fraile”, Taxco - Guerreropágina 87
- Figura 5.23b** Concentraciones totales de elementos asociados a minerales neutralizadores potenciales de drenaje ácido, en las diferentes zonas identificadas en el depósito de jales “El Fraile”, Taxco – Guerrero.....página 88
- Figura 5.24** Concentraciones totales vs. pH de metales y metaloides potencialmente tóxicos en las diferentes zonas identificadas en el depósito de jales “El Fraile”, Taxco – Guerrero.....página 89
- Figura 5.25** Concentraciones “solubles” de elementos asociados a minerales generadores de Drenaje Ácido en las diferentes zonas identificadas en el depósito de jales “El Fraile”, Taxco – Guerreropágina 93
- Figura 5.26- P1** Concentraciones “totales” y “solubles” de MMPT y EM en el perfil P1 Jales “El Fraile”página 94
- Figura 5.26- P2.** Concentraciones “totales” y “solubles”de MMPT y EM en el perfil P2 Jales “El Fraile”página 95
- Figura 5.26-P3** Concentraciones “totales” y “solubles” de MMPT y EM en el perfil P3 Jales “El Fraile”página 96
- Figura 5.26- P4** Concentraciones “totales” y “solubles” de MMPT y EM en el perfil P4 Jales “El Fraile”página 97
- Figura 5.26- P5** Concentraciones “totales” y “solubles” de MMPT y EM en el perfil P5 Jales “El Fraile”página 98
- Figura 5.27** Solubilidad teórica de algunos minerales de hierro (Fe) y arsénico (As); y concentraciones solubles de Fe y As en función del pH en los lixiviados de jales en el depósito “El Fraile”, Taxco – Guerrero.....página 103
- Figura 5.28** Concentraciones “fácilmente solubles” de MMPT en muestras de jales del depósito “El Fraile”, Taxco – Guerrero.....página 106
- Figura 5.29** Influencia del tiempo de agitación en la extracción de MMPT en muestras de jales oxidados del depósito “El Fraile”, Taxco – Guerrero.....página 109

LISTA DE TABLAS:

- Tabla 2.1** Mineralogía de los yacimientos minerales metálicos en el DMT (Fuente: IMMSA, 1973).....página 15
- Tabla 2.2** Valores promedio de concentración total y disponible de MMPT en jales oxidados del depósito de jales “El Fraile” (Fuente: Barrera 2001).....página 16
- Tabla 2.3** Valores promedio de concentración total y disponible de MMPT en jales oxidados del depósito de jales “El Fraile” (Fuente: Flores 2002).....página 17
- Tabla 2.4** Resultados de análisis químicos en aguas de lluvia que interaccionan con los jales oxidados de “El Fraile” (fuente: IMMSA 2002).....página 17
- Tabla 2.5** Minerales primarios y secundarios en los jales “El Fraile” (Fuente: Talavera et al. 2004).....página 18
- Tabla 5.1** Zonificación de jales por sus características macroscópicas en el depósito “El Fraile”, Taxco – Guerrero.....página 49
- Tabla 5.2** Distancias interplanares (en Å) reportadas para la beudantita (d (*)) y las calculadas manualmente a partir de los patrones de difracción electrónica: d (**) para la forma rómbica, d (***) para la forma rectangular y d (directo) medidos en la microfotografías de alta resolución.....página 78
- Tabla 5.3** Identificación de los posibles ejes zonales correspondiente para la red recíproca de la beudantita.....página 78
- Tabla 5.4 (a)** Estadística descriptiva de las concentraciones totales de metales y metaloides potencialmente tóxicos, en las diferentes zonas identificadas en el depósito de jales “El Fraile”, Taxco – Guerrero.....página 86
- Tabla 5.4 (b)** Estadística descriptiva de las concentraciones totales de elementos mayores en las diferentes zonas identificadas en el depósito de jales “El Fraile”, Taxco – Guerrero.....página 86
- Tabla 5.5** Estadística descriptiva de las concentraciones solubles (mg/L) de elementos asociados a minerales productores y neutralizadores potenciales de drenaje ácido en las diferentes zonas identificadas en el depósito de jales “El Fraile”, Taxco – Guerrero.....página 92

Tabla 5.6 Concentración “fácilmente soluble” de MMPT en muestras de jales del “talud” del depósito “El Fraile”, Taxco–Guerrero: (a) Extracción donde el pH del extracto es determinado por la capacidad amortiguadora de los minerales presentes en los jales. (b) Extracción a pH controlado con 6.5 – 7.0, mediante la adición de NaOH 0.1M.....página 105

Tabla 5.7 Influencia del tiempo de agitación en la concentración soluble (extraíble) de los principales MMPT en muestras de jales oxidadas del depósito de jales “El Fraile”, Taxco-Guerrero.....página 108

Tabla 6.1 Cálculo de la composición mineral a partir de la composición química de los sulfuros metálicos del depósito de jales “El Fraile”, Taxco – Guerrero...página 114

Tabla 6.2 Concentraciones solubles de MMPT y EM en la zona de oxidación del depósito de jales “El Fraile”, Taxco – Guerrero.....página 127

RESUMEN

El proceso de beneficio de la mena de yacimientos minerales sulfurados produce residuos mineros de granulometría fina denominados jales que contienen sulfuros metálicos residuales y otros minerales de ganga. La oxidación de los sulfuros metálicos en los jales puede generar condiciones ácidas y la liberación de metales y metaloides potencialmente tóxicos (Drenaje Ácido de Mina "DAM"). Sin embargo, la oxidación de los sulfuros metálicos no siempre genera DAM; ya que la tendencia para generarlo es una función del balance entre los minerales productores de ácido (sulfuros) y los minerales consumidores de ácido (carbonatos, hidróxidos y aluminosilicatos) que se acumulan en el depósito.

Las actividades mineras históricas han generado una gran cantidad de jales en diferentes regiones de México, que representan un riesgo potencial para el medio ambiente. Los jales inactivos de sulfuros metálicos de "El Fraile" fueron seleccionados para estudiar los procesos geoquímicos que controlan la movilidad de los metales y metaloides potencialmente tóxicos. El depósito de jales "El Fraile" se localiza a 7 km al sur de la ciudad de Taxco – Guerrero; y fue utilizado para almacenar aproximadamente 5.5×10^6 toneladas de jales de sulfuros metálicos en el periodo comprendido entre 1945 y 1973. Estos jales provienen de la explotación de yacimientos epitermales de Zn y Pb, cuyos principales minerales sulfurados eran la esfalerita (11.5%), galena (4%) y pirita (10 – 5%)

Se colectaron un total de 40 muestras superficiales y hasta 200 cm de profundidad en los perfiles P1- P5. La composición mineralógica de estos jales fue determinada utilizando las técnicas de difracción de rayos X (DRX), microscopía óptica de reflexión, microscopía electrónica de barrido acoplada con espectrometría de rayos X por energía dispersa (MEB-EDS) y microscopía electrónica de transmisión (MET).

La composición química de los jales y sus lixiviados fue determinada utilizando las técnicas de fluorescencia de rayos X (FRX), espectroscopía de absorción atómica (AA) y de emisión atómica inductivamente acoplada a plasma (ICP-AES). La calidad de los resultados de los análisis se controló en muestras duplicadas y en material de referencia (RTS-3).

En el depósito de jales "El Fraile" se pueden distinguir tres zonas geoquímicas: zona de oxidación "ZO", zona de transición "ZT" y zona de jales inalterados "ZJI". Los jales en la ZO son de color amarillo – café – rojo, y en los los de la ZT y ZJI predomina el color gris. El método de construcción de este depósito permitió la separación granulométrica de los jales: Las fracciones finas se acumularon en el "vaso" y las gruesas se utilizaron para formar la cortina contenedora del depósito ("talud").

Los jales del "talud" ocupan aproximadamente 1/3 parte del depósito (6.6 hectáreas). La zona de oxidación (ZO) en el "talud" se inicia en la superficie y se extiende hasta unos 65 – 120 cm de profundidad. En la ZO se distinguen capas cementadas y No cementadas. En las capas No cementadas se registraron valores de pH ácidos (pH < 2.8) y bajo éstas, los valores de pH se incrementan hasta 4.4. Este incremento del pH causa la precipitación de fases que contienen Fe^{3+} , que forman las capas cementadas. La zona de transición (ZT) y la de jales inalterados (ZJI) subyacen a la capa cementada de Fe; y los pH registrados en estos jales inalterados son cercanos al neutro (pH = 5.6 – 7.2). Esto sugiere que la capa cementada funciona como una barrera que limita el avance del frente de oxidación hacia las capas inferiores del depósito de jales.

Los valores de pH para el 80% de las muestras de los jales oxidados del "talud" son bajos (pH = 1.9 – 2.8), lo cual indica que en estos jales los procesos de neutralización no fueron suficientes para consumir la acidez generada; por lo que a este grupo de jales (grupo A) se les puede clasificar como potenciales generadores de drenaje ácido. Para el restante 20% de las muestras de jales oxidados del "talud" los valores de pH son cercanos al neutro (pH = 6.6 – 7.5), lo que indica que en este

grupo de jales (grupo B) han ocurrido reacciones de neutralización las cuales han sido eficientes para consumir la acidez generada por la oxidación de los sulfuros metálicos.

Los jales del “vaso” ocupan aproximadamente 2/3 partes del depósito (13.4 hectáreas). La zona de oxidación (ZO) en el “vaso” se inicia a unos 35 – 45 cm bajo la superficie, subyaciendo a la capa de relleno, y su desarrollo es limitado (10-20 cm de espesor). Los jales oxidados del vaso tienen bajos valores de pH (pH = 2.7 – 4.1) y se incrementan en los jales de la zona intermedia (ZI) y en la de jales inalterados (ZJI) (pH = 6.7 – 7.2); lo que significa que en los jales oxidados del vaso, los procesos de neutralización no han sido suficientes para consumir la acidez generada durante la oxidación de los sulfuros metálicos. Los jales del vaso son considerados generadores potenciales de drenaje ácido (jales que pertenecen al grupo B); pero no representan riesgo para el medio ambiente ya que están aislados y prácticamente no hay posibilidad de que entren en contacto con aguas meteóricas para formar lixiviados.

Los jales inalterados del grupo A contienen, en términos de valores de mediana, 18.7 % de sulfuros metálicos que se encuentran principalmente como pirita (14.6%), esfalerita (3.7%), galena (0.36%) y calcopirita (0.09%). Los minerales de ganga identificados fueron cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, muscovita, epidota, y clorita. Los análisis de microscopía indican que los minerales de la zona intermedia y de jales inalterados no muestran signos de oxidación y alteración. En cambio, los sulfuros metálicos en los jales oxidados de este grupo A, están intensamente oxidados y los minerales aluminosilicatados están alterados o han sido consumidos; lo que es la principal causa de los lixiviados ácidos en estos jales (pH = 2.0 – 4.4). Los principales minerales secundarios que se formaron como producto de la oxidación de los sulfuros metálicos fueron yeso, goetita, hematita, lepidocrocita, akaganeita, jarosita y beudantita.

En la mineralogía de los jales inalterados del grupo B sobresale la presencia de los minerales de ganga (42% de calcita) y menos del 8% de sulfuros metálicos. Entre los sulfuros metálicos destaca la pirita (6%), la esfalerita (1%), la galena (0.29%) y la calcopirita (0.06%). Los sulfuros metálicos de los jales de este grupo están intensamente oxidados y las principales fases secundarias que resultaron de su

oxidación son yeso, goetita y hematita. Sin embargo, la acidez generada por la oxidación de los sulfuros metálicos fue eficientemente neutralizada por la disolución de la calcita, lo que es la causa de que el pH de sus lixiviados sea cercano al neutro (pH = 6.4 – 6.7).

Las concentraciones totales de elementos asociados con los sulfuros metálicos como Fe, Zn, Cd y Cu y los asociados con los aluminosilicatos (Al, Na, Mg, Mn) son menores en las capas “no compactas” de la zona de oxidación (ZO) con respecto a la zona de jales inalterados (ZJI); lo que se puede explicar por la pérdida de minerales sulfurados y aluminosilicatados durante los procesos de oxidación y disolución que tuvieron lugar en los jales de la ZO. Sin embargo, en la capa cementada de Fe de la ZO se registró un incremento en las concentraciones totales de Fe, Zn, As, Cu y Cd; lo que indica que la capa cementada de Fe funciona como una zona donde se acumulan los elementos liberados durante la oxidación y disolución de minerales en los jales de las capas No cementadas.

La concentración soluble de los componentes de los jales estudiados indica que la liberación de los elementos potencialmente tóxicos se da preferentemente a pH bajos (pH < 4.4); y que a medida que aumenta el pH, las concentraciones solubles llegan a ser más bajas que los límites de detección de las técnicas de análisis.

Los valores de tendencia central (mediana) de las concentraciones solubles de metales y sulfatos en los jales de las capas No cementadas de la ZO son: 626 mg/L SO_4^{2-} , 325 mg/L Zn, 167 mg/L Fe, 4.2 mg/L Cd, 9.8 mg/L Cu, 89 mg/L Mg, 69 mg/L Mn, 138 mg/L Al, 0.8 mg/L Na y 0.8 mg/L K. En las capas cementadas de Fe de la ZO se obtienen las máximas concentraciones solubles en términos de valores de mediana de SO_4^{2-} (6731 mg/L), Cd (25 mg/L), Mg (257 mg/L), Mn (421 mg/L), Al (182 mg/L), Na (1.3 mg/L) y K (1.5 mg/L). Las altas concentraciones solubles de los elementos potencialmente tóxicos son atenuadas por una serie de reacciones de precipitación y sorción. La movilidad del Fe en los jales “El Fraile” está controlada por la precipitación de oxihidróxidos de Fe como goetita, jarosita-K, hematita, lepidocrocita y akaganeita. De acuerdo a los análisis de SEM-EDS, la movilidad del Cu y Zn está controlada por los procesos de sorción (coprecipitación y adsorción) en las superficies de oxihidróxidos de Fe. Los resultados también indican que la movilidad del Zn adicionalmente está controlada por la coprecipitación en jarosita-K.

La concentración total del Pb y As, elementos asociados a los sulfuros metálicos, no muestran diferencias sustanciales entre los jales de la zona de oxidación (ZO), zona de transición (ZT) y zona de jales inalterados (ZJI), lo cual podría ser explicado por la poca movilidad del As y Pb en los jales de estudio. En términos de valores de tendencia central (mediana), se registraron concentraciones solubles del Pb y As en los jales oxidados muy similares: 0.1 mg/L de Pb y 0.1 mg/L de As. Sin embargo, en algunas muestras de jales oxidados y ácidos ($\text{pH} = 2 - 2.2$) se registraron altas concentraciones de As soluble (101 y 164 mg/L).

Los análisis por SEM-EDS, MET y XRD en muestras concentradas de jales oxidados ($\varnothing < 40 \mu\text{m}$) muestran que la precipitación de la beudantita es el mecanismo natural que limita la movilidad del As y Pb en los jales oxidados de "El Fraile". Así mismo, los análisis por SEM-EDS indican que los oxihidróxidos de Fe contienen trazas de As. Esto indica que el arsénico liberado durante la oxidación de los sulfuros metálicos es retenido en los oxihidróxidos de Fe; lo que sugiere que la movilidad del As también es atenuada por sorción en los oxihidróxidos de Fe. Sin embargo, en los jales ácidos, el consumo de H^+ implica la disolución de los oxihidróxidos de Fe y en consecuencia el As sorbido puede liberarse por procesos de desorción, lo que sugiere que la sorción de As en oxihidróxidos de Fe no es muy importante en la inmovilización del As en los jales ácidos.

Los resultados de este estudio aportan información relevante para desarrollar estrategias de remediación con el fin de minimizar el riesgo potencial que representan los jales oxidados y ácidos del "talud" del depósito "El Fraile" en Taxco, Guerrero.

ABSTRACT

Mining processing of sulfide ores has led to the deposition of sulfide bearing tailings. Tailings consist on finely ground sulfides and other gangue minerals that remain after the metal recovery process. Oxidation of the sulfide minerals contained within the tailings can result in the generation of low-pH conditions and the release of potentially toxic metals and metalloids (Acid Mine Drainage "AMD"). However, the oxidation of sulfide minerals, not always generates AMD, since it's generation is a function of the balance between the acid producing minerals (sulfides) and acid-consuming (carbonates and aluminosilicates) minerals.

Historic mining activities have generated vast quantities of mine tailings in several regions from Mexico. These tailings constitute potential environmental pollution sources. The "El Fraile" inactive sulfide-rich tailings impoundments were selected for study the geochemical processes that control the mobility of potentially toxic elements. The "El Fraile" tailings impoundment is located 7 km south of the town of Taxco, Guerrero, and was used to deposit 5.5×10^6 t of sulfide-bearing tailings from 1945 to 1973. These tailings were derived from the processing of epithermal Zn-Pb ores. The main ore minerals in the area are sphalerite (11.5%), galena (4%) and pyrite (10 – 15%).

A total of 40 superficial and up to 200 cm depth samples were collected from core P1 to core P5. The mineralogical composition was determined by X-ray diffraction (XRD), optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM-EDS) and transmission electron microscopy (TEM). The chemical composition of sample tailings and leachates was determined using X-ray fluorescence (XRF), atomic absorption spectrometry (AAS) and inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES). Quality control was performed by use of sample duplicates and reference materials (RTS-3).

The "El Fraile" tailings are divided in three zones: an active oxidation horizon (AOH) an underlying intermediate horizon (IH) and an unoxidized horizon (UH). The tailings in the AOH are brownish to reddish yellow; and the tailings in the IH and UH are mainly grey in color. The disposal technique at "El Fraile" tailings impoundment caused hydraulic sorting of the tailings particles, and results in the formation of a shallow basin-shaped deposit of smaller particles (settling pond), surrounded by high containment dyke of coarser particles (dam).

The tailings of the “dam” occupy approximately 1/3 of the impoundment (6,6 ha). In the “dam”, the active oxidation horizon (AOH) starts at the tailings surface and extends downwards about 65 - 120 cm. The AOH contains cemented and uncemented layers. Acid pH values ($\text{pH} < 2.8$) were recorded in tailings at uncemented layers; below the uncemented layers, the tailings pH values rise up to 3.4 – 4.4. This increase of pH values results in a rapid precipitation of Fe^{3+} (cemented layers). The intermediate horizon (IH) and the unoxidized horizon (UH) occur below the Fe precipitate layer and pH values of these unoxidized tailings are near to neutral ($\text{pH} = 5.6 - 7.2$). This suggests that the cemented layer functions as a barrier which restricts the downward movement of the front of oxidation within “El Fraile” tailings dam. The pH values of 80% of superficial samples in the oxidized tailings dam are low ($\text{pH} = 1.9 - 2.8$), which suggests lack of neutralization processes. This means that tailings of this group (“group A”) have the potential to produce acid drainage. The pH values rise up to near neutral ($\text{pH} = 6,6 - 7,5$) for the rest 20% of superficial samples at oxidized tailings dam, which suggests that pH-buffering reactions are occurring within this group of tailings (“group B”).

Tailings of the “settling pond” occupy approximately 2/3 of the impoundment (13.4 ha). In the “settling pond”, the active oxidation horizon (AOH) starts at 35 - 45 cm under the layer of cover material and form a thin layer (10-20 cm thick). The pH values of oxidized tailings are low ($\text{pH} = 2.8 - 4.1$) and rise up to near neutral in the intermediate horizon (IH) and the unoxidized horizon (UH) ($\text{pH} = 6.7 - 7.2$). This pH values indicate lack of neutralization within the oxidized tailings in the settling pond. These tailings have the potential to produce acid drainage (tailings of group A) but they do not represent an environmental risk since they are isolated and practically there is no possibility of leachates formation.

The unoxidized tailings of group A contain an average of 18.7% sulfide, mainly in the form of pyrite (14.6%), sphalerite (3.7%), galena (0.36%) and chalcopyrite (0.09%). The most common gangue minerals are quartz, K-feldspar, plagioclase, muscovite, epidote, and chlorite. Microscopy analysis showed no noticeable weathering of the sulfide minerals in these unoxidized tailings. In the oxidized tailings of group A, sulfide minerals are intensively oxidized and aluminosilicate minerals are depleted or altered. This is the principal cause of low pH values of their leachates ($\text{pH} = 2.0 - 4.4$). The main secondary phases resulting from the

oxidation of sulfide minerals include gypsum, goethite, hematite, lepidocrocite, akaganeite, jarosite and beudantite.

Minerals of the unoxidized tailings of group B consist mainly of primary gangue mineral (42 % of calcite) and less than 8 % of sulfide minerals. The pyrite content is approximately 6%, 1% is sphalerite, 0.29% galena and 0.06% chalcopyrite. In the oxidized tailings of group B, sulfide minerals are intensively oxidized and the principal secondary phases resulting from their oxidation include gypsum, goethite and hematite. However, hydrogen ions released from oxidation of sulfide minerals are consumed by dissolution of calcite and pH in leachates remains at near neutral values (pH = 6.4 – 6.7).

Total concentrations of the sulfide-bound elements: Fe, Zn, Cu and Cd; and aluminosilicate-bound elements (Al, Mg, Mn, Na and K) are lower in the uncemented layers of tailings at active oxidation horizon (AOH) regarding the tailings at intermediate horizon (IH) and unoxidized horizon (UH). This is due to losses of sulfide and aluminosilicate minerals during oxidation and dissolution processes. However, the bulk chemical compositions show that there is a significant increase of Fe, Zn, As, Cu and Cd concentrations in the Fe precipitate layers of active oxidation horizon (AOH). This means that Fe precipitated layer function as a trap for released metals and metalloids from the uncemented layers within the AOH.

The concentrations of water-soluble constituents indicates that release of potentially toxic elements occurs at low pH (pH < 4.4). At higher pH, soluble concentrations decrease drastically to near detection limits.

The tailings of uncemented layer at active oxidation horizon (AOH) contain high concentrations of water – soluble constituents, with median values of 3626 mg/L of SO_4^{2-} , 325 mg/L Zn, 167 mg/L Fe, 4.2 mg/L Cd, 9.8 mg/L Cu, 89 mg/L Mg, 69 mg/L Mn, 138 mg/L Al, 0.8 mg/L Na, and 0.8 mg/L K.

The soluble concentrations of SO_4^{2-} , Cd, Mg, Mn, Al, Na and K reach a maximum at depths where the Fe precipitate layers occurs with median values of 6731 mg/L of SO_4^{2-} , 25 mg/L Cd, 257 mg/L Mg, 421 mg/L Mn, 182 mg/L Al, 1.3 mg/L Na and 1.5 mg/L K. The high concentrations of dissolved potentially toxic elements are attenuated by a series of precipitation and sorption reactions. The solid-phase

control on the mobility of Fe within “El Fraile” tailings is the precipitation of Fe-oxyhydroxides minerals like goethite, K-jarosite, hematite, lepidocrocite and akaganeite. According to SEM-EDS analysis, the solid-phase control on the mobility of Cu and Zn appears to be sorption (adsorption and coprecipitation) on Fe-oxyhydroxides. SEM-EDS analysis shows that Zn mobility is also attenuated by coprecipitation with jarosite.

The sulfide-bound elements Pb and As show no significant difference in their total concentration content between tailings at active oxidation horizon (AOH), underlying intermediate horizon (IH) and unoxidized horizon (UH). This is due to the low mobility of As and Pb within “El Fraile” tailings. In the oxidized tailings soluble Pb shows a similar behavior to soluble As, with median values of 0.1 mg/L Pb and 0.1 mg/L As. However, some few oxidized tailing samples with very acidic pH (2 – 2.2) contain higher concentrations of soluble As (101 and 164 mg/L).

SEM-EDS, MET and XRD analysis of concentrated oxidized tailings samples ($\phi < 40 \mu\text{m}$) reveals that precipitation of beudantite is a natural mechanism of As and Pb fixation within “El Fraile” tailings impoundment. SEM-EDS analysis shows that Fe-oxyhydroxides contain traces of arsenic. This indicates that arsenic released in the active oxidation horizon through the oxidation of sulfide minerals is likely retained by Fe-oxyhydroxides. This suggests that As mobility is also attenuated by sorption onto Fe-oxyhydroxides surfaces. However, in acidic tailings, the H^+ consumptions involves the dissolution of Fe-oxyhydroxides and sorbed arsenic may be released through desorption reactions. This indicates that arsenics sorption onto Fe-oxyhydroxides is not a relevant candidate for As immobilization in acidic tailings.

The results of this study will be helpful for the assessment of remediation strategies to minimize the potential environmental hazard of oxidized and acid tailings within “El Fraile” tailings impoundment at Taxco, Guerrero.

I. INTRODUCCIÓN

Los desechos de la actividad minera, denominados jales, son el producto de la trituración y molienda del mineral una vez que se han recuperado los metales comerciales mediante procesos físicos y químicos. Los jales que provienen del procesamiento de yacimientos de sulfuros metálicos (SM) generalmente contienen cantidades variables de pirita (FeS_2), pirrotita (Fe_{1-x}S), galena (PbS), esfalerita (ZnS), calcopirita (CuFeS_2) y arsenopirita (FeAsS).

El principal fenómeno geoquímico que ocurre en los depósitos de jales de SM es la oxidación, para lo cual es preciso que contengan SM reactivos, condiciones climáticas apropiadas (aire y agua o atmósfera húmeda) y permeabilidad suficiente para permitir la difusión de los agentes oxidantes. El principal producto de la oxidación de los SM es la liberación de: a) protones " H^+ " (acidez), b) sulfatos " SO_4^{2-} " y c) metales y metaloides potencialmente tóxicos (MMPT).

Es generalmente aceptado que la oxidación de los SM, en particular de la pirita, está asociada a la generación de drenaje ácido (Gray 1997, Dold et al. 2001), que consiste en soluciones con pH ácido, que a menudo pueden contener altas concentraciones de MMPT (USEPA 1994 (a), Johnson et al. 1999, Bain et al. 2000, Roussel et al. 2000).

Sin embargo, no siempre la oxidación de los SM produce drenaje ácido, ya que la tendencia de los jales para generarlo es una función del balance entre los minerales productores potenciales de ácido (sulfuros metálicos) y los minerales consumidores potenciales (carbonatos, hidróxidos y aluminosilicatos) de los productos de la oxidación. En general, cuando la capacidad consumidora de ácido en los jales (potencial de neutralización) excede al potencial de generación de ácido, se consumirá toda la acidez generada y las soluciones que drenen del depósito de jales tendrán un pH cercano al neutro.

La oxidación de los sulfuros metálicos en los jales, es generalmente muy limitada durante la operación y se desarrolla lentamente a lo largo del tiempo, después que cesa la acumulación en el depósito y que la porosidad en el mismo permite la

difusión del oxígeno atmosférico. Se ha reportado que el espesor de la zona de oxidación en los jales inactivos es muy limitado (50 – 200 cm), debido a la formación de capas de baja permeabilidad que impiden el transporte vertical de los agentes oxidantes hacia los niveles inferiores de los jales (Blowes et al. 1990, Lin 1997, Johnson 2000, Holmstrom et al. 2001, Ljungberg 2001, McGregor and Blowes 2002)

Si en los jales existen condiciones favorables para la generación de drenaje ácido, la ocurrencia de otros procesos geoquímicos y físicos puede controlar eficientemente la acidez, la movilidad y dispersión de los MMPT en los depósitos de jales; estos procesos pueden ser:

1. Disolución y alteración

a) La disolución de minerales carbonatados como la calcita (CaCO_3), puede neutralizar a las soluciones ácidas llevándolas hasta un pH entre 6.0 y 8.0. Así mismo, existen otros minerales como gibsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), goetita ($\alpha\text{-FeOOH}$), ferrihidrita ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) y brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), que al disolverse consumen protones (Lin 1997, Morin and Hutt 2001)

b) La alteración de minerales aluminosilicatados (anortita, muscovita, albita, etc.) consume protones y en consecuencia puede neutralizar los ácidos generados por la oxidación de los SM (Morin and Hutt 2001).

2. Sorción y precipitación:

a) La sorción (adsorción y co-precipitación) de aniones y cationes en superficies de minerales de arcillas, oxihidróxidos de Fe, Al, Mn, y calcita ha sido ampliamente documentada como otro de los principales controles de la movilidad los MMPT (Frost and Griffin 1977, Goldberg and Glaubig 1988, Bowel 1994, Van Der Hoek et al. 1994, Manning and Goldberg 1997, Foster et al. 1998, McGregor et al. 1998, Goldberg and Johnston 2001, Goldberg 2002, Romero et al. 2004).

b) La precipitación de minerales secundarios como óxidos, hidróxidos, sulfatos, carbonatos y arseniatos de los metales liberados durante la oxidación, es uno de los

principales controles de la movilidad de los MMPT (Lin 1997, Foster et al. 1998, McGregor et al. 1998, Bain et al. 2000, Roussel et al. 2000, Johnson et al. 2000, Fukushi et al. 2003, Gieré et al. 2003).

c) La formación de capas compactas por la precipitación de minerales secundarios, principalmente de Fe, dentro de la zona de oxidación; puede ser el principal control de la dispersión de los MMPT, ya que además de proporcionar estabilidad física al depósito, actúan como una zona de acumulación de los MMPT que se lixivian de las capas superiores y no permite el avance del frente de oxidación hacia las partes inferiores del depósito (Blowes et al. 1990, Lin 1997, McGregor et al. 2002)

Objetivos

La presente investigación tuvo como objetivo general la identificación de los principales procesos geoquímicos que controlan la movilidad de los MMPT en los jales de sulfuros metálicos del depósito "El Fraile" en el distrito minero de Taxco, Guerrero.

Los jales estudiados provienen de la explotación de vetas y mantos, de origen hidrotermal, de sulfuros de plomo (galena) y zinc (esfalerita) asociados con sulfuros de hierro (pirita), encajonados en lutitas, calizas y esquistos, y que se beneficiaron por el método de flotación selectiva en la hoy inactiva Planta de Beneficio de "El Fraile", situada a unos 7 km al SE de la ciudad Taxco de Alarcón. De acuerdo a los documentos históricos (Osborne 1956, IMMSA 1973), se infiere que en el depósito "El Fraile" se acumularon unas 5.5×10^6 de toneladas de jales en el periodo comprendido entre 1945 y 1973.

Los objetivos específicos de esta investigación fueron:

- Zonificación vertical del depósito de jales con base en las características físicas, geoquímicas y mineralógicas

- Valoración y dimensión del peligro potencial que representan los jales para el entorno natural.
- Identificación de las fases sólidas que controlan la movilidad y minimizan la dispersión de los MMPT, y en consecuencia moderan los potenciales impactos ambientales.

Para cumplir con los objetivos propuestos se planteó una estrategia metodológica de estudio que se presenta en la Figura 1.1. Los resultados de esta investigación permitirán dimensionar el problema ambiental potencial que representan los jales “El Fraile” para el entorno y serán útiles para implementar estrategias eficaces de remediación que minimicen la severidad del impacto ambiental y no conlleven a daños ambientales colaterales.

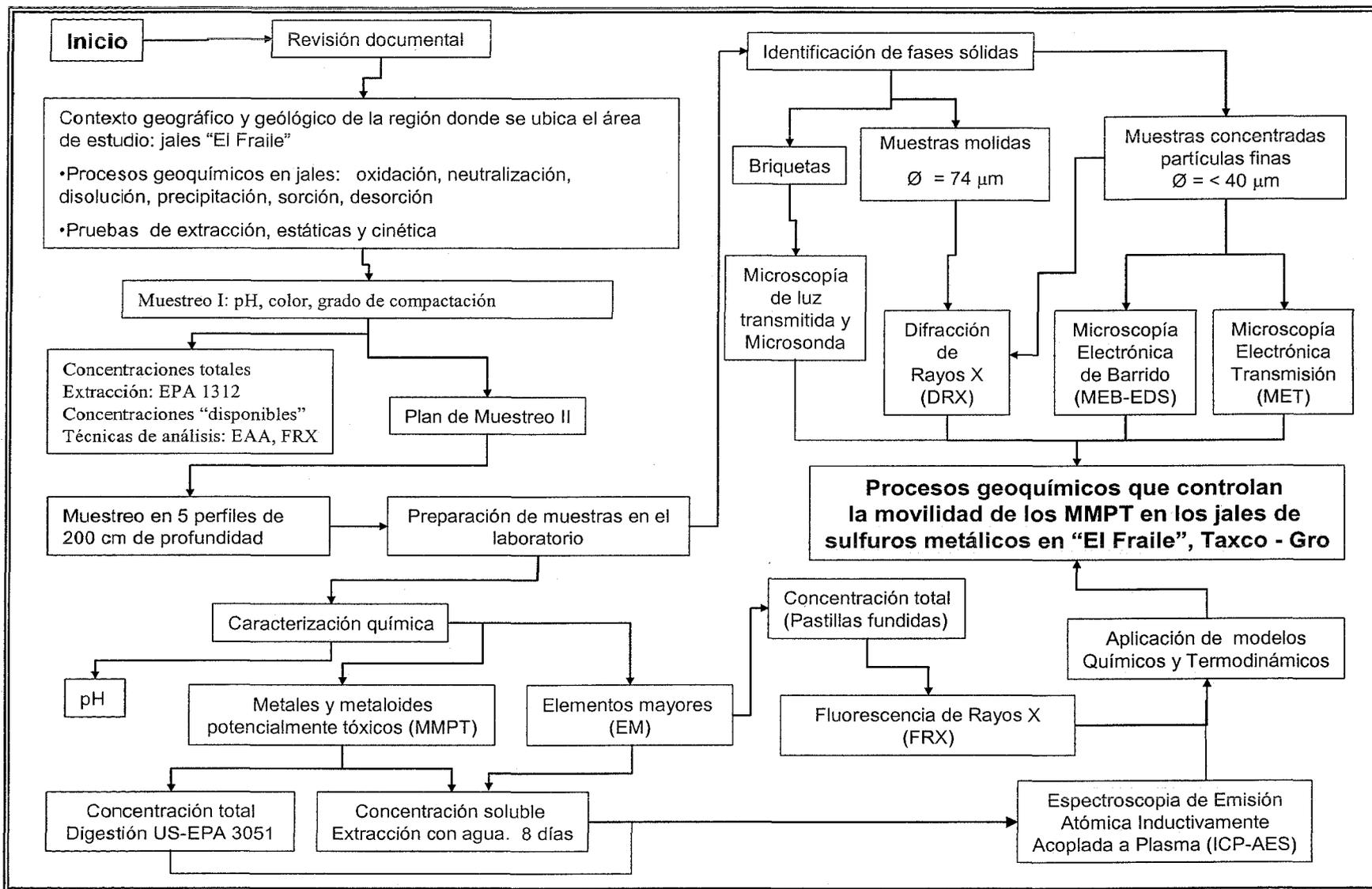


Figura 1.1 Estrategia metodológica para estudiar los procesos geoquímicos que controlan la movilidad de los MMPT en los jales de sulfuros metálicos "El Fraile", Taxco – Guerrero

II. ASPECTOS GEOGRÁFICOS Y GEOLÓGICO-MINEROS DE LA REGIÓN DONDE SE UBICA EL ÁREA DE ESTUDIO

2.1 Descripción del área de estudio: Depósito de jales “El Fraile”

El depósito de jales “El Fraile” se localiza en el Distrito Minero de Taxco (DMT), en el estado de Guerrero. Estos jales provienen de la explotación de yacimientos hidrotermales de sulfuros de plomo (galena) y zinc (esfalerita) asociados con sulfuros de hierro (pirita), que se beneficiaron por el método de flotación selectiva en la hoy inactiva Planta de Beneficio de El Fraile, situada a unos 7 Km al SE de la ciudad Taxco de Alarcón.

De acuerdo a los documentos históricos (Osborne 1956, IMMSA 1973), se infiere que la acumulación de jales en “El Fraile” se inició en la década de 1940 y finalizó en 1973. Estos jales se depositaron en el lecho de dos arroyos tributarios del río Cacalotenango, que están divididos por una pequeña elevación, por lo que se puede apreciar que el depósito se divide en dos unidades: a) Fraile Norte y b) Fraile Sur (Figura 2.1). En ambas unidades del depósito se distinguen las partes correspondientes al “talud” y al “vaso”.

En el denominado “talud” de las dos unidades del depósito, los jales están expuestos al intemperismo, y son de color café–amarillo–rojo. En cambio, la parte denominada “vaso” del depósito está totalmente forestada con vegetación autóctona y está integrado al paisaje natural.

En el depósito “El Fraile” hay acumuladas aproximadamente 5.4×10^6 toneladas de jales (IMMSA, 1980). Los jales del “Fraile Norte” ocupan una superficie de aproximadamente 13.2 hectáreas y los de “Fraile Sur” unas 6.8 hectáreas. Del área total ocupada por los jales ($\cong 20$ hectáreas), las 2/3 partes corresponden al denominado “vaso” (13.4 hectáreas) y aproximadamente 1/3 parte, a la parte denominada “talud” (6.6 hectáreas). Información verbal proporcionada por el personal de la empresa, indica que los espesores en la parte del vaso son del orden de los 20 m y en el talud del orden de los 70 m.

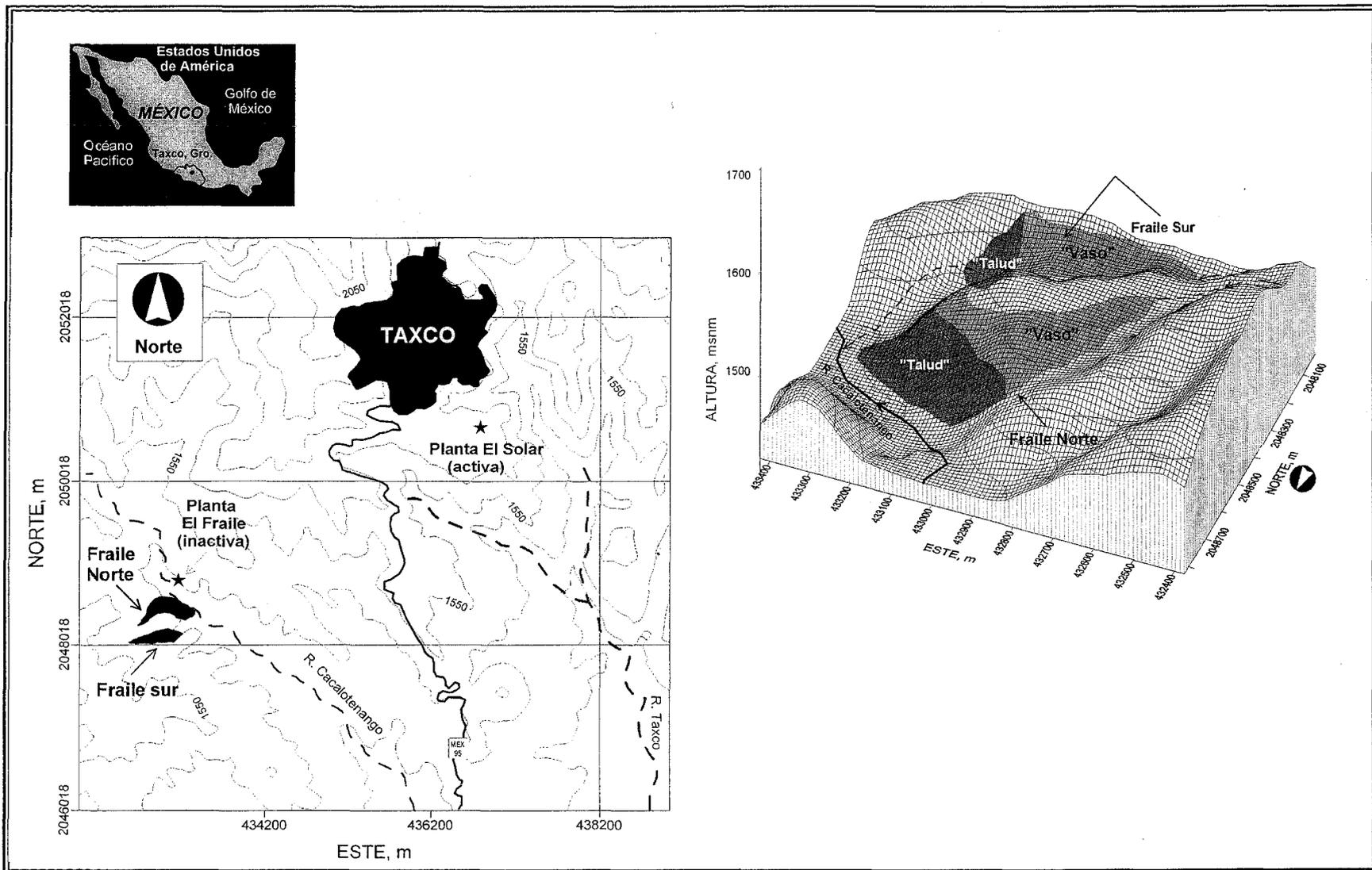


Figura 2.1 Ubicación del Depósito de Jales "El Fraile", Taxco - Guerrero

2.2 Contexto geográfico y geológico - minero

2.2.1 Ubicación

El depósito de jales “El Fraile” se localiza en el DMT, que a su vez se ubica en la parte norte–central del Estado de Guerrero, al sur de la República Mexicana. (Figura 2.1). El sitio es accesible a través de la carretera federal No. 95 (México D.F. – Acapulco). A la altura del kilómetro 160 de esta carretera se encuentra la ciudad de Taxco de Alarcón y siguiendo unos 7 Km al sur se intercepta un camino empedrado, que a 5 Km en dirección este conduce hasta el depósito de jales en estudio.

2.2.2. Fisiografía

A escala regional, el sitio de estudio se ubica en la cuenca Balsas – Mexcala. Localmente se observa una topografía accidentada donde los rasgos geomorfológicos sobresalientes son pequeñas quebradas con sus respectivas elevaciones que las delimitan. La elevación promedio es del orden de los 1700 msnm. En los alrededores del depósito de jales se localizan arroyos que son de flujo intermitente y que desembocan en el río Cacalotenango, el cual fluye de noroeste al sureste (Figura 2.1)

De acuerdo a la clasificación de Koeppen, el clima de la región es tropical lluvioso con precipitaciones en verano e inviernos secos (Asw). La temperatura promedio anual es de 26 – 30°C con mínimos de 12°C y máximos de 31°C. El registro histórico de precipitaciones indica un promedio anual del orden de los 1000 mm (INEGI 1999). De junio a octubre se registran las mayores precipitaciones en la región con valores máximos en el mes de septiembre (300 mm). En los meses de diciembre a mayo las precipitaciones son escasas con valores mínimos en febrero (1.2 mm), razón por la cual en esta época del año la región muestra apariencia de aridez, y se favorece la ocurrencia de los fenómenos de evapotranspiración.

2.2.3 Bosquejo histórico de la minería en el Distrito Minero de Taxco (DMT)

El DMT se ha caracterizado históricamente por su producción de plata. Los datos indican que las actividades mineras en el DMT se remontan a épocas precolombinas.

En 1528 se estableció en el poblado de Tetelcingo un campamento minero que junto con los de Cantarranas y Tenango llegaron a formar hacia 1570 el Real de Minas de Taxco. De acuerdo a documentos existentes en el archivo de la Unidad Minera de Taxco (IMMSA, 1973) se pueden distinguir 6 diferentes periodos en la historia de la actividad minera en el DMT:

- Periodo inicial: 1522 – 1747

Los españoles introducen herramientas de hierro y el uso de la pólvora negra para extraer el mineral. Sobresale en este periodo la explotación del Socavón del Rey (hoy mina El Pedregal).

- Periodo de bonanza: 1747 – 1802

En este periodo, José de la Borda y José Vicente de Anza dieron un gran impulso a la minería en Taxco, ya que explotaron grandes bonanzas de plata en las minas de San Ignacio, La Lajuela, La Perla, y otras más localizadas en Tehuilotepic.

- Periodo de estancamiento: 1810 – 1900

Los sucesos de guerra de independencia ocasionaron que la industria minera en todo el país sufriera un estancamiento.

- Periodo de reorganización: 1900 – 1943

Con la promulgación de la Ley Minera de 1892 se propició la llegada al país de compañías mineras extranjeras. En este periodo se introduce el sistema de beneficio de flotación selectiva que permitió el resurgimiento del DMT como un importante productor de Zn y Pb. La primera compañía extranjera que llegó a Taxco fue la "*Eagle Picher Company*".

- Periodo moderno: 1943 – 1973

Este periodo está marcado con la llegada de la "*American Smelting and Refining Company*" (ASARCO), que en 1965 cambió su razón social por ASARCO Mexicana.

En este periodo se procesaron 1000 toneladas diarias de mineral en la planta de flotación instalada en el poblado El Fraile.

- Periodo contemporáneo: 1974 – 2004

IMMSA (Industrial Minera México, subsidiaria del Grupo México) inauguró la Unidad Minera Taxco en 1976, con todas sus minas comunicadas de forma subterránea a fin de concentrar el mineral producido en un solo punto: Planta de Beneficio El Solar.

De acuerdo a los datos INEGI¹ actualmente el DMT ocupa el 12° lugar en producción de plata, el 6° en plomo y el 7° en zinc, en el ámbito nacional.

2.2.4 Geología

Las rocas que afloran en el área donde se ubica el sitio de estudio conforman una secuencia litológica que está representada, de la base a la cima, por rocas metamórficas, sedimentarias e ígneas (Figura 2.2) (De Cserna y Fries 1981, IMMSA 1973, CRM 1999).

Las rocas más antiguas son esquistos con intercalaciones de pizarras que pertenecen al esquistito de Taxco (Paleozoico Superior). Sobre el esquistito de Taxco descansan discordantemente rocas sedimentarias (calizas, dolomitas, limolitas, lutitas, areniscas y conglomerados) pertenecientes a las Formaciones Morelos y Mexcala del Cretácico Inferior y Superior. Rocas clásticas de origen continental de la formación Balsas del Terciario se encuentran descansando sobre las rocas sedimentarias del Cretácico, y finalizando la columna litológica se encuentran las rocas ígneas de la Riolita Tilzapotla que junto a algunas intrusiones ígneas de tipo basáltico son las rocas más jóvenes de la región (Figura 2.2)

El primer periodo de deformación estructural dentro del área fue pre-cretácico, lo que ocasionó el metamorfismo de las rocas del Paleozoico hasta formar la serie de

¹ INEGI. *Estadística de la Industria Minerometalúrgica*. <http://www.INEGI.gob.mx/>. actualización 27/ Feb/ 2001

esquistos y estuvo acompañada de fuertes plegamientos. El inicio del Terciario estuvo caracterizado por esfuerzos de compresión que originaron un fuerte plegamiento y fallamiento de las rocas preterciarias (esquistos, calizas y lutitas).

La formación de fallas con rumbo N y NE favoreció el emplazamiento de la mineralización en vetas, razón por la cual las vetas de Pb–Zn–Ag están encajonadas en rocas preterciarias. A finales del Terciario ocurrieron eventos que involucraron la extrusión de lavas riolíticas y depósito de materiales volcánicos.

2.2.5 Yacimientos minerales metálicos

En el DMT sobresalen dos tipos de yacimientos minerales metálicos de origen hidrotermal: a) Vetas, y b) Mantos. El emplazamiento de vetas tiene una relación directa con el principal sistema de fracturamiento que afectó al DMT a inicios del Terciario, y la formación de los mantos se favoreció cuando los flujos mineralizantes interceptaron las capas de calizas de la Formación Morelos en el contacto de éstas con los esquistos de Taxco. (Osborne 1956, De Cserna y Fries 1981, IMMSA 1973, CRM 1999).

Las vetas están agrupadas siguiendo una orientación en dos direcciones principales: N–S y NW–SE (Figura 2.2), y se formaron por fluidos hidrotermales que circularon por las fracturas de las rocas metamórficas del Esquisto de Taxco y de las rocas sedimentarias sobreyacentes, por lo que la mineralización se hospeda en ambos tipos de rocas. Dentro de este grupo existen vetas en que la roca encajonante por su composición química permitió el reemplazamiento a lo largo de las fracturas para formar los llamados filones.

Los mantos se localizan preferentemente en las calizas de la Formación Morelos donde estas rocas son de poco espesor y las vetas interceptan el horizonte del contacto caliza – esquisto.

Las principales minas que se han explotado en el DMT son mina San Antonio, Jesús, Remedios, Pedregal y Guerrero.

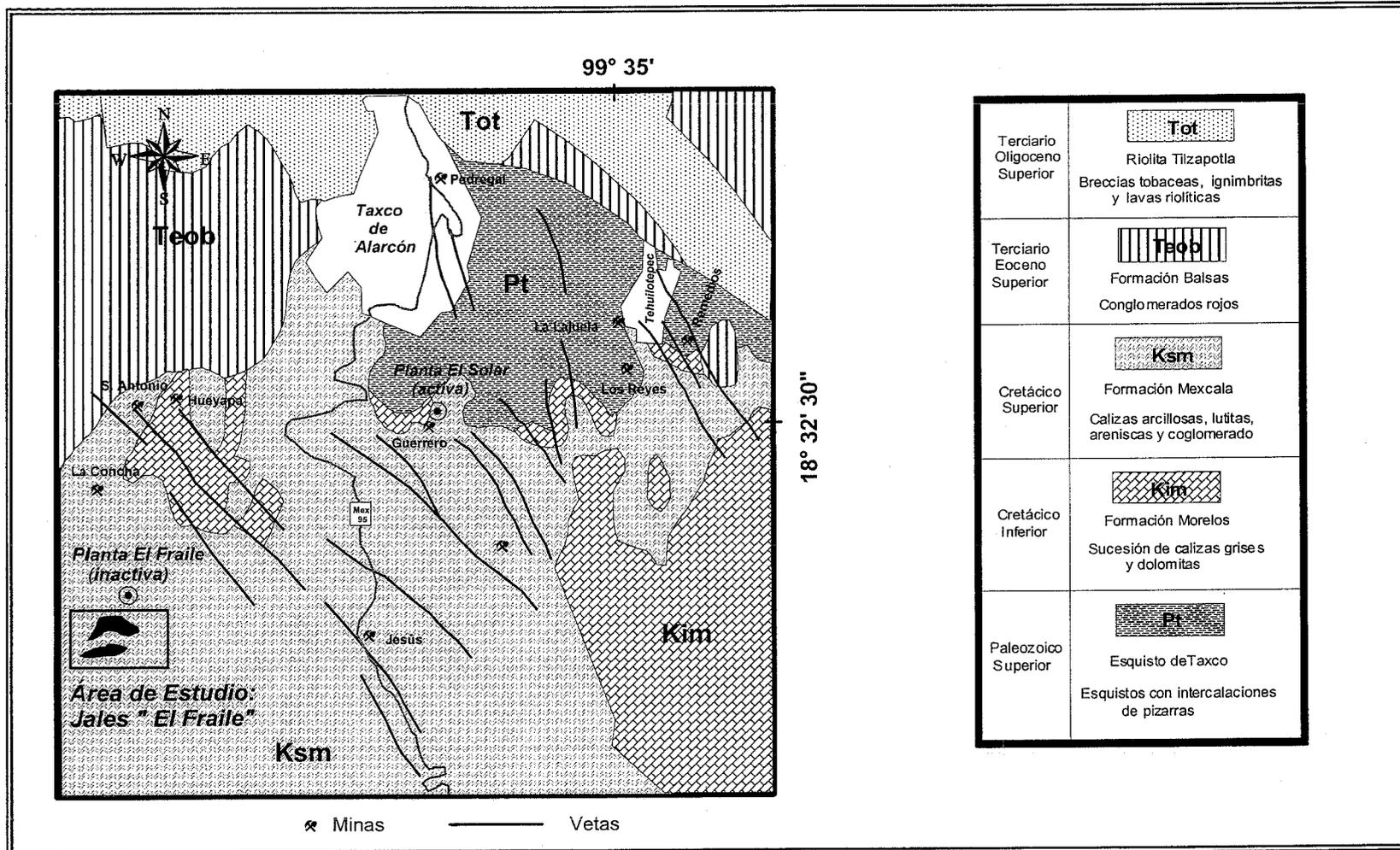


Figura 2.2 Mapa y columna litológica de la región donde se ubica el área de estudio (Fuente: Monografía Geológica – Minera del Estado de Guerrero, CRM 1999)

2.2.6 Beneficio de minerales

En el periodo comprendido entre 1522 y finales del siglo XIX, para el beneficio de los minerales se utilizó el proceso de amalgamación². Sin embargo, en los inicios de la actividad minera se utilizó un proceso de reducción por calor, mediante el cual obtenían plomo argentífero y luego por sublimación separaban a la plata casi pura.

En los inicios del siglo XX se introduce el proceso de beneficio por cianuración que permitió el tratamiento de minerales de baja ley, y en la segunda década de este mismo siglo se introdujo el método de beneficio por flotación selectiva, que permitió el tratamiento de minerales complejos de Pb y Zn.

Aunque actualmente todo el mineral que se extrae en el DMT se procesa por flotación selectiva en la Planta El Solar (CRM 1999); en el periodo comprendido entre 1945 y 1973, el beneficio de los sulfuros metálicos se realizó por flotación selectiva en la Planta “El Fraile”, cuyos jales se depositaron en un sitio cercano a la misma sobre las lutitas y areniscas de la Formación Mexcala, para formar el depósito de jales “El Fraile” (Figuras 2.1 y 2.2).

Entre los reactivos utilizados en el proceso de beneficio destacan: xantatos, cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), sulfato de Cobre (CuSO_4) y sulfato de Zinc (ZnSO_4).

La Planta de Beneficio “El Fraile” tenía una capacidad de 15000 toneladas mensuales y procesaba minerales de sulfuros metálicos provenientes de las minas San Antonio, Jesús, Babilonia y Pedregal (Osborne, 1956). A inicios de la década de 1970 se procesaban 1000 toneladas diarias de las cuatro minas en operación en esa fecha: Guerrero, Jesús, San Antonio y Pedregal (IMMSA, 1973).

Si se toma en cuenta que en el periodo comprendido entre 1945 y 1973 las principales operaciones de beneficio se realizaron en la Planta El Fraile y que en ese mismo periodo se procesaron aproximadamente 6×10^6 toneladas de sulfuros

² El proceso de amalgamación consistía en mezclar el mineral molido con azogue (mercurio) para formar amalgama de plata que al calentarse desprendía al mercurio por evaporación, quedando la plata en estado sólido y casi pura

metálicos con leyes de 160 g de Ag, 3.6% de Pb y 7.6% de Zn (IMMSA, 1973) se estima que en el depósito “El Fraile” puede haber acumuladas unas 5.5×10^6 toneladas de jales si se asume una recuperación óptima de un 80% de Pb y Zn. Este dato es muy cercano a las 5.4×10^6 toneladas calculadas por IMMSA (IMMSA 1980).

2.2.7 Mineralogía de los yacimientos minerales metálicos

Los minerales de mena de los yacimientos minerales del DMT son la esfalerita (ZnS) y la galena (PbS). En las vetas la proporción de esfalerita (ZnS) es de aproximadamente 11 – 11.5 % y de galena (PbS) es de 4%, y están asociados con pirita (FeS₂), que se encuentra en proporciones entre 10 y 15%.

En la actualidad la zona de oxidación que fuera rica en plata está totalmente agotada. Sin embargo, aún se extrae algo de plata procedente de los sulfuros primarios que está asociada al plomo en forma de galena argentífera y también se puede encontrar como proustita, pirargita y freibergita. Los principales minerales de ganga son el cuarzo en las vetas y la calcita en los filones de reemplazamiento y mantos. La mineralogía de los yacimientos minerales metálicos del DMT se resume en la tabla 2.1 (IMMSA 1973).

2.2.8 Estudios previos realizados en el depósito de jales “El Fraile”

Los resultados obtenidos en los estudios realizados en el depósito de jales “El Fraile” y que a continuación se describen, se basan en muestras superficiales de los taludes expuestos y oxidados del depósito y en muestras de aguas superficiales que escurren por el talud de jales oxidados del depósito.

a) Barrera (2001) reporta que el 80% de las muestras de jales superficiales estudiadas (8 muestras) que forman el grupo I tienen un pH ácido ($\text{pH} < 3.0$), y que el 20% (2 muestras) que forman el grupo II tienen pH cercano al neutro ($\text{pH} = 6.9$). Los valores promedio de las concentraciones totales difieren sustancialmente entre los jales ácidos y los neutros. Así mismo, se reporta que en términos de valores promedio, la fracción “lixiviable” en los jales ácidos es mayor que en los jales neutros (tabla 2.2). En este estudio se identifican minerales primarios como el cuarzo, calcita y pirita en los jales del grupo II; y cuarzo, y escasa pirita en los del grupo I. Así

mismo, el único mineral secundario común en ambos grupos de jales es el yeso. Adicionalmente, reportan K-jarosita e illita en los jales ácidos.

Mineral	Fórmula	Filones		Mantos
		Fisura (vetas)	Reemplazamiento	
Esfalerita	ZnS	√	√	√
Galena	PbS	√	√	√
Argentita	Ag ₂ S	√	√	
Pirargirita	Ag ₃ SbS ₃	√		
Proustita	S ₃ AsAg ₃	√		
Cuarzo	SiO ₂	√		√
Calcita	CaCO ₃	√	√	√
Calcopirita	CuFeS ₂	√		
Pirita	FeS ₂	√	√	√
Marcasita	FeS ₂	√		√
Especularita	Fe ₂ O ₃			√
Magnetita	Fe ₃ O ₄	√		√
Pirrotita	Fe _{1-x} S	√	√	√
Marmatita	ZnFeS	√		√
Arsenopirita	FeAsS			√
Jamesonita	Sb ₆ Pb ₄ FeS ₁₄	√		
Ilvaíta	CaFe ₂ (Fe,Mn)Si ₂ O ₈ (OH)			
Epidota	Ca ₂ Al _{2.4} Fe _{0.6} Si ₃ O ₁₃	√		√
Estibinita	Sb ₂ S ₃	√		√
Rodocrosita	MnCO ₃		√	
Barita	BaSO ₄	√		
Cerusita	PbCO ₃	√	√	
Hematita	Fe ₂ O ₃			√
Limonita	Fe(OH)*nH ₂ O	√	√	√
Plumbojarosita	Pb[Fe ₃ (SO ₄) ₂ (OH ₆)] ₂		√	
Anglesita	PbSO ₄	√	√	
Wulfenita	PbMoO ₄	√		
Melanterita	FeSO ₄ *H ₂ O	√		

**Tabla 2.1 Mineralogía de los yacimientos minerales metálicos en el DMT
(Fuente: IMMSA, 1973)**

Elemento	Grupo I (pH = 2.3 – 2.9)		Grupo II (pH = 6.7 –7.0)	
	total	disponible	total	disponible
	mg/kg	mg/L	mg/kg	mg/L
Zn	1 045.9	457.3	13 062.3	36.5
Pb	4 089.8	2.4	13 493.3	0.5
As	570.55	13.42	1 963.8	0.45
Fe	9 272.6	2 106	13 445	ND

Tabla 2.2 Valores promedio de concentración total y disponible de MMPT en jales oxidados del depósito de jales “El Fraile” (Fuente: Barrera 2001)

b) Flores (2002) reporta que el 79% de las muestras de jales superficiales estudiadas (28 muestras), que forman el grupo I, tienen un pH ácido (pH = 2.4 – 5.3) y que el 21 % (7 muestras), que forma el grupo II, tienen pH cercano al neutro (pH = 7.3 – 7.8). Al igual que en el estudio anterior, los resultados obtenidos indicaron que los valores promedio de las concentraciones totales de los MMPT difieren sustancialmente entre los jales ácidos y los neutros. Así mismo se reporta que en términos de valores promedio, la fracción “lixiviable” (disponible) en los jales ácidos es mayor que en los jales neutros (tabla 2.3).

Este autor reporta la presencia de sulfuros metálicos como la pirita, esfalerita, calcopirita y sulfosales de plata. Así mismo, indica que la calcita es abundante sólo en la muestras con pH alto (pH > 6.5); y que en los jales con pH bajo (pH < 5.5) se identificaron precipitados secundarios principalmente yeso, oxihidróxidos de Fe, jarosita; y en algunas muestras identificó smithsonita.

c) IMMSA (2002) reporta que las aguas de lluvia que entran en contacto con los jales oxidados se caracterizan por la presencia de concentraciones solubles de As, Cd, Cu y Zn. (tabla 2.4).

d) Talavera et al. (2002) reportan que los suelos alrededor de los jales están afectados y presentan altas concentraciones de metales totales.

Elemento	Grupo I (pH = 2.4 – 5.3)		Grupo II (pH =7.3 –7.8)	
	total	disponible	total	disponible
	mg/kg	mg/L	mg/kg	mg/L
Zn	2 866.4	94.12	12 574.8	3.05
Pb	9 717.5	0.09	8 748.5	0.008
As	3 383.5	0.036	1 283.8	0.189
Fe	76 393.6	476.75	32 861.9	0.005
Cu	691.4	8.28	1 294.9	0.02
Cd	38.34	2.07	208.5	0.31

Tabla 2.3 Valores promedio de concentración total y disponible de MMPT en jales oxidados del depósito de jales “El Fraile” (Fuente: Flores 2002)

e) Estudios geoquímicos y mineralógicos realizados por Armienta et al. (2003) indican que en términos porcentuales, tanto en jales ácidos como neutros, el Fe, Zn y As presentan las mayores concentraciones “disponibles”; y en cambio el plomo presenta las menores concentraciones disponibles. Estos autores concluyen que los jales del depósito “El Fraile” son generadores de drenaje ácido y que constituyen un riesgo potencial para el ambiente y para la comunidad del Fraile.

Muestra	pH(*)	As, mg/L	Cd, mg/L	Cu, mg/L	Pb, mg/L	Zn, mg/L
1	2.2	0.796	6.37	18.0	ND	1134
2	6.36	0.552	0.02	0.02	ND	4.1
3	6.62	0.002	0.01	0.01	ND	0.01
4	6.54	NR	0.01	0.01	ND	0.43

pH(*) medido en campo. NR: no realizado. ND: No detectado

Tabla 2.4 Resultados de análisis químicos en aguas de lluvia que interaccionan con los jales oxidados de “El Fraile” (Fuente: IMMISA 2002)

f) Talavera et al. (2004) reportan que la oxidación de los sulfuros metálicos en los jales de Taxco (incluidos los de “El Fraile”) y la generación de drenaje ácido están acompañadas por procesos de disolución de otras fases, de neutralización por la calcita, de precipitación de fases secundarias y adsorción, y que estos procesos son

los principales responsables de la movilidad y disponibilidad de MMPT en los desechos mineros de Taxco.

Los minerales primarios reportados para los jales de “El Fraile”, en general, son consecuentes con la composición mineralógica de los yacimientos (tabla 2.1) de los cuales provienen estos jales; y las fases secundarias identificadas son principalmente sulfatos de Ca, Mg y Fe, oxihidróxidos de Fe y arcillas. (tabla 2.5). Los autores reportan que los oxihidróxidos de Fe retienen al As, Pb, Mn y Zn posiblemente vía sorción y no identifican minerales secundarios de As y Pb, que son los elementos de naturaleza tóxica más importantes en los jales “El Fraile”.

Minerales primarios	Cantidad	Minerales secundarios	Cantidad
Cuarzo (SiO ₂)	xxxx	Saponita (Mg _{2.09} Ca _{0.48} Fe _{0.35} Mn _{0.62})(Al _{0.58} Si _{3.42})O ₁₀	xx
Fragmentos de roca	xxxx	Montmorillonita (Mg ₃ [SiO ₄ O ₁₀][OH] ₂)	xx
Feldespatos (KAlSi ₃ O ₈)	xxxx	Calcosita (Cu ₂ S)	x
Ferromagnesianos	xxx	Yeso (CaSO ₄ ·2H ₂ O)	xxxx
Calcita (CaCO ₃)	x	Hexahidrita (MgSO ₄ ·6H ₂ O)	xx
Barita (BaSO ₄)	x	Basanita (CaSO ₄ ·H ₂ O)	xx
Pirita (FeS ₂)	xx	Epsonita (MgSO ₄ ·7H ₂ O)	xxx
Pirrotita (Fe _{1-x} S)	x	Bernalita (Fe(OH) ₃)	xxx
Galena (PbS)	x	Hematina (Fe ₂ O ₃)	xxx
Calcopirita (FeCuS ₂)	xx	Smithsonita (ZnCO ₃)	x
Esfalerita (ZnS)	xxx	Jarosita (KFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆)	xxxx
Magnetita (Fe ₃ O ₄)	x	Pickerigita (MgAl ₂ (SO ₄) ₄)	x
		Rozenita (FeSO ₄ ·4H ₂ O)	xx

x: escaso; xx: poco abundante; xxx: moderadamente abundante; xxxx: muy abundante

**Tabla 2.5 Minerales primarios y secundarios de los jales “El Fraile”
(Fuente: Talavera et al. 2004)**

III. EXPERIENCIA NACIONAL E INTERNACIONAL EN ESTUDIOS DE JALES DE SULFUROS METÁLICOS

3.1 Identificación de los procesos geoquímicos que tienen lugar en los jales de sulfuros metálicos

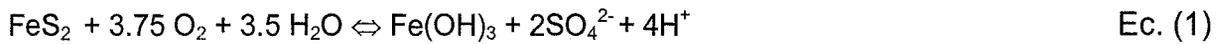
3.1.1 Oxidación de los sulfuros metálicos

En general, los sulfuros metálicos ocurren en yacimientos de origen hidrotermal y son portadores de los metales indispensables para el funcionamiento del mundo moderno. Sin embargo, para obtener estos metales la industria minero-metalúrgica forzosamente genera residuos entre los que destacan los jales, que son el resultado de la trituración y molienda de los minerales una vez que se han recuperado los metales comerciales mediante procesos físicos y químicos. Consecuentemente, los jales tienen la misma composición química que los minerales beneficiados, sólo que con menores cantidades de metales y por ser partículas finas, con mayor superficie de reacción (Muhech 2001). Además, en la composición de los jales se pueden encontrar algunos residuos de los reactivos utilizados en el proceso de beneficio (xantatos, sulfatos de Cu y Zn y cianuro de sodio).

Los sulfuros metálicos en los jales se pueden oxidar al estar expuestos a los fenómenos de intemperismo (interacción con oxígeno y agua). Los minerales se oxidan con mayor dificultad que los compuestos amorfos y los más importantes asociados a la generación de acidez son la pirita y pirrotita.

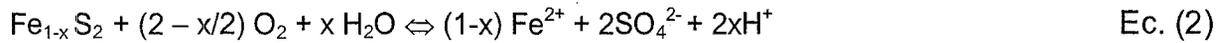
Diferentes autores han reportado las reacciones de oxidación de los principales sulfuros metálicos que se encuentran en los jales (Faure 1980, Bain et al. 2000, Jennings et al. 2000, Armienta et al. 2001, Costello 2003), cuyas constantes de equilibrio ($\log k$) se pueden estimar a partir de los valores de energía libre de formación (ΔG°) reportadas en la literatura especializada (Lindsay 1979, Faure 1980).

pirita (FeS₂)



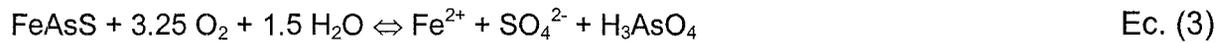
$$\log k = 211.1$$

pirrotita (Fe_{1-x}S)



$$\log k = 92.6$$

arsenopirita (FeAsS)



$$\log k = 198.7$$

galena (PbS)



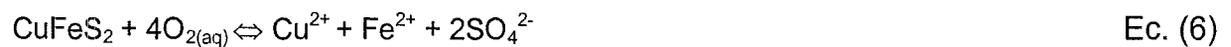
$$\log k = 121.1$$

esfalerita (ZnS)



$$\log k = 166.1$$

calcopirita (CuFeS₂)



$$\log k = 124.5$$

La oxidación de los sulfuros metálicos en los jales está asociada a la generación de drenaje ácido (DA), que son soluciones ácidas con metales y metaloides potencialmente tóxicos (MMPT) disueltos (USEPA 1994a, Johnson et al. 1999, Bain et al. 2000, Roussel et al. 2000). Este fenómeno puede ser catalizado por la presencia de microorganismos a pH ácidos (USEPA 1994a).

La oxidación de los sulfuros metálicos, en los jales, es generalmente muy limitada durante la operación y se desarrolla lentamente a lo largo del tiempo, después que ha cesado la acumulación en el depósito y la porosidad en el mismo permite la difusión del oxígeno atmosférico. Se ha reportado que el espesor de la zona de oxidación en los jales inactivos es muy limitado (50 – 200 cm) debido a la formación de capas de baja permeabilidad que impiden el transporte vertical de los agentes oxidantes hacia los niveles inferiores de los jales (Blowes et al. 1990, Lin 1997, Johnson 2000, Holmstrom et al. 2001, Ljungberg 2001, McGregor y Blowes 2002)

De acuerdo a las reacciones planteadas en las ecuaciones (1) – (6), se puede decir que la problemática ambiental derivada de la oxidación de los sulfuros metálicos está asociada a la liberación al ambiente de sulfatos (SO_4^{2-}), protones (H^+), arseniatos ($\text{H}_n\text{AsO}_4^{3-n}$) y de los metales pesados principales³, que forman parte de la composición de los sulfuros metálicos. En el caso del plomo, el producto de la oxidación de la galena (PbS) es la anglesita (PbSO_4), que es un mineral poco soluble a pH ácidos y neutros.

De los elementos que se pueden liberar durante la oxidación de los sulfuros metálicos, el S, Fe, Cu, Zn, Co, Ni, Se son elementos esenciales para la vida pero en altas concentraciones pueden ser tóxicos. En el caso del Pb, Cd y Tl no es conocido que realicen alguna función bioquímica y junto al As son considerados de naturaleza tóxica (Manahan, 1989). Sin embargo, el que un elemento sea de naturaleza tóxica, no significa necesariamente que provoque daños al ambiente, los

³ Además de los metales pesados principales que forman parte de la composición de los sulfuros metálicos, se pueden liberar los elementos que se reportan como impureza en los cristales de los sulfuros metálicos (Co, Ni, Cd, Tl, Se, etc)

ecosistemas o a la salud, porque para que esto ocurra es necesario que se encuentre en una forma "disponible" que permita que se difunda en el ambiente alterando la calidad del aire, suelo y agua; así como que entre en contacto con los organismos acuáticos o terrestres⁴. El daño que los metales y metaloides potencialmente tóxicos (MMPT) puedan causar a la salud o al ambiente en general depende de su biodisponibilidad, que está en función de la solubilidad de las fases minerales que contengan dichos elementos (Davis et al. 1996). La toxicidad de los MMPT varía ampliamente, aún para el mismo elemento, dependiendo de la especie química y mineralógica (Hellowell, 1988).

3.1.2 Neutralización

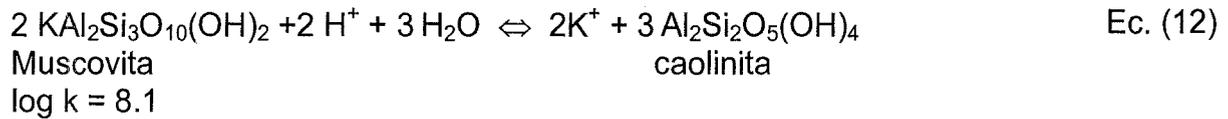
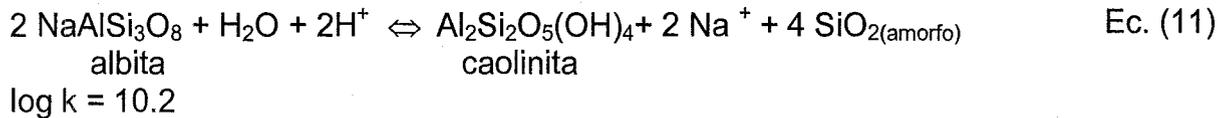
La oxidación de los sulfuros metálicos, en los jales, no siempre genera drenaje ácido (DA), ya que la tendencia de los jales para generar DA es una función del balance entre los minerales productores potenciales de ácido (sulfuros) y los minerales consumidores potenciales de ácido (carbonatos, hidróxidos y aluminosilicatos).

El proceso mediante el cual se consume ácido se denomina "neutralización". En general, cuando la capacidad consumidora de ácido en los jales (potencial de neutralización) excede al potencial de generación de ácido, se consumirán todos los protones y el agua que drene del depósito tendrá un pH cercano al neutro. El proceso de neutralización puede ocurrir por la disolución y alteración de ciertos minerales

A. Disolución de minerales

Los minerales más comunes que consumen protones (H^+) al disolverse son los carbonatos y de ellos el más importante es la calcita ($CaCO_3$), que tiende a neutralizar a las soluciones ácidas, llevándolas hasta un pH entre 6.0 y 8.0. Otros

⁴ <http://www.ine.gob.mx/dgmrar/rip/definicion.html>



3.1.3. Etapas del desarrollo del Drenaje Ácido (DA)

A) Etapa inicial: Predominan las reacciones de oxidación química donde el O₂ es el oxidante principal. Los sulfatos "SO₄²⁻" y protones "H⁺" liberados por la oxidación de los sulfuros metálicos son consumidos por las reacciones de neutralización que se producen por la disolución y alteración de minerales carbonatados, hidróxidos y aluminosilicatos que mantienen las condiciones desde neutras a alcalinas (pH>7). En esta etapa se propicia la precipitación de minerales secundarios que controlan la movilidad de los MMPT liberados durante la oxidación.

B) Etapa intermedia: Coexisten las reacciones de oxidación química y biológica. A medida que continúa la generación de DA y los minerales con potencial neutralizador se agotan o se vuelven inaccesibles, el pH del drenaje disminuye a 3.5 - 4.5 y la oxidación puede ser catalizada por el tipo de bacterias "Metallogenium" (Walsh and Mitchell 1972), y se producen condiciones favorables para el desarrollo de bacterias del género Thiobacillus.

C) Etapa final: Predominan las reacciones de oxidación biológica. La producción de H⁺ ocurre a mayor velocidad que la de OH⁻; el pH se vuelve más ácido y cuando el medio alcanza un pH < 3.5 la oxidación es catalizada por microorganismos del género Thiobacillus: ferrooxidans y thiooxidans (USEPA 1994). De las reacciones de oxidación química (etapa inicial), a partir de los sulfuros de hierro, se produce hierro ferroso "Fe²⁺", que se oxida biológicamente y se convierte en hierro férrico "Fe³⁺" que reemplaza el O₂ como el oxidante principal. En esta etapa la velocidad de oxidación es considerablemente más rápida que en las etapas anteriores. Evangelou y Zhang(1995) reportan que la oxidación de los sulfuros metálicos catalizada por

bacterias puede ser más rápida que la oxidación química hasta en seis ordenes de magnitud.

3.1.4 Precipitación y sorción de los MMPT liberados en los procesos de oxidación

En el control de la movilidad de los MMPT en jales destacan los procesos de precipitación y sorción

- a) La precipitación de goetita (α -FeOOH), lepidocrocita (β -FeOOH), ferrihidrita $\text{Fe}(\text{OH})_3$, jarosita ($\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$) y yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) limita la movilidad del Fe y sulfatos liberados durante la oxidación de los sulfuros metálicos (Blowes y Jambor 1990, Lin 1997, Bain et al. 2000)
- b) La formación de minerales secundarios insolubles como la cerusita (PbCO_3) en ambientes alcalinos; y de anglesita (PbSO_4) y beaundantita ($\text{PbFe}_3(\text{AsO}_4)(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$) en ambientes ácidos (Lin 1997, Roussel et al. 2000) limita la movilidad del plomo. Gieré et al. (2003) reporta que la movilidad del Pb en jales oxidados y ácidos está controlada por la co-precipitación en jarosita.
- c) La precipitación de covelita (CuS), limita la movilidad del Cu (Lin 1997, McGregor et al. 1998. Johnson et al. 2000). McGregor et al. (1998) reportan que la movilidad del cobre puede estar controlada por la coprecipitación o adsorción en jarosita y goetita.
- d) El control de la movilidad del Zn en jales se da vía adsorción y coprecipitación en goetita y jarosita (McGregor et al. 1998)
- e) Roussel et al. (2000) y Gieré et al. (2003) han observado que la precipitación de beaundantita " $\text{PbFe}_3(\text{AsO}_4)(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$ ", en jales ácidos, controla la movilidad del

arsénico. Así mismo ha sido ampliamente reportado el control de la movilidad de arseniatos por procesos de sorción en superficies minerales como oxihidroxidos de Fe, arcillas y calcita (Frost and Griffin 1977, Goldberg and Glaubig 1988, Bowel 1994, Van Der Hoek et al. 1994, Manning and Goldberg 1997, Foster et al. 1998, McGregor et al. 1998, Goldberg and Johnston 2001, Goldberg 2002, Romero et al. 2004).

La precipitación de los minerales secundarios, principalmente de Fe, puede ser el principal control de la dispersión de los MMPT ya que forman capas compactadas que además de proporcionar estabilidad física al depósito, actúan como una zona de acumulación de los MMPT y no permite el avance del frente de oxidación hacia las partes inferiores del depósito.

- a) Capas cementadas (*hardpans*) formadas por yeso y fases sólidas de Fe de 10 – 15 y de 1 – 5 cm de espesor fueron encontradas a una profundidad de 25 cm a partir de la superficie en depósitos de jales de sulfuros metálicos en Québec y New Brunswick, Canadá (Blowes et al. 1990). Así mismo, McGregor et al. (2002) reportan la formación de una capa cementada y muy compacta de unos 20 cm (de los 20 a los 40 cm de profundidad) en jales de sulfuros metálicos en Ontario, Canadá. En ambos casos, las capas cementadas actúan como una zona de acumulación de MMPT y restringen el movimiento de éstos a través del depósito.

- b) Lin (1997) reporta que las fases sólidas de Fe que precipitan en los jales de sulfuros metálicos, en depósitos de Suecia, se encuentran rellenando los poros intergranulares y cementan la matriz de los jales y forman capas compactas. Estas capas compactas actúan como una barrera que limita la difusión de O₂ (agente oxidante) a través de los jales y retiene a los metales pesados. Estas capas cementadas se reportan a una profundidad de 30 cm a partir de la superficie y su espesor es de unos 50 cm.

3.2 Pruebas utilizadas para valorar y predecir el comportamiento de los jales con relación al peligro potencial que representan para el ambiente

Considerando que la generación del DA, en los jales, es una función del tiempo y del balance entre los minerales sulfurados (productores potenciales de ácido) y los minerales alcalinos (consumidores potenciales de ácido); para la adecuada valoración y/o predicción del comportamiento de los jales con relación al peligro potencial que representan para el ambiente, es necesario realizar pruebas del tipo indicativo y/o predictivo de acuerdo a la estrategia de estudio propuesta por Lawrence (1990)

3.2.1 Pruebas de extracción

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

La prueba consiste en mezclar la muestra de jales con agua meteórica o un ácido débil en una proporción de 1:20 y se agita para mantener los sólidos en suspensión por 18 a 24 horas. El pH final de la solución indica la capacidad amortiguadora del material y el extracto final se analiza por parámetros tales como pH, Eh, conductividad, sulfatos, y MMPT solubles. Las metodologías de mayor aceptación para realizar estas pruebas son: 1) USEPA 1312⁵ y 2) la prueba modificada de la ASTM D3987-85⁶.

⁵ Method EPA 1312 "Synthetic Precipitation Leaching Procedure". En la prueba se utiliza como extractante una disolución de ácido nítrico/sulfúrico (40:60) a pH entre 4.2 y 5.

⁶ Modified ASTM D3987 Modified test for shake extraction of solid waste with water ASTM D3987. En la prueba se utiliza como extractante agua a pH = 5.5 acidificada con CO₂ (NOM-141-SEMARNAT-2003).

Interpretación de los resultados de las pruebas de extracción

En la Norma Oficial Mexicana en materia de jales (NOM -141-SEMARNAT-2003) se señala que si la concentración en el extracto (obtenido mediante la prueba modificada ASTM 3987-85) de uno o varios de los elementos listados en la NOM-052-SEMARNAT-1993⁷, es superior a los límites permisibles señalados en la misma, los jales se consideran peligrosos por su toxicidad.

3.2.2 Pruebas estáticas

Considerando que las pruebas estáticas de balance ácido – base son de tipo predictivo, este tipo de prueba aplica sólo en jales inalterados (no oxidados) para pronosticar su potencial para la producción de DA en el futuro. Los resultados de las pruebas estáticas permiten estimar el balance entre los minerales potencialmente generadores de ácido y aquellos potencialmente consumidores de ácido en una muestra.

En la literatura especializada se reporta que la estimación de la cantidad de minerales productores de acidez y los neutralizadores puede realizarse a través de la composición química de los jales estudiados, para lo cual se toma en cuenta los pesos moleculares de los minerales de interés y las concentraciones totales de los elementos principales que forman parte de dichos minerales (Holmstron et al. 2001). Sin embargo, el procedimiento más utilizado para estimar el balance entre los minerales productores de acidez y los neutralizadores es el propuesto por Lawrence (1990, 1997), denominado “Prueba Modificada de Balance Ácido-Base (PM – ABA)”, que consiste en determinar en la muestras de jales:

⁷ Esta norma establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y el listado de los residuos peligrosos. Los límites máximos de las concentraciones (mg/L) en los extractos de los elementos que hacen a un residuo peligroso son: As, Pb, Cr VI, Ni y Ag = 5.0; Ba = 100; Cd = 1.0; Hg = 0.2; Se = 1.0

- a) El Potencial de neutralización (PN), que está dado por la presencia de minerales que contienen carbonatos
- b) El Potencial de acidez (PA), que está dado por la presencia de minerales que contienen azufre

El procedimiento de la PM – ABA se basa en el método desarrollado por Sobek et al. (1978) (“Prueba de Balance Ácido-Base” (ABA)) y se diferencia en dos aspectos fundamentales:

1. Para determinar el Potencial de Neutralización, en esta PM-ABA se determinan los carbonatos mediante la agitación (24 horas) de la muestras en ácido clorhídrico (HCl) a temperatura ambiente. Este modo de determinar los carbonatos evita la sobreestimación de la capacidad de neutralización de las muestras, que se produce al aplicar el procedimiento de la prueba original ABA, que establece que las muestras en HCl se debe calentar hasta el punto de ebullición, con lo que se logra disolver carbonatos como el de hierro (FeCO_3), que en condiciones ambientales no participarían en el proceso de neutralización

2. Para determinar el Potencial de Acidez, la PM-ABA solamente toma en cuenta la cantidad de azufre que se encuentra en forma de “sulfuro”, ya que considera que el azufre que está presente como sulfato no contribuye a la generación de acidez, con lo que se evita la sobreestimación de la capacidad de generación de acidez que se obtiene cuando se aplica la prueba original ABA, que establece que el Potencial de Acidez se determina a partir de la cantidad de azufre total.

Procedimiento para determinar el potencial de acidez (PA) y el potencial de neutralización (PN) de acuerdo a la metodología PM-ABA:

1. Potencial de Acidez (PA). El PA está determinado por el contenido de azufre como sulfuro y se estima a través de la ecuación:

$$PA = \% \text{ de azufre como sulfuro} \times 31.25^{(8)}$$

Ec. (13)

2. Potencial de Neutralización (PN, kg CaCO₃ / ton). El PN está determinado por el contenido de carbonatos, que se estima mediante titulación. La muestra se trata con HCl y se agita por 24 horas. Después de que se haya completado la acidificación, se titula el ácido que no ha sido consumido con una base estandarizada a un pH = 8.3, luego se calcula el equivalente de carbonato de calcio a través de la ecuación:

$$PN = [(N_{NaOH} \times Vol_{NaOH} (ml)) - (N_{HCl} \times Vol_{HCl} (ml)) \times 50] / [\text{peso (g)}]$$

Ec. (14)

Interpretación de los resultados de la prueba estática de Balance Ácido - Base

En general es aceptado que si la relación PN : PA \leq 1 indica que los jales son generadores potenciales de drenaje ácido (USEPA 1994). Sin embargo, la Norma Oficial Mexicana en materia de jales (NOM -141-SEMARNAT-2003) señala que si la relación PN:PA < 1.2, los jales se consideran generadores potenciales de drenaje ácido.

3.2.3 Pruebas cinéticas

Considerando que este tipo de prueba es predictiva, es conveniente realizarla en los jales inalterados (no oxidados) para confirmar los resultados de las pruebas estáticas y predecir la calidad del agua de drenaje cuando, en el futuro, los jales estudiados se oxiden.

Las pruebas cinéticas consisten en someter a intemperismo acelerado a las muestras, bajo condiciones controladas de laboratorio. Una de las pruebas cinéticas

⁸ El factor 31.25 se basa en la acidez generada, según se derivó por estequiometría química, para la oxidación completa de la pirita y la subsiguiente hidrólisis del Fe³⁺ generado. Por tanto, este factor relaciona la acidez total producida con la alcalinidad equivalente como CaCO₃ requerida para la neutralización.

más utilizadas es la prueba de celdas húmedas, que está diseñada para simular los procesos de intemperismo geoquímico bajo condiciones de oxidación óptimas. La muestra se coloca en una cámara cerrada, de unos 20 cm de diámetro donde se somete a ciclos alternados de aire seco y húmedo (tres días cada uno) y un día de lavado con agua destilada; y evaluación del lixiviado.

Se considera que el tiempo mínimo de prueba es de 20 a 30 semanas. El extracto del lavado se analiza y se obtienen datos de pH, potencial redox, sulfatos, conductividad y MMPT disueltos. Estos datos pueden utilizarse para evaluar la velocidad relativa de liberación de productos de oxidación, el grado potencial del intemperismo y para estimar el tiempo que debe pasar para la generación de ácido.

La interpretación de los datos resultantes de las pruebas cinéticas es compleja, por lo que en la práctica se le da un mayor peso a los resultados de las pruebas estáticas para la clasificación de los jales por el peligro que representan para el ambiente (Lawrence et al. 1997).

IV. METODOLOGÍA

4.1 Muestreo

Se realizó una primera campaña de muestreo en septiembre de 2001 (Muestreo I) donde se tomaron un total de 13 muestras en los jales oxidados del “talud” hasta una profundidad de 30 cm (Figura 4.1). En febrero de 2003 se realizó la segunda campaña de muestreo (Muestreo II) para obtener muestras a mayor profundidad en el depósito de jales. Durante el muestreo II se colectaron un total de 27 muestras de jales distribuidas en 5 perfiles de 200 cm de profundidad.

Con base en las características actuales del depósito de jales en estudio, los perfiles para el muestreo se ubicaron de la siguiente manera (Figura 4.1):

- a) dos perfiles en el denominado “vaso”, que actualmente está cubierto con material de relleno compuesto de clastos de lutitas en matriz calcárea, donde crece vegetación propia del lugar y está prácticamente integrado al paisaje natural.

- b) tres perfiles en el denominado talud que está expuesto a los fenómenos de intemperismo, por lo que presentan una coloración amarillo-café propia de los productos de oxidación de los sulfuros metálicos.

Los perfiles se excavaron manualmente (picos, palas, barretas, cinceles y mazo) y sus dimensiones aproximadas fueron de 1 m x 2 m x 2 m, de tal manera que permitiera realizar una descripción macroscópica y delimitar los intervalos del muestreo con base en la heterogeneidad de los jales: color, granulometría, grado de compactación y pH medido en campo. Se delimitaron 27 intervalos de muestreo en los 5 perfiles que corresponden al total de las 27 muestras colectadas:

- Perfil 1: M1 (0–20 cm); M2 (20–35 cm); M3 (35–45 cm); M4 (45– 75 cm); M5 (75–85 cm); M6 (85–100 cm); M7 (100–130 cm); M8 (130–200 cm)

- Perfil 2: M9 (0–45); M10 (45–65 cm); M11 (65–85 cm); M12 (85–200 cm)
- Perfil 3: M13 (0–18); M14 (20–35 cm); M15 (35–45); M16 (45–65 cm); M17 (65–120 cm); M18 (120–200 cm)
- Perfil 4: M19 (0–20 cm); M20 (20–38 cm); M21 (38–125); M22 (125–200 cm)
- Perfil 5: M23 (0–35 cm); M24 (35–45 cm); M25 (45–78 cm); M26 (78–110 cm); M27 (110 – 200 cm)

4.2 Preparación de muestras y análisis de laboratorio

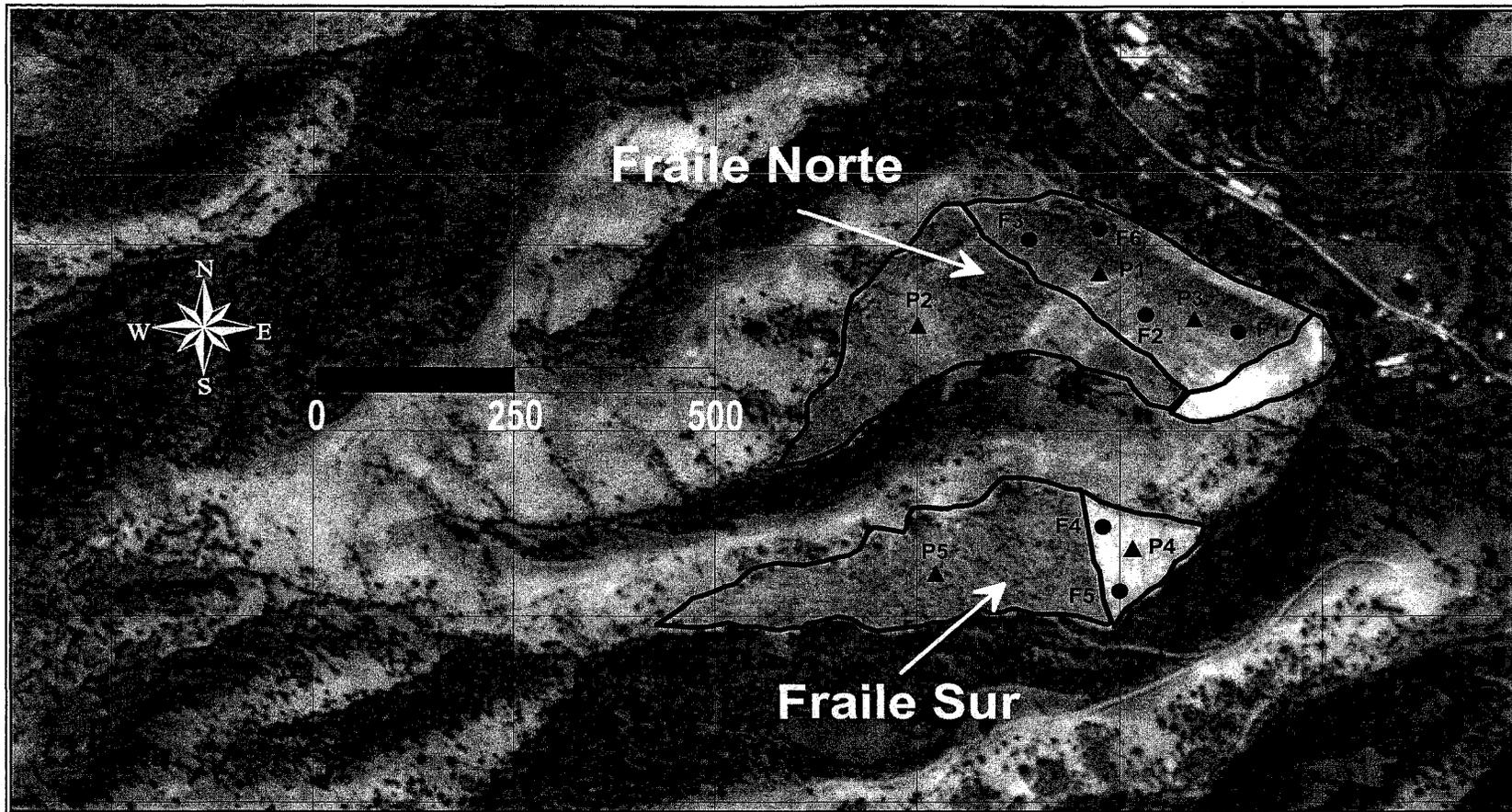
4.2.1 Preparación general de las muestras

La preparación de las muestras se realizó de acuerdo al siguiente orden:

- a) Secar a temperatura ambiente
- b) Disgregar los materiales compactos
- c) Homogenizar y cuartear

4.2.2 pH

El pH de las muestras homogenizadas se determinó en una suspensión utilizando una relación sólido:líquido de 1 : 5, y siguiendo el procedimiento general descrito en el método 9045C de la US-EPA (1995). Las lecturas se realizaron con potenciómetro BECKMAN modelo Φ 720. Adicionalmente, para las muestras del muestreo I se determinó el pH en 4 muestras duplicadas (31% del total) y en las muestras del muestreo II se determinó el pH en el 100% de muestras duplicadas.



Muestreo I (F1 ●) Muestreo II (P1 ▲)

Figura 4.1 Ubicación de sitios de muestreo en el depósito de jales “El Fraile”

4.2.3 Concentraciones totales de metales y metaloides potencialmente tóxicos (MMPT)

a) Muestreo I

Las muestras homogenizadas se pulverizaron en molino de bolas hasta obtener una granulometría inferior a 65 μm (malla 230) y fueron digeridas en sistema abierto con HClO_4 , HF y HCl siguiendo el procedimiento general descrito por Tessier et al (1979)⁹. En estas muestras se determinó la concentración total de los siguientes MMPT: arsénico (As), cobre (Cu), hierro (Fe), plomo (Pb) y zinc (Zn). Las concentraciones totales de estos MMPT se midieron, mediante Espectroscopía de Absorción Atómica (PERKIN - ELMER 2380, PERKIN - ELMER Analyst 100), siguiendo los procedimientos generales descritos por la US-EPA: As por el método 7062 (US-EPA1994b): EAA - Generación de hidruros. Cu por el método 7210 (US-EPA 1986a): EAA - flama. Fe por el método 7380 (US-EPA 1986b): EEA - flama. Pb por el método 7421 (US-EPA 1986c): EAA - Horno de grafito. Zn por el método 7950 (US-EPA 1986d): EEA - flama.

La calidad de los análisis de laboratorio se controló a través del análisis del 31% de muestras duplicadas (4 muestras duplicadas del total de 13)

b) Muestreo II

Las muestras homogenizadas se pulverizaron en molino de bolas hasta obtener una granulometría inferior a 65 μm (malla 230) y fueron digeridas con ácido nítrico en horno de microondas siguiendo el procedimiento general descrito en el método 3051 de la US-EPA (1994c)¹⁰.

⁹ Este procedimiento se seleccionó tomando en cuenta los equipos existentes en el laboratorio donde se realizaron las digestiones y los análisis químicos (Laboratorio de Química Analítica del Instituto de Geofísica, UNAM)

¹⁰ Este procedimiento se seleccionó tomando en cuenta los equipos existentes en el laboratorio donde se realizaron las digestiones (Laboratorio de Análisis Físicos y Químicos del Ambiente del Instituto de Geografía, UNAM)

En las muestras de detalle se determinó la concentración total de los siguientes MMPT: plata (Ag), arsénico (As), bario (Ba), cadmio (Cd), cobalto (Co), cromo (Cr), Cobre (Cu), plomo (Pb), níquel (Ni), selenio (Se), talio (Tl) y zinc (Zn). Las concentraciones totales de estos MMPT se determinaron por Espectroscopía de Emisión Atómica Inductivamente Acoplada a Plasma (ICP- AES - 3100 R), siguiendo el procedimiento general descrito en el método 6010b (US-EPA 1996).

La calidad de los resultados de los análisis químicos se controló a través de análisis del 100% de muestras duplicadas (precisión del método) y de una muestra por triplicado de jales de referencia RTS-3¹¹ (exactitud del método).

4.2.4 Concentraciones totales de elementos mayores (EM)

En los jales se determinó la concentración total de los siguientes EM: silicio (Si), titanio (Ti), aluminio (Al), calcio (Ca), hierro (Fe), potasio (K), manganeso (Mn), sodio (Na) y fósforo (P).

Las muestras homogenizadas se secaron durante 24 horas a 100°C y se pulverizaron en molino de bolas hasta obtener una granulometría menor a 65 µm (malla 230). Con las muestras pulverizadas se prepararon pastillas fundidas de acuerdo al procedimiento descrito por Lozano (1995). Las concentraciones totales de los EM se determinaron por Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X (FRX) con un sistema secuencial de FRX Siemens SRS 3000.

La calidad de los resultados de los análisis se controló a través de análisis de muestras de jales de referencia "RTS-3" (exactitud del método) y a través de realizar tres lecturas diferentes por pastilla para calcular la desviación estándar de los resultados.

¹¹ *Canadian Certified Reference Materials Project. RTS-3 was prepared from samples drawn by Noranda Inc. from the oxidized and the unoxidized zone of the Waite-Amulet tailings (Quebec).*

4.2.5 Caracterización química de los lixiviados en los jales de estudio

a) Obtención de los lixiviados a partir de las muestras sólidas

La composición química de los lixiviados de los jales estudiados se evaluó en las muestras obtenidas en el muestreo II, para lo cual se realizaron experimentos de extracción cuyo metodología se basa en el supuesto de que los lixiviados se forman cuando los EM y MMPT se disuelven como producto de la interacción de la solución de poro con los sólidos del sistema, y que la transición completa de la solución de poro a los lixiviados se indica por la estabilización de parámetros como el pH o la conductividad eléctrica (CE).

Se realizaron experimentos de extracción durante ocho días en las 27 muestras de jales del muestreo II. La metodología utilizada en estos experimentos, se basa en las propuestas por Reddy et al. (1993); Wang et al. (1994); Martycak et al. (1994) y Lin (1997):

- Con las muestras homogenizadas que pasaron la malla 10 ($\varnothing < 2.0$ mm) se prepararon suspensiones con agua destilada (relación: 50 g de jales en 150 ml de agua destilada).
- Tipo de agitación: agitador orbital a 100 rpm.
- Se realizaron lecturas de pH y CE cada 24 horas.
- Cuando se logró la estabilización de pH y CE ($t = 8$ días) se detuvo la agitación y los extractos se centrifugaron y filtraron ($0.45 \mu\text{m}$)
- La suspensión filtrada se dividió en dos submuestras para determinar la concentración "soluble" de metales, metaloides y aniones:
 - A) Acidificada para análisis de los metales y metaloides
 - B) Sin acidificar para análisis de los aniones (sulfatos, cloruros y carbonatos-bicarbonatos)

b) Técnica de análisis

En los extractos obtenidos se determinaron las concentraciones “solubles” de los aniones (SO_4^{2-} , carbonatos-bicarbonatos y cloruros); y de los elementos Ca, Mg, Mn, Al, Na, K, Fe, Zn, Cd, Pb, Cu, As y Ni.

Las lecturas del pH y CE en los extractos se realizaron con un potenciómetro BECKMAN modelo Φ 720 y un conductímetro CORNING 441, respectivamente. Las concentraciones de carbonatos–bicarbonatos se determinaron por titulación (Armienta et al. 1987), las de cloruros por el método potenciométrico y las de sulfatos por el método turbidimétrico (APHA 1989). Las concentraciones “solubles” de los metales y metaloides en los extractos se realizaron por la técnica descrita en la sección 4.2.3 inciso “b”

Los resultados de los análisis químicos en los extractos se utilizaron para calcular los índices de saturación (IS) con el programa de cómputo MINTEQA (Allison et al. 1991). Además se utilizaron para identificar de manera indirecta las posibles fases sólidas a través de diagramas solubilidad-pH contruidos con el programa de cómputo MINEQL (Schecher et al. 1999).

c) Reproducibilidad de los experimentos

La reproducibilidad de los experimentos para obtener los lixiviados de los jales se valoró a través de experimentos de extracción en cuatro muestras duplicadas.

4.2.6 Valoración del peligro potencial que representan los jales en estudio

Para valorar el peligro potencial que representan los jales de estudio se determinaron las concentraciones de los MMPT fácilmente solubles en las muestras de jales oxidados del “talud” del depósito. Los extractos para determinar las concentraciones de los MMPT fácilmente solubles se obtuvieron utilizando el procedimiento general

descrito por el método 1312 (USEPA 1995) que consiste en poner a agitar una mezcla en relación sólido: extractante de 1:20 durante 18 horas.

Se utilizaron muestras de jales con partículas de diámetro menor a 2.0 mm. Además, en este estudio se utilizó como extractante agua destilada en equilibrio con la atmósfera, para simular un posible escenario de interacción de los jales con aguas meteóricas. Las muestras se agitaron en un agitador orbital de tal forma que se lograra una interacción completa y constante, durante las 18 horas del experimento, entre el sólido y el extractante.

La aplicación de esta metodología de extracción pretende que el pH final del extracto resultante refleje la interacción del extractante con la capacidad amortiguadora de los jales. Esta extracción con agua simula las condiciones donde la composición química y mineralógica de los jales es el factor determinante en el pH final del extracto.

Los extractos obtenidos se utilizaron para determinar las concentraciones de As, Pb, Zn, Fe y Cu fácilmente solubles por las técnicas de análisis descritas en la sección 4.2.3 inciso "a" del presente estudio. Así mismo, en los extractos se determinó la conductividad eléctrica (conductímetro CORNING 441) y el contenido de sulfatos por el método turbidimétrico (APHA, 1989).

Con el objetivo de valorar la influencia del pH del extractante en la magnitud de las concentraciones de los MMP fácilmente solubles, se realizaron experimentos siguiendo la misma metodología; pero controlando el pH cercano al neutro, mediante la adición de NaOH 0.1 M.

La reproducibilidad de las pruebas de extracción se valoró a través de experimentos y análisis del 31% de muestras duplicadas (4 muestras de un total de 13).

4.2.7 Valoración de la influencia del tiempo de agitación en la magnitud de la concentración soluble (extraíble) de los MMPT.

Utilizando el procedimiento general descrito en la sección 4.2.5 inciso "a" se realizó la extracción a 4 muestras de control (C1, C2, C3 y C4) con el fin de valorar la influencia del tiempo de agitación en la capacidad de extracción de los MMPT; para lo cual a la mezcla en agitación se le extrajo la fase líquida para análisis de MMPT cuatro veces (1 día, 3 días, 5 días y 8 días) durante un experimento de agitación de ocho días. Cada vez que se extrajo la fase líquida, ésta fue reemplazada con el mismo extractante utilizado, teniendo el cuidado de conservar las condiciones iniciales en cuanto a la relación sólido: extractante.

Los extractos obtenidos durante el experimento fueron acidificados y analizados para determinar la concentración soluble (extraíble) de Fe, Zn, Cu, Cd, Fe y Pb utilizando las técnicas de análisis descritas en la sección 4.2.5 inciso "b".

4.2.8 Mineralogía general en muestras molidas y briquetas

a) Difracción de rayos X (DRX)

Las muestras homogenizadas se pulverizaron en mortero de ágata hasta obtener una granulometría inferior a las 65 μm (malla 230) y se analizaron en un difractómetro Siemens D5000 (radiación de Cu y $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$). La composición mineralógica de las muestras fue determinada a partir de la interpretación de los patrones de difracción obtenidos, utilizando la información acerca de la composición química de las muestras, y la base de datos de patrones de difracción reportados por la Fundación Rusa de Investigaciones Básicas¹²

¹² <http://database.iem.ac.ru/mincryst/search.php?>: Russian Foundation for basic research. Crystallographic database for minerals. Created: December, 1997. New full Revision: December, 2000. Last update: April, 2000

b) Microscopía óptica de reflexión

En 12 muestras de jales (representativas de los diferentes tipos de jales identificados en el depósito estudiado) se hicieron briquetas para la identificación de los minerales opacos de acuerdo a sus propiedades (forma cristalográfica, crucero, textura, intercrecimientos, color, etc). Se tomaron microfotografías de algunos minerales primarios y secundarios para obtener evidencia fotográfica de los fenómenos de oxidación y alteración que ocurren en los jales de estudio.

En las briquetas analizadas por microscopía óptica de reflexión se identificaron y marcaron los oxihidróxidos de Fe, que son las principales fases sólidas capaces de retener vía sorción a los MMPT. Los oxihidróxidos de Fe marcados fueron analizados en la microsonda electrónica (JEOL. JXA-8900R. Superprobe in scanning electron microscopy) con el fin de cuantificar la presencia de los MMPT de interés que estén co-precipitados o adsorbidos en su estructura.

4.2.9 Mineralogía de detalle en muestras concentradas ($\varnothing < 40 \mu\text{m}$)

Considerando que la concentración de los elementos trazas como los MMPT aumenta con la disminución del tamaño de las partículas (Roussel et al. 2000), se seleccionaron 12 muestras homogenizadas y se tamizaron (malla 400) para obtener muestras con partículas inalteradas de diámetro inferior a las 40 μm . En las 12 muestras concentradas se determinó la composición mineralógica utilizando la técnica de Difracción de Rayos - X "DRX" .

De las 12 muestras concentradas ($\varnothing < 40 \mu\text{m}$) se seleccionaron 5 (que representan las diferentes zonas identificadas en el depósito de jales estudiados) para analizarlas por Microscopía Electrónica de Barrido acoplada con espectrometría de Rayos X por energía dispersa (MEB-EDS). En estas 5 muestras se analizaron aproximadamente unas 250 partículas por MEB-EDS (JEOL. JSM-5900 LV). A las partículas en las cuales se detectó la presencia de los MMPT de interés (As, Pb, Zn, Cd, Cu, Zn y Fe)

se les tomó microfotografías y se determinó la concentración de los mismos (MEB-EDS). En algunas partículas de las muestras con mayor presencia de MMPT se obtuvieron el patrón de difracción de electrones y microfotografías de alta resolución (Microscopía Electrónica de Transmisión "MET" JEOL. JEM-2010), para tener evidencias directas de la precipitación de los minerales secundarios que controlan la movilidad de los dos principales elementos de naturaleza tóxica (arsénico y plomo) que son de mayor preocupación por su reconocida presencia en jales abandonados y activos en diferentes regiones de la República Mexicana.

Principios básicos de la Microscopía Electrónica

A continuación se describen brevemente los principios básicos de la técnica de Microscopía Electrónica (Yacamán et al. 1995, Williams and Barry 1996) utilizada en este estudio:

MEB-EDS

El Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) es un instrumento diseñado para estudiar en alta resolución la superficie de un sólido. Su funcionamiento está basado en barrer la muestra con un haz electrónico de sección transversal pequeña y de alta energía y generar una imagen punto a punto de ella. Cuando el haz de electrones impacta la muestra, se generan varios tipos de señales, las cuales permiten obtener una imagen topográfica de las muestras y su composición química:

- **Electrones secundarios:** Son emitidos como resultado de la excitación atómica por el haz primario y se caracterizan por tener menor energía que el haz original. Estos electrones provienen de una región que se encuentra a 5 – 10 nm por debajo de la muestra y proporcionan información acerca de la superficie de la muestra, lo que permite obtener imágenes de alta resolución.

- **Electrones retrodispersados:** Son aquellos que se desvían debido a la dispersión elástica, por los átomos de la muestra y se caracterizan por tener energía similar a la del haz original. Estos electrones provienen de una región que se encuentra a 0.5 μm por debajo de la superficie. Proporcionan información acerca de la superficie de la muestra, lo que permite obtener imágenes de las mismas pero con menor resolución que la que se obtiene con electrones secundarios.
- **Rayos X característicos:** Se producen debido a las transiciones de los electrones excitados de la muestras por el haz primario. Estas señales pueden ser detectadas por un espectrómetro de fluorescencia de rayos X como los que reciben la energía dispersa (EDS). Los rayos X característicos dependen de la composición química de la muestra, lo que permite un análisis químico de las partículas analizadas
- **MET**

Cuando el haz primario de electrones impacta en la muestra, además de los electrones secundarios, retrodispersados y rayos X característicos, se generan otras señales como la de los electrones transmitidos y los electrones difractados. Los primeros son los que logran atravesar la muestra sin ser desviados de su dirección incidente y los segundos son aquellos que sí son desviados. Los electrones transmitidos y difractados aportan información sobre las características estructurales de la muestra. Estos electrones forman un arreglo conformado por un punto muy luminoso (haz transmitido) rodeado de varios puntos luminosos de diferente intensidad (haces difractados) que se conoce como "patrón de difracción de electrones", cuyo análisis permite el estudio de la estructura atómica de la muestra.

El análisis de los patrones de difracción de electrones consiste en medir la distancia "R" entre el haz más intenso del patrón (haz transmitido) y un punto de difracción. Conocida "R" para varios puntos de difracción, ésta se relaciona con la denominada constante de cámara ($\lambda^* L$) a través de la ecuación:

$$Rd = \lambda * L \quad \text{Ec. (15)}$$

“ λ ”: longitud de onda; “L”: longitud que hay entre la cámara y la muestra; “d”: distancia interplanar en el cristal con distancia “R” en el patrón de difracción.

La obtención de la ecuación (16) se basa en la ecuación de Bragg: La longitud “R” y “L” son los catetos de triángulo recto que se forma en la obtención de un patrón de difracción de electrones; y el ángulo entre “L” y la hipotenusa del triángulo formado se denomina 2θ , por lo que la tangente de este ángulo (2θ) es igual a la relación entre “R” y “L” ($\tan 2\theta = R/L$). Considerando que para ángulos pequeños $\tan 2\theta = \sin 2\theta$; y asumiendo $n = 1$ en la ecuación de Bragg, pueden obtenerse las distancias interplanares en los patrones de difracción de electrones:

$$d = (\lambda * L) / R \quad (16)$$

Aplicando la ecuación (16) se obtienen una lista de distancias interplanares, que se comparan con bases de datos existentes en la literatura para la identificación de los minerales correspondientes (Yacamán et al. 1995)

V. RESULTADOS

5.1 Zonificación geoquímica de los jales “El Fraile”

Se realizó una zonificación de los jales del depósito estudiado con base en las características visibles (color, granulometría, grado de compactación) y los valores de pH en las muestras de jales, que se muestran en la tabla 5.1. La diferencia porcentual relativa (DPR) entre los valores de pH de muestras originales (lectura 1) y duplicadas (lectura 2) varía entre 0 y 8%; lo que significa una precisión aceptable del método de medición de acuerdo a lo establecido en los criterios de calidad de la USEPA [DPR < 20%] (USEPA 1994d).

El método de construcción del depósito “El Fraile” permitió la separación granulométrica de los jales. Las fracciones finas se acumularon en el denominado “vaso” y las fracciones gruesas se utilizaron para formar la cortina contenedora del depósito, al cual se le denomina “talud”.

La superficie del “vaso” está cubierta con una capa de material de relleno (clastos de lutitas en matriz calcárea). Considerando la homogeneidad observada en campo, de esta capa de relleno, sólo se tomaron dos muestras de ésta (M9 y M23) cuyos pH varían entre 7.4 y 7.5 (tabla 5.1). El espesor es homogéneo y varía entre 35 y 45 cm. La superficie del “vaso” está totalmente forestada, lo que hace que esté integrada al paisaje natural. Información verbal indica que la acción de cubrir los jales se llevó a cabo un poco después que cesaron las operaciones (\cong 1974 – 1975).

La superficie del “talud” se caracteriza por la presencia de jales en un estado de oxidación avanzado (color café con tonalidades amarillas y rojas) y presentan diferente grado de compactación, lo que está marcado por cárcavas de erosión hídrica de entre 10 y 50 cm de profundidad; las cuales se extienden a lo largo de la pendiente del “talud”. De un total de 16 muestras superficiales (0 – 30 cm) colectadas en los jales oxidados del “talud”, en el 81 % (n = 13) se registró un pH ácido (pH = 1.9 -2.8); y en el restante 19 % (n = 3) se registró un pH cercano al neutro (pH = 6.6-7.5) (tabla 5.1).

De las tres muestras de jales con pH cercano al neutro, una corresponde a jales de coloración gris (F6-13) que presenta características de jales “No oxidados” con pH = 7.6; y que se localiza en una franja de unos 30 x 5 m en la parte inferior del “talud” en el extremo norte de los jales Fraile Norte; y dos muestras corresponden a jales oxidados de color café muy compactos con pH igual a 6.6 (F1-1) y 7.0 (F1-2), y localizados en la parte inferior del extremo sur del “talud” de los jales Fraile Norte.

Tanto en la parte del “vaso” como en el “talud” del depósito de jales “El Fraile” se pueden distinguir las siguientes zonas geoquímicas en el sentido vertical: a) Zona de oxidación (ZO), donde los jales presentan un avanzado estado de oxidación y son de color café – rojos (jales secundarios producto de los procesos geoquímicos que han ocurrido en los jales primarios); b) Zona de jales inalterados (ZJI), donde los jales son de color gris oscuro y muy húmedos (jales primarios que se encuentran en el estado inalterado en que fueron depositados hace aproximadamente 30 años); y c) Zona de transición (ZT) que se desarrolla entre las ZO y ZJI; y donde predominan los jales de color gris (inalterados).

El desarrollo y las características que presentan estas tres zonas (ZO, ZT y ZJI) en la parte del “talud” son diferentes a las que se presentan en la parte del “vaso” del depósito estudiado, debido a que la granulometría gruesa en el “talud” facilita la difusión de los agentes oxidantes y en el “vaso”, donde la granulometría es fina, ocurre lo contrario. Así mismo, estas diferencias se podrían explicar por el hecho de que los jales en la zona del “vaso” fueron cubiertos con material de relleno después de finalizar las operaciones de la mina y en consecuencia estuvieron poco tiempo expuestos al intemperismo.

5.1.1 Zona de oxidación (ZO)

La ZO en la parte del “talud” se inicia en la superficie y se extiende hasta unos 85 cm en P 1, 65 cm en P 3 y hasta 120 cm en P 4 (tabla 5.1). Dentro de esta zona se distinguen capas de jales cementados y muy compactos (capa de hierro) y capas de jales no – cementados. En P 1 y P 3 la capa de hierro tiene un espesor de unos 15 cm, mientras que en P 4 esta capa de hierro presenta el mayor desarrollo con un espesor de unos 80 cm.

La ZO en el “vaso” se inicia a unos 35 – 45 cm bajo la superficie, subyaciendo a la capa de relleno. En esta parte del depósito la ZO tiene un desarrollo muy limitado y presenta espesores entre 20 cm (P 2) y 10 cm (P 5). A diferencia de la ZO en el “talud”, la ZO del “vaso” no presenta capas cementadas y compactas (capa de Fe).

En general, el pH de los jales en la ZO es bajo (pH = 2.0 – 2.8). Sin embargo en la capa de hierro el pH es ligeramente superior con respecto a los jales oxidados de las capas no–compactas (pH = 3.4 – 4.4). Las observaciones de campo indican que estos jales se caracterizan por la presencia de oxihidróxidos de Fe de color café – rojo y la presencia de capas muy delgadas de sales de color blanco. No se observaron cristales de sulfuros metálicos.

5.1.2 Zona de transición (ZT)

La ZT en el “talud” ocurre entre la capa de hierro y la ZJI; y se caracteriza por capas poco compactas de jales de color gris claro con tonos verdes y espesores de 15 cm (P1), 55 cm (P 3) y > 80 cm (P 4). En el “vaso”, la ZT se caracteriza por capas de jales grises con espesores de 15 cm (P 2) y 30 cm (P 5); dentro de estas capas de jales se desarrollan bandas de unos 2 a 3 cm de jales de color café claro.

Tanto en el “talud” como en el “vaso”, el pH de los jales en ZT varía entre 5.6 y 7.1 (tabla 5.1). Las características visuales y el pH de las muestras en la ZT indican que la oxidación de los sulfuros metálicos de la zona no ha sido intensa, pudiéndose observar cristales inalterados de sulfuros metálicos.

5.1.3 Zona de jales inalterados (ZJI)

La ZJI en el “talud” se desarrolla a profundidades mayores a 120 – 130 cm a partir de la superficie (P1 y P3). En el P 4 no fue posible identificar la ZJI, lo que indica que deberá desarrollarse a profundidades mayores a la estudiada (200 cm). En el “vaso”, la ZJI se desarrolla a profundidades mayores de 75 – 85 cm. En la ZJI, el pH de los jales varía entre 6.2 y 7.2; y se observan abundantes cristales inalterados de sulfuros metálicos.

Los valores del pH en las muestras de jales del “talud” del depósito evidencian que el proceso de oxidación de los sulfuros metálicos y la subsiguiente producción de acidez fue generalizada en una gran parte de los jales del “talud” ($\cong 80\%$); por lo que son considerados jales potenciales generadores de drenaje ácido; y en cambio en una parte menor ($\cong 20\%$) a pesar de haber ocurrido la oxidación, los procesos de neutralización han evitado la producción de acidez por lo que pueden considerarse jales que no tienen potencial de generación de drenaje ácido.

La presencia de jales oxidados con pH cercano neutro y pH ácido en la ZO, permite inferir la existencia de dos grupos de jales en el depósito estudiado: “Jales A” con pH ácido y “Jales B” con pH neutro.

Las muestras de jales de las ZT y ZJI, de los sitios donde se hicieron los perfiles (donde actualmente no son evidentes los fenómenos de oxidación, el pH es cercano al neutro y en las cuales se observan abundantes sulfuros metálicos), subyacen a los muestras de jales oxidados y ácidos, lo que evidencia que son el producto de la oxidación de los jales inalterados de la ZT y ZJI; por lo que se pueden asociar al grupo de “Jales A”.

Sitio	Clave	Intervalo cm	pH			DPR %	Características macroscópicas	Zona	
			Lectura 1	Lectura 2	promedio				
Muestreo I									
F1	F1-1	0 a 10	6.5	6.7	6.6	3	arenosos de color café-rojo, muy compactos (capa de Fe)	Zona de Oxidación (ZO)	
	F1-2	10 a 20	7.0	ND	7.0	ND			
F2	F2-3	0 a 10	2.6	ND	2.6	ND	arenosos de color café-amarillo, sueltos, deleznales		
	F2-4	10 a 20	2.8	2.8	2.8	0			
F3	F3-5	0 a 10	2.4	ND	2.4	ND			
	F3-6	10 a 20	2.6	ND	2.6	ND			
F4	F4-7	0 a 10	2.7	ND	2.7	ND			
	F4-8	10 a 20	1.9	ND	1.9	ND			
	F4-9	20 a 30	2.4	ND	2.4	ND			
F5	F5-10	0 a 10	2.5	ND	2.5	ND			
	F5-11	10 a 20	2.5	ND	2.5	ND			
	F5-12	20 a 30	2.2	2.2	2.2	0			
F6	F6-13	0 a 10	7.6	7.4	7.5	3		limosos de color gris, sueltos, deleznales	¿.....?
Muestreo II									
P 1 "Talud"	M1	0 a 20	2.3	2.5	2.4	8	arenosos de color amarillo, poco compactos	Zona de Oxidación (ZO)	
	M2	20 a 35	4.4	4.3	4.4	2	arenosos de color café oscuro, muy compactos (Capa de Fe)		
	M3	35 a 45	2.5	2.3	2.4	8	arenosos de color café oscuro, deleznales		
	M4	45 a 75	2.4	2.4	2.4	0	areno-limosos de color verde con bandas de color café		
	M5	75 a 85	2.6	2.4	2.5	8	arenosos de color café, semi - compactos		
	M6	85 a 100	5.6	5.6	5.6	0	areno-limosos de color gris y húmedos		Zona de Transición (ZT)
	M7	100 a 130	6.0	6.3	6.2	5	arenosos de color gris - verde y compactos		Zona de Jales Inlaterados (ZJI)
	M8	130 a 200	6.2	6.4	6.3	3	arenosos de color gris oscuro muy compactos		
P 2 "Vaso"	M9	0 a 45	7.3	7.5	7.4	3	material de relleno	Cubierta	
	M10	45 a 65	2.8	2.7	2.8	4	limo-arcillosos de color café - amarillo y deleznales	ZO	
	M11	65 a 85	6.9	6.7	6.8	3	finos de color gris con bandas café ligeramente compactas	ZT	
P 3 "Talud"	M12	85 a 200	7.1	6.9	7.0	3	finos de color gris muy húmedos	ZJI	
	M13	0 a 20	2.4	2.5	2.5	4	arenosos de color amarillo muy deleznales	ZO	
	M14	20 a 35	2.2	2.3	2.3	4	arenosos de color café oscuro semi - compactos		
	M15	35 a 50	7.2	7.1	7.2	1	arenosos de color café claro		
	M16	50 a 65	3.5	3.3	3.4	6	arenosos de color café - rojo, muy compactos (Capa de Fe)		
	M17	65 a 120	5.9	6.0	6.0	2	arenosos de color gris -verde y deleznales		ZT
M18	120 a 200	6.5	6.6	6.6	2	limosos de color gris oscuro muy húmedos	ZJI		
P 4 "Talud"	M19	0 a 20	2.2	2.1	2.2	5	arenosos de color amarillo muy deleznales	ZO	
	M20	20 a 40	2.0	2.0	2.0	0	arenosos de color verde oscuro, deleznales		
	M21	40 a 120	3.5	3.5	3.5	0	arenosos de color café - rojo, muy compactos (Capa de Fe)		
	M22	120 a 200	7.0	7.3	7.2	4	arenosos de gris claro con tonos verde-café		ZT
P 5 "Vaso"	M23	0 a 35	7.5	7.6	7.6	1	material de relleno	Cubierta	
	M24	35 a 45	4.0	4.1	4.1	2	finos de color amarillo con bandas café, deleznales	ZO	
	M25	45 a 75	6.5	6.8	6.7	5	finos de color amarillo con bandas verdes, deleznales	ZT	
	M26	75 a 100	6.9	7.2	7.1	4	finos de color gris con bandas café ligeramente compactas	ZJI	
	M27	100 a 200	7.0	7.3	7.2	4	finos de color gris oscuro muy húmedos		

$$DPR = \frac{|S - D|}{|S + D|/2} \times 100;$$

donde S: Lectura 1 y D: Lectura 2 [Criterio de aceptación DPR < 20% (USEPA 1994d)]

Tabla 5.1 Zonificación de jales por sus características macroscópicas en el depósito "El Fraile", Taxco - Guerrero

5.2 Caracterización mineralógica

5.2.1 Mineralogía general en muestras molidas y briquetas

5.2.1.a Zona de transición (ZT) y Zona de jales inalterados (ZJI)

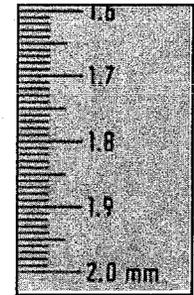
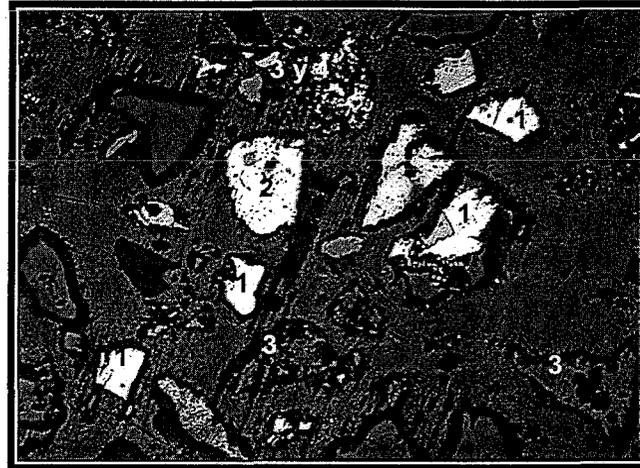
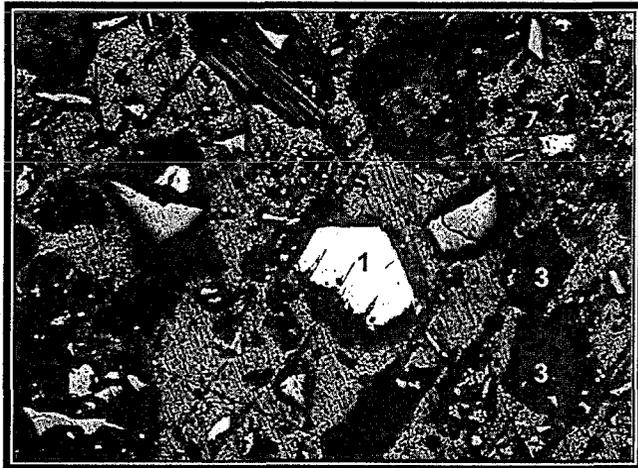
Los resultados del análisis mineralógico general por difracción de rayos X (DRX), en las muestras de jales molidas; y por microscopía óptica (MO) en briquetas; indican que, en general, la zona de transición (ZT) y la zona de jales inalterados (ZJI) están caracterizadas por la presencia de minerales primarios¹³. Los minerales primarios comunes identificados por DRX son el cuarzo, ortoclasa, caolinita, clorita y pirita (apéndice 1 y 2). Adicional a los minerales primarios, se identificó la presencia de yeso por DRX, y oxihidróxidos de Fe por MO (Figura 5.1).

La principal diferencia mineralógica entre las ZJI y ZT es el contenido de pirita. En el “talud” de la parte Fraile Norte se identificó la mayor cantidad de pirita (12 – 15 % estimada por conteo en MO). En la parte Fraile Sur (“vaso”) el porcentaje de pirita varía entre 8 y 10%. Adicionalmente, en el talud de la parte Fraile Norte se identificó, por MO, la presencia de minerales inalterados de calcopirita (<1 %) y en el vaso de la parte Fraile Sur se identificaron cristales inalterados de galena (<1%) (Figura 5.1).

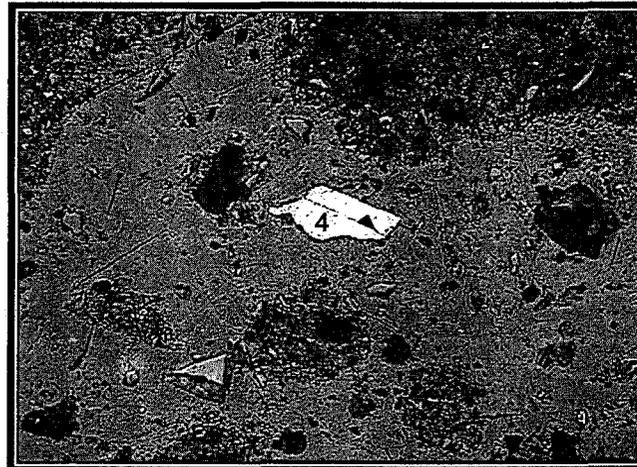
Otra diferencia mineralógica entre las ZJI y ZT se relaciona con la presencia de minerales aluminosilicatados: a) por DRX se identificó a la ilvaíta en el “talud”, y a la epidota, en el “vaso” de la parte Fraile Norte y b) en el “vaso” y “talud” de la parte Fraile Sur se identificó a la plagioclasa (apéndice 1 y 2).

Similar mineralogía ha sido reportada en estudios de otros jales de sulfuros metálicos de la zona de jales inalterados que están cubiertos por capas de jales oxidados (Lin 1997, Holmstrom et al. 2001; Ljungberg et al. 2001).

¹³ Son los minerales no comerciales y aquellos comerciales, que no se pudieron recuperar en el proceso de beneficio, y que se han depositado en el depósito de jales sin ningún cambio más que la reducción de la granulometría (Jambors, 1994).



Escala



LEYENDA

1: Pirita

2: Calcopirita

3: Oxi-hidróxidos de Fe

4: Galena

Figura 5.1 Minerales opacos por microscopía óptica en la zona de jales inalterados del depósito de jales "El Fraile", Taxco- Guerrero

5.2.1.b Zona de oxidación (ZO)

Los resultados del análisis mineralógico general por difracción de rayos X (DRX), en las muestras de jales molidas; y por microscopía óptica (MO), en briquetas; indican que la ZO está caracterizada por la presencia de minerales secundarios¹⁴ y de minerales primarios que han resistido los fenómenos de intemperismo como el cuarzo y la ortoclasa (apéndices 1 y 2).

El análisis por MEB-EDS en algunas secciones pulidas indica que los cristales de cuarzo permanecen inalterados y en cambio algunos cristales de feldespatos-K presentan un avanzado estado de alteración y otros permanecen inalterados (Figura 5.2).

En general, los resultados indican que el principal mineral secundario identificado y común en la zona de oxidación tanto en la parte Fraile Norte como en Fraile Sur es el yeso. Así mismo se observan algunas diferencias mineralógicas en la zona de oxidación de las diferentes partes del depósito:

1) Las capas “no compactas” del “talud” de jales oxidados del Fraile Norte y Sur, además de los minerales primarios cuarzo y ortoclasa se caracterizan por la presencia de los minerales secundarios como el yeso, la jarosita-K (apéndice 1 y 2) y oxihidróxidos de Fe (Figura 5.3a)

2) Las capas “compactas” (capa de hierro) del “talud” de jales oxidados del Fraile Norte y Sur, además de los minerales primarios cuarzo, caolinita y ortoclasa se caracterizan por la presencia de los minerales secundarios como el yeso y la hematita

¹⁴ En este trabajo los minerales secundarios son todos aquellos minerales que resultan de los diferentes procesos geoquímicos que han ocurrido en los jales (oxidación, reducción, neutralización, disolución, precipitación, hidrólisis, etc). Este término incluye a los denominados minerales terciarios, que son, de acuerdo a Jambor (1994), los que cristalizan a partir de la solución de poro durante el secado de los jales

(en esta capa, a diferencia de la capa “no compacta”, no se identifico a la jarosita-K) (apéndices 1 y 2). Así mismo la capa de hierro se caracteriza por la presencia de pirita residual¹⁵ rodeada de una aureola de oxihidróxidos de Fe o encapsuladas en mineral transparente cuyos bordes muestran aureolas de alteración (Figura 5.3 b).

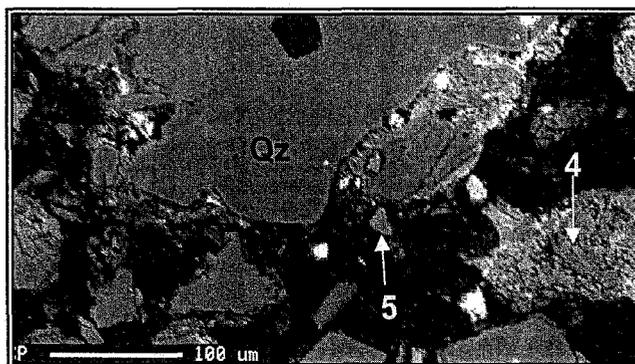
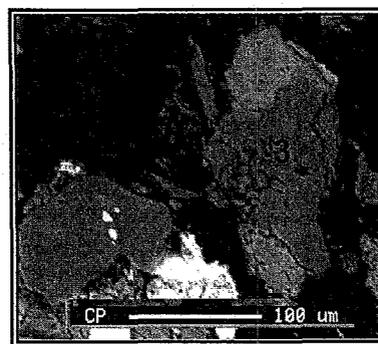
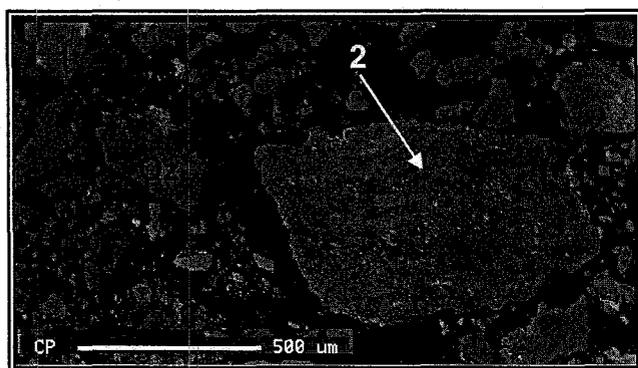
La mineralogía general de la zona de oxidación de los jales “El Fraile” es similar a la reportada en estudios anteriores (Talavera et al. 2004) y a la reportada para otros jales de sulfuros metálicos (Blowes et al. 1990, McCarty 1998, Lin 1997, McGregor et al. 1998) en cuanto a la presencia de yeso, jarosita y óxidos de hierro; pero difiere en la ausencia de fases sólidas secundarias de sulfatos de hierro.

5.2.1.c Jales grises y oxidados con pH cercano al neutro sobre el “talud” de la zona de oxidación de Fraile Norte (Jales del Grupo B)

Sobre la superficie de jales oxidados del “talud” en la parte Fraile Norte se identificó un grupo de muestras (n=3) de jales grises y jales oxidados que de acuerdo a la zonificación se pueden agrupar como “Jales B” por su comportamiento (ver sección 5.1).

Los jales de color gris (no presenta signos visibles de oxidación) se caracterizan por la presencia de minerales primarios como cuarzo, caolinita, calcita y pirita; y los jales oxidados (posible producto del intemperismo de los jales grises y ricos en calcita) se caracterizan por la presencia de los minerales primarios antes enumerados, y de los minerales secundarios como yeso, goetita y hematita. Estos jales oxidados con pH cercano al neutro se distinguen de los jales oxidados ácidos por la ausencia de jarosita (apéndice 3)

¹⁵ *Remanentes de pirita primaria que ha resistido los procesos de oxidación*



Qz: cuarzo inalterado; 1, 3 y 5: Feldespatos – K inalterados; 2 y 4 Feldespatos-K alterados

Análisis semicuantitativo (% en peso) por FRX en partículas de las muestras M5, M10 y M16							
Elemento	1	2	3	4	5	Qz	
Na	0.13			0.74			
Al	12.57	36.29	14.51	9.37	13.52	1.19	0.15
Si	49.74	50.79	50.27	52.4	50.21	98.12	94.56
S	0.33	0.54	0.08	1.34	0.24		0.12
K	32.47	10.35	28.03	14.25	33.48		
Ca	0.59		0.56	0.51	0.87		1.4
Fe	1.81	1.1	4.32	18.23	1.62	0.61	

Figura 5.2 Feldespatos–K con diferente grado de alteración en la zona de oxidación del depósito de jales “El Fraile”, Taxco – Guerrero

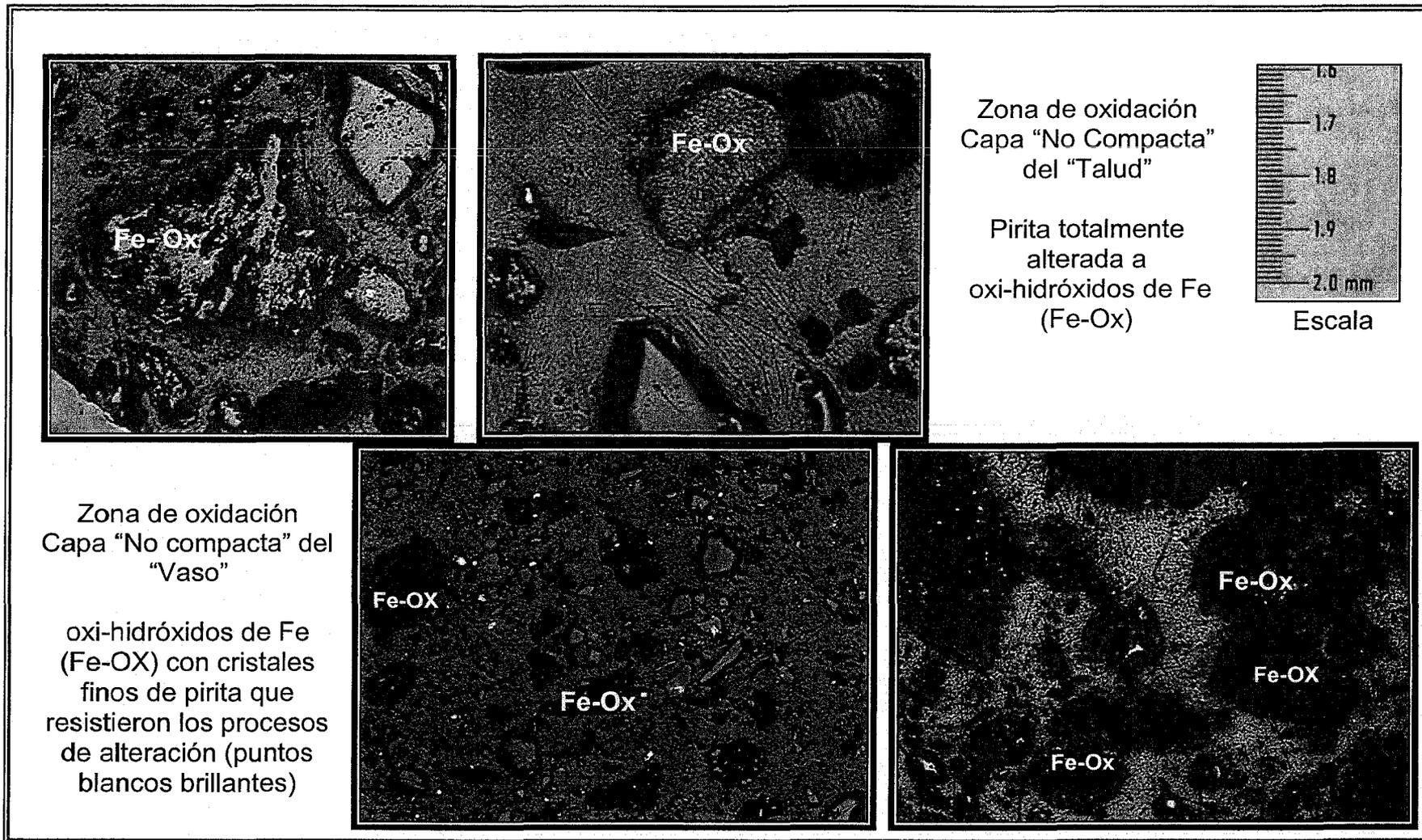
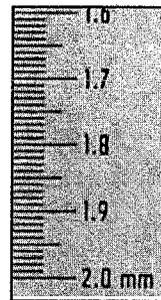
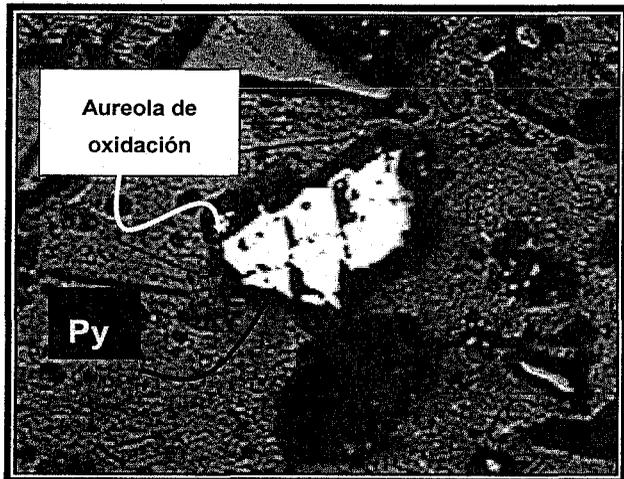


Figura 5.3a Minerales opacos por microscopía óptica en la capa "no compacta" de la zona de oxidación del depósito de jales "El Fraile", Taxco- Guerrero

Pirita (Py) parcialmente alterada a oxi-hidróxidos de Fe (Fe-Ox)



Pirita (Py) inalterada encapsulada en minerales transparentes

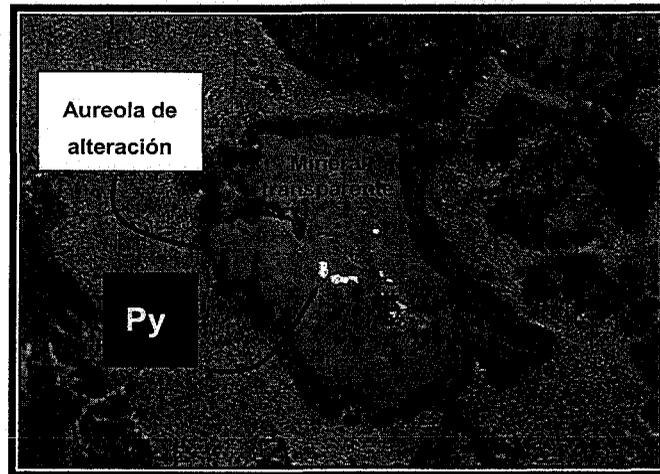
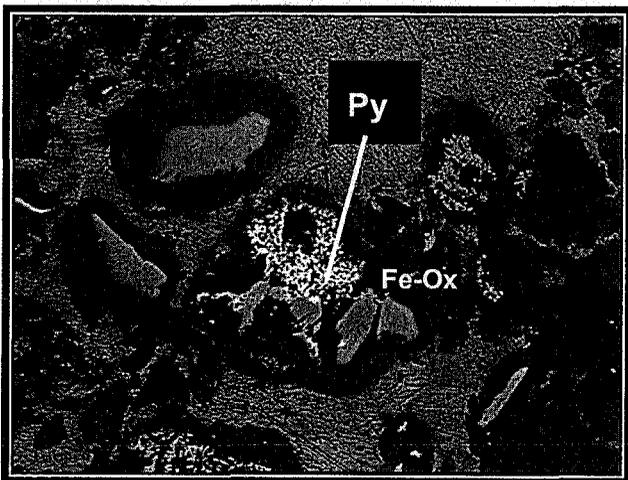
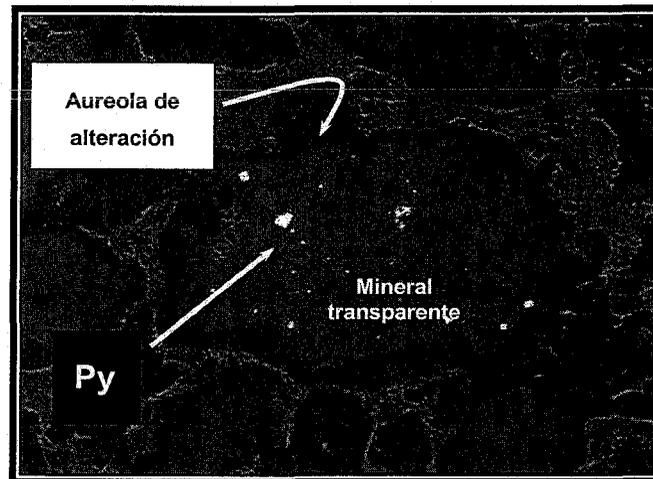


Figura 5.3b Minerales opacos por microscopía óptica en la capa de hierro de la zona de oxidación del depósito de jales "El Fraile", Taxco- Guerrero

5.2.2 Mineralogía de detalle en muestras concentradas ($\varnothing < 40 \mu\text{m}$)

5.2.2.a Zona de transición (ZT) y Zona de jales inalterados (ZJI)

El análisis de detalle por DRX en las muestras de jales concentradas ($\varnothing < 40 \mu\text{m}$) mostró que, además de los minerales identificados en el análisis mineralógico general, en las ZT y ZJI existen otros minerales primarios como la esfalerita y la epidota en el talud de la parte Fraile Norte (Figura 5.4a (1)); y muscovita y esfalerita en el vaso de la parte Fraile Sur (Figura 5.4a (2)). Así mismo, por MEB-EDS se observó que los cristales de pirita y de partículas, en cuya composición química sobresale la asociación Fe-Cu-Sb y Pb, están inalterados (Figura 5.4 b)

5.2.2.b Zona de oxidación (ZO):

La caracterización mineralógica de detalle permitió establecer las principales diferencias mineralógicas entre las capas “no compactas” y capas “compactas” de la zona de oxidación (ZO) en las distintas partes del depósito de jales estudiado. De manera general se puede destacar los siguientes resultados:

b.1) Identificación por DRX de las diferentes fases sólidas de minerales secundarios de Fe: lepidocrocita, akageneita, goetita, hematita y jarosita-K.

b.2 Identificación por DRX del mineral beudantita ($\text{PbFe}_3(\text{AsO}_4)(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$). La presencia de este mineral es de mucha importancia desde el punto de vista ambiental; ya que su precipitación involucra el control de la movilidad del As y Pb, que son los dos principales elementos de naturaleza tóxica reportados en jales de sulfuros metálicos de la República Mexicana (Manz y Castro 1998, Méndez y Armienta 2003; Armienta et al. 2003; Carrillo et al. 2003, Talavera et al. 2004).

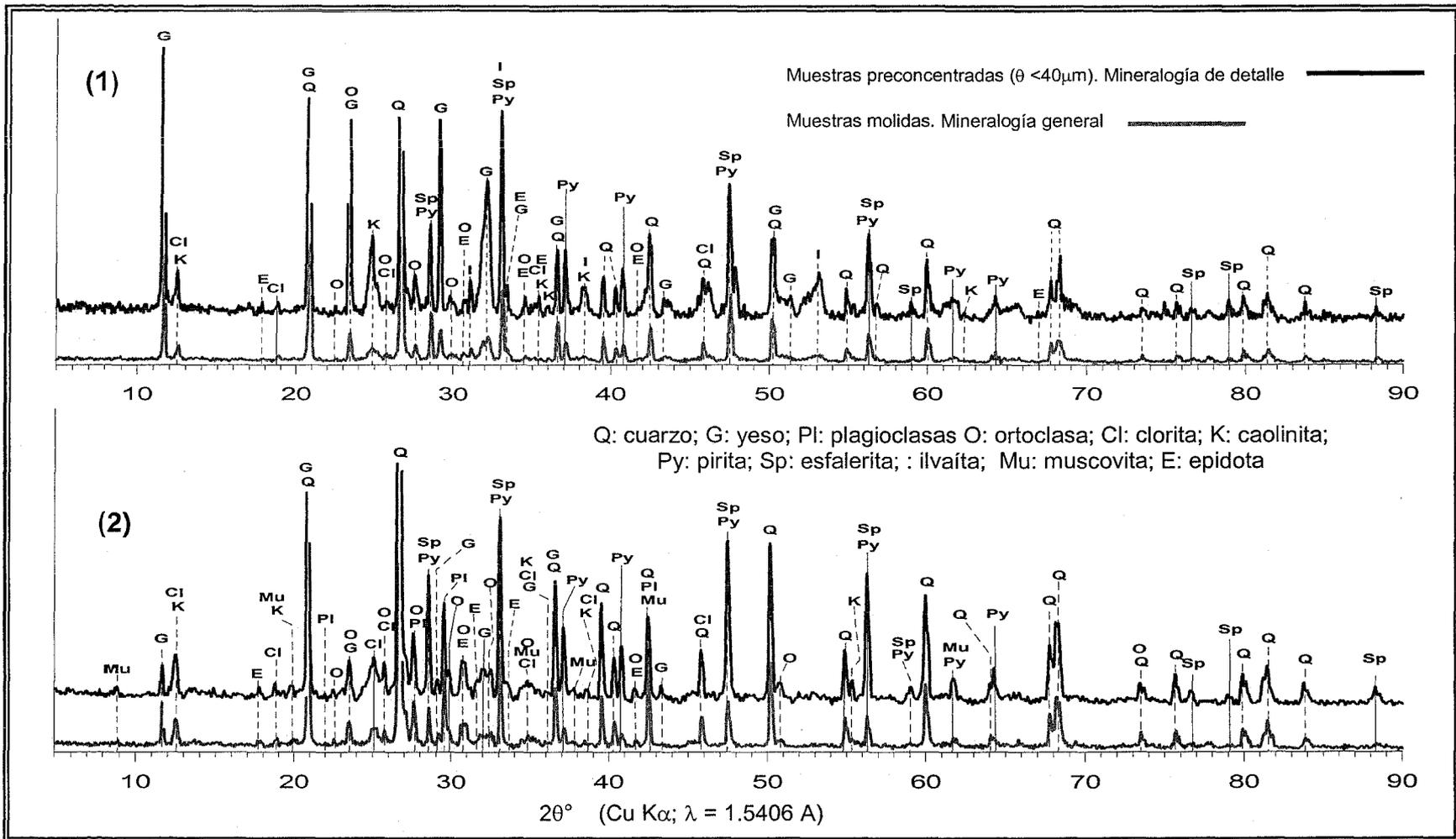
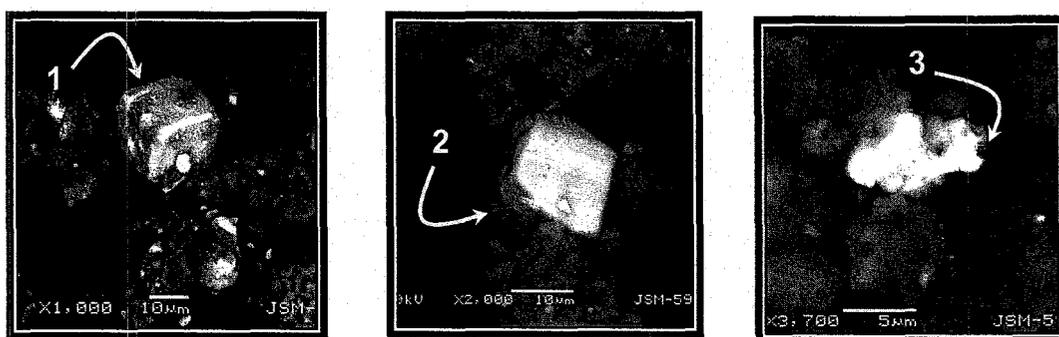


Figura 5.4a Mineralogía de detalle por DRX en muestras concentradas ($\theta < 40 \mu\text{m}$) de la zona de jales inalterados del “talud” (1) de la parte Fraile Norte y del “vaso” de la parte Fraile Sur (2) del depósito “El Fraile”, Taxco-Guerrero.



1 y 2: Partículas identificadas como pirita; 3: Partícula de Fe-Zn-Cu-Pb

Análisis semicuantitativo (% en peso) por FRX			
Elemento	1	2	3
O	13.15	14.8	20.91
Mg	0.15	0.35	0.46
Al	0.6	2.10	2.04
Si	2	9.02	9.20
S	14.01	4.39	1.18
K	0.16	0.92	0.64
Ca	0.19	0.97	0.92
Fe	13.42	36.20	9.63
Cu			0.58
Zn		1.36	2.72
Sb			7.86
Pb			4.37

Figura 5.4b Partículas inalteradas y ricas en MMPT en la zona de jales inalterados (muestra M8) del depósito de jales “El Fraile”, Taxco-Guerrero

b.3) Identificación de los procesos de precipitación y sorción de MMPT con base en microanálisis de partículas por Microscopía Electrónica de Barrido y espectrometría de Rayos X por energía dispersa (MEB-EDS):

b.3.1) Precipitación de minerales secundarios:

Se identificó que el As, Pb, Zn y Fe están presentes en partículas brillantes sin forma definida y de diámetro inferior a 1 μm ; y que de acuerdo a su composición química podrían identificarse como minerales secundarios que han precipitado a partir de los

elementos liberados durante el proceso de oxidación de los sulfuros metálicos en los jales estudiados.

- En jales ácidos, las partículas que contienen principalmente Fe-As-Pb-S podrían corresponder al mineral beudantita.
- En jales ácidos, las partículas que contienen principalmente Fe-Pb-S podrían corresponder al mineral plumbojarosita.
- En los jales con pH = 7.2, las partículas que contienen principalmente C-O-Pb y C-O-Zn podrían corresponder a carbonatos de Pb (cerusita) y de Zn (smithsonita).

b.3.2) Sorción de MMPT en superficies de oxihidróxidos de Fe y jarosita:

- Se observó que el As, Pb, Zn y Cu están presentes en partículas de oxihidróxidos de Fe, lo que podría estar asociado a fenómenos de sorción.
- En partículas de jarosita – K, se identificó la presencia de Zn. Este fenómeno podría estar asociado a la coprecipitación del Zn en la jarosita

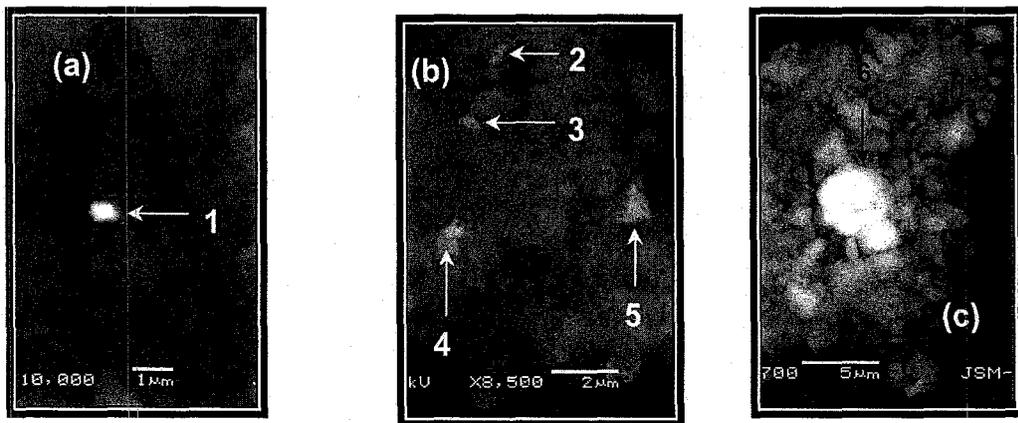
A continuación se presentan los resultados de la caracterización mineralógica de detalle de las muestras concentradas en cada una de las muestras de las capas “no compactas” y capas “compactas” de la zona de oxidación de los jales “El Fraile”:

Capas “no compactas” de la zona de oxidación (ZO)

Los resultados de DRX indican que en Fraile Norte, las capas “no compactas” de la ZO, además de los minerales identificados en el análisis general, se caracterizan por la presencia de los minerales secundarios de Fe (goetita) y de Fe-S-As-Pb (beudantita) (Figura 5.5 (1)). En la parte Fraile Sur, las capas “no compactas” de la ZO, además de los minerales identificados en el análisis general, se caracterizan por la presencia de la beudantita. Sin embargo, las capas “no compactas” del Fraile Sur se diferencian de las capas “no compactas” del Fraile Norte por la presencia de la lepidocrocita, akageneita y la ausencia de goetita (Figura 5.5 (2))

Los resultados del análisis por MEB-EDS indican que:

- En la capa “no compacta” de jales ácidos en la ZO del “talud” de Fraile Norte (muestra M5) se identificaron partículas con diámetro inferior a $1\ \mu\text{m}$ (Figura 5.6 (a) y (b)), cuya composición química permite asociarlas al mineral beudantita. En estas mismas capas (muestra M13), se identificaron partículas que por su composición química podrían asociarse a la plumbojarosita (Figura 5.6 (c)).

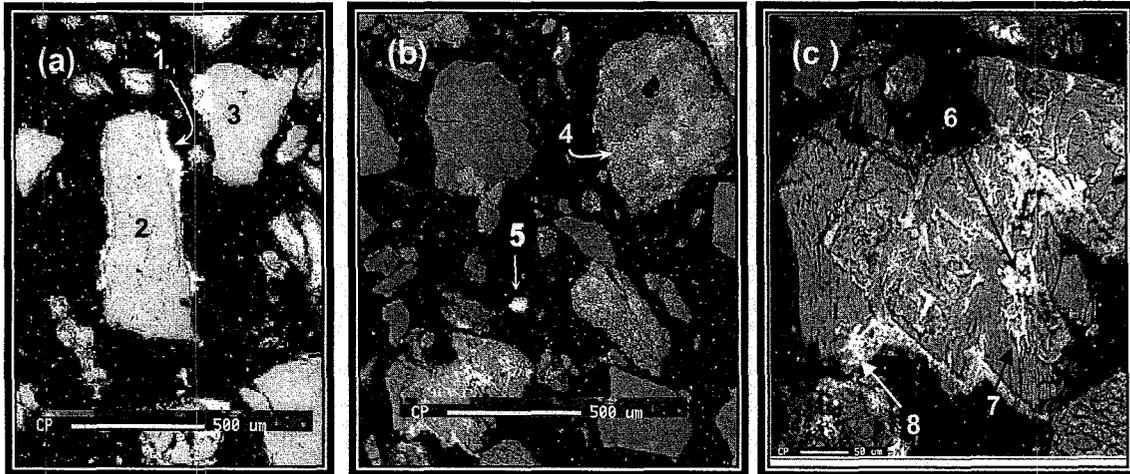


Análisis semicuantitativo por FRX						
Elemento	1	2	3	4	5	6
	%					
O	45.57	43.76	45.33	43.5	35.95	67.5
Al	3.36	3.73	2.34	2.73	4.94	0.33
Si	8.79	4.07	4.21	2.48	3.59	1.36
S	6.58	5.24	5	5.63	6.58	4.05
K	0.23	0.28	0.19	0.25	0.62	0.21
Ca	1.71	1.22	1.24	1.29	2.21	
Mn		0.85	0.52	0.78	1.22	
Fe	12.39	27.57	30.6	30.33	34.17	12.45
Cu				0.93	0.98	
Zn	1.82	4.19	5.13	5.73	5.72	
As	1.24	2.84	1.76	2.48	2.14	
Pb	18.32	5.71	3.68	3.86	1.89	3.65

Figura 5.6 Partículas ricas en MMPT en la capa “no compacta” de la zona de oxidación del “talud” Fraile Norte (muestra M5 y M13): (a) y (b) beudantita y (c) plumbojarosita

- Los oxihidróxidos de Fe, ubicados previamente por microscopía óptica en la briqueta de la muestras M5, contienen de 0.4 a 5.2 % de arsénico (Figura 5.7).

Los oxihidróxidos de Fe que retienen al As se encuentran rodeando minerales de cuarzo (Figura 5.7(a)) o bien asociados con yeso secundario que es otro de los productos de la oxidación de los sulfuros de Fe en los residuos mineros (Figura 5.7 (c)).

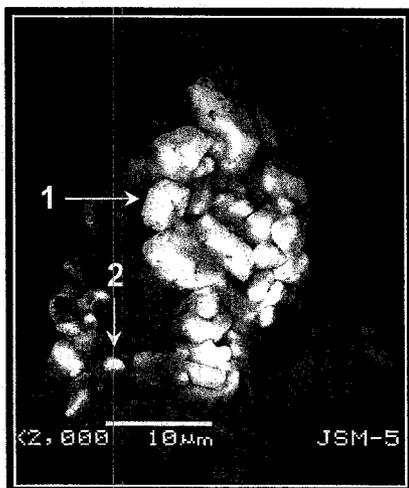


1, 4, 5, 6 y 8: oxihidróxidos de Fe; 2 y 3: cuarzo; 7: yeso

Análisis semicuantitativo por FRX								
Elemento	1	2	3	4	5	6	7	8
	%							
S	1.426		0.47	7.027	2.488	3.119	33.901	3.91
Fe	96.108	0.612	1.057	83.008	91.799	88.269	0.881	88.143
Al	0.597	1.186	0.545	2.536	0.539	0.782	0.118	0.364
Si	1.041	98.124	96.912	4.667	0.769	0.613	0.203	0.803
Ca	0.462		0.787			2.875	64.896	0.336
As	0.365	0.077	0.228	1.917	4.405	4.164		5.242

Figura 5.7 Microanálisis de oxihidróxidos de Fe por MEB-EDS en la capa “no compacta” de la zona de oxidación del “talud” Fraile Norte (Muestra M5)

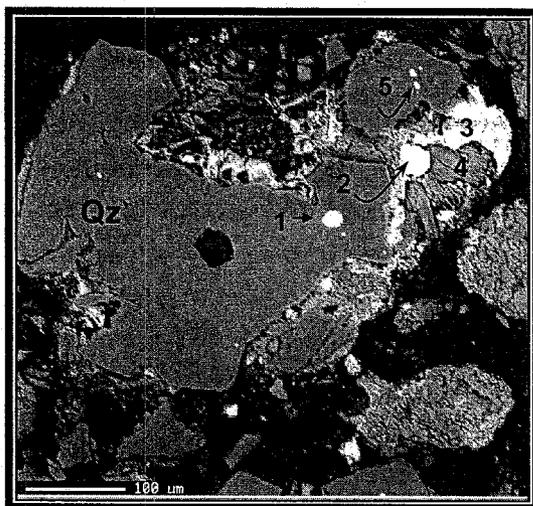
- En las capas “no compactas” de la ZO del “talud” de Fraile Norte donde se registró un pH = 7.2 (M15), se identificaron partículas brillantes que por su composición química podrían asociarse a carbonatos de plomo (partícula 1) y de zinc (partícula 2) (Figura 5. 8).



Análisis semicuantitativo por FRX		
Elemento	1	2
	%	
C	22.27	24.5
O	19.92	14.15
Mg	0.2	0.33
Al	0.96	0.9
Si	2.78	2.92
S	2.27	12.13
K	0.39	0.27
Ca	4.77	3.12
Mn	1.67	1.46
Fe	3.47	3.69
Cu	1.4	
Zn	2.15	36.52
Pb	37.75	

Figura 5.8 Partículas ricas en MMPT en la capa “no compacta” con pH cercano al neutro de la zona de oxidación del “talud” Fraile Norte (Muestra M15): partícula 1 carbonato de plomo y partícula 2 carbonato de zinc

- En la ZO del “vaso” de Fraile Norte (muestra M10) se identificaron partículas brillantes encapsuladas en cuarzo (Figura 5.9) que por su composición química podrían estar asociadas al mineral anglesita. Así mismo, se identificaron partículas que por su composición química podría asociarse a la plumbojarosita (partícula 5 de la Figura 5.9).

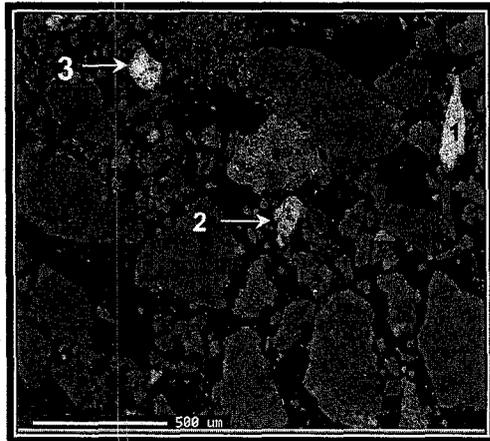


Análisis semicuantitativo por FRX					
Elemento	1	2	3	4	5
	%				
Na		0.123			0.141
Al	0.21		1.788	0.013	
Si		0.092	2.402	0.209	0.626
S	14.456	13.57	20.694	34.712	13.482
K		0.161	0.133		0.112
Ca		0.143		64.371	0.378
Fe	0.631	3.209	55.067	0.542	0.582
Cu	0.197	0.355	0.525		0.303
As	0.034		0.484	0.152	0.07
Pb	84.473	82.347	18.906		84.307

- 1, 2 y 5 anglesita o galena
- 3: plumbojarosita
- 4: yeso
- Qz: cuarzo

Figura 5.9 Partículas ricas en MMPT en la capa “no compacta” de la zona de oxidación del “vaso” Fraile Norte (Muestra M10)

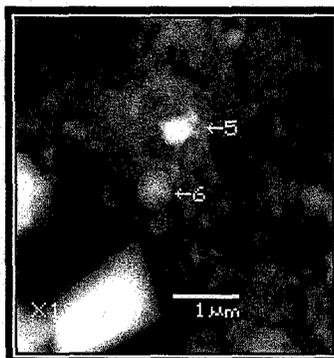
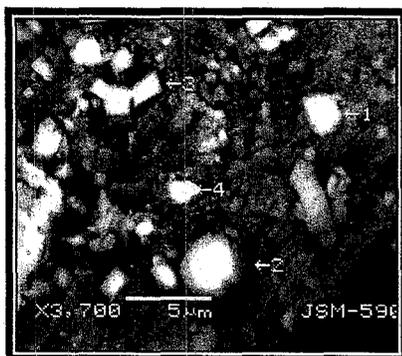
- Los oxihidróxidos de Fe (partículas 1,2 y 3, Figura 5.10), ubicados previamente por microscopía óptica en la briqueta de la muestra M10 (ZO del “vaso” de Fraile Norte), contienen de 1.3 a 2.8 % de As y cantidades variables de Pb, Cu y Zn.



Análisis semicuantitativo por FRX			
Elemento	1	2	3
	%		
Na		0.424	0.666
Al		0.377	0.602
Si	0.832	1.509	1.163
S	1.583	3.277	2.784
K			0.143
Ca	0.445		
Fe	95.175	84.126	82.806
Cu		0.994	1.308
Zn	1.965	7.872	6.049
As		1.3	2.671
Pb		0.121	1.809

Figura 5.10 Microanálisis de oxihidróxidos de Fe por MEB-EDS en la capa “no compacta” de la zona de oxidación del “vaso” de Fraile Norte (Muestras M10)

- En la capa “no compacta” de jales ácidos en la ZO del “talud” de Fraile Sur (muestra M19) se identificaron partículas de diámetro inferior a 5 μm (Figura 5.11), cuya composición química permite asociarlas al mineral beudantita.



Análisis semicuantitativo por FRX						
Elemento	1	2	3	4	5	6
	%					
O	47.55	46.58	45.65	45.99	47.19	45.66
Al	4.25	1.86	5.32	6.03	5.64	7.07
Si	9.09	5.00	11.72	10.06	19.65	20.11
S	6.74	10.53	6.85	5.70	3.43	4.02
Fe	24.08	27.94	26.30	22.95	17.28	19.58
Cu	0.66	0.43	0.39	0.43	0.46	
Zn			0.63	0.72	0.49	0.51
As	2.37	1.03	1.78	2.51	1.67	1.64
Pb	5.26	6.64	1.36	5.61	3.35	0.55

Figura 5.11 Partículas ricas en MMPT (beudantita) en la capa “no compacta” de la zona de oxidación del “talud” Fraile Norte (Muestra M19)

- En la ZO del “vaso” de Fraile Sur (muestra 24) se observaron partículas brillantes con diámetro inferior a 1 μm (Figura 5.12), cuya composición química permite asociarlas al mineral plumbojarosita.

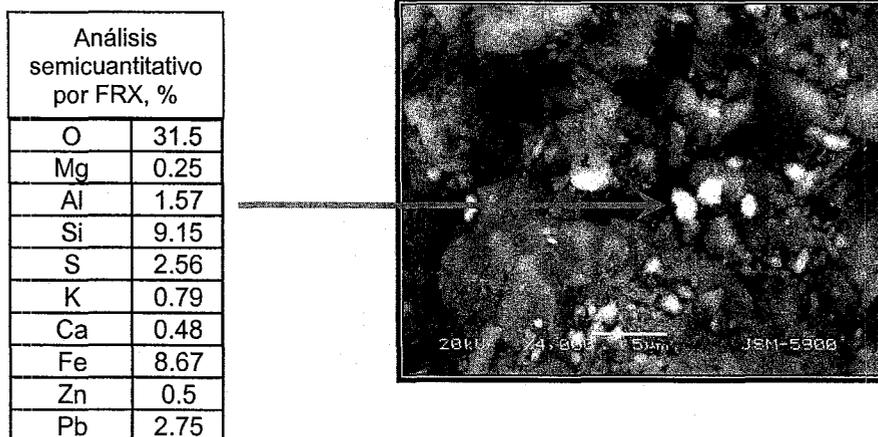


Figura 5.12 Partículas ricas en MMPT (plumbojarosita) en la capa “no compacta” de la zona de oxidación del “vaso” Fraile Sur (M24)

Capas compactas (Capa de Fe)

Los resultados del análisis de detalle por DRX en las muestras de jales concentradas ($\phi < 40 \mu\text{m}$) indican que las capas de Fe de ambas partes del depósito de jales se caracterizan por presentar una mineralogía similar. Se observan los picos característicos de la jarosita-K, beudantita, goetita, hematita y alunita. La alunita es el mineral que marca la diferencia entre las capas “compactas” de las “no compactas” en la zona de oxidación de ambas partes del depósito de jales (Figura 5.13).

Los resultados del análisis MEB-EDS indican que:

- En la capa compacta (capa de hierro) de la ZO del “talud” de Fraile Norte (muestra M2) se identificaron partículas brillantes con diámetro inferior a $1 \mu\text{m}$ (Figura 5.14 (a)), cuya composición química permite asociarlas al mineral beudantita. También se observaron cristales bien formados de jarosita (partícula 7 de la Figura 5.14 (b)) con 5.17% de Zn.
- Los oxihidróxidos de Fe, ubicados previamente por microscopía óptica en briqueta de la muestra M2 (capa de hierro de la ZO del “talud” de Fraile Norte), contienen de 0.3 a 2.2 % de arsénico (Figura 5.15). Así como cobre en porcentajes que varían entre 0.2 – 1.2% (partículas 3, 4 y 5 de la Figura 5.15).
- En la capa compacta (capa de hierro) de la ZO del “talud” de Fraile Sur (muestra M21) se observaron partículas brillantes con diámetro inferior a $1 \mu\text{m}$ (Figura 5.16 (a)) cuya composición química permite asociarlas a la beudantita. También se identifican cristales de jarosita-K (partícula 6 de la Figura 5.16 (b)) con 5.21% de Zn.

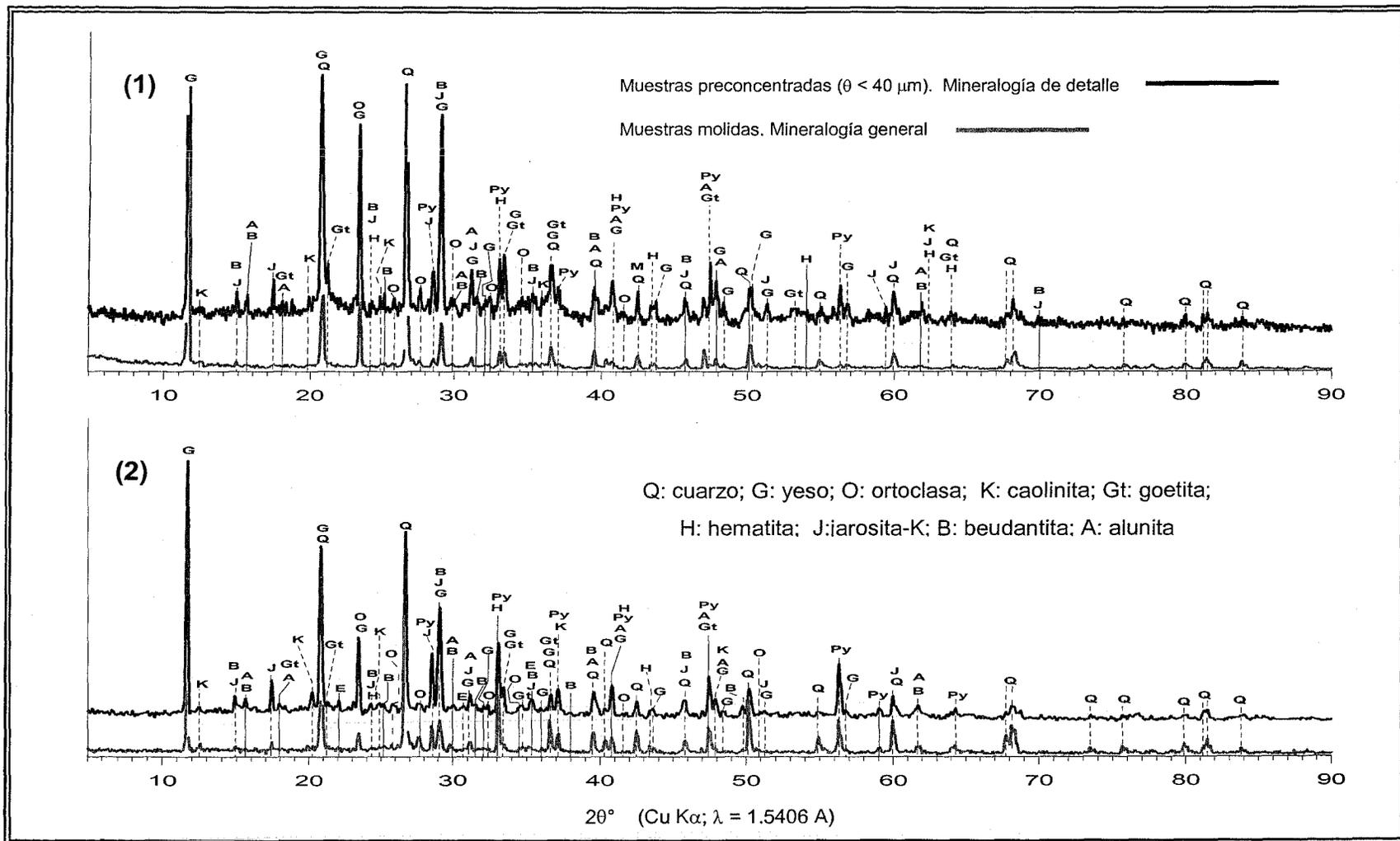
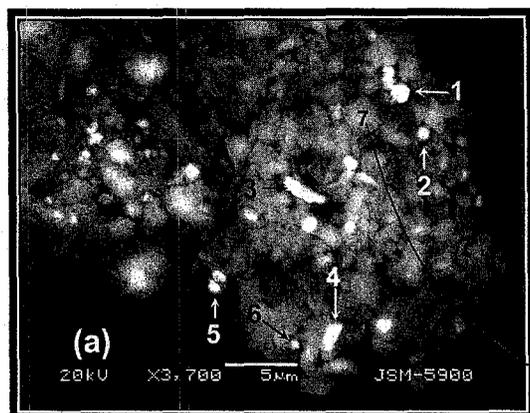


Figura 5.13 Mineralogía de detalle por difracción de rayos X en muestras concentradas ($\theta < 40 \mu\text{m}$) de la capa “compacta” (capa de Fe) de la zona de oxidación “talud” de la parte Fraile Norte (1) y de la parte Fraile Sur (2) del depósito de jales “El Fraile”, Taxco-Guerrero



Elemento	1	2	3	4	5	6	7
	%						
O	36.93	38.25	40.28	37.99	6.91	22.53	51.03
Al	1.07	1.36	2.02	2.53	1.35	1.89	0.46
Si	0.79	0.97	1.84	1.02	1.06	1.94	0.63
S	11.59	14.61	11.96	13.73	3.68	18.3	17.11
Ca		0.72	0.66	1.53	1.37		0.73
K							0.92
Fe	20.83	20.19	18.25	20.92	61.34	23.79	24.69
Cu				1.21	3.03	1.93	
Zn	7.19	8.74	7.96	2.51	18.43	14.71	5.17
As	4.61	4.57	4.82	1.79	1.03	2.95	
Pb	16.99	10.57	10.65	16.77	1.82	11.23	

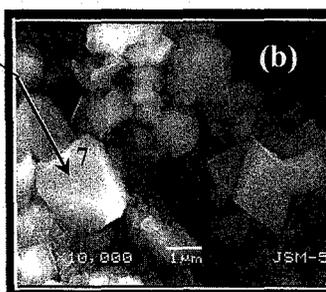
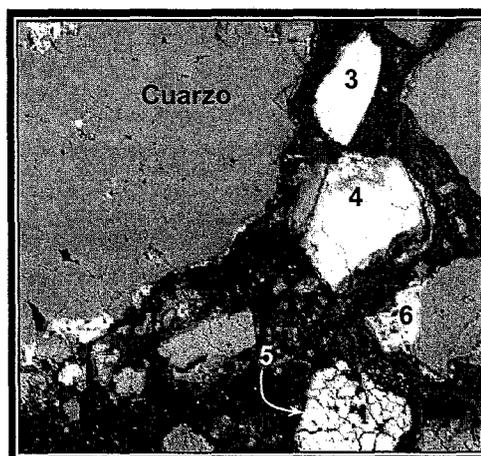
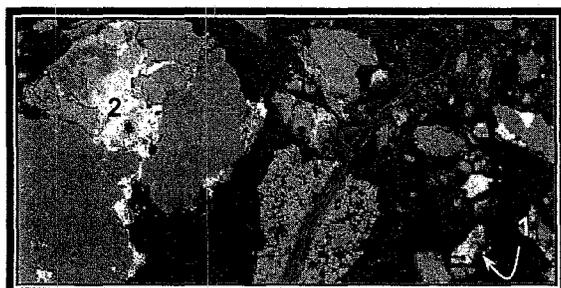


Figura 5.14 (a) Partículas ricas en MMPT asociadas a beudantita y (b) partículas asociadas jarosita-K en la capa compacta (capa de Fe) de la zona de oxidación del “talud” Fraile Norte (Muestras M2)



Elemento	1	2	3	4	5	6
	%					
S	5.659	4.781	5.545	4.561	12.089	4.583
Fe	91.641	92.976	92.779	89.693	81.201	91.31
Al	0.605	0.415	0.089	0.275	0.672	0.139
Si	0.225	0.924	0.313	1.796	0.918	0.562
Ca	0.444	0.452			0.267	2.4
Na	0.091	0.086	0.312	0.18	2.277	0.145
K				0.055	0.165	0.59
Cu			0.2	1.236	0.252	
As	1.335	0.367	0.763	2.203	2.159	0.274

Figura 5.15 Microanálisis de oxihidróxidos de Fe por MEB-EDS en la capa compacta (capa de Fe) de la zona de oxidación del “talud” de Fraile Norte (Muestras M2)

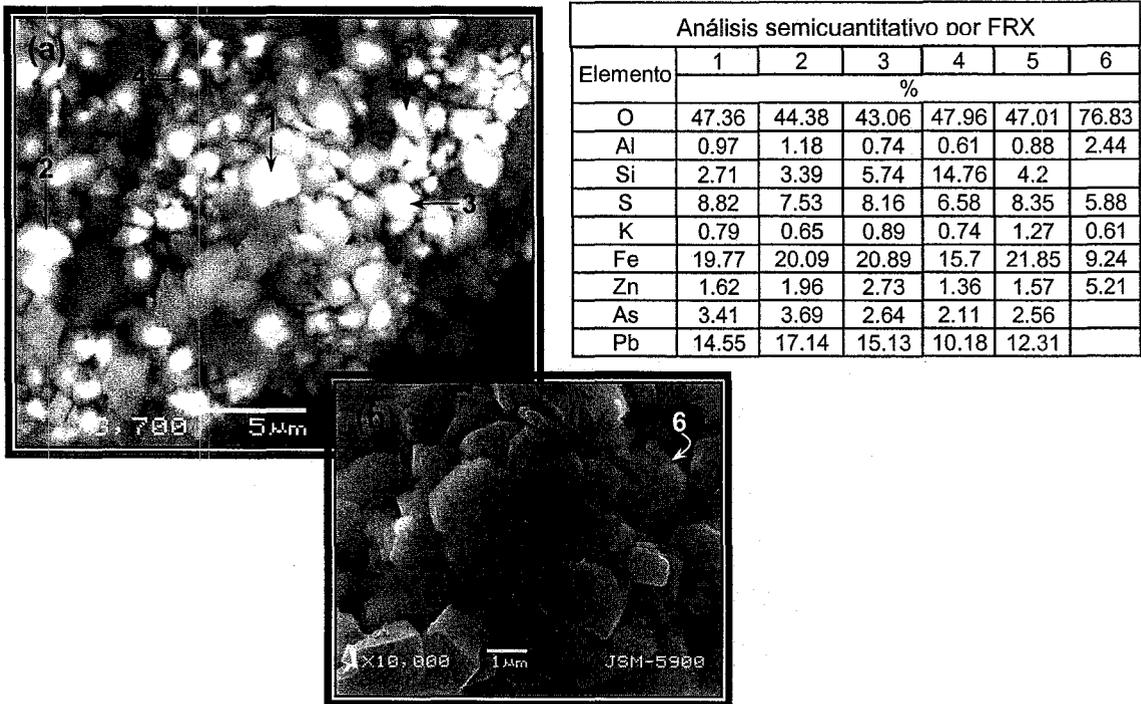


Figura 5.16 (a) Partículas ricas en MMPT asociadas a la beudantita y (b) partícula asociada a jarosita en la capa compacta (capa de Fe) de la zona de oxidación del “talud” Fraile Sur (M21)

5.2.2.c. Identificación del mineral beudantita ($\text{PbFe}_3(\text{AsO}_4)(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$) por microscopía electrónica de transmisión (MET)

Se identificó beudantita por DRX en las muestras concentradas ($\varnothing < 40 \mu\text{m}$) de los jales oxidados y ácidos del depósito "El Fraile"; sin embargo, sus picos característicos son parecidos a los de los minerales del grupo de la jarosita.

En estas mismas muestras, se observaron partículas ricas en Fe-S-As-Pb por MEB-EDS, que pueden ser asociadas al mineral beudantita; pero no es una evidencia directa

Por lo tanto y considerando la importancia ambiental de la beudantita en los jales mineros de México, se procedió a demostrar su presencia en los jales estudiados por microscopía electrónica de transmisión (MET)

c.1) Características de la beudantita:

Szymanski (1988) ha reportado la siguiente composición química de la beudantita:

Pb = 28.6 – 29.6 %
Fe = 18.8 – 23.54 %
Al = 1.0 – 2.0 %
As = 9.9 – 12.3 %
S = 3.7 – 4.5 %

Por su estructura cristalina la beudantita se asocia al grupo de la alunita " $\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ " (Jambor 1999). Szymanski (1988) ha reportado los siguientes datos de la estructura cristalina de la beudantita:

Sistema: Hexagonal – Trigonal

Dimensiones de la celda unitaria: $a_1 = a_2 = a_3 = 7.3151 \text{ \AA}$; $c = 17.0355 \text{ \AA}$

Grupo espacial: $R\bar{3}m$

Posiciones atómicas:

N/N	x	y	z	Ocupación
1	0.0383	0.0	0.0	Pb = 0.17
2	0.00	0.0	0.3149	As = 0.53; S = 0.47
3	0.00	0.5	0.5	Fe = 0.85; Al = 0.15
4	0.00	0.0	0.4068	O = 1
5	0.2145	0.4290	0.9468	O = 1
6	0.1254	0.2508	0.1343	O = 1

Patrón de difracción de rayos X:

En el Handbook of Mineralogy Vol. IV (Anthony et al. 2000) se reportan las siguientes distancias interplanares (en Å) para las mayores intensidades (en %): 3.078 Å (100%), 2.865 Å (80%), 2.290 Å (70%), 5.725 Å (50%), 3.108 Å (50%), 5.089 Å (45%), 1.979 Å (35%).

En la base de datos de la Fundación Rusa de Investigaciones Básicas¹⁶ se reportan las siguientes distancias interplanares (en Å) para las mayores intensidades (en %): 3.075 Å (100%); 5.938 Å (74.7%), 3.657 Å (40.4%), 1.979 Å (26.8%), 2.271 Å (24.7%), 1.828 Å (20.2%), 2.968 Å (17.3%).

Los datos reportados por Szymanski (1988) se utilizaron para alimentar el programa CaRIne 3.1 y se obtuvo la estructura cristalina de la beudantita (Figura 5.17). En esta estructura se puede observar que en el plano horizontal se forma una figura tipo rombo donde los lados son iguales (eje cristalográfico "a" = eje cristalográfico "b"). En cambio en el plano vertical se forma una figura rectangular cuya altura corresponde al eje cristalográfico "c"

¹⁶ <http://database.iem.ac.ru/mincryst/search.php?>: Russian Foundation for basic research. Crystallographic database for minerals. Created: December, 1997. New full Revision: December, 2000. Last update: April, 2003.

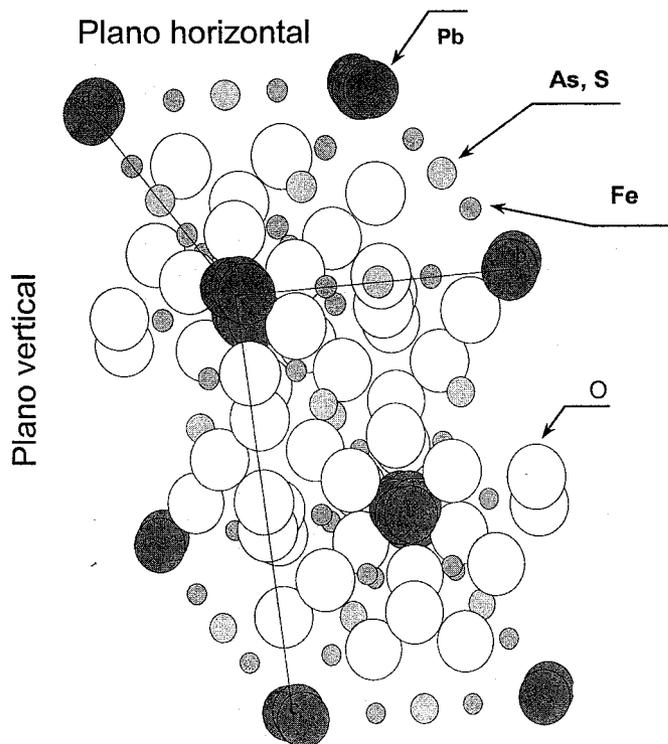


Figura 5.17 Estructura cristalina de la beudantita

c.2) Microscopía electrónica de transmisión (MET) y de alta resolución en la muestra M21 que corresponde a la capa de Fe del “talud” de Fraile Sur

En la muestra M21, con abundante presencia de partículas ricas en Fe-S-As-Pb, se separaron las partículas menores de 1 μm (suspensión en etanol) y se ubicaron en rejillas para su análisis por MET. Se realizó un barrido para localizar la zona de la muestra donde el microanálisis por EDS había indicado la presencia de los elementos de interés: Fe-S-As-Pb (Figura 5.18)

Patrones de difracción electrónica

- En la Figura 5.19 (a) se observa que en el patrón de difracción electrónica se forman figuras rómbicas entre los puntos de haces difractados (pequeños puntos luminosos) alrededor del haz transmitido (punto central grande y luminoso) y se

observan figuras hexagonales teniendo como centro al haz transmitido, lo que indica un arreglo hexagonal – trigonal. Las formas de rombos se corroboran en la microfotografía de alta resolución (Figura 5.19(b)). Estas formas rómbicas podrían corresponder a la vista sobre el plano horizontal de la beudantita (Figura 5.17).

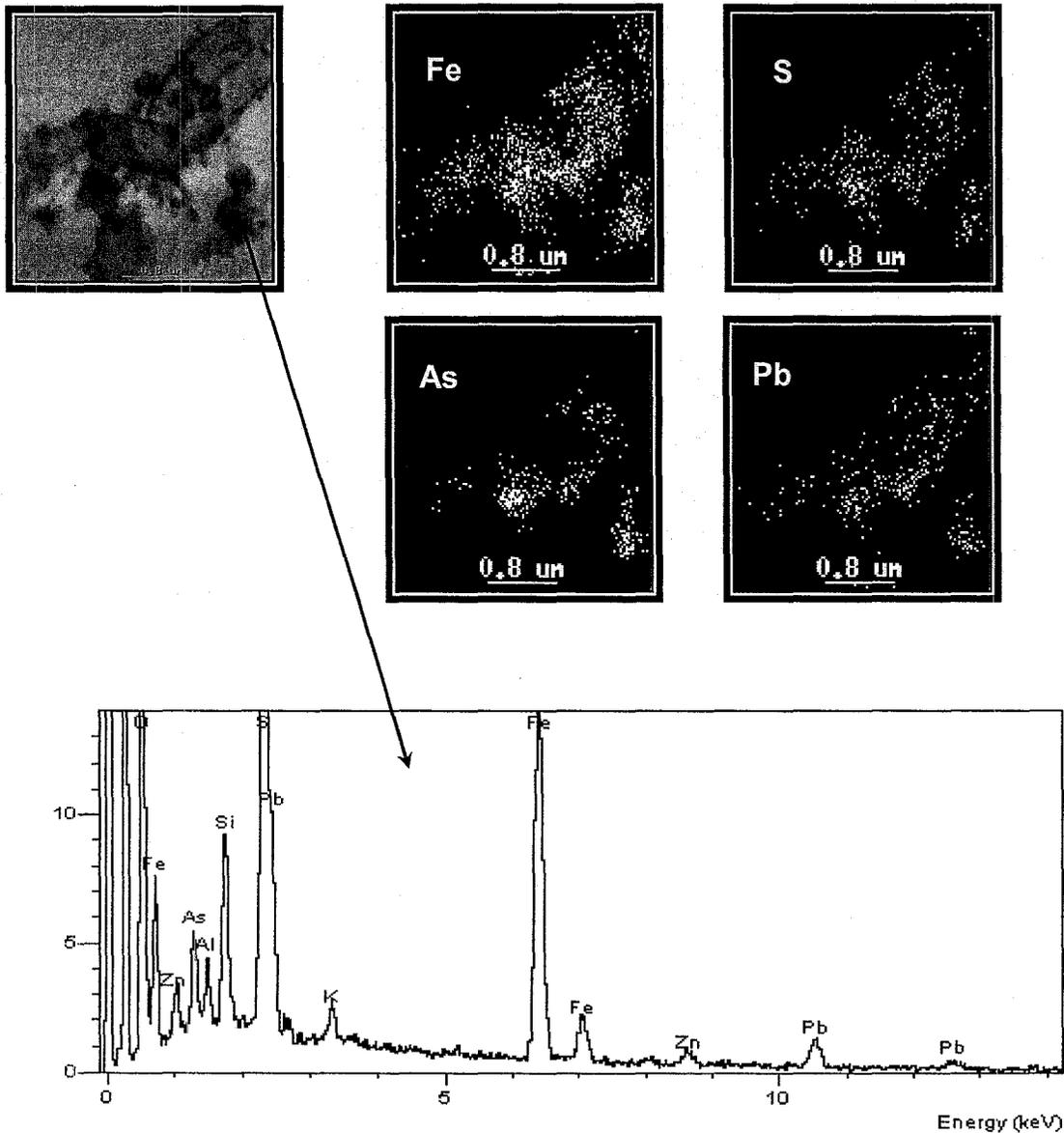


Figura 5.18 Distribución de MMPT en la muestra M21

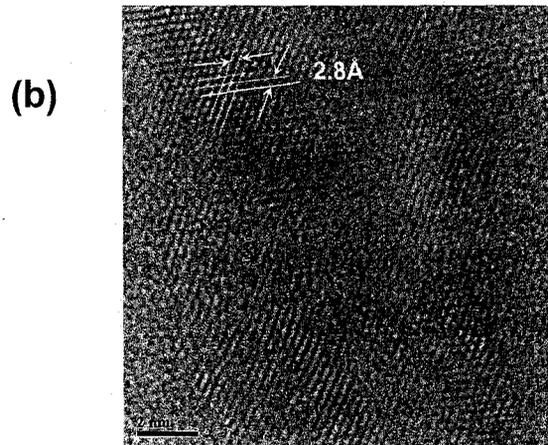
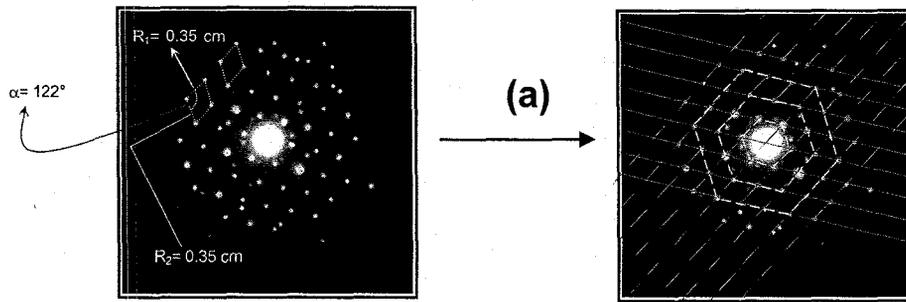


Figura 5.19 Patrón de difracción electrónica 1 (a) y microfotografía 1 de alta resolución (b)

- En la Figura 5.20 (a) se observa que en el patrón de difracción electrónica se forman figuras rectangulares entre los puntos de haces difractados (pequeños puntos luminosos) alrededor del haz transmitido (punto grande y luminoso central). Las formas rectangulares se corroboran en la microfotografía de alta resolución (Figura 5.20 b). Estas formas rectangulares podrían corresponder a la vista sobre el plano vertical de la beudantita (Figura 5.17)

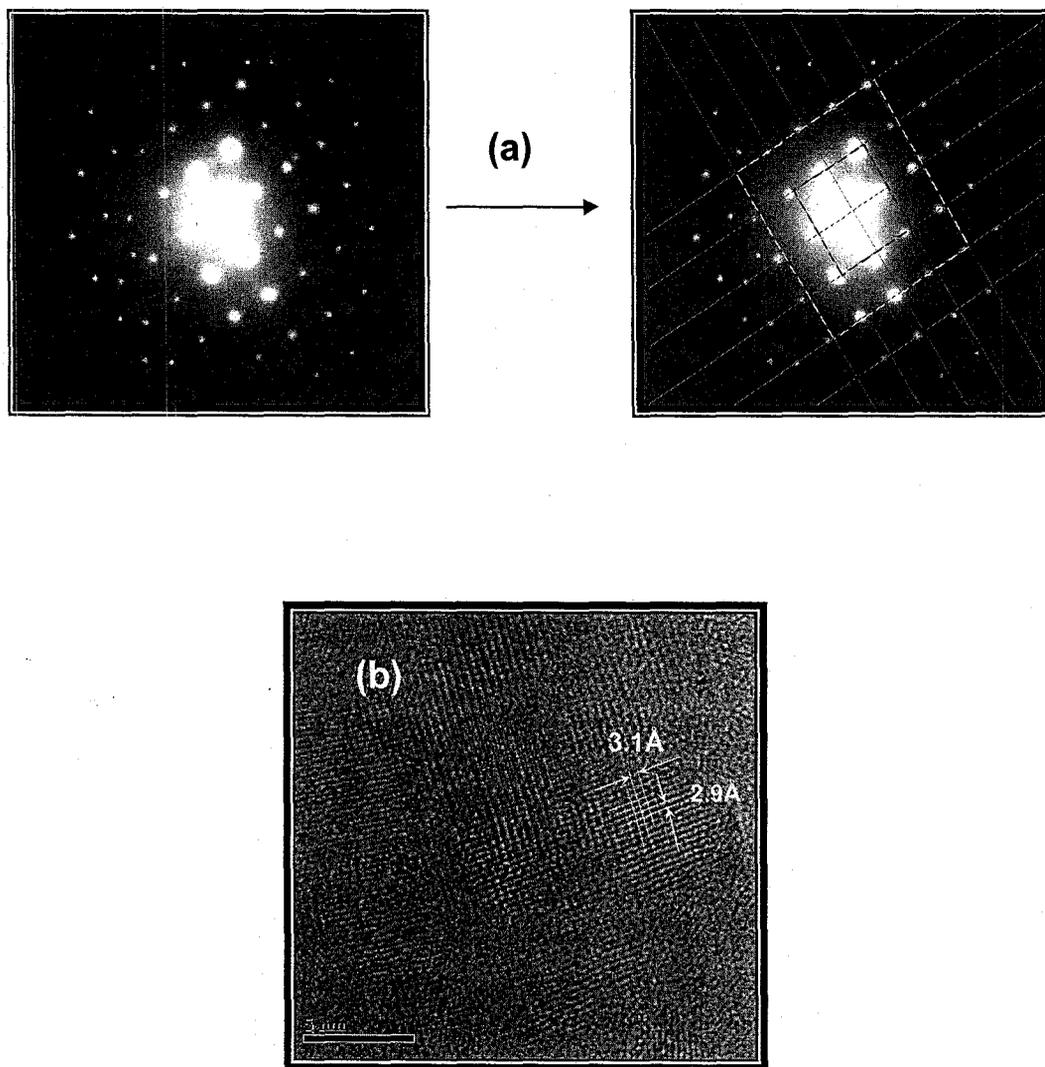


Figura 5.20 Patrón de difracción electrónica 2 (a) y microfotografía 2 de alta resolución (b)

Cálculo de distancias interplanares y comparación con las reportadas en la literatura para el mineral beudantita

Se obtuvo una serie de distancias (R) entre el haz transmitido (punto central más intenso del patrón) y los puntos de difracción (puntos luminosos alrededor del centro), y con la longitud de la cámara (L) y longitud de onda (λ) correspondiente al voltaje de aceleración utilizado; se aplicó la fórmula (16) (ver sección 4.2.9) para calcular las distancias interplanares (d) con el fin de compararlas con las distancias interplanares reportadas para la beudantita (tabla 5.2)

$$d = \lambda L/R \dots \dots \dots \text{ Ec. (16), donde}$$

R: distancias (cm) entre el haz transmitido y difractado, L: Longitud de cámara: L = 80 cm; y λ : Longitud de onda: $\lambda = 0.0251 \text{ \AA}$, que corresponde al voltaje de aceleración de 200 kV utilizado (Williams y Carter, 1996)

Las distancias R (cm) se midieron manualmente utilizando una regla con una gradación de 0.5 mm. Para el cálculo de las distancias interplanares (d) se utilizó el valor correspondiente al valor promedio de 5 mediciones de "R" (tabla 5.2)

Tanto las distancias interplanares calculadas a partir de los patrones de difracción electrónica como las medidas directamente en las fotografías de alta resolución son similares a las distancias interplanares reportadas en la literatura para el mineral beudantita (tabla 5.2), y por lo tanto se puede confirmar la precipitación de beudantita en los jales oxidados y ácidos de "El Fraile".

Los resultados de los cálculos de distancias interplanares realizados manualmente y mediciones manuales del ángulo, se contrastaron con los cálculos realizados por el programa CaRIne 3.1. Se alimentó al programa con los datos obtenidos en el patrón de difracción electrónica del plano horizontal (formas rómbicas Figura 5.19). Los resultados del programa para distintos ejes zonales son muy cercanos a las obtenidas manualmente (tabla 5.3)

H	K	L	d (*)	I, %	R (**)	d (**)	R (***)	d (***)	d (directo)
1	1	3	3.075	100	0.65	3.089	0.65	3.089	3.1
1	0	1	5.938	74.73	0.35	5.737			
1	1	0	3.658	40.42	0.55	3.651	0.55	3.651	
3	0	3	1.979	26.79	1	2.008			
1	0	7	2.272	24.68					
2	2	0	1.829	20.16			1.075	1.868	
2	0	2	2.969	17.31					2.9
0	0	6	2.839	17.03					2.8
2	0	4	2.542	16.78			0.8	2.510	
2	2	6	1.537	13.15					
2	0	10	1.500	11.87	1.35	1.487			
1	1	6	2.243	11.63					
4	1	3	1.343	10.5			1.65	1.217	
1	1	9	1.681	10.46			1.2	1.673	
2	1	1	2.371	8.86	0.85	2.362	0.84	2.390	
2	1	2	2.305	8.39					
0	0	3	5.679	7.87					
1	0	4	3.534	7.31					
2	1	7	1.707	6.83	1.15	1.746			
3	0	9	1.409	6.41					

Tabla 5.2
Distancias interplanares (en Å) reportadas para la beudantita (d (*))
y las calculadas manualmente a partir de los patrones de difracción electrónica:
d ()** para la forma rómbica, **d (***)** para la forma rectangular y
d (directo) medidos en la microfotografías de alta resolución.

hkl (1)	hkl(2)	d _{hkl(1)} , Å	d _{hkl(2)} , Å	α , °	Error (%)	Eje zonal
1, -1, 1	0,1,-1	5.94	5.94	124.1	5.4	0,1,1
1, -1, -1	0,1,1	5.94	5.94	124.1	5.4	0,-1,1
0,1,1	1,-1,-1	5.94	5.94	124.1	5.4	0,-1,1
0,1,-1	1,-1,1	5.94	5.94	124.1	5.4	0,1,1

Nota: El Error (%) corresponde a la diferencia entre los valores medidos contra los calculados por el programa

Tabla 5.3 **Identificación de los posibles ejes zonales correspondiente para la**
red recíproca de la beudantita.

5.2 Caracterización Geoquímica

5-3.1 Concentración total de elementos mayores (EM) y de metales y metaloides potencialmente tóxicos (MMPT)

Las concentraciones totales de los EM se presentan en apéndice 4 y las de los MMPT, en el apéndice 5. Las diferencias porcentuales relativa (DPR) entre las concentraciones de muestras originales y duplicadas fueron menores al 20%; y se obtuvo una recuperación del 88% al 115% respecto al valor de las concentraciones del material de referencia (apéndice 6), lo que indica que la precisión y exactitud de las metodologías y técnicas analíticas utilizadas son aceptables de acuerdo a los criterios de calidad señalados por la USEPA (1994d).

Los resultados de las concentraciones totales de EM y MMPT se presentan a continuación considerando que en la sección 5.1 de este estudio se identificaron a dos grupos de jales en el depósito estudiado: "Jales A" y "Jales B".

a) Los principales EM, por su concentración total¹⁷, para el grupo de "Jales A" son el silicio "Si" (41.1 – 70.9 % con una mediana de 58.6% expresado como SiO₂), el hierro "Fe" (4.8 – 23.2 % con una mediana de 11.7% expresado como Fe₂O₃), el aluminio "Al" (2.7 – 7.1 % con una mediana de 3.9 % expresado como Al₂O₃) y el calcio "Ca" (2.0 – 8.7% con una mediana de 4.6 % expresado como CaO). Los EM que presentan las menores concentraciones totales son el potasio "K" (1.0 – 2.2 % con una mediana de 1.6% expresado como K₂O), el magnesio "Mg" (0.08 – 1.4 % con una mediana de 0.6% expresado como MgO), el sodio "Na" (0.1 – 1.3 % con una mediana de 0.4% expresado como Na₂O).

Las concentraciones totales de EM se resumen en la Figura 5.21 (a), e indican que en términos de valores de tendencia central (mediana) el contenido de Fe (elemento

¹⁷ Sólo se toman en cuenta las concentraciones de EM en muestras de jales y no se consideran las concentraciones de EM de las muestras de la cubierta (capa de relleno)

asociado a la pirita "FeS₂" que es el principal mineral generador de drenaje ácido, ampliamente identificada en este grupo de jales) es ligeramente superior a la suma de las concentraciones totales de Ca, Al, Mg, K y Na que son elementos asociados a los principales minerales consumidores de ácido identificados en este estudio para este grupo de jales (ortoclasa, plagioclasa, epidota, clorita, moscovita)

b) A pesar de que solamente se cuenta con tres muestras del grupo de jales con pH cercano al neutro que pertenecen al "talud" (Jales B); se estimaron los valores de tendencia central y los mínimos y máximos de las concentraciones totales de EM (Figura 5.21 (b)), solamente con el fin de resaltar sus diferencias con las muestras del grupo "Jales A"

La principal diferencia que se observa en ambos grupos de jales (Figura 5.21 (a) y (b)) es que en las muestras del grupo "Jales B", la mediana de las concentraciones totales de Fe (7.1 % expresado como Fe₂O₃), elemento asociado al principal mineral generador de drenaje ácido "FeS₂" (identificado en los jales del grupo "Jales B"), es inferior al valor de mediana de las concentraciones totales de Ca (8.9 % expresado como CaO), que está asociado al principal mineral consumidor de drenaje ácido identificado en el grupo de "Jales B": calcita

c) Los principales MMPT¹⁷, por su concentración, en las muestras del grupo "Jales A" son el zinc "Zn" (500 – 32700 mg/kg con una mediana de 4850 mg/kg), el plomo "Pb" (1124 – 7349 mg/kg con una mediana de 3088 mg/kg), y el arsénico "As" (570 – 6592 mg/kg con una mediana de 1542 mg/kg). En menores concentraciones se encuentran el cobre "Cu" (73 – 613 mg/kg con una mediana de 193 mg/kg) y el cadmio "Cd" (3 – 384 mg/kg con una mediana de 96 mg/kg) (Figura 5.22 (a)).

d) En términos de valores de tendencia central (mediana), en las muestras del grupo "Jales B" se registraron mayores concentraciones totales de los MMPT con respecto a las del grupo "Jales A". En los jales del "grupo B" se registraron las siguientes concentraciones totales de Zn: 6400 - 26700 mg/kg con una mediana de

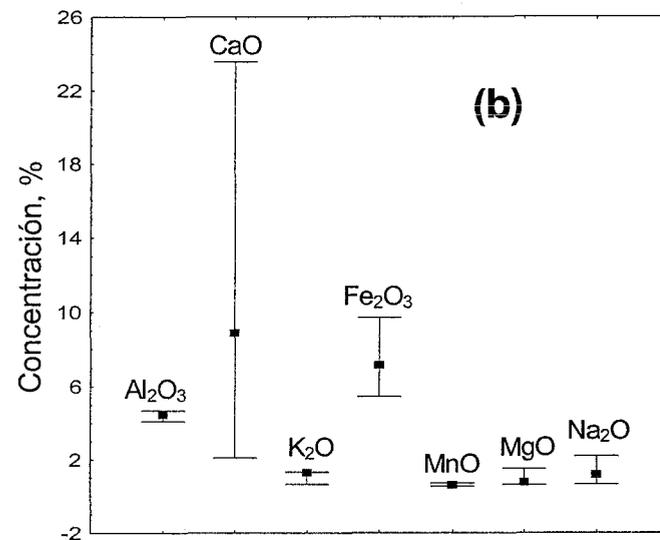
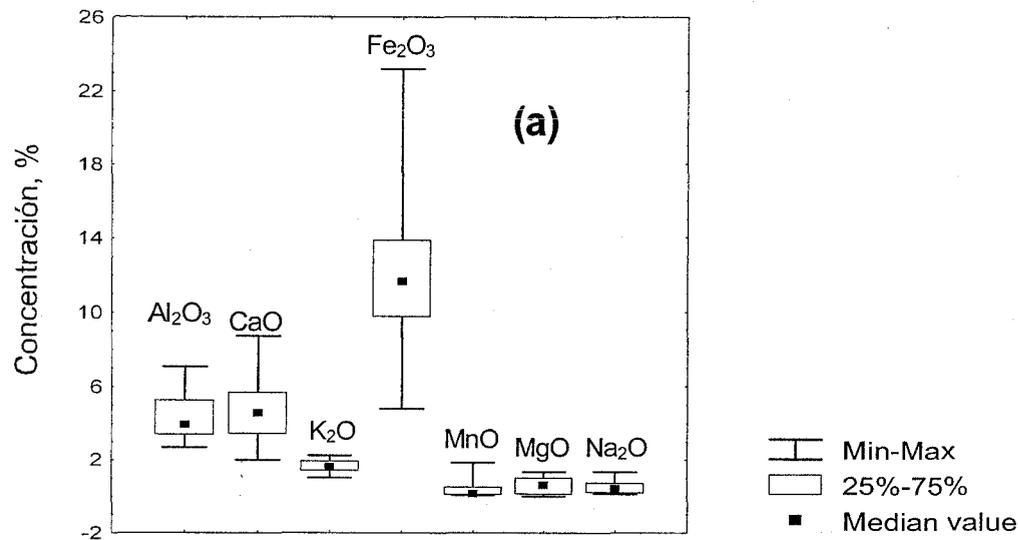
¹⁷ Sólo se toman en cuenta las concentraciones de MMPT en muestras de jales y se desechan las concentraciones de MMPT de las muestras de la capa de relleno

21200, de plomo: 2479 – 4136 mg/kg con una mediana de 4012 mg/kg, de As: 992 – 3309 mg/kg con una mediana de 2950, y de Cu: 201 – 545 mg/kg con una mediana de 465 mg/kg (Figura 5.22 (b)).

Las concentraciones de Zn, Pb y Cu, en los jales de estudio, se pueden explicar por la presencia de los minerales primarios de los respectivos sulfuros metálicos que fueron identificados en los jales de estudio: esfalerita (ZnS), galena (PbS) y calcopirita (FeCuS).

Las concentraciones de As y Cd, en los jales “El Fraile”, parecen estar asociadas a su posible existencia como impurezas de los sulfuros metálicos predominantes (FeS₂ y ZnS); ya que no fueron identificados minerales primarios que los contengan.

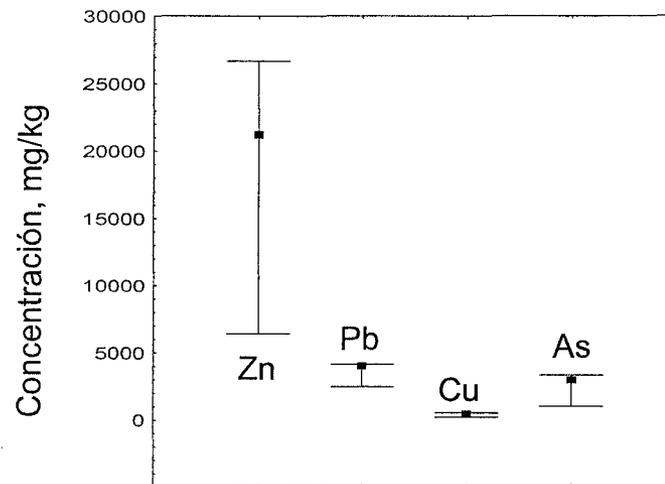
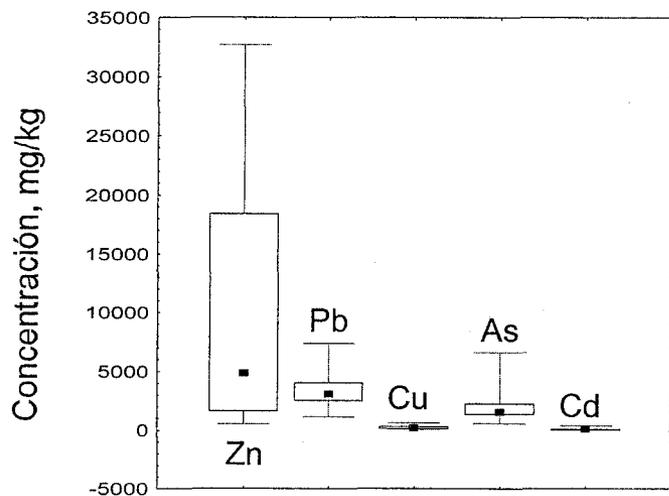
Las concentraciones de otros MMPT como el Co, Ni, Ba y Ag son relativamente bajas; y las de Tl y Se están por debajo del límite de detección (apéndice 5).



	Muestras	Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Desv.
SiO ₂	35	57.69	58.57	41.13	70.93	6.86
TiO ₂	35	0.24	0.20	0.10	0.39	0.08
Al ₂ O ₃	35	4.29	3.93	2.69	7.07	1.16
CaO	35	4.63	4.58	1.99	8.73	1.83
K ₂ O	35	1.65	1.60	1.01	2.23	0.31
Fe ₂ O ₃	35	12.25	11.65	4.81	23.19	4.14
MnO	35	0.41	0.14	0.06	1.84	0.48
MgO	35	0.62	0.62	0.00	1.36	0.47
Na ₂ O	35	0.50	0.41	0.11	1.33	0.36
P ₂ O ₅	35	0.08	0.07	0.02	0.21	0.04

	Muestras	Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Desv.
SiO ₂	3	51.94	53.20	43.73	58.90	7.66
TiO ₂	3	0.16	0.17	0.13	0.18	0.03
Al ₂ O ₃	3	4.44	4.48	4.12	4.71	0.30
CaO	3	11.52	8.88	2.10	23.58	10.98
K ₂ O	3	1.10	1.29	0.67	1.33	0.37
Fe ₂ O ₃	3	7.43	7.14	5.45	9.70	2.14
MnO	3	0.63	0.61	0.54	0.73	0.10
MgO	3	0.96	0.76	0.62	1.50	0.47
Na ₂ O	3	1.34	1.17	0.65	2.20	0.79
P ₂ O ₅	3	0.05	0.07	0.01	0.08	0.04

Figura 5.21 Concentración total de Fe en % (elemento asociado al principal mineral generador de drenaje ácido) y de Al, Ca, K, Mg y Na, en % (elementos asociados a minerales neutralizadores de drenaje ácido): (a) Grupo de “Jales A” y (b) Grupo de “Jales B”



Min-Max
 25%-75%
 Median value

	Muestras	Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Desv. Est.
Zn	34	9817	4850	500	32700	10137
Pb	34	3341.0	3088.0	1123.7	7349.3	1413.5
Cu	34	241.9	193.0	72.8	613.0	140.1
As	34	1936.4	1541.5	570.0	6592.1	1115.6
Cd	34	99.3	96.0	2.5	383.5	103.7

	Muestras	Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Desv. Est.
Zn	3	18100	21200	6400	26700	10499
Pb	3	3542.5	4012.1	2479.2	4136.3	923.0
Cu	3	403.6	464.9	200.8	545.0	180.1
As	3	2416.9	2950.1	991.7	3309.0	1247.3

Figura 5.22 Concentraciones totales (mg/kg) de elementos asociados a los principales sulfuros metálicos en el depósito de jales “El Fraile”, Taxco – Guerrero: (a) Grupo de “Jales A” y (b) Grupo de “Jales B”

5.3.2 Concentración soluble de EM y MMPT en los lixiviados obtenidos de las muestras sólidas de los jales de estudio

La metodología utilizada para obtener los lixiviados a partir de las muestras sólidas de jales indica que esto se logra a través de pruebas de extracción cuando los EM y MMPT se disuelven como producto de la interacción de la solución de poro con los sólidos del sistema y que la transición completa de la solución de poro a los lixiviados se indica por la estabilización de parámetros como el pH o la conductividad eléctrica (ver sección 4.2.5).

La transición completa de la solución de poro a los lixiviados en las muestras de los jales estudiados se logró al octavo día de agitación de los jales, si se considera que:

a) Las lecturas de pH indican diferencias entre 0.03 – 0.01 unidades entre el día 5 y 7 de agitación, y al día 8 las diferencias varían entre 0.00 y 0.02 (apéndice 7) lo que indica estabilización de este parámetro.

b) Las lecturas diarias de conductividad eléctrica (CE) indican que ésta se estabiliza entre el día 6 y 8 de agitación cuando las variaciones fluctuaron entre 0.00 y 0.07 mS/cm (apéndice 8).

Las concentraciones solubles de los EM y MMPT en las muestras de lixiviados se presentan en el apéndice 9 y los resultados que se presentan en el apéndice 10 muestran que las diferencias porcentuales relativas (DPR) entre las concentraciones de muestras originales y duplicadas fueron menores al 15%, lo que indica que la precisión de las metodologías y técnicas analíticas utilizadas son aceptables de acuerdo a los criterios de calidad de la USEPA (1994d).

El cálculo del balance de carga realizado para cada uno de los extractos indica un error menor al 10% para 25 muestras y entre 10 y 15% para 2 muestras (apéndice 9).

Las concentraciones solubles de los EM y MMPT en términos de valores de tendencia central decrecen en el siguiente orden: $\text{SO}_4^{2-} > \text{Zn} > \text{Ca} > \text{Fe} > \text{Mn} > \text{Mg} > \text{Al} > \text{Ni} > \text{Cd} > \text{As} > \text{Cu} > \text{K} > \text{Na} > \text{Pb}$. En general se observa que las mayores

concentraciones solubles de EM y MMPT se registraron en las muestras de jales con pH ácido ($\text{pH} < 3$); y en cambio, las menores concentraciones solubles se registraron en los jales con pH cercano al neutro.

5.3.3 Comportamiento de las concentraciones totales (jales sólidos) y solubles (lixiviados) de los EM y MMPT en las diferentes zonas identificadas en el depósito “El Fraile”

5.3.3.1 Concentraciones Totales

a) Las medianas de las concentraciones totales de los elementos asociados a los sulfuros metálicos son menores en la zona de oxidación (ZO) ($\text{Fe}_2\text{O}_3 = 10\%$; $\text{Zn} = 2200 \text{ mg/kg}$; $\text{Cu} = 134 \text{ mg/kg}$ y $\text{Cd} = 10 \text{ mg/kg}$); que las registradas en la zona de jales inalterados ZJI ($\text{Fe}_2\text{O}_3 = 13.4\%$; $\text{Zn} = 24550 \text{ mg/kg}$; $\text{Cu} = 314.3 \text{ mg/kg}$; $\text{Cd} = 131 \text{ mg/kg}$). Sin embargo, las medianas de las concentraciones de Pb y As en la ZO ($\text{Pb} = 3613 \text{ mg/kg}$; $\text{As} = 1506 \text{ mg/kg}$) son del mismo orden a las registradas en la ZJI ($\text{Pb} = 3149 \text{ mg/kg}$; $\text{As} = 1385.5 \text{ mg/kg}$) [tabla 5.4(a), Figura 5.23(a)].

b) Las medianas de las concentraciones totales de los elementos asociados a los minerales carbonatados y aluminosilicatados, son menores en la ZO ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 3.6\%$; $\text{MgO} = 0.6\%$; $\text{MnO} = 0.1\%$; $\text{Na}_2\text{O} = 0.2\%$; $\text{K}_2\text{O} = 1.6\%$) que las registradas en la ZJI ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 4.7\%$; $\text{MgO} = 1.1\%$; $\text{MnO} = 0.9\%$; $\text{Na}_2\text{O} = 0.9\%$, $\text{K}_2\text{O} = 1.8\%$). Sin embargo, la mediana de las concentraciones de Si y Ca en la ZO ($\text{SiO}_2 = 61.3\%$; $\text{CaO} = 5.5\%$) son mayores que las registradas en la ZJI ($\text{SiO}_2 = 56.3\%$; $\text{CaO} = 4.3\%$) [(tabla 5.1(b), Figura 5.23(b)].

c) En las capas compactas (capa de Fe) de la ZO en el “talud” del depósito se observa un enriquecimiento de algunos MMPT con relación a las capas “no compactas” de la misma ZO: $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 16\%$, $\text{Zn} = 12250 \text{ mg/kg}$; $\text{As} = 2693 \text{ mg/kg}$, $\text{Cu} = 392 \text{ mg/kg}$ y $\text{Cd} = 92 \text{ mg/kg}$ (tabla 5.1(a), Figura 5.24).

El comportamiento de las concentraciones totales de cada muestra, en las diferentes zonas identificadas en el depósito de jales estudiados, se aprecian en detalle en las gráficas (concentración vs profundidad) que se construyeron para cada uno de los

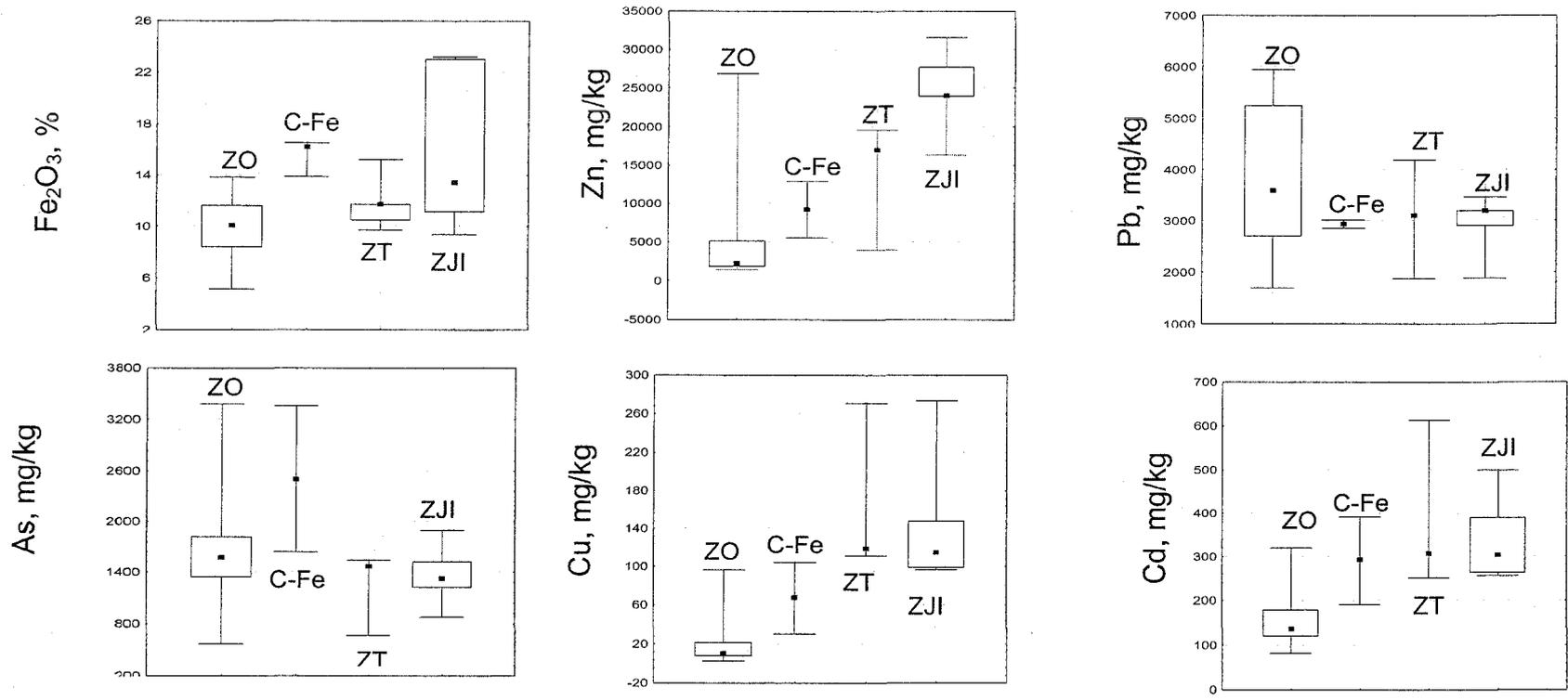
elementos en los diferentes perfiles distribuidos tanto en “vaso” como el “talud” del depósito de jales (Figuras 5.26-P1, 5.26-P2, 5.26-P3, 5.26-P4 y 5.26P-5)

Elemento	Zona de Oxidación						Zona					
	Capa No compacta			Capa de hierro			Transición			Jales Inalterados		
mg/kg	Mediana	D.Est.	Intervalo	Mediana	D.Est.	Intervalo	Mediana	D.Est.	Intervalo	Mediana	D.Est.	Intervalo
Zn	2200	7691	1300-27700	12250	4375	5600-13850	18400	6769	4050-20950	24550	6168	16200-32700
Pb	3613.0	1433.7	1692-5940	2954.0	81.6	2848-3009	2635.0	1074.0	1842-4189	3149.0	553.9	1891-3470
Cu	134.0	62.8	82.5-320	392.0	150.2	192-486	284.0	164.0	193-613	314.3	92.5	257-501
As	1506.0	698.1	570-3379	2693.0	866.7	1640-3359	1473.0	368.0	668-1542	1981.5	338.4	879-1898
Cd	10.0	27.5	2.5-96	92.0	39.4	31-104	122.0	90.0	111-287	131.0	117.4	96.5-383.5

Tabla 5.4 (a). Estadística descriptiva de las concentraciones totales de metales y metaloides potencialmente tóxicos, en las diferentes zonas identificadas en el depósito de jales “El Fraile”, Taxco – Guerrero

Elemento	Zona de Oxidación						Zona					
	Capa No compacta			Capa de hierro			Transición			Jales Inalterados		
%	Mediana	D.Est.	Intervalo	Mediana	D.Est.	Intervalo	Mediana	D.Est.	Intervalo	Mediana	D.Est.	Intervalo
SiO ₂	61.30	6.91	47.90-70.93	51.14	2.08	49.47-53.61	59.59	5.97	47.54-62.21	56.33	9.87	41.13-64.74
TiO ₂	0.19	0.08	0.17-0.39	0.20	0.05	0.19-0.29	0.29	0.09	0.18-0.39	0.26	0.09	0.16-0.35
Al ₂ O ₃	3.61	1.32	2.69-7.07	4.82	1.01	3.33-5.26	5.29	0.78	4.27-6.44	4.67	1.21	3.49-6.03
CaO	5.47	2.26	1.99-8.73	5.96	2.49	3.44-8.41	4.50	0.88	3.89-5.85	4.32	0.69	3.48-5.15
K ₂ O	1.57	0.30	1.30-2.20	1.62	0.10	1.54-1.73	1.91	0.32	1.43-2.23	1.75	0.33	1.32-2.06
Fe ₂ O ₃	10.06	2.44	5.15-13.83	16.20	1.45	13.87-16.54	11.70	2.11	9.72-15.22	13.42	6.03	9.38-23.19
MnO	0.09	0.53	0.06-1.84	0.34	0.06	0.31-0.43	0.68	0.29	0.32-1.06	0.88	0.54	0.37-1.51
MgO	0.61	0.42	0.42-1.19	0.92	0.54	0.82-1.02	1.22	0.16	0.95-1.30	1.09	0.17	0.94-1.36
Na ₂ O	0.18	0.18	0.13-0.73	0.61	0.25	0.20-0.66	0.74	0.17	0.59-1.02	0.94	0.34	0.60-1.33
P ₂ O ₅	0.05	0.02	0.02-0.08	0.07	0.02	0.05-0.10	0.08	0.02	0.05-0.09	0.08	0.02	0.04-0.10

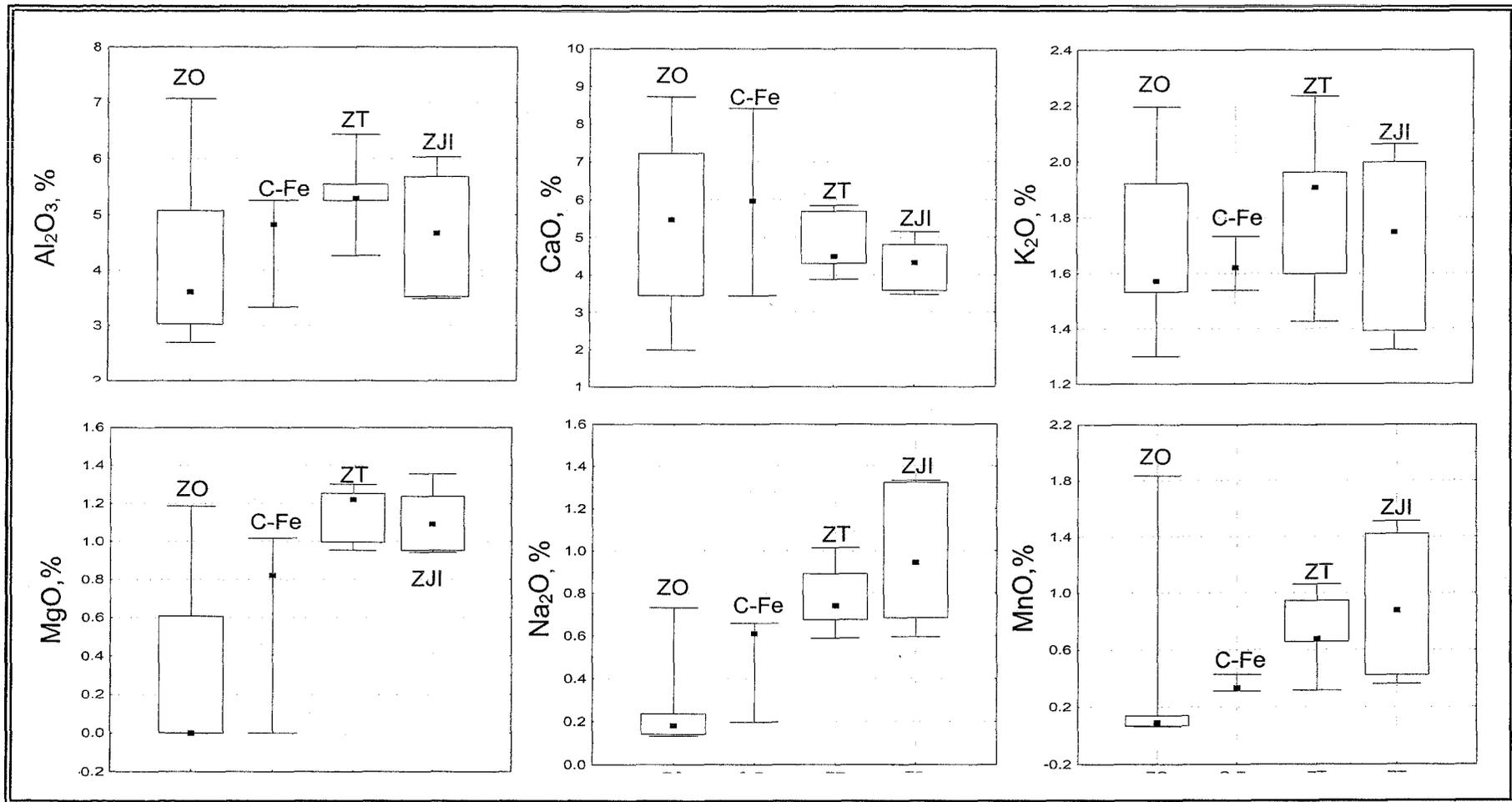
Tabla 5.4 (b) Estadística descriptiva de las concentraciones totales de elementos mayores en las diferentes zonas identificadas en el depósito de jales “El Fraile”, Taxco – Guerrero



Min-Max
 Median value
 25%-75%

ZO: Capa "no compacta" de la Zona de oxidación; C-Fe: Capa "compacta" de la Zona de oxidación; ZT: Zona de transición; ZJI: Zona de jales inalterados

Figura 5.23a Concentraciones totales de elementos asociados a minerales productores potenciales de drenaje ácido en las diferentes zonas identificadas en el depósito de jales "El Fraile", Taxco - Guerrero



 Min-Max
  Median value
  25%-75%

ZO: Capa "no compacta" de la Zona de oxidación; C-Fe: Capa "compacta" de la Zona de oxidación; ZT: Zona de transición; ZJI: Zona de jales inalterados

Figura 5.23b Concentraciones totales de elementos asociados a minerales neutralizadores potenciales de drenaje ácido, en las diferentes zonas identificadas en el depósito de jales "El Fraile", Taxco – Guerrero

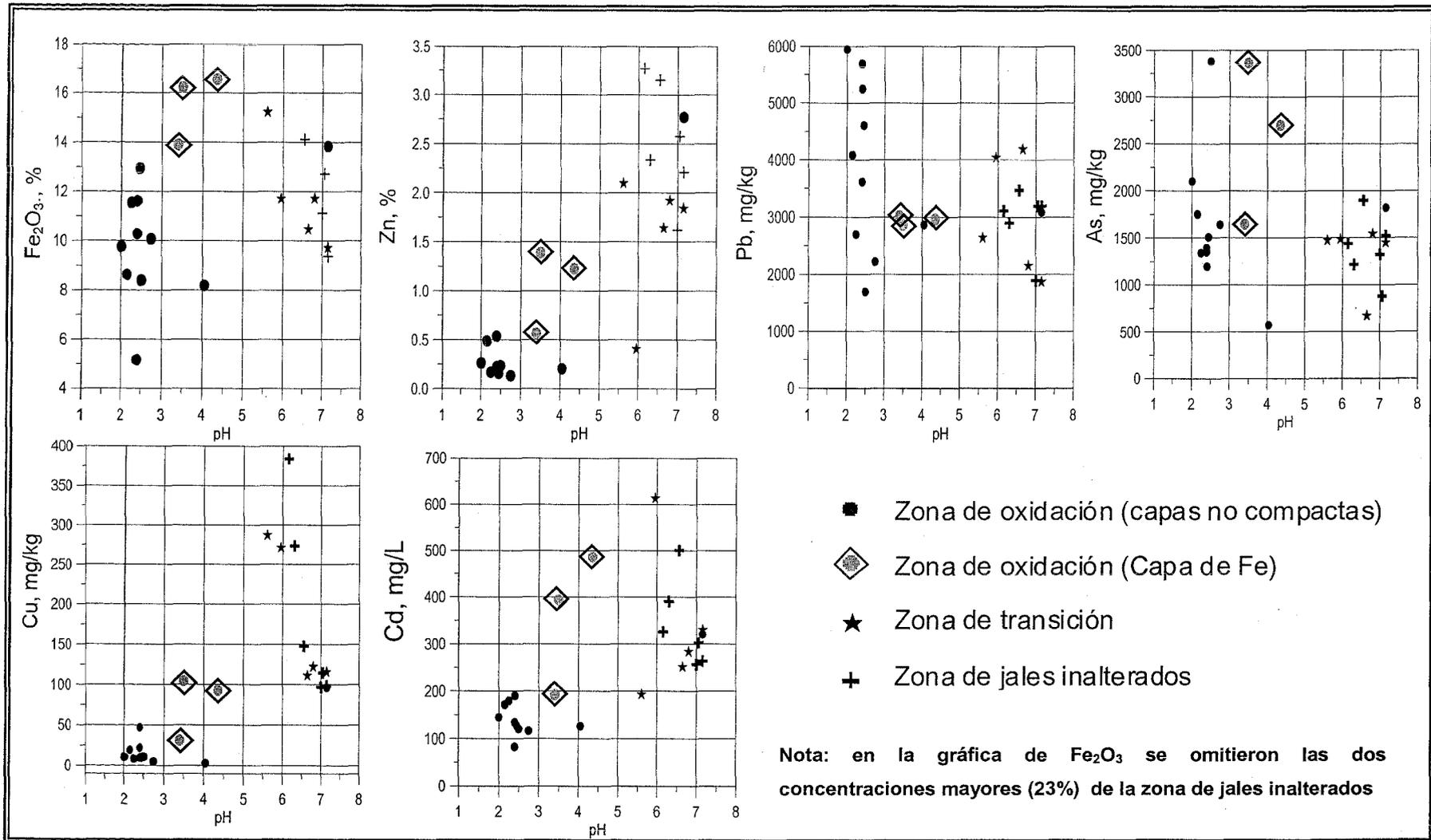


Figura 5.24 Concentraciones totales vs. pH de metales y metaloides potencialmente tóxicos en las diferentes zonas identificadas en el depósito de jales “El Fraile”, Taxco – Guerrero

5.3.3.2 Concentraciones Solubles

a) El pH de los lixiviados es ácido en las capas “no compactas” de la zona de oxidación (ZO) (mediana del pH = 2.3); y va aumentando hasta alcanzar valores cercanos al neutro en la zona de transición (ZT), donde la mediana del pH es 6.5 y zona de jales inalterados (ZJI) donde la mediana del pH es 6.8. La capa compacta (de hierro), dentro de la ZO, presenta valores de pH entre 3.5 y 4.4 (tabla 5.5).

b) Las mayores concentraciones solubles, de elementos asociados a los minerales productores potenciales de drenaje ácido, se registran en la zona de oxidación (ZO) donde el pH es ácido, y donde los jales están intensamente oxidados y se identificaron minerales secundarios como oxihidróxidos de Fe y jarosita. Las concentraciones solubles disminuyen sustancialmente en las zonas de transición (ZT) y de jales inalterados (ZJI), donde el pH de los lixiviados es cercano al neutro (tabla 5.5) y los minerales identificados están principalmente en forma de sulfuros metálicos en los cuales no se observan signos visibles de oxidación.

b.1) Las mayores concentraciones solubles Fe y Cu (en términos de valores de mediana) se registran en las capas “no compactas” de la ZO (Fe = 167.8 mg/L; Cu = 9.8 mg/L). En las capas “compactas” de la ZO las medianas de las concentraciones solubles de Fe y Cu son 6.8 y 4.7 mg/L respectivamente. En las ZT y ZJI se registran las menores concentraciones solubles en términos de valores de mediana de Fe (1.4 – 0.8 mg/L) y Cu (0.03 – 0.015 mg/L).

b.2) Las mayores concentraciones solubles de Zn, Cd, Pb y SO_4^{2-} (en términos de valores de mediana) se registran en las capas “compactas” de la ZO (Zn = 2415 mg/L; Cd = 25 mg/L; Pb = 0.4 mg/L y SO_4^{2-} = 6730.5 mg/L). En las capas “no compactas” de las ZO, las medianas de las concentraciones solubles de estos mismos elementos son menores (Zn = 325 mg/L; Cd = 4.2 mg/L; Pb = 0.1 mg/L y SO_4^{2-} = 3626 mg/L) que en las capas “compactas”, pero mayores que en la ZT (Zn = 126 mg/L; Cd = 4.5 mg/L; Pb = 0.2 mg/L y SO_4^{2-} = 2278.9 mg/L) y ZJI (Zn = 72.6 mg/L; Cd = 2.6 mg/L; Pb = 0.3 mg/L y SO_4^{2-} = 1881.3 mg/L).

b.3) Aunque las medianas de las concentraciones solubles de As son similares en las diferentes zonas del depósito de jales, en las capas “no compactas” de la ZO del

“talud” del perfil P4 de Fraile Sur (M19 y M20) donde el pH es muy ácido (pH = 2.0 – 2.2) se registran altas concentraciones solubles de As: 101 y 164 mg/L, respectivamente (Figura 5.25).

c) Las mayores concentraciones solubles de Mg, Mn, Al, Na y K (elementos asociados a los minerales neutralizadores potenciales de drenaje ácido) se registraron en las capas “compactas” de la ZO (Mg = 257 mg/L; Mn = 421 mg/L; Al = 182 mg/L; Na = 1.3 mg/L; K = 1.5 mg/L). Las concentraciones solubles de estos mismos elementos son similares en las capas “no compactas” de la ZO (Mg = 65.2 mg/L; Mn = 92.8 mg/L; Al = 134.1 mg/L; Na = 0.5 mg/L; K = 0.8 mg/L) y la zona de transición (Mg = 63.7 mg/L; Mn = 90 mg/L; Al = < 3 mg/L; Na = 0.9 mg/L; K = 1.8 mg/L) y zona de jales inalterados (Mg = 40.2 mg/L; Mn = 106.8 mg/L; Al = < 3 mg/L; Na = 0.8 mg/L; K = 2.0 mg/L).

d) Las concentraciones solubles de Ca (elemento asociado a aluminosilicatos y a calcita que es el principal mineral neutralizador potencial de drenaje ácido) es similar en las distintas zonas identificadas en el depósito de jales. En las capas “no compactas” de la ZO, la mediana de Ca = 462 mg/L; en las capas “compactas” de la ZO es de 411 mg/L; y en la zona de transición es de 473 mg/L, y en la zona de jales inalterados, Ca = 483.5 mg/L. Este comportamiento del Ca parece indicar que este elemento está asociado, principalmente, a minerales que participan muy poco en los procesos geoquímicos que ocurren en los jales muestreados en los perfiles y que pertenecen al grupo “Jales A”.

El comportamiento de las concentraciones solubles puntuales, en las diferentes zonas identificadas en el depósito de jales estudiado, se aprecian en detalle en las gráficas (concentración vs profundidad) que se construyeron para cada uno de los elementos en los diferentes perfiles distribuidos tanto en “vaso” como en el “talud” del depósito de jales (Figuras 5.26-P1, 5.26-P2, 5.26-P3, 5.26-P4 y 5.26P-5).

Elemento	Zona de Oxidación						Zona					
	Capa No compacta			Capa de hierro			Transición			Jales Inalterados		
	Mediana	D.Est.	Intervalo	Mediana	D.Est.	Intervalo	Mediana	D.Est.	Intervalo	Mediana	D.Est.	Intervalo
pH	2.3	1.5	2.0-7.3	4.1	0.5	3.5-4.4	6.5	0.6	5.7-7.1	6.8	0.4	6.3-7.1
Zn	324.6	377.5	1.7-1309	2415.0	1027.5	645.3-2434.7	126.0	529.9	5.8-1259.2	72.6	180.5	9.2-425.2
Cd	4.2	5.2	0.03-18.2	25.0	14.2	3.6-30.6	4.5	30.2	0.3-71.4	2.6	12.4	0.4-26.1
Fe	166.8	933.6	0.4-2568.0	6.8	378.2	1.5-659.1	1.4	0.6	0.4-1.7	0.8	1.2	0.3-3.3
Pb	0.1	0.0	<0.01-0.13	0.4	0.4	<0.01-0.62	0.2	0.5	0.11-1.12	0.3	0.7	<0.01-1.9
Cu	9.8	7.3	0.01-18.3	4.7	20.7	0.5-38.2	0.03	0.05	0.02-0.1	0.015	0.01	0.01-0.03
Ca	462.0	27.2	433.0-509.0	411.0	20.7	395.0-436.0	473.0	49.6	399.0-530.0	483.5	29.9	449-519
Mg	89.0	65.2	14.7-238.0	257.0	101.6	147.0-350.0	63.7	77.4	21.3-223.0	40.2	8.0	38.4-57.0
Mn	69.0	92.8	6.1-327.5	421.0	110.9	396.6-599.7	90.0	249.3	23.8-620.2	106.8	111.5	13.5-232.5
As	0.1	55.2	0.01-164.0	0.1	0.2	0.05-0.37	0.1	0.01	0.02-0.1	0.0	0.0	<0.001-0.04
Al	138.0	134.1	<3.0-370.0	182.0	162.2	12.8-337.0	<3.0	<3.0	<3.0	<3.0	<3.0	<3.0
Na	0.8	0.5	0.20-1.90	1.3	0.4	0.8-1.6	0.9	0.4	0.3-1.2	0.8	0.3	0.5-1.3
K	0.8	0.6	0.10-2.30	1.5	0.6	0.6-1.8	1.8	0.9	0.3-2.5	2.0	0.5	2.0-3.0
SO ₄ ²⁻	3625.6	2852.8	1533.7-10085.5	6730.5	2437.9	3714.6-8540.5	2278.9	1377.7	1479.2-4868.4	1881.3	575.3	1208.8-2640.8

Relación sólido – extractante de la prueba de extracción: 50 mg de jales – 150 ml de agua destilada

Tabla 5.5 Estadística descriptiva de las concentraciones solubles (mg/L) de elementos asociados a minerales productores y neutralizadores potenciales de drenaje ácido en las diferentes zonas identificadas en el depósito de jales “El Fraile”, Taxco – Guerrero

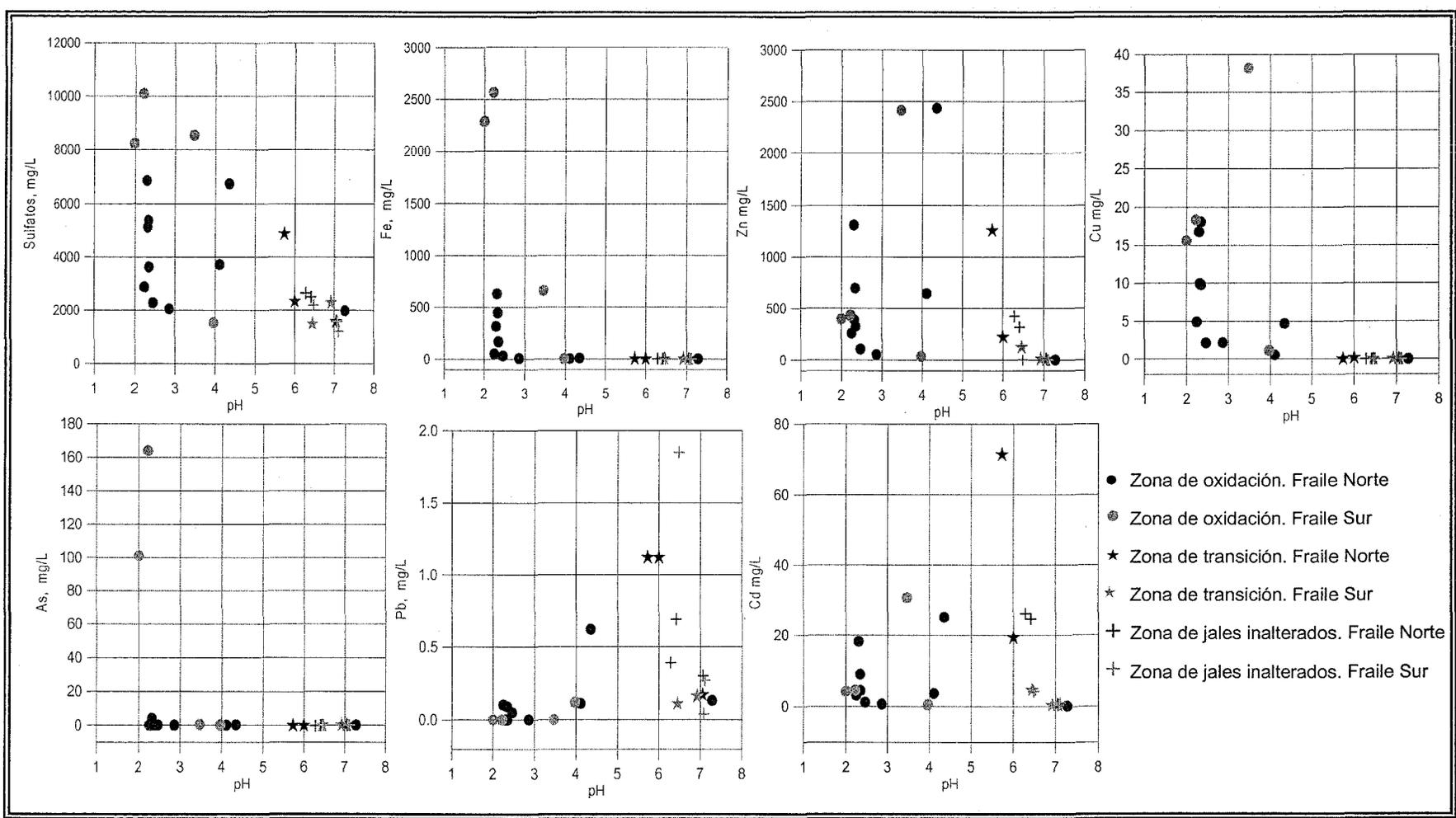


Figura 5.25 Concentraciones “solubles” de elementos asociados a minerales generadores de Drenaje Ácido en las diferentes zonas identificadas en el depósito de jales “El Fraile”, Taxco. Guerrero

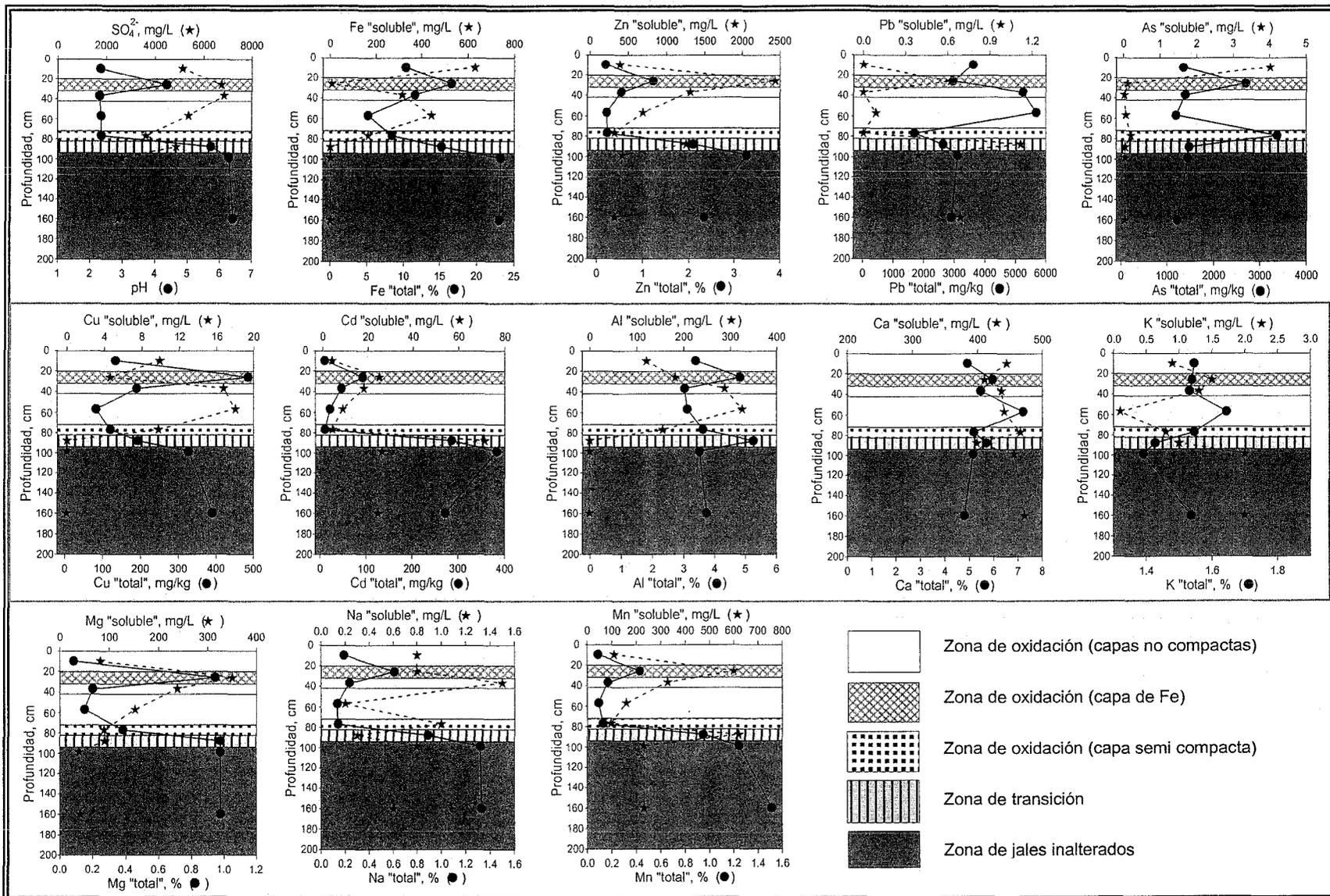


Figura 5.26- P1 Concentraciones "totales" y "solubles" de MMPT y EM en el perfil P 1. Jales "El Fraile"

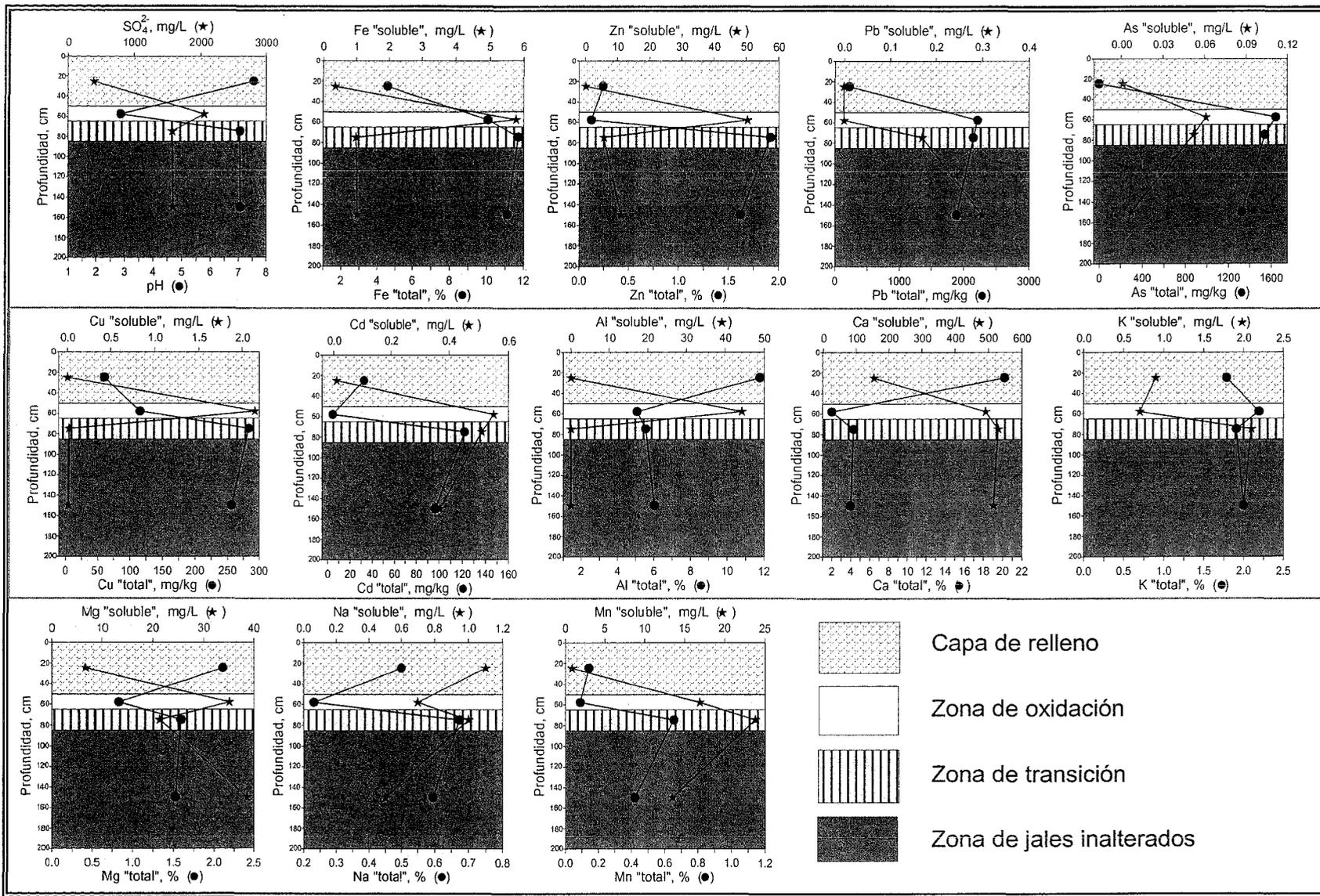


Figura 5.26- P2. Concentraciones “totales” y “solubles” de MMPT y EM en el perfil P 2. Jales “El Fraile”

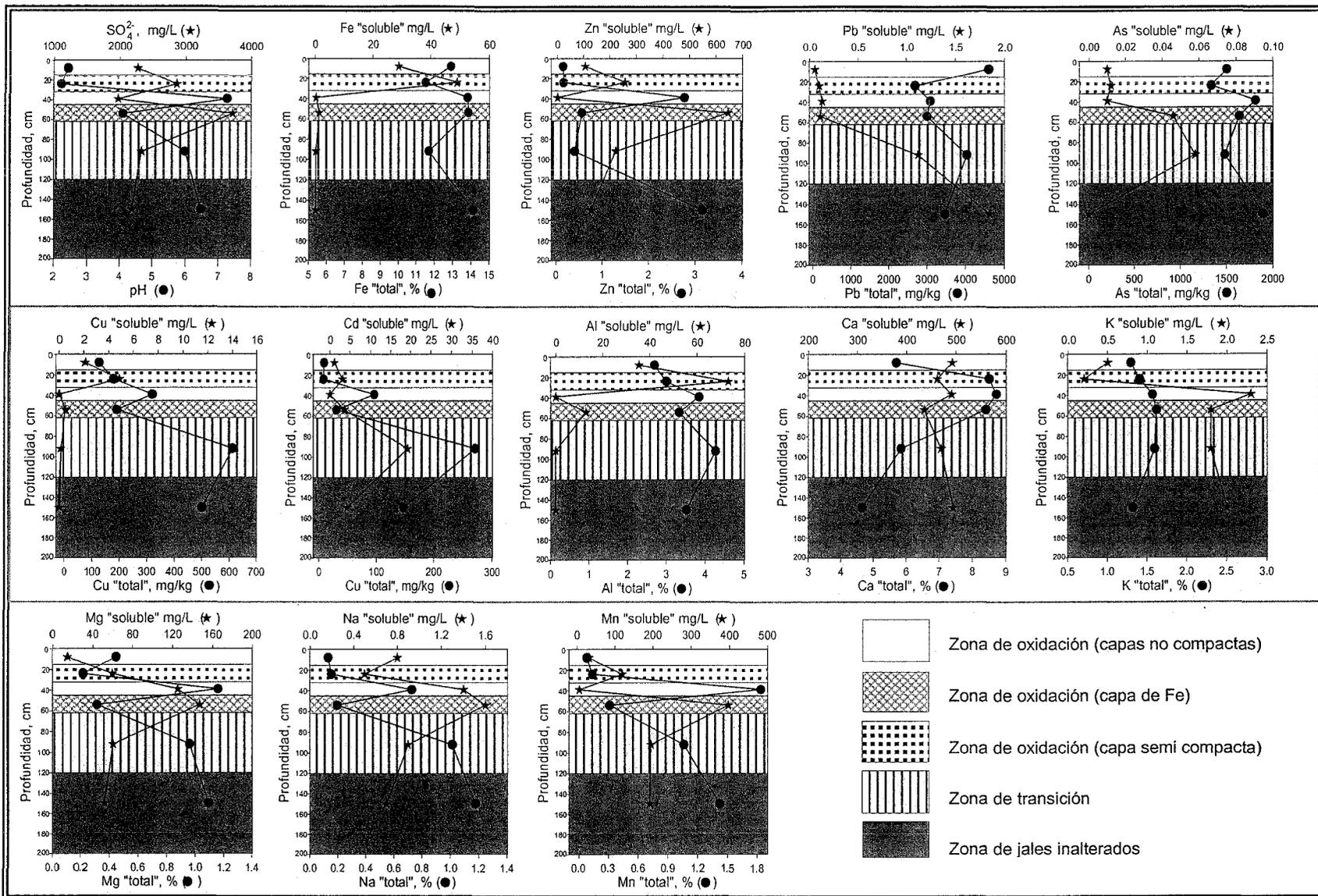


Figura 5.26-P3 Concentraciones "totales" y "solubles" de MMPT y EM en el perfil P 3. Jales "El Fraile"

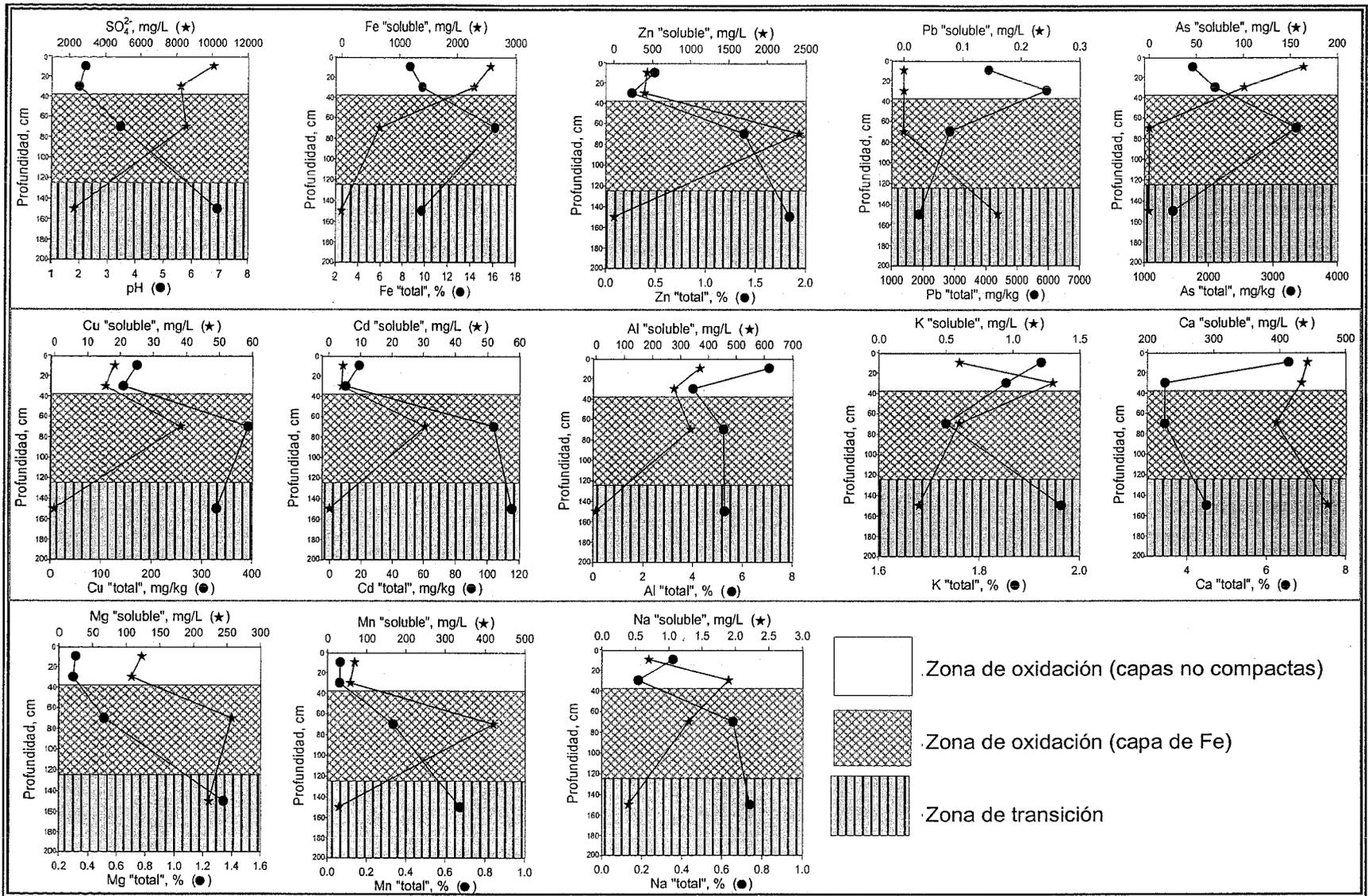


Figura 5.26- P4 Concentraciones "totales" y "solubles" de MMPT y EM en el perfil P 4. Jales "El Fraile"

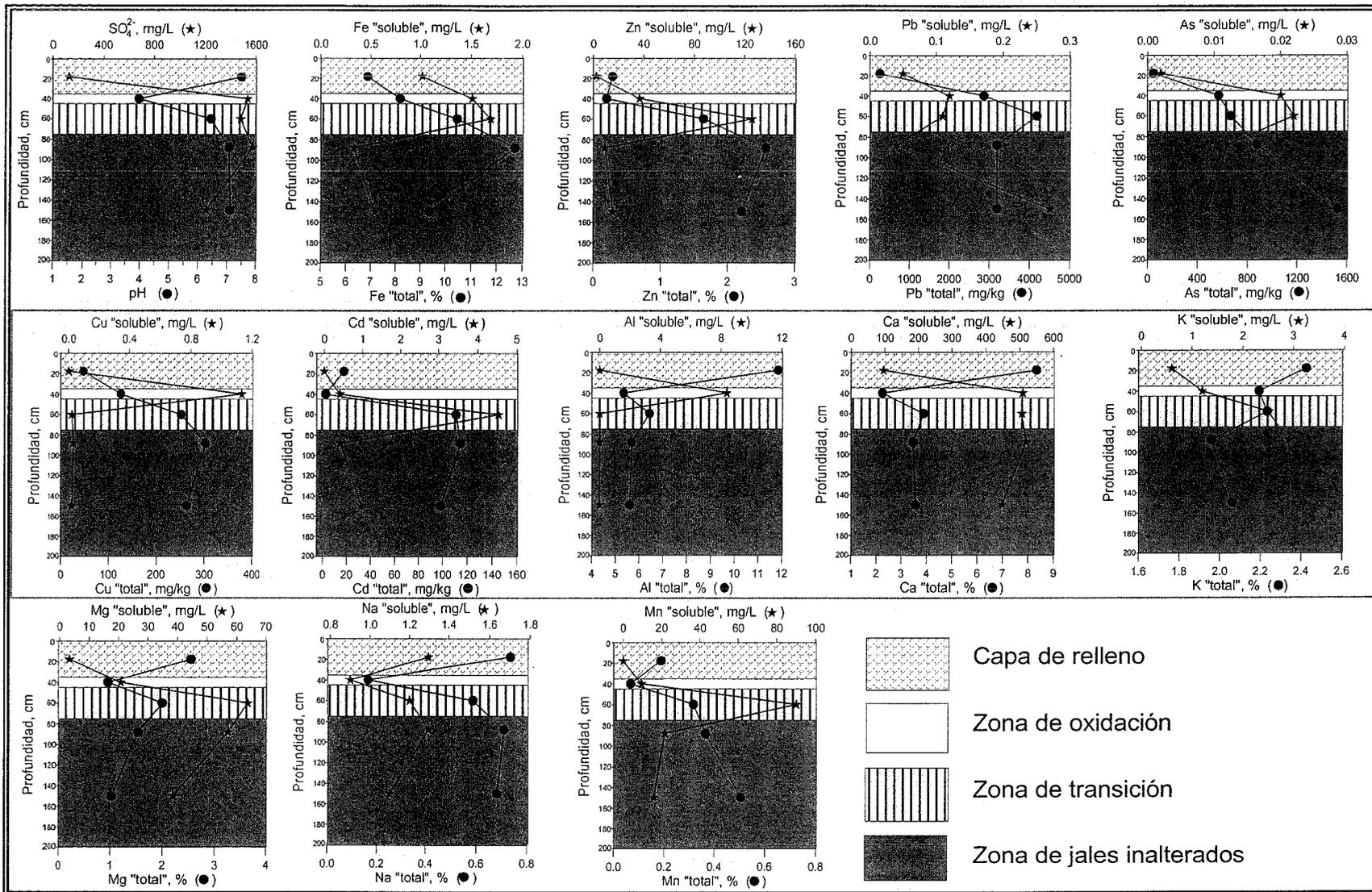


Figura 5.26- P5 Concentraciones “totales” y “solubles” de MMPT y EM en el perfil P5. Jales “El Fraile”

5.3.4 Modelos de hidrogeoquímica

5.3.4.1 Índice de saturación

Con el fin de identificar a los minerales que tienden a precipitar a partir de las concentraciones solubles de los MMPT y EM de los lixiviados, analizados en este estudio, se calcularon los índices de saturación (IS) que se presentan en los apéndices 11 (zona de oxidación), 12 (zona de transición) y 13 (zona de jales inalterados).

El cálculo de los IS se realizó con el programa de cómputo MINTQA2 (Allison et al. 1990) sin alterar su base de datos, por lo que los resultados presentados son limitados a los datos del programa. El IS puede indicar a los minerales que tienden a precipitar a partir de datos termodinámicos y no considera aspectos cinéticos, por lo que es posible que los minerales identificados a partir del IS no coincidan con los identificados durante el análisis mineralógico

El IS se calcula a partir de la relación entre el producto de la actividad de los iones (PAI) de interés y la constante de equilibrio (k) del mineral que precipitará:

$$IS = \log [PAI / k] \quad (17)$$

Cuando el $IS = 0$ (equilibrio entre los iones solubles y el mineral) y $IS > 0$ (lixiviado sobresaturado con respecto a los iones de interés) significa que el mineral tiende a precipitar. Por el contrario, cuando $IS < 0$, significa que el lixiviado está insaturado y por lo tanto el mineral no tiende a la precipitación.

Los "lixiviados" de las muestras de jales de la zona de oxidación (ZO) están sobresaturados con respecto a los oxihidróxidos de Fe (goetita, hematita, lepidocrocita), sulfato de calcio (yeso) e hidroxisulfatos de Fe (jarositas de H, Na y K). Estos resultados indican que en la zona de oxidación dominan los minerales secundarios propios de jales oxidados (Blowes et al. 1990; Lin 1997; McGregor et al. 1998; Holmstrom 2001, Armienta 2003, Talavera 2004); los cuales fueron identificados en los jales de estudio.

En la zona de transición (ZT) y de jales inalterados (ZJI), donde el análisis mineralógico indica que los sulfuros metálicos no muestran signos visibles de oxidación, los lixiviados están sobresaturados con respecto a algunas fases sólidas de óxidos de Fe y de yeso, mismos que fueron identificados en el análisis mineralógico. Esto parece indicar que los óxidos de Fe de la ZT y ZJI están relacionados con la mineralogía original de los yacimientos de los cuales provienen estos jales (ver tabla 2.1); y que el yeso puede provenir de los reactivos utilizados en el proceso de beneficio o de procesos de oxidación muy incipientes que no fueron detectados en este trabajo.

La tendencia a precipitar de minerales secundarios de aluminio ($\text{Al}(\text{OH})\text{SO}_4$, alunita y diásporo) y de maghemita ($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$), diferencia a la capa "compacta" (capa de Fe) en la zona de oxidación respecto a las capas "no – compactas". De todos estos minerales con tendencia a precipitar, solamente se identificó a la alunita en la capa de Fe.

En la zona de oxidación, los IS muestran una marcada insaturación con relación a minerales de sulfatos de Fe, Zn, Cu, Cd y Pb; los cuales, tampoco fueron identificados por técnicas directas. Esto puede significar que la precipitación de los sulfatos de estos metales (minerales secundarios) no es un control importante en la movilidad de estos MMPT como ha sido reportado en otros estudios, en el caso de los sulfatos de Fe (Talavera et al. 2004).

En la zona de transición y de jales inalterados existe una tendencia a la precipitación de carbonatos de Mn, Zn, Cd, y Pb; además de ferrita-Mg. Esto podría indicar la presencia de estos minerales en estas zonas y dadas las condiciones de acidez (pH cercano al neutro), explicar las concentraciones solubles de Zn, Cd y Pb que no tienen relación con los procesos de oxidación de los sulfuros metálicos. Ninguna de estas fases fue identificada en este trabajo; sin embargo, en otros estudios se reporta la presencia del carbonato de Zn en los jales "El Fraile" (Flores 2002).

Los IS calculados indican que no existe tendencia a la precipitación de arseniatos de metales transicionales, con excepción de la muestra M19, donde el IS para el arseniato de Fe es cercano 0. Esto parece indicar que la precipitación de minerales secundarios de As no sea un control importante en la movilidad del As en estos jales.

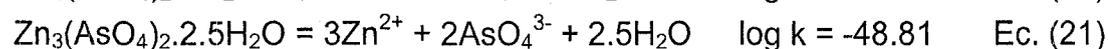
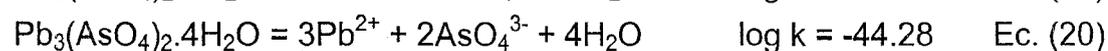
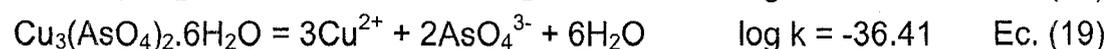
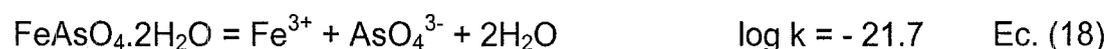
Sin embargo, la precipitación de la beudantita ($\text{PbFe}_3 (\text{AsO}_4) (\text{SO}_4) (\text{OH})_6$) en los jales “El Fraile” fue ampliamente demostrada en este estudio; lo que sugiere que la base de datos utilizada para calcular los IS para las fases de arseniatos de metales (base de datos del MINTEQA) es muy limitada en datos termodinámicos, por lo que se procedió a construir los diagramas de solubilidad teórica para los arseniatos de metales transicionales utilizando datos termodinámicos reportados por Rodie et al (1995)

5.2.4.2 Diagramas pH – solubilidad

Utilizando el programa de cómputo MINEQL (Schecher et al. 1999) se construyeron diagramas de solubilidad teórica (pH vs. Solubilidad) para algunas fases sólidas de hierro y arsénico.

Los diagramas de solubilidad teórica se utilizaron para inferir las fases sólidas a las cuales pueden estar asociados el Fe y As, mediante la comparación de las concentraciones solubles experimentales de los MMPT con las teóricas. Al igual que en el caso de los IS, estas fases sólidas inferidas deben tomarse con reserva ya que estos diagramas no necesariamente reflejan lo que ocurre en la realidad pues sólo consideran datos termodinámicos y omiten factores cinéticos.

Los diagramas de solubilidad teórica para fases sólidas de Fe y As se presentan en las Figuras 5.27, las cuales se construyeron considerando condiciones estándares de presión ($\log P_{\text{CO}_2} = -3.5$) y temperatura (25°C). Para las concentraciones de las especies en solución se utilizaron las relaciones estequiométricas de las respectivas reacciones de la base de datos del programa. Así mismo, las constantes de equilibrio para cada fase sólida se tomaron de la base de datos del programa, excepto para los arseniatos de metales que se utilizaron las reportadas por Rodie et al (1995):



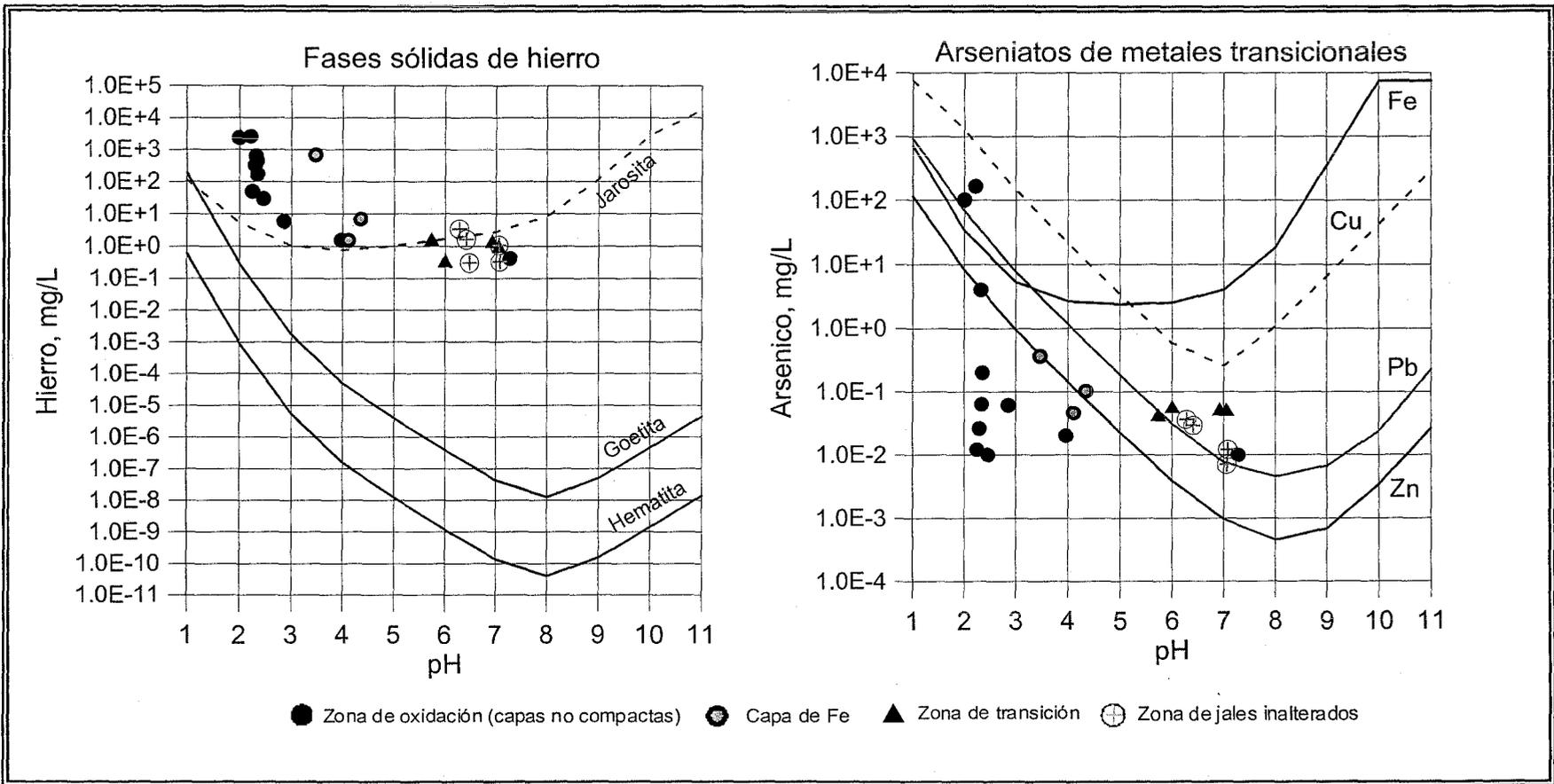
A partir de estos diagramas (Figura 5.27) se puede interpretar lo siguiente:

1. La comparación de las solubilidades experimentales de Fe obtenidas en los lixiviados con las solubilidades teóricas indica que:

- La movilidad del Fe en los jales oxidados y no-oxidados puede estar controlada por la precipitación de goetita y hematita. Adicionalmente, en los jales oxidados esta movilidad del Fe puede estar controlada por la precipitación de la jarosita. Todas estas fases fueron identificadas en los jales de estudio.

2. La comparación de las concentraciones solubles experimentales de As con las solubilidades teóricas calculadas indica que:

- Para un 40% de las muestras de jales oxidados el control de la movilidad del As puede estar controlada por las fases sólidas de arseniatos de Zn, Pb y Fe. El mineral beudantita ($\text{PbFe}_3(\text{AsO}_4)(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$) fue identificado en los jales oxidados de "El Fraile".
- Para el 60% de las muestras de jales oxidados, las concentraciones solubles experimentales del As son inferiores a las solubilidades teóricas, lo que permite sugerir que en estos jales los procesos de sorción pueden tener lugar en el control de la movilidad del As. El análisis por MEB-EDS en las muestras de jales oxidados de "El Fraile" indica que los oxihidróxidos de Fe contienen As.



Nota: En el texto se describe el detalle de las condiciones para la construcción de los diagramas

Figura 5.27 Solubilidad teórica de algunos minerales de hierro (Fe) y arsénico (As); y concentraciones solubles de Fe y As en función del pH en los lixiviados de jales en el depósito "El Fraile", Taxco – Guerrero

5.3.5 Valoración del peligro potencial que representan los jales

Los resultados de las pruebas de extracción para valorar el peligro potencial que representan los jales expuestos en la zona de oxidación se presentan en la tabla 5.6 (a). Las diferencias porcentuales relativas (DPR) entre las concentraciones de muestras originales y duplicadas fueron menores al 20%; lo que indica que la precisión de las metodologías y técnicas analíticas utilizadas son aceptables de acuerdo a los criterios de calidad de la USEPA (1994d).

Los resultados indican que la movilidad de los elementos estudiados presenta el siguiente orden: sulfatos (SO_4^{2-}) > hierro (Fe) = zinc (Zn) > arsénico (As) > cobre (Cu) > plomo (Pb). (Figura 5.28).

En los extractos con pH ácido se obtuvieron, las mayores concentraciones solubles de los MMPT analizados. Las concentraciones máximas solubles (en mg/L) de As, Zn, Fe y S son de 28.7, 470, 1195 y 3324, respectivamente; y corresponden a los extractos con pH ácido (tabla 5.6 (a)). En el caso del plomo se observa que las concentraciones “solubles” son similares, y en general bajas, tanto en los extractos con pH ácido como en los extractos con pH cercano al neutro, lo que puede ser explicado por el hecho de que el Pb está asociado a la anglesita, que es poco soluble en medio ácido y neutro, en los jales oxidados del “talud”.

Para valorar la influencia del pH del extractante en las concentraciones de MMPT fácilmente solubles, se procedió a realizar otras pruebas en las muestras, cuyo extracto resultó ácido ($\text{pH} < 3.5$), siguiendo la misma metodología con la variante de controlar el pH mediante la adición de NaOH 0.1M para que el pH final del extracto fuera cercano al neutro.

Los resultados de las pruebas de extracción con pH controlado se presentan en la tabla 5.6 b. Estos resultados muestran que al controlar el pH de la extracción, la movilidad de los MMP estudiados (adicionalmente se analizó Cd) se reduce significativamente con respecto a las primeras pruebas. Estos resultados indican que con solo controlar el pH cercano al neutro se puede minimizar el peligro potencial que estos jales representan para el entorno natural.

(a)

No.	Lecturas	pH		CE,		SO ₄ ²⁻		As		Pb		Zn		Fe,		Cu	
		DPR,%	mS/cm	DPR,%	mg/L	DPR,%	mg/L	DPR,%	mg/L	DPR,%	mg/L	DPR,%	mg/L	DPR,%	mg/L	DPR,%	
F1-1	a	6.3		1		465.3		0.003		0.53		6.00		1.85		0.08	
	b	6.5	3	0.9	13	386.1	19	0.004	20	0.410	26	5.50	9	1.620	13	0.070	13
F1-2		6.7		2.2		1371.6		0.005		0.73		8.00		1.03		0.09	
F2-3		2.9		2.6		1487.8		0.006		bld		10.25		2.57		0.4	
F2-4	a	3.3		2.4		1428.9		0.007		0.57		13.00		2.65		0.35	
	b	3.4	2	2.3	3	1473.9	3	0.007	2	0.630	10	14.25	9	2.720	3	0.390	11
F3-5		2.6		3.9		3105.1		3.006		0.81		305.00		215		5.25	
F3-6		2.8		3.8		2815.1		0.792		bld		470.00		59		12.1	
F4-7		3.1		2.5		1491.8		0.007		0.47		3.80		9.4		0.15	
F4-8		2.4		4.2		3323.9		14.76		0.85		27.00		404		1.56	
F4-9		2.6		3.6		2493.3		0.967		0.32		54.00		179		2.86	
F5-10		2.7		3.1		2080		0.555		bld		62.00		148		1.77	
F5-11		2.7		3.7		2630.7		0.903		0.35		115.00		232		3.11	
F5-12	a	2.6	0	4.2	0	2212.5	2	28.727	16	0.58	4	51.00	4	1185	1	2.53	6
	b	2.6		4.2		2247.8		33.752		0.560		53.00		1195.000		2.380	
F6-13	a	6.4		2.1		1261		0.002		0.45		1.60		1		0.06	
	b	6.6	3	2.2	4	1382.6	9	0.002	0	0.650	36	1.90	17	1.430	35	0.060	0

a: concentración en muestra original "S". b: Concentración en muestra duplicada "D".

NA: no aplica

(b)

Clave	pH	As	Cd	Cu	Pb	Zn
	mg/L					
F2-3	6.9	< 0.002	0.02	<0.01	<0.01	0.74
F2-4	7.0	< 0.002	0.06	<0.01	<0.01	3.29
F2-5	6.7	< 0.002	1.42	0.04	<0.01	105.39
F2-6	6.5	< 0.002	3.06	0.1	<0.01	298.62
F2-7	6.8	< 0.002	<0.01	<0.01	<0.01	0.21
F2-8	6.6	< 0.002	0.12	<0.01	<0.01	6.3
F2-9	6.9	< 0.002	0.33	0.01	<0.01	25.97
F2-10	6.5	< 0.002	0.35	0.01	<0.01	53.54
F2-11	6.6	< 0.002	0.42	0.21	<0.01	43.93
F2-12	6.8	< 0.002	0.36	0.06	<0.01	38.79

Tabla 5.6 Concentración "fácilmente soluble" MMPT en muestras de jales del "talud" del depósito "El Fraile", Taxco – Guerrero: (a) Extracción donde el pH del extracto es determinado por la capacidad amortiguadora de los minerales presentes en los jales. (b) Extracción con pH controlado a 6.5 – 7.0 mediante la adición de NaOH 0.1 M

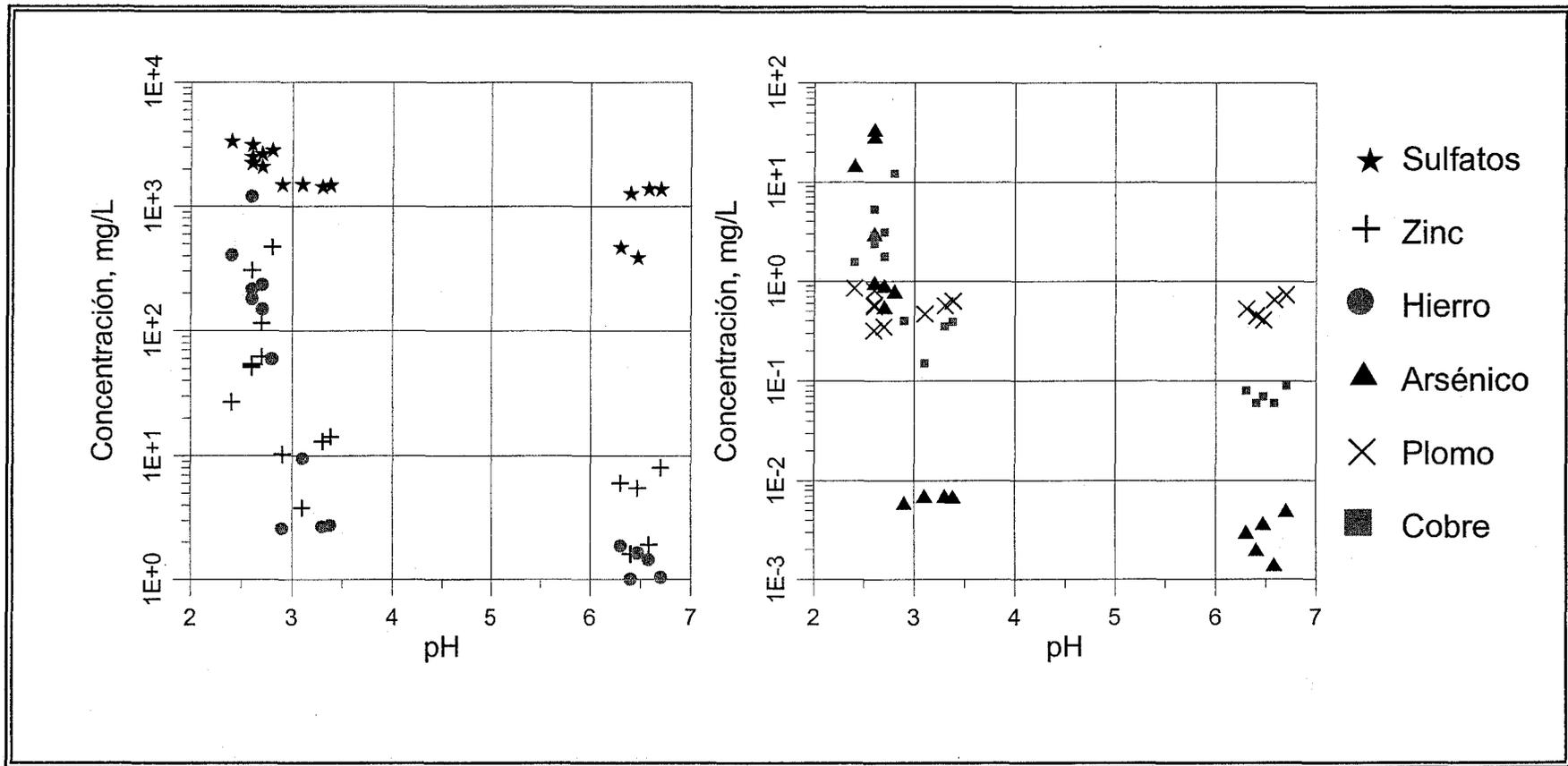


Figura 5.28 Concentraciones “fácilmente solubles” de MMPT en muestras de jales del depósito “El Fraile”, Taxco – Guerrero.

5.3.6 Estimación de la influencia del tiempo de agitación en la magnitud de la concentración soluble (extraíble) de los principales MMPT.

Utilizando el procedimiento descrito en la sección 4.2.5.a, se realizó la extracción a 4 muestras de jales oxidadas (C1, C2, C3 y C4) con el fin de valorar la influencia del tiempo de agitación en la magnitud de extracción de los MMPT. Los resultados se presentan en la tabla 5.7 y se observan gráficamente en la Figura 5.29.

En las muestras de jales con el pH de 2.2 y 2.4, se obtuvieron altas concentraciones solubles (mg/L), de Fe (2905.5 y 826.3), As (200.2 y 12.6), Zn (495.8 y 495.8), Cd (5.3 y 5.5) y Cu (20.5 y 12.2). Sin embargo, en estos jales se registraron las más bajas concentraciones solubles de Pb (0.05 y 0.2 mg/L). Al primer día de agitación se logró extraer el 80% de la fracción soluble de Zn, Cd, y Cu; el 85% de Fe, el 96% de As. El Pb soluble se logra extraer en el quinto y octavo día de agitación.

Este comportamiento sugiere que en estos jales, el Zn, Cd, Cu y As están asociados a fases sólidas de Fe vía sorción; y que al ser muy inestables en medio ácido, se liberan fácilmente al ambiente; y que el Pb puede estar precipitado en fases sólidas estables en medio ácido como la galena, anglesita o plumbojarosita.

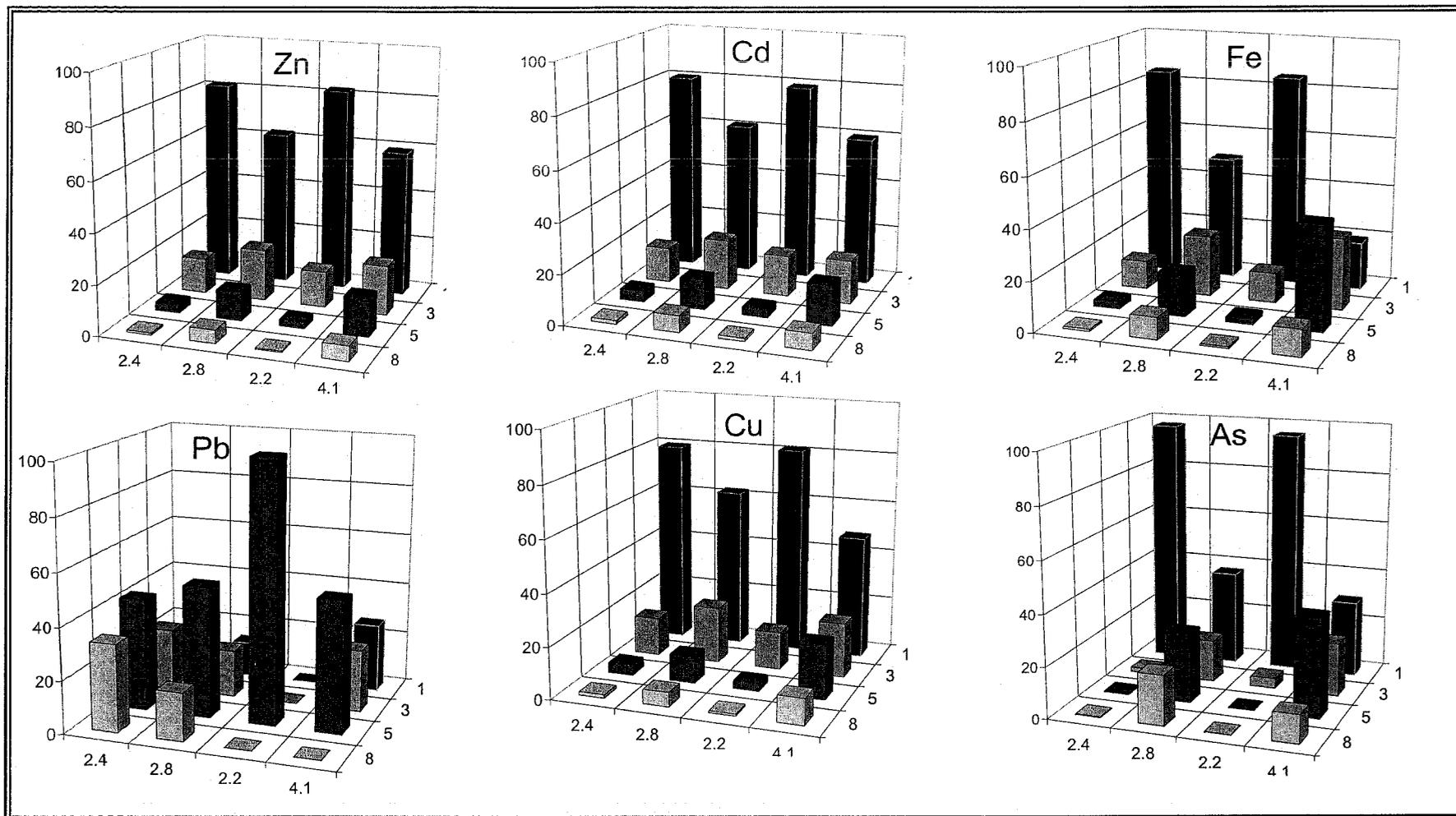
En las muestras con pH de 2.8 y 4.1 se obtuvieron las menores concentraciones solubles (mg/L), de Fe (21.5 y 8.0), As (0.2 y 0.1), Zn (66.2 y 51.1), Cd (0.8 y 0.8) y Cu (3.3 y 2.1). Sin embargo, en estas muestras se registraron concentraciones de Pb solubles de 0.2 y 0.4 mg/L. Al tercer día de agitación, en la muestra con pH de 2.8, se logró extraer el 74 – 84% de la fracción soluble de Fe, Zn, Cd y Cu; el 54% de As y el 32% de Pb. Al tercer día de agitación, en la muestra con pH de 4.1, se logró extraer el 69 – 79% de la fracción soluble de Zn, Cd y Cu; el 48% de Fe, el 50% de Pb y el 51% de As; y solamente al quinto día de agitación se logra extraer 82 – 90% de la fracción soluble de Fe, Pb y As.

Este comportamiento sugiere que el Zn, Cd y Cu están asociados a fases sólidas de Fe vía sorción, y que al ser relativamente estables a estos pH, solamente con el tiempo van liberando a los elementos que los contienen. Las bajas concentraciones solubles de Pb y As y la dificultad con que se liberan (tercer y quinto día de agitación), sugiere que éstos deben de estar asociados a fases sólidas muy estables desde el punto de vista químico como la beudantita.

MMPT	Muestra	pH	Agitación		Agitación		Agitación		Agitación		Extracción	
			1 día		3 días		5 días		8 días		Acumulada	
			E1		E3		E5		E8		ET= E1 + E2 + E3 + E4	
			mg/L	% (*)	mg/L	%						
Zn	C1	2.4	404	81	70.3	14	17.40	4	4.1	1	495.8	100
	C2	2.8	41.4	63	13.7	21	7.6	11	3.5	5	66.2	100
	C3	2.2	394	82	69.3	14	12.9	3	2.4	1	478.6	100
	C4	4.1	30.2	59	10.1	20	7.7	15	3.1	6	51.1	100
Cd	C1	2.4	4.43	80	0.78	14	0.24	4	0.08	1	5.53	100
	C2	2.8	0.46	61	0.15	20	0.09	12	0.05	7	0.75	100
	C3	2.2	4.20	79	0.87	16	0.18	3	0.07	1	5.3	100
	C4	4.1	0.45	60	0.13	17	0.12	16	0.05	7	0.75	100
Fe	C1	2.4	701	85	93.51	11	24.06	3	7.65	1	826.32	100
	C2	2.8	10.70	50	5.20	24	3.68	17	1.88	9	21.46	100
	C3	2.2	2470	85	348	12	66.63	2	20.84	1	2905.47	100
	C4	4.1	1.54	19	2.30	29	3.34	42	0.86	11	8.04	100
Pb	C1	2.4	< 0.01		0.05	24	0.09	43	0.07	33	0.21	100
	C2	2.8	0.03	14	0.04	18	0.11	50	0.04	18	0.22	100
	C3	2.2	< 0.01		< 0.01		0.05	100	< 0.01		0.05	100
	C4	4.1	0.11	26	0.10	24	0.21	50	< 0.01		0.42	100
Cu	C1	2.4	9.76	80	1.81	15	0.49	4	0.17	1	12.23	100
	C2	2.8	2.04	62	0.71	22	0.34	10	0.18	6	3.27	100
	C3	2.2	16.65	81	2.99	15	0.65	3	0.17	1	20.46	100
	C4	4.1	1.00	48	0.44	21	0.44	21	0.21	10	2.09	100
As	C1	2.4	12.3	98	0.217	1.7	0.062	0.5	0.030	0.2	12.609	100
	C2	2.8	0.067	37	0.030	17	0.049	27	0.035	19	0.181	100
	C3	2.2	192	96	7.87	4	0.236	0	0.081	0	200.19	100
	C4	4.1	0.027	30	0.019	21	0.035	38	0.010	11	0.091	100

(*) Porcentaje con respecto a la extracción acumulada ET.

Tabla 5.7 Influencia del tiempo de agitación en la concentración soluble (extraída) de los principales MMPT en muestras de jales oxidadas del depósito de jales “El Fraile”, Taxco – Guerrero



Eje Y: % de extracción (0 – 100%) . Eje X: pH de las muestras sólidas (2.4, 2.8, 2.2 y 4.1). Eje Z: Días de agitación (1, 3, 5 y 8 días)

Figura 5.29 Influencia del tiempo de agitación en la extracción de MMPT en muestras de jales oxidadas del depósito de jales “El Fraile”, Taxco - Guerrero

VI. DISCUSIÓN

6.1 Zonificación geoquímica en el depósito de jales “El Fraile”

Las diferencias macroscópicas (color, granulometría, grado de compactación), los valores de pH y las características geoquímicas en las muestras de los jales de “El Fraile” permitieron definir que en el sentido vertical, se distingue la zona de oxidación “ZO” (jales oxidados de color café-rojo-amarillo) y la zona de jales inalterados “ZJI” (jales “NO oxidados” de color gris). Entre ambas zonas se desarrolla una zona transicional “ZT” con predominio de los jales “NO oxidados”. La ZO se observa desde la superficie hasta una profundidad que varía entre 35 y 120 cm, sobreyaciendo a los jales de la ZT (de 15 a 80 cm de espesor) que a su vez sobreyace a los de la ZJI.

En general, los jales de la ZO tienen un pH ácido ($\text{pH} = 1.9 - 2.8$) que aumenta hasta 4.4, donde se forma una capa compacta (capa de Fe). En la ZO los minerales están intensamente oxidados y alterados. Los jales de la ZT y ZJI tienen un pH muy cercano al neutro ($\text{pH} = 5.8 - 7.2$) (tabla 5.1) y en ellos se observan cristales de sulfuros metálicos en los que no son visibles los signos de oxidación

El método de construcción del depósito “El Fraile” permitió la separación granulométrica de los jales. Las fracciones finas se acumularon en el denominado “vaso” y las fracciones gruesas se utilizaron para formar la cortina contenedora del depósito, al cual se le domina “talud”.

El “vaso” ocupa aproximadamente las dos terceras partes ($2/3$) del depósito. Esta parte de los jales está cubierta con una capa de unos 40 cm de espesor que tiene un pH de 7.5 (clastos de lutitas en matriz calcárea). Sobre el material que cubre los jales del “vaso” crece abundante vegetación autóctona, lo que hace que esté integrada al paisaje natural. La cubierta sobre los jales del “vaso” y la granulometría de los mismos ha minimizado el avance de los agentes oxidantes (agua y aire)

hacia las partes inferiores del depósito, por lo que en esta parte, el desarrollo de la ZO es muy limitado (espesores de unos 10 – 20 cm).

Los jales del “talud” ocupan aproximadamente 1/3 parte del depósito (6.6 hectáreas). La zona de oxidación (ZO) en el “talud” se inicia en la superficie y se extiende hasta unos 65 – 120 cm de profundidad. En la ZO se distinguen capas cementadas y No cementadas. En las capas No cementadas se registraron valores de pH ácidos ($\text{pH} < 2.8$) y bajo éstas, los valores de pH se incrementan hasta 4.4. Este incremento del pH causa la precipitación de fases que contienen Fe^{3+} , que forman las capas cementadas. La zona de transición (ZT) y la de jales inalterados (ZJI) subyacen a la capa cementada de Fe; y los pH registrados en estos jales inalterados son cercanos al neutro ($\text{pH} = 5.6 - 7.2$). Esto sugiere que la capa cementada funciona como una barrera que limita el avance del frente de oxidación hacia las capas inferiores del depósito de jales.

6.2 Capacidad de generación potencial de drenaje ácido

Los resultados de los análisis en las muestras de jales sugieren que de acuerdo a la composición química y mineralógica y a los valores de pH de sus lixiviados; en el depósito “El Fraile” existen dos tipos de jales por su capacidad potencial para generar drenaje ácido: grupo de “Jales A” (que son generadores potenciales de acidez); y grupo de “Jales B” (que son No generadores potenciales de ácido).

a) Jales generadores potenciales de drenaje ácido (Jales A): Este tipo de jales corresponde a la mayor parte del depósito estudiado y se identificaron con 13 muestras (superficiales) colectadas durante el muestreo I y 25 muestras (superficiales y profundas) colectadas durante el muestreo II. Estos jales se distribuyen en las tres diferentes zonas identificadas en la zonificación vertical: ZO, ZT y ZJI. Entre los minerales neutralizadores potenciales de drenaje ácido no se detectó a los carbonatos (calcita) y solamente se identificó a minerales aluminosilicatados que no han sido capaces de neutralizar la acidez producida por la oxidación de los sulfuros metálicos en la ZO; por lo que los jales de la ZO y sus lixiviados son ácidos (mediana del $\text{pH} = 2.3 - 4.1$. tabla 5.5).

b) Jales “NO” generadores potenciales de drenaje ácido (Jales B): Este tipo de jales corresponde a una parte limitada del depósito estudiado. Se localizan sobre la superficie de los jales oxidados del denominado “talud”. Estos jales se identificaron con 3 muestras superficiales colectadas durante el muestreo I (1 muestra de jales inalterados y 2 muestras de jales oxidados), que corresponden a un 19% del total de muestras superficiales analizadas. Los minerales potenciales neutralizadores, entre los que destaca la calcita que fue identificada en los jales inalterados, fueron capaces de neutralizar la acidez producida por la oxidación de los sulfuros metálicos, por lo que el pH de los extractos de estos jales (oxidados) es cercano al neutro (pH = 6.4 – 6.7. tabla 5.6)

6.3 Procesos geoquímicos que controlan la movilidad de los metales y metaloides potencialmente tóxicos (MMPT) en los jales “El Fraile”

La movilidad de los MMPT en los jales “El Fraile” está gobernada por diferentes procesos geoquímicos que se identificaron en este estudio: oxidación, neutralización, precipitación, disolución y sorción. La intensidad de estos procesos está en función de la reactividad y cantidad de los minerales productores y neutralizadores potenciales de drenaje ácido.

6.3.1 Procesos geoquímicos identificados en los jales generadores de drenaje ácido (grupo de “Jales A”)

En este tipo de jales, la oxidación de los sulfuros metálicos y la subsiguiente generación de acidez ha sido intensa y la disolución y alteración de los minerales neutralizadores no ha sido suficiente para llevar a pH neutro a los lixiviados de estos jales, lo cual se debe a:

- Los minerales neutralizadores identificados en este tipo de jales son aluminosilicatos con reactividad limitada de acuerdo a la escala relativa propuesta por Morin y Hutt (2000).

- Considerando la composición química y mineralógica en los jales se infiere que el contenido de los sulfuros metálicos es mayor que el contenido de los minerales neutralizadores.

6.3.1.a. Minerales generadores de drenaje ácido (sulfuros metálicos)

El principal sulfuro metálico que se identificó en este tipo de jales de la ZJI es la pirita (FeS_2). También se observaron esfalerita (ZnS), calcopirita (FeCuS_2) y galena (PbS).

El porcentaje de los sulfuros metálicos, determinado por conteo en las briquetas de algunas muestras seleccionadas de jales de la ZJI, varía entre 10 y 18%. El sulfuro metálico dominante es la pirita cuyo porcentaje varía entre 8 y 15%, seguido por la galena y calcopirita ($< 1\%$). Aunque la esfalerita no fue observada por MO en las muestras seleccionadas, se logró identificar en las muestras concentradas por DRX, lo cual indica que debe existir en porcentajes superiores a la galena y calcopirita, los cuales no se identificaron por DRX.

Con base en la composición química de los jales inalterados de la ZJI, se realizó el cálculo para determinar el contenido de sulfuros metálicos (tabla 6.1), considerando que los elementos involucrados (Fe, Zn, Cu y Pb) están asociados únicamente con los sulfuros metálicos correspondientes; por lo que se puede incurrir en la sobreestimación del cálculo. Este procedimiento ha sido utilizado en otros estudios de jales (Holmstrom et al 2001).

Los resultados del cálculo basados en la composición química indican que el contenido de sulfuros metálicos varía entre 13.0% y 30.9% con una mediana de 18.7%. El mineral dominante es la pirita (10.3% - 25.5% con una mediana de 14.6%) seguido por la esfalerita (2.4% - 4.9% con una mediana de 3.7%), la galena (0.22%-0.40% con una mediana de 0.36%) y la calcopirita (0.07-0.14% con una mediana de 0.09%) (tabla 6.1)

Composición química (%) por FRX e ICP-AES				Composición (%) mineralógica			
Elemento	mediana	mínimo	máximo	Mineral	mediana	mínimo	máximo
Fe ₂ O ₃	13.24	9.38	23.19	pirita	14.6	10.3	25.5
Zn	2.45	1.62	3.27	esfalerita	3.7	2.4	4.9
Pb	0.315	0.1891	0.347	galena	0.36	0.22	0.40
Cu	0.031	0.0257	0.05	calcopirita	0.09	0.07	0.14
				TOTAL	18.7	13.0	30.9
Peso Molecular (PM1)	Peso Molecular (PM2)	Factor: PM1/PM2	Composición mineralógica (%) = Composición química (%) x PM1/PM2				
pirita (FeS ₂) PM = 175.81	Fe ₂ O ₃ PM=159.69	1.100945582					
Esfalerita (ZnS) PM=97.44	Zn PM = 65.38	1.490364026					
Galena (PbS) PM=239.26	Pb PM=207.2	1.15472973					
calcopirita (CuFeS ₂) PM=183.51	Cu PM=63.546	2.887829289					

Tabla 6.1 Cálculo de la composición mineral a partir de la composición química de los sulfuros metálicos

6.3.1.b. Minerales neutralizadores de drenaje ácido

De los minerales reportados que pueden contribuir a la neutralización del drenaje ácido (Morin and Hutt 2001), en los jales inalterados de este grupo, solamente se identificaron minerales aluminosilicatados: plagioclasas (CaAl₂Si₂O₈), epidota (Ca₂Al_{2.4}Fe_{0.6} Si₃O₁₃), clorita (Mg₅Al₂Si₃O₁₀(OH)₈), ortoclasa (KAlSi₃O₈) y muscovita (KAl₃Si₃O₁₀(OH)₂). Adicionalmente se identificó a la ilvaíta (CaFe₂(Fe,Mn)Si₂O₈(OH)) (apéndices 1 y 2 y Figura 5.4a).

Las técnicas de análisis mineralógico utilizadas no permitieron cuantificar el contenido de estos minerales en los jales de estudio; y debido a que los mismos elementos pueden formar parte de diferentes minerales, no se consideró apropiado estimar su contenido con base en la composición química como se hizo con los sulfuros metálicos.

De los minerales identificados en los jales de "El Fraile" y que tienen capacidad de consumir ácido al alterarse, la plagioclasa es más susceptible a alterarse en comparación con la ortoclasa y la muscovita. Las plagioclasas se alteran totalmente en las primeras etapas del proceso de alteración, mientras que los feldespatos-K

(ortoclasa) lo hacen parcialmente (Faure 1980). Morin y Hutt (2001) reportan la siguiente reactividad relativa (escala: 1 – 0) para los minerales neutralizadores potenciales identificados en los jales de estudio:

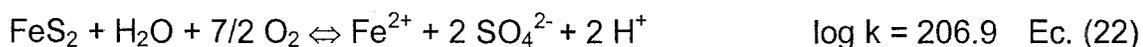
- feldespatos cálcicos (anortita) = 0.6
- epidota y clorita = 0.4
- feldespatos potásicos y muscovita = 0.01

6.3.1.c. Procesos geoquímicos identificados

c.1 Oxidación de los sulfuros metálicos

▪ Pirita

La oxidación de la pirita en los jales de estudio puede ser descrita a través de las reacciones (22) y (23) reportadas por Stumm y Morgan (1996); las cuales indican la liberación de protones (H^+), sulfatos (SO_4^{2-}) y Fe^{3+} .

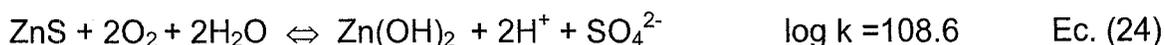


En la capas “no compactas” de la ZO donde los jales son ácidos, es muy probable que la oxidación sea catalizada por las bacterias “*Thiobacillus ferrooxidans*”, cuya presencia ha sido identificada, en estos jales, en estudios realizados por la Facultad de Química de la UNAM (comunicación verbal).

▪ Esfalerita

La oxidación de la esfalerita de los jales de estudio se puede describir a través de la reacción (24) reportada por Jennings et al. (2000) y la reacción (25) reportada por

Lindsay (1979). Las reacciones (24) y (25) indican que la oxidación de la esfalerita no libera protones (H^+); pero si libera sulfatos (SO_4^{2-}) y Zn^{2+} .



En condiciones ácidas el compuesto $Zn(OH)_2$ es inestable (Lindsay 1979):



- **Galena**

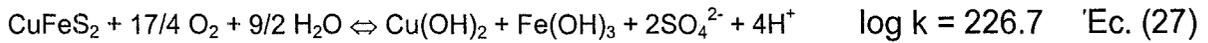
La oxidación de la galena en los jales de estudio se puede describir a través de la reacción (26) reportada por Jennings et al. (2000), lo que significa que este proceso provoca la precipitación del mineral secundario denominado anglesita ($PbSO_4$) que es poco soluble (Betejtin 1970). La reacción (26) indica que la oxidación de la galena, además de no liberar protones (H^+), no libera al ambiente ni sulfatos (SO_4^{2-}) ni Pb^{2+}



- **Calcopirita**

La oxidación de la calcopirita de los jales de estudio se puede describir a través de la reacción (27) reportada por Jennings et al. (2000) y la reacciones (28) y (29)

reportadas por Appelo y Postma (1993). La reacción (27) indica que la oxidación de la calcopirita libera protones (H^+) y sulfatos (SO_4^{2-}).



Sin embargo, en condiciones ácidas el compuesto $Fe(OH)_3$ es inestable al igual que $Cu(OH)_2$ (Appelo y Postma 1993) y por lo tanto se liberan Fe^{3+} y Cu^{2+} al consumir los protones liberados.



c.2 Precipitación de minerales secundarios en la zona de oxidación

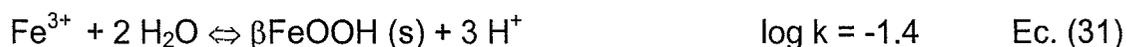
- **Minerales secundarios precipitados a partir de los productos de la oxidación de los sulfuros metálicos**

Oxihidróxidos de Fe

En los jales de la zona de oxidación se identificaron los siguientes minerales secundarios de Fe: goetita ($\alpha FeOOH$), lepidocrocita ($\gamma FeOOH$), akaganeita ($\beta FeOOH$) y hematita (Fe_2O_3) (apéndices 1 y 2, Figuras 5.5 y 5.13).

La identificación de estos oxihidróxidos de Fe en los jales oxidados de "El Fraile", sugiere que el Fe^{3+} , producido por la oxidación de la pirita (reacciones 22 y 23) y de la calcopirita (reacciones 27 y 28), precipitó para formar los minerales secundarios

identificados. Las siguientes reacciones reportadas por Lindsay (1979) ilustran la formación de los oxihidróxidos de Fe:



La presencia de goetita, lepidocrocita, akaganeita y hematita es la causa de la coloración café-amarillo-roja de los jales de la zona de oxidación del depósito "El Fraile"

Sulfato de Plomo (anglesita)

En jales oxidados se identificaron pequeñas partículas que por su composición química pueden ser identificadas como anglesita "PbSO₄" (ver Figura 5.9); que de acuerdo a la reacción (26), es el producto principal de la oxidación de la galena (PbS).

▪ Minerales secundarios precipitados a partir de los productos de oxidación de los sulfuros metálicos y de la alteración de los minerales aluminosilicatados

Las reacciones (22), (24) y (27) indican que la oxidación de los sulfuros metálicos de los jales "El Fraile" permite la liberación de protones (H⁺). Los protones generados propician la alteración de los aluminosilicatos y la subsiguiente liberación de cationes que permite la precipitación de los siguientes minerales secundarios:

Caolinita y yeso

Los protones producidos por la oxidación de los sulfuros metálicos son consumidos por la disolución incongruente de la plagioclasa ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), lo que tiene como consecuencia la liberación de iones de calcio (Ca^{2+}) y la precipitación de caolinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) de acuerdo a la reacción (34) reportada por Faure (1980). La caolinita ha sido identificada en los jales de la zona de oxidación (Figuras 5.5 y 5.13).

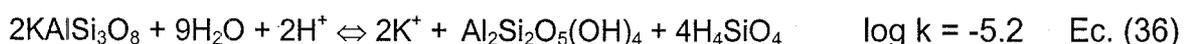


De manera similar se puede decir que la alteración de la ilvaíta ($\text{CaFe}_2(\text{Fe},\text{Mn})\text{Si}_2\text{O}_8(\text{OH})$) y la epidota ($\text{Ca}_2\text{Al}_{2.4}\text{Fe}_{0.6}\text{Si}_3\text{O}_{13}$), al consumir protones, contribuyen a aumentar la concentración de iones calcio (Ca^{2+}), que al encontrar en el medio iones sulfato (SO_4^{2-}), liberados por la oxidación de los sulfuros metálicos, tienden a precipitar como yeso (índice de saturación > 0 , apéndice 11) de acuerdo a la reacción (35). El yeso es el mineral secundario más abundante en los jales de la zona de oxidación (apéndices 1 y 2, Figuras 5.5 y 5.13)



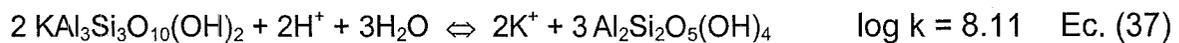
Caolinita y jarosita – K

La alteración de la ortoclasa (KAlSi_3O_8), al consumir protones liberan al ambiente iones potasio (K^+) y puede ocurrir la precipitación de la caolinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) de acuerdo a la reacción (36) reportada por Faure (1980). La caolinita ha sido identificada en los jales de la zona de oxidación (Figuras 5.5 y 5.13)

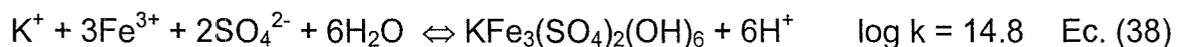


En muestras de jales de la zona de oxidación, se observó que algunas partículas de feldespatos – K presentan un avanzado estado de alteración y en cambio, otros permanecen inalterados (Figura 5.2), lo que termodinámicamente se explica por el valor negativo de la constante de equilibrio y que es consistente con lo afirmado por Faure (1980) acerca de que los feldespatos–K se alteran parcialmente y no totalmente como es el caso de los feldespatos – Ca.

De igual modo, la alteración de la muscovita ($\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), al consumir protones libera iones potasio (K^+) y ocurre la precipitación de la caolinita de acuerdo a la reacción (37) reportada por Faure (1980).

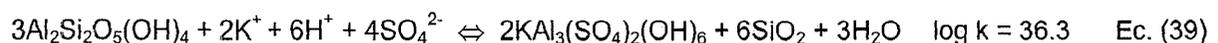


Los iones K^+ en presencia de Fe^{3+} y SO_4^{2-} tienden a precipitar como jarosita – K (índice de saturación > 0, apéndice 11) y contribuye a mantener condiciones ácidas de acuerdo con la reacción (38) reportada por McGregor et al (1998)



Alunita

La caolinita producida por la alteración de los minerales aluminosilicatados (reacciones 34, 36, 37) en presencia de SO_4^{2-} y H^+ (productos de la oxidación de los sulfuros metálicos) y de K^+ (producto de la alteración de los aluminosilicatos) tiende a precipitar como alunita ($\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$) a través de la reacción (39) reportada por Pirajno (1995).



- **Minerales secundarios de arsénico y plomo precipitados a partir de los productos de oxidación de los sulfuros metálicos y de disolución de minerales de plomo**

Beudantita

La beudantita ($\text{PbFe}_3(\text{AsO}_4)(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$) es un mineral secundario que contiene plomo y arsénico; que pertenece al grupo de la alunita al igual que la jarosita (Jambor 1999) y que ha sido reportada como un control importante de la movilidad del As y Pb en jales ácidos (Roussel et al. 2000, Gieré et al. 2003). La existencia de la beudantita en los jales de estudio fué ampliamente demostrada (ver sección 5.2.2.b y c).

Aunque el principal mineral que contiene As en jales es la arsenopirita y ésta no fue identificada en los jales estudiados, es probable que las altas concentraciones de As registradas se deban a que su presencia está asociada a impurezas en la pirita, que es un fenómeno frecuente (Betejtin 1970); lo que significa que la oxidación de la pirita, además de liberar los productos indicados en las reacciones (22) y (23) puede liberar As en su forma más oxidada (arseniatos).

La formación de la beudantita en los jales de estudio puede ser explicada por los siguientes mecanismos:

Precipitación directa

Se identificaron partículas asociadas a carbonato de plomo en los jales oxidados con pH cercano al neutro (Figura 5.8), por lo que se puede inferir que al bajar el pH del medio, estos carbonatos de plomo pueden disolverse (en los jales oxidados y ácidos) y liberar al ambiente iones de Pb^{2+} de acuerdo a la reacción (40) reportada por Lindsay (1979).

y liberar al ambiente iones de Pb^{2+} de acuerdo a la reacción (40) reportada por Lindsay (1979).



Los arseniatos (H_2AsO_4^-), el Fe^{3+} y SO_4^{2-} (productos de la oxidación de los pirita) y el Pb^{2+} (disolución de carbonatos de plomo) son los reactivos necesarios para la precipitación de la beudantita, a través de la reacción (41) propuesta por Roussel et al. (2000), cuyo producto de solubilidad ($K_s = 10^{-15}$) lo calcularon utilizando los datos termodinámicos de la plumbojarosita (por ser muy similar a la beudantita) ya que no existen datos reportados para la beudantita.



Reemplazamiento de plumbojarosita por beudantita

La plumbojarosita ($\text{Pb}[\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6]_2$) fue identificada en las muestras de jales oxidadas (Figuras 5.6, 5.12) y considerando que ha sido reportada la capacidad de los arseniatos para sustituir a los sulfatos en las jarositas (Foster et al 1998), se puede interpretar que en los jales de estudio es posible que los arseniatos hayan sustituido a los sulfatos en las plumbojarositas para formar beudantita.

c.3 Sorción de MMPT en superficies de minerales secundarios de Fe

El microanálisis de las partículas de oxihidróxidos de Fe indica que éstos contienen As, Zn, Cu y Pb (Figuras 5.7, 5.10, 5.15) y considerando la capacidad de los oxihidróxidos de Fe para retener en su superficies (vía sorción) especies aniónicas (arseniatos) y catiónicas (Zn^{2+} , Cu^{2+} y Pb^{2+}), se puede inferir que éstos han sido retenidos en las superficies de los oxihidróxidos de Fe.

La sorción de las especies acuosas de As (V) en las superficies de los oxihidróxidos de Fe puede ser descrita a través de la reacción (42) reportada por Wang and Reardon (2001)



La sorción del Cu^{2+} en los oxihidróxidos de Fe puede ser descrita a través de la reacción (43) (Stum 1992) y la de Pb^{2+} a través de la reacción (44) (Appelo y Postma 1993). De manera similar, la sorción de Zn^{2+} puede ser descrita a través de la reacción (45).



Adicionalmente, se observó que los hidroxil-sulfatos de Fe (jarositas) contienen Zn (Figuras 5.14b y 5.16b) lo que sugiere que los iones de Zn^{2+} está sorbidos (coprecipitados) en las superficies de las jarositas. Este proceso es congruente con lo reportado por McGregor et al (1998) acerca de la sorción de Zn en jarositas como un control de la movilidad del Zn en jales de sulfuros metálicos.

c.4 Disolución–desorción en las diferentes zonas identificadas en el depósito de jales “El Fraile”

c.4.1 Zona de jales inalterados (ZJI) y Zona de transición (ZT)

En estas zonas se registraron valores de pH cercanos al neutro (5.7 – 7.1 en tabla 5.1). De los elementos químicos potencialmente tóxicos asociados a los minerales productores de acidez se registraron concentraciones solubles de Fe, Zn, Cd, Pb y sulfatos; las cuales parecen no estar relacionadas con los procesos de oxidación que han ocurrido en los jales de la ZO, pero que podrían estar relacionados con la disolución de algunos minerales primarios identificados en ambas zonas.

▪ Hierro (Fe)

Las concentraciones solubles de Fe varían entre 0.3 y 3.3 mg/L. La modelación hidrogeoquímica indica que los lixiviados de estos jales están sobresaturados con respecto a las fases sólidas de Fe: ferrihidrita, goetita, hematita, jarosita, maghemita, ferrita-Cu, ferrita-Mg y lepidocrocita (apéndices 12 y 13). En la gráfica de solubilidad vs pH (Figura 5.27), se observa que las concentraciones solubles experimentales de Fe en la ZJI y ZT puede estar controlada por la disolución de los oxihidróxidos de Fe, que fueron identificados de manera indiferenciada por microscopía óptica en los jales de la ZJI (Figura 5.1), y que existían en el yacimiento que dio origen a los jales de estudio (ver tabla 2.1 en la sección 2.2.7).

▪ Sulfatos (SO_4^{2-})

Las concentraciones de sulfatos varían entre 1209 y 4868 mg/L. La modelación hidrogeoquímica indicó que los lixiviados de estos jales están sobresaturados con respecto al yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) y jarosita (apéndices 12 y 13) y de estos minerales solamente se identificó al yeso.

El análisis mineralógico indica que los sulfuros metálicos de la ZT y ZJI no muestran signos visibles de oxidación y por lo tanto, la presencia de yeso en los jales de estas zonas o se debe a procesos de oxidación muy incipientes que no se detectaron en este estudio; o bien que el yeso precipita a partir de los reactivos utilizados en el procesos de beneficio (sulfatos de Zn y Cu, y $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (ver sección 2.2.6)).

Considerando que el yeso fue observado en las muestras de jales de ambas zonas y en cambio no se identificó a la jarosita (apéndices 1 y 2), y que termodinámicamente es más favorecida la reacción de disolución del yeso (ver reacciones 35 y 38); se puede inferir que la concentraciones de los sulfatos en las ZJI y ZT están controladas, principalmente, por la disolución del yeso.

De igual manera las concentraciones de Ca^{2+} (399 – 530 mg/L en tabla 5.5) registradas en los jales de las ZJI y ZT pueden explicarse por la disolución del yeso si se considera que la calcita no fue observada en estos jales; y aunque existiera en concentraciones bajas y no detectables por el método de análisis, su disolución en medio neutro es menos posible que la del yeso, ya que la constante de equilibrio para la reacción de disolución de la calcita ($\log k = -8.5$) es menor que la del yeso ($\log k = -4.6$).

▪ **Zinc (Zn) y cadmio (Cd)**

Las concentraciones solubles de Zn varían entre 5.8 y 1259.2 mg/L y las de Cd entre 0.3 y 71.4 mg/L. La modelación hidrogeoquímica indicó que los lixiviados de estos jales están sobresaturados con respecto a fases sólidas de carbonatos de Zn y Cd (apéndices 12 y 13). Ninguna de estas fases fue identificada por técnicas directas en este estudio. Sin embargo, Flores (2002) reporta la existencia de la smithsonita en los jales de “El Fraile”, por lo que se puede inferir que la solubilidad del Zn y Cd en las ZJI y ZT puede estar controlada por la disolución de los carbonatos de los respectivos metales.

Adicionalmente, las concentraciones solubles de Zn en los jales de la zona ZT y ZJI, se pueden explicar por el hecho de que en el proceso de beneficio se utilizaron sales solubles de Zn (ver sección 2.2.6).

▪ Plomo (Pb)

Las concentraciones solubles de Pb varían entre < 0.01 y 1.9 mg/L. La modelación hidrogeoquímica indicó que los lixiviados en algunas muestras de los jales de la zona de jales inalterados están sobresaturados (o muy cerca del equilibrio) con respecto a los carbonatos de plomo (apéndices 12 y 13). Aunque ninguna fase de carbonato de plomo fue identificada por técnicas directas en los jales de la ZT y ZJI, su presencia en los jales no oxidados se puede explicar, ya que la cerusita (PbCO_3) está reportada como un mineral que formaba parte del yacimiento del cual provienen los jales de estudio (ver tabla 2.1 en la sección 2.2.7), por lo que se puede inferir que las concentraciones solubles de Pb en las ZJI y ZT pueden estar controladas por la disolución de la cerusita.

c.4.2 Zona de oxidación

En la zona de oxidación (ZO) se identificaron capas con diferente magnitud de concentraciones solubles de los elementos asociados a los principales minerales productores y neutralizadores de drenaje ácido. Las diferencias en la magnitud de estas concentraciones se explican por los diversos valores de pH en las capas de la ZO; ya que la acidez del medio y naturaleza de los minerales secundarios, resultan en la mayor o menor magnitud de la disolución de estos minerales secundarios.

El valor de tendencia central para los valores de pH en las capas “No compactas” ($\text{pH} = 2.3$) es menor con relación a las capas compactas “Capa de Fe” ($\text{pH} = 4.1$) (tabla 6.1). Sin embargo entre las capas “No compactas” existen variaciones de pH ($2.0 - 4.0$), lo que es determinante para marcar diferencias entre las concentraciones solubles de los MMPT asociados a los jales en esta capas. En términos de valores de tendencia central (mediana) en las capas “No compactas” se registraron las concentraciones solubles más altas de Fe, Cu y Ca. En cambio, en la “Capa compacta” (capa de Fe) se obtuvieron las concentraciones solubles más altas de Zn, Cd, Pb, Mg, Mn, Al, Na, K y sulfatos. En el caso del As las medianas de las concentraciones solubles son iguales en los dos tipos de capas.

Elemento	Zona de Oxidación					
	Capa No compacta			Capa de hierro		
	Mediana	D.Est.	Intervalo	Mediana	D.Est.	Intervalo
pH	2.3	0.6	2.0-4.0	4.1	0.5	3.5-4.4
Zn	357.4	377.3	36.7-1309	2415.0	1027.5	645.3-2434.7
Cd	4.2	5.3	0.4-18.2	25.0	14.2	3.6-30.6
Fe	240.6	962.2	1.5-2568	6.8	378.2	1.5-659.1
Pb	0.1	0.0	<0.01-0.12	0.4	0.4	<0.01-0.62
Cu	9.9	7.3	1.13-18.3	4.7	20.7	0.5-38.2
Ca	453.5	27.1	433.0-509.0	411.0	20.7	395.0-436.0
Mg	85.5	68.0	14.7-238	257.0	101.6	147.0-350.0
Mn	82.7	93.2	9.6-328	421.0	110.9	396.6-599.7
As	0.1	57.6	0.01-164	0.1	0.2	0.05-0.37
Al	138.0	134.1	<3.0-370.0	182.0	162.2	12.8-337.0
Na	0.8	0.5	0.20-1.90	1.3	0.4	0.8-1.6
K	0.8	0.4	0.10-1.30	1.5	0.6	0.6-1.8
SO ₄ ²⁻	4373.0	2870.0	1534-10085	6730.5	2437.9	3714.6-8540.5

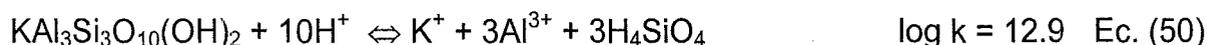
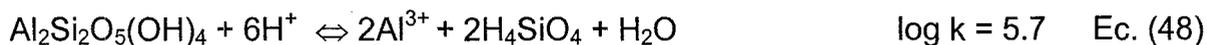
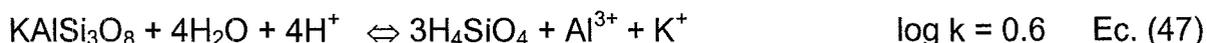
Nota: No se toma en cuenta la muestra M15, en cuyo lixiviado se obtuvieron un pH = 7.3

Tabla 6.2 Concentraciones solubles de MMPT y EM en la zona de oxidación

c.4.2.1 Elementos asociados a los minerales con potencial de neutralización

La alteración de aluminosilicatos como la clorita y los feldespatos puede liberar Fe, Ca, Mg, K y Na a la solución de poro en los jales (Lin 1997). En este trabajo, las concentraciones solubles de Al, Mg, Ca, K y Mg en los lixiviados puede ser resultado de la disolución, en medio ácido, de los minerales que los contienen y que fueron identificados por técnicas directas (apéndices 1 y 2, Figura 5.5. y 5.13): feldespatos-Ca ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), feldespatos-K (KAlSi_3O_8), caolinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), alunita ($\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$), muscovita ($\text{KA}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), clorita ($\text{Mg}_5\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$).

Las reacciones de disolución de estos aluminosilicatos en medio ácido han sido reportadas por diferentes autores (Faure 1980, Allison et al. 1991, Linsay 1980) y las constantes de equilibrio (> 0), calculadas a partir de los valores de energía libre de formación, indican que la disolución de estos minerales es posible en medio ácido.



c.4.2.2 Elementos asociados a minerales generadores de drenaje ácido

A continuación se detalla el comportamiento de las concentraciones solubles de los principales elementos asociados a los minerales productores de drenaje ácido en las diferentes capas de la zona de oxidación

- **Hierro (Fe)**

Capas “No compactas”

En las capas “No compactas” se obtuvieron concentraciones solubles de Fe que varían entre 1.5 y 2568 mg/L (tabla 6.2). La modelación hidrogeoquímica indicó que los lixiviados de estos jales están sobresaturados con respecto a las fases sólidas de Fe: goetita, hematita, jarosita, ferrita-Cu, ferrita-Mg y lepidocrocita (apéndice 11)

Las mayores concentraciones se registraron en los jales ácidos del “talud” de Fraile Sur. En el apéndice 9 se observa que la concentración soluble de Fe en las dos muestras de estos jales M19 (pH = 2.0) y M20 (pH = 2.2) es 2568 y 2228 mg/L respectivamente. Las fases sólidas que contienen Fe y que se identificaron en los

jales, por técnicas directas, en estas capas fueron la akageneita, lepidocrocita, jarosita-K y beudantita (apéndices 1 y 2, Figura 5.5).

Las menores concentraciones en las capas “No compactas” se registraron en los jales del “talud” de Fraile Norte y del “vaso” de ambas partes del depósito (Fraile Norte y Sur). Con excepción de la muestra M15 (pH = 7.3 y $Fe_{\text{soluble}} = 0.4$ mg/L), en las muestras de jales del “talud” de Fraile Norte, el pH de los lixiviados varía entre 2.3 y 2.5 y se registraron concentraciones solubles de Fe entre 29 y 631 mg/L. En el apéndice 9 se observa que las concentraciones solubles de Fe en las muestras de los jales del “vaso” de ambas partes del depósito M10 (pH = 2.9) y M24 (pH = 4.0) son 5.8 y 1.51 mg/L respectivamente. Las fases sólidas que contienen Fe y que se identificaron, por técnicas directas, en estas capas fueron goetita, hematita, jarosita-K y beudantita (apéndices 1 y 2, Figura 5.5).

Considerando que:

a) La beudantita y la jarosita–K son muy poco solubles en medio ácido (reacciones 38 y 41)

b) La solubilidad de los oxihidróxidos de Fe desciende en el siguiente orden: akaganeita > ferrihidrita > lepidocrocita > maghemita > hematita > goetita (Cornell and Schwertman 1996)

c) La hematita y la goetita son los oxihidróxidos de Fe más estables aún en medio ácido [(sus reacciones de disolución presentan los menores valores de constante de equilibrio en comparación con otros oxihidróxidos de Fe (reacciones 30, 31, 32 y 33)];

Se puede interpretar que las altas concentraciones solubles experimentales de Fe en las capas “No compactas” de Fraile Sur son producto de la disolución de la akageneita y lepidocrocita. En cambio, en los jales del “talud” de Fraile Norte” y del “vaso” de ambas partes del depósito, donde se registraron concentraciones relativamente bajas, la solubilidad del Fe está controlada por la disolución de la

hematita y la goetita. Las diferencias en la magnitud de las concentraciones en las muestras pueden ser explicadas por los valores de pH de cada una de las mismas.

▪ Capas “Compactas” (Capas de Fe)

En las capas “Compactas” (capa de Fe) se obtuvieron concentraciones solubles de Fe que varían entre 1.5 y 659 mg/L (tabla 6.2). La modelación hidrogeoquímica indicó que los lixiviados están sobresaturados con respecto a las fases sólidas de Fe: ferrihidrita, goetita, hematita, jarosita, maghemita, ferrita-Cu, ferrita-Mg y lepidocrocita (apéndice 11)

Las mayores concentraciones se registraron en la capa de Fe de los jales del “talud” de Fraile Sur (muestra M21) donde se registró un pH de 3.5 y una concentración de Fe soluble igual a 659 mg/L. Las menores concentraciones de Fe soluble [6.8 mg/L (muestra M2) y 1.5 mg/L (muestra M16)] se registraron en los jales de las capas de Fe del “talud” de Fraile Norte donde se obtuvieron valores de pH entre 4.1 (muestra M16) y 4.4 (muestras M2) (apéndice 9).

Considerando que:

a) La mineralogía identificada en los jales de ambas partes del depósito y relacionada con fases sólidas de Fe es similar: goetita, hematita, beudantita y jarosita (Figura 5.13)

b) La jarosita y la beudantita son estables en medio ácido (reacciones 38 y 41)

Se puede inferir que las concentraciones solubles de Fe obtenidas en las capas compactas están en función del grado de disolución de los oxihidróxidos de Fe identificados y las diferencias en la magnitud de las concentraciones solubles entre las muestras pueden ser explicadas por los diferentes valores de pH de las mismas.

- **Sulfatos (SO_4^{2-})**

Capas “No compactas”

En las capas “No compactas” se obtuvieron concentraciones de sulfatos que varían entre 1534 y 10085 mg/L (tabla 6.2). La modelación hidrogeoquímica indicó que los lixiviados están sobresaturados con respecto al yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), jarosita y AlOHSO_4 (apéndice 11). Las mayores concentraciones se registraron en los jales ácidos del “talud” de Fraile Sur. En el apéndice 9, se observa que la concentración de SO_4^{2-} en las dos muestras de estos jales M19 (pH = 2.0) y M20 (pH = 2.2) es 10085 y 8237 mg/L respectivamente.

Las menores concentraciones en las capas “No compactas”, se registraron en los jales ácidos del “talud” de Fraile Norte; y del “vaso” de ambas partes del depósito (Fraile Norte y Sur). Con excepción de la muestra M15 (pH = 7.3 y $\text{SO}_4^{2-} = 1976$ mg/L), en las muestras de jales del “talud” de Fraile Norte, el pH de los lixiviados varía entre 2.3 y 2.5 y se registraron concentraciones de SO_4^{2-} entre 2278 y 6853 mg/L (apéndice 9). En este mismo apéndice 9, se observa que la concentración soluble de SO_4^{2-} , en las dos muestras de los jales del “vaso” de ambas partes del depósito M10 (pH = 2.9) y M24 (pH = 4.0), son 2047 y 1534 mg/L respectivamente.

Los minerales identificados, por técnicas directas, en los jales de las diferentes partes del depósito y relacionada con fases sólidas que contienen SO_4^{2-} , son el yeso, jarosita-K, y beudantita (apéndice 1 y 2, Figura 5.5). Considerando que la jarosita-K y la beudantita son relativamente estables en medio ácido (reacciones 38 y 41), las concentraciones de SO_4^{2-} obtenidas en las capas “No compactas” pueden ser el resultado de la disolución del yeso y las diferencias en la magnitud de las concentraciones entre las muestras pueden ser explicada por los valores de pH de las mismas.

Capas “Compactas” (Capas de Fe)

En las capas compactas (capa de Fe) se obtuvieron concentraciones de SO_4^{2-} que varían entre 3715 y 8541 mg/L (tabla 6.2). La modelación hidrogeoquímica indicó que los lixiviados están sobresaturados con respecto al yeso, jarosita, alunita y AlOHSO_4 (apéndice 11).

Las mayores concentraciones se registraron en la capa de Fe de los jales del “talud” de Fraile Sur (muestra M21) donde se registró un pH de 3.5 y una concentración de SO_4^{2-} igual a 8541 mg/L (apéndice 9). Las menores concentraciones de SO_4^{2-} [6731 mg/L (muestra M2) y 3715 mg/L (muestra M16)] se registraron en los jales de las capas de Fe del “talud” de Fraile Norte donde se midieron valores de pH entre 4.4 (muestra M2) y 4.1 (muestras M16) (apéndice 9).

Considerando que los minerales identificados por técnicas directas en los jales de ambas partes del depósito y relacionada con fases sólidas de SO_4^{2-} son similares [yeso, beudantita, jarosita y alunita (Figura 5.13)] y que la jarosita y beudantita son estables en medio ácido (reacciones 38 y 41); se puede inferir que las concentraciones de SO_4^{2-} obtenidas en las capas compactas están en función del grado de disolución del yeso y de la alunita que es soluble en medio ácido (reacción 49) y las diferencias en la magnitud de las concentraciones pueden ser explicadas por las diferencias de pH.

▪ Zinc (Zn) y cadmio (Cd)

En las capas “No compactas” se obtuvieron concentraciones solubles de Zn varían entre 37 y 1309 mg/L; y de Cd que varían entre 0.4 y 18 mg/L (tabla 6.2). En las capas “Compactas” (capas de Fe) se obtuvieron concentraciones solubles de Zn entre 645 y 2435 mg/L y de Cd entre 3.6 y 30.6 mg/L (tabla 6.2)

La modelación hidrogeoquímica indicó que los lixiviados están insaturados con respecto a las principales fases sólidas de estos metales (sulfatos, carbonatos, hidróxidos, óxidos y arseniatos) lo que significa que no hay tendencia a la precipitación de estos compuestos, lo que es congruente con el hecho de que no se identificó a ningún mineral de estos elementos.

Con excepción de las muestras M15 (pH = 7.3, Zn = 1.70 mg/L, Cd = 0.03 mg/L) y M3 (pH = 2.3, Zn = 1309 mg/L, Cd = 18.2 mg/L), en las capas "No compactas" del "talud" de ambas partes del depósito (Fraile Norte y Sur) las concentraciones de Zn y Cd son del mismo orden y varían entre 107 y 695 mg/L para el Zn, y entre 1.1 y 4.5 mg/L para el Cd (apéndice 9). En las muestras de jales de las capas "No compactas" del "vaso" de ambas partes del depósito (M10, pH = 2.9 y M24, pH = 4.0), las concentraciones de Zn (50.4 y 36.7 mg/L) y Cd (0.5 y 0.4 mg/L) (apéndice 9) son más bajas que en las capas "No compactas" del "talud" de ambas partes del depósito.

Para las muestras de jales oxidados de estas capas no se identificaron minerales de Zn o Cd. Sin embargo, se observó que el Zn está contenido en las fases sólidas identificadas como beudantita (Figuras 5.6, 5.11, 5.14 y 5.16) o sorbido en jarosita (Figuras 5.14 y 5.16) y oxihidróxidos de Fe (Figura 5.10). Lo anterior sugiere que en los jales oxidados, las concentraciones solubles de Zn registradas en este estudio pueden estar gobernadas por procesos de sorción - desorción, ya que de acuerdo a lo reportado por Dzombak y Morel (1990) la sorción y desorción de los cationes en las superficies de los oxihidróxidos de Fe ocurre en pequeños intervalos de pH (cerca de 2 unidades de pH). El aporte de la disolución de la beudantita en las concentraciones solubles experimentales Zn puede ser poco importante si se considera que la beudantita es poco soluble en medio ácido (Roussel et al 2000).

Considerando que el comportamiento de las concentraciones solubles de Cd y Zn es similar, lo que es congruente con lo reportado en otros estudios (McGregor et al 1998), se puede inferir que las concentraciones solubles de Cd están controladas por procesos de sorción - desorción en oxihidróxidos de Fe.

Cobre (Cu)

En las capas "No compactas" se obtuvieron concentraciones solubles de Cu entre 1.1 y 18.3 mg/L. En las capas compactas "capa de Fe" las concentraciones solubles de Cu varían entre 0.5 y 38.2 mg/L. La modelación hidrogeoquímica indicó que los lixiviados están sobresaturados con respecto al mineral denominado ferrita-Cu (apéndice 11).

En las capas "No compactas", las mayores concentraciones solubles de Cu (10 – 18 mg/L) se obtuvieron para las muestras con valores de pH entre 2.0 y 2.3 (apéndice 9). Para las muestras de jales con valores de pH más altos (M15: pH = 7.3; M10: pH = 2.9; M24: pH = 4; M13: pH = 2.9) se registraron las menores concentraciones de Cu soluble en mg/L (M15: Cu = 0.01; M10: Cu = 2.1; M24: Cu = 1.1; M13: Cu = 2.1)

En las capas compactas (capa de Fe), la mayor concentración de Cu soluble (38.2 mg/L) se obtuvo para la muestra M21 (pH = 3.5) y las menores concentraciones (0.5 y 4.7 mg/L) se obtuvieron para las muestras M2 (pH = 4.4) y M16 (pH = 4.1) (apéndice 9)

Para las muestras de jales oxidados de estas capas no se identificaron minerales discretos de Cu. Sin embargo, por MEB-EDS se identificó que el Cu está contenido en las fases sólidas identificadas como beudantita (Figuras 5.6, 5.11, 5.14) y en las fases sólidas identificadas como anglesita (Figura 5.9) o sorbido en las superficies de oxihidróxidos de Fe (Figura 5.10, 5.15).

Considerando que la beudantita y la anglesita son poco solubles en medio ácido (Betejtin 1970, Roussel et al 2000), su aporte a las concentraciones solubles de Cu registradas en este estudio es poco importante; por lo que el principal aporte debe de estar asociado a fenómenos de sorción - desorción del Cu que se encuentra sorbido en los oxihidróxidos de Fe.

Plomo (Pb)

En las capas "No compactas" se obtuvieron concentraciones de Pb soluble que varían entre < 0.01 y 0.13 mg/L. En las "Capas compactas" (capa de Fe) las concentraciones de Pb soluble varían entre < 0.01 y 0.62 mg/L. La modelación hidrogeoquímica indicó que los lixiviados están insaturados con respecto a los sulfatos y carbonatos de Pb (apéndice 11).

En las capas "No compactas", las mayores concentraciones de Pb ($0.12 - 0.13$ mg/L) se obtuvieron para las muestras con $\text{pH} = 4.0$ (M24) y $\text{pH} = 7.3$ (M15) (apéndice 9). Para las muestras de jales con valores de pH más bajos ($2.0 - 2.5$) se registraron las menores concentraciones de Pb soluble en mg/L ($< 0.01 - < 0.1$ mg/L). En las "Capas Compactas (capa de Fe), la mayor concentración de Pb soluble (0.62 mg/L) se obtuvo para la muestra M2 ($\text{pH} = 4.4$) y la menor concentración (< 0.01 mg/L) se obtuvo para la muestra M21 ($\text{pH} = 3.5$) (apéndice 9)

En la muestra M15 ($\text{pH} = 7.3$), se observaron partículas de carbonato de Pb, cuya disolución puede estar determinando la concentración soluble de Pb (0.13 mg/L) registrada en esta muestra.

En las muestras de jales ácidos de las capas "No compactas", por MEB-EDS, se identificaron a los siguientes minerales que contienen Pb: beudantita (Figuras 5.6, 5.11), anglesita y plumbojarosita (Figura 5.6, 5.12). Además en estas capas se observó que el Pb puede estar sorbido en superficies de oxihidróxidos de Fe (Figura 5.10). En las capas compactas "capa de Fe", solamente se identificó a la beudantita (Figuras 5.14 y 5.16).

Considerando que la beudantita, la anglesita y plumbojarosita son poco solubles en medio ácido (Betejtin 1970, Roussel et al 2000), se puede inferir que el principal origen de las concentraciones solubles de Pb registradas en este estudio debe de

estar asociado a fenómenos de sorción-desorción de Pb sorbido en los oxihidróxidos de Fe.

- **Arsénico (As)**

En las capas “No compactas” se obtuvieron concentraciones solubles de As que varían entre 0.01 y 164 mg/L (tabla 6.2). Aunque el cálculo de los índices de saturación indicaron que los lixiviados están insaturados con respecto a los principales fases sólidas que contienen arseniatos (apéndice 11), la gráfica de solubilidad vs. pH (Figura 5.27) indica la posible presencia de arseniatos de Pb-Zn-Cu-Fe.

Las mayores concentraciones se registraron en los jales ácidos del “talud” de Fraile Sur. En el apéndice 9, se observa que la concentración de As soluble en las dos muestras de estos jales M19 (pH = 2.0) y M20 (pH = 2.2) es 164 y 101 mg/L respectivamente.

En las muestras de los jales del “talud” de Fraile Norte y del “vaso” de ambas partes del depósito (Frailes Norte y Sur) las concentraciones de As soluble son bajas y varían entre 0.01 y 0.06 mg/L, con excepción de las muestras M1 (pH = 2.3, $As_{\text{soluble}} = 4.0$ mg/L) y M3 (pH = 2.3, $As_{\text{soluble}} = 0.2$ mg/L).

El único mineral identificado en los jales de las capas “No compactas” de las diferentes partes del depósito y relacionado con fases sólidas que contienen As es la beudantita (Figuras 5.5, 5.6, 5.11). Así mismo, por MEB-EDS se observó que el As puede estar sorbido en las superficies de oxihidróxidos de Fe (Figuras 5.7, 5.9, 5.10).

En las “Capas compactas” (capa de Fe) se obtuvieron concentraciones solubles de As entre 0.05 y 0.3 mg/L. Al igual que en las capas “No compactas”, el cálculo de los índices de saturación indicó que los lixiviados están insaturados con respecto a los

principales fases sólidas que contienen arseniatos (apéndice 11) pero la gráfica de solubilidad vs. pH (Figura 5.27) indica la posible presencia de arseniatos de Pb-Zn-Cu-Fe. La mayor concentración de As soluble (0.37 mg/L) se registró en la capa de Fe de los jales del “talud” de Fraile Sur (muestra M21) donde el pH = 3.5. La menor concentración de As soluble (0.05 mg/L) se registró en la capa de Fe de los jales del “talud” de Fraile Norte (muestra M16) donde el pH = 4.1

El único mineral identificado en los jales de las “capas compactas” de las diferentes partes del depósito y relacionado con fases sólidas que contienen As es la beudantita (Figuras 5.13, 5.14, 5.16, 5.19, 5.20). Así mismo, por MEB-EDS se observó que el As puede estar sorbido en las superficies de oxihidróxidos de Fe (Figuras 5.15).

Considerando que la beudantita es poco soluble en medio ácido (Reacción 41) su aporte a las concentraciones solubles de As registradas en este estudio es poco importante; por lo que el principal aporte en las concentraciones solubles de As puede estar asociado a fenómenos de sorción-desorción del As en los oxihidróxidos de Fe.

6.3.2 Procesos geoquímicos identificados en jales “NO” generadores potenciales de drenaje ácido “Jales B”

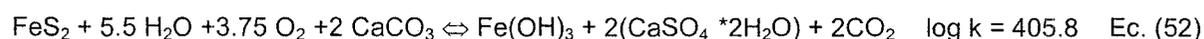
El único sulfuro metálico identificado en los jales inalterados de este grupo fue la pirita; lo cual se debe probablemente a que, en estos jales, solamente se realizó la caracterización mineralógica general por DRX.

Con base en la composición química de la única muestra de jales inalterados de este grupo (F6-13 del apéndice 1 y 2) se estima que el contenido de pirita puede ser de un 6%. Del mismo modo, con base en la composición química no se descarta la presencia de sulfuros de Zn, Pb y Cu en cantidades menores (1% de ZnS; 0.29% de PbS y 0.06% de CuFeS₂).

Los resultados del análisis por DRX indican la presencia de calcita que al disolverse puede consumir la acidez generada por la oxidación de los sulfuros metálicos. Con base en la composición química (F6-13 del apéndice 2) se estima el contenido de calcita en aproximadamente 42 %, que puede ser un valor muy alto si se considera que el Ca además de estar asociado a la calcita está asociado al yeso que fue identificado en estos jales (apéndice 3).

Al igual que para los jales del grupo “Jales A” (generadores potenciales de drenaje ácido); la oxidación de la pirita, en los jales “El Fraile” del grupo “Jales B” (“NO” generadores potenciales de drenaje ácido), se puede describir a través de las reacciones planteadas anteriormente (reacciones 22 – 33); lo que significa que en los jales oxidados han precipitado oxihidróxidos de Fe que es lo que les da la coloración café-amarillo-roja. Entre los oxihidróxidos de Fe identificados por DRX en este grupo de jales están la goetita (αFeOOH) y la hematita (Fe_2O_3) (apéndice 3).

Sin embargo, la acidez generada por la oxidación de la pirita ha sido controlada por la capacidad amortiguadora de la calcita a través de la reacción (52), lo que explica que los extractos de las muestras de los jales oxidados de este grupo (F1-1 y F1-2) tengan un pH cercano al neutro ($\text{pH} = 6.4 - 6.7$) (tabla 5.6 a).



El proceso de oxidación de la pirita acompañado de la neutralización por la calcita involucra la formación de yeso, el cual fue identificado por DRX en los jales oxidados (apéndice 3). La precipitación del yeso es el principal control de las concentraciones solubles de SO_4^{2-} en los jales oxidados de este grupo ($\text{SO}_4^{2-} = 465.3 - 1371.6 \text{ mg/L}$ tabla 5.6a)

6.4 Estimación del peligro potencial que representan los jales expuestos y oxidados del “talud” de los jales “El Fraile” y valoración de la influencia del tiempo de agitación en la magnitud de la concentración soluble de los MMPT

Los resultados de la prueba de peligrosidad en los jales oxidados del “talud” del depósito “El Fraile” indican que en el 77 % de las muestras estudiadas (10 muestras de un total de 13) el pH de los extractos es ácido (pH = 2.4-3.4. tabla 5.6a) y en el restante 23 %, el pH es cercano al neutro (pH = 6.4-6.7). En general, las concentraciones solubles del As y Pb (elementos normados en la legislación mexicana en materia de jales “NOM-141-SEMARNAT-2003”) son menores a los límites permisibles que hacen a un residuo peligroso (límite para As y Pb = 5.0 mg/L). Solamente en 2 muestras de un total de 13 se registraron altas concentraciones solubles de As (14.8 y 28.8 mg/L) y que pertenecen a muestras con pH ácido del “talud” en la parte sur del depósito de jales estudiado (Fraile Sur); lo que significa que solamente los jales del “talud” de la parte Fraile Sur se considerarían peligrosos por la capacidad de movilidad del As. Sin embargo, cuando se controla el pH de los lixiviados (pH cercano al neutro) las concentraciones solubles se reducen significativamente hasta el grado de no representar un riesgo para el entorno natural.

Los experimentos realizados para estimar la influencia del tiempo de agitación en la magnitud de la concentración soluble de los MMPT en los jales “El Fraile” indican que en los jales más ácidos (pH = 2.2 y 2.4) la liberación de Fe, As, Zn, Cd y Cu se da predominantemente al primer día de agitación, lo que puede ser explicado por el hecho de que en estas muestras de jales muy ácidos los MMPT están sorbidos a fases sólidas de Fe, (fenómeno que fue identificado por MEB-EDS), los cuales son inestables en el medio ácido. El poco Pb soluble registrado en estas muestras, se libera al quinto y octavo día de agitación, lo que puede deberse al hecho de que el Pb está precipitado como anglesita o plumbojarosita que son estables en medio ácido.

En los jales con pH de 2.8 y 4.1, la liberación de Zn, Cu y Cd se obtiene predominantemente al tercer día de extracción y la de As y Pb se logra hasta el quinto día de agitación. Este comportamiento sugiere que el Zn, Cd y Cu están asociados a

fases sólidas de Fe vía sorción, y que al ser relativamente estables, a estos pH, solamente con el tiempo van liberando a los elementos que los contienen. Las bajas concentraciones solubles de Pb y As y la dificultad con que se liberan, sugiere que éstos están asociados a fases sólidas muy estables como la beudantita, la cual ha sido ampliamente identificada por métodos directos en los jales de "El Fraile

VII CONCLUSIONES

1. En el sentido vertical, el depósito de jales “El Fraile” está dividido en tres zonas: zona de oxidación (ZO), zona de transición (ZT) y zona de jales inalterados (ZJI). En la ZO los jales están oxidados y son de color café-rojo-amarillo y en la ZJI los jales están inalterados tal y como fueron depositados hace aproximadamente 30 años, son de color gris y están muy húmedos. Entre las ZO y ZJI se desarrolla una zona transicional con predominio de los jales inalterados. La ZO se observa desde la superficie hasta una profundidad que varía entre 35 y 120 cm, sobreyaciendo a los jales de la ZT (de 15 a 80 cm de espesor) que a su vez sobreyace a los de la ZJI.

2. El método de construcción de la presa permitió que en el depósito de jales “El Fraile” se formaran el “vaso” y el “talud”

2.1 El “vaso” está compuesto de los jales más finos y ocupa aproximadamente las dos terceras partes (2/3) del depósito. La ZO en el “vaso” se inicia a unos 35 – 45 cm bajo la superficie, subyaciendo a la capa de relleno y tienen un desarrollo muy limitado (10 – 20 cm de espesor); y no ha avanzado hacia las partes inferiores del depósito.

Aunque jales del “vaso” son potenciales generadores de acidez (en los jales oxidados el pH registrado fue de 2.8 – 4.0), no representan riesgo para el medio ambiente ya que están cubiertos por una capa de clastos de lutitas en matriz calcárea (espesor 35 – 45 cm), y prácticamente no hay posibilidad de que se formen lixiviados al estar aislados de cualquier contacto con corrientes de agua meteórica.

2.2 El “talud” está compuesto de los jales más gruesos (arenas – limos) y ocupa aproximadamente una tercera parte (1/3) del depósito. La ZO en el “talud” se inicia en la superficie y se extiende hasta unos 65 – 120 cm. Dentro de esta zona se distinguen capas de jales cementadas y muy compactas (capa de hierro) con espesores desde 15 hasta 80 cm. La zona de transición (ZT) y de jales inalterados (ZJI) subyacen a la capa cementada de Fe; y los pH registrados en estos jales inalterados son cercanos al neutro (pH = 5.6 – 7.2). Esto sugiere que la capa

cementada funciona como una barrera que limita el avance del frente de oxidación hacia las capas inferiores del depósito de jales.

En un 81% de las muestras estudiadas en la ZO del “talud” se registró un pH ácido (pH = 1.9 - 2.8) y para el restante 19% un pH cercano al neutro (pH = 6.6-7.5). Esto indica que la oxidación de los sulfuros metálicos y la subsiguiente producción de acidez fueron generalizadas en una gran parte de los jales del “talud”; y que solamente en una parte menor, los procesos de neutralización han sido capaces de consumir la acidez generada por la oxidación.

La situación actual de los jales del talud (expuestos al intemperismo) y los resultados de la caracterización geoquímica indican que por lo menos el 80% de los jales superficiales del “talud” (1/3 del depósito), y hasta una profundidad de 1.20 m, representan un riesgo potencial para el medio ambiente; ya que al estar expuestos a la interacción con aguas meteóricas pueden generar drenaje ácido cuyo destino principal es el río Cacalotenango.

3. En el depósito “El Fraile” se identificó que la movilidad de los MMPT está gobernada por la ocurrencia de diferentes procesos geoquímicos: oxidación, neutralización, precipitación, disolución, sorción y desorción. La intensidad de estos procesos geoquímicos está en función de la reactividad y cantidad de los minerales productores y neutralizadores potenciales de drenaje ácido; lo que ha determinado que en los jales “El Fraile” se identifiquen: a) “Jales A”, que son peligrosos por su capacidad potencial para generar de drenaje ácido y b) “Jales B”, que son NO peligrosos por NO ser generadores potenciales de drenaje ácido

4. Los sulfuros metálicos que se identificaron en el grupo de jales generadores potenciales de drenaje ácido (Jales A) fueron la pirita (14.6%), esfalerita (3.7%), calcopirita (0.09%) y galena (0.36%). Entre los minerales potenciales neutralizadores de drenaje ácido que se identificaron (no se cuantificaron) están las plagioclasas ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), epidota ($\text{Ca}_2\text{Al}_2.4\text{Fe}_{0.6}\text{Si}_3\text{O}_{13}$), clorita ($\text{Mg}_5\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$), ortoclasa (KAlSi_3O_8), muscovita ($\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) e ilvaíta ($\text{CaFe}_2(\text{Fe},\text{Mn})\text{Si}_2\text{O}_8(\text{OH})$). La

reactividad relativa (escala de 1 a 0) de estos minerales neutralizadores disminuye desde 0.6 (feldespatos – Ca) hasta 0.01 (feldespatos – K y muscovita).

En los jales de la zona de oxidación del grupo “Jales A” (generadores potenciales de drenaje ácido), la oxidación de los sulfuros metálicos y la subsiguiente generación de acidez ha sido intensa y la disolución y alteración de los minerales neutralizadores potenciales de drenaje ácido no ha sido suficiente para neutralizar el pH de los lixiviados de los jales oxidados de este grupo: pH = 2.0 - 4.4

5. El único sulfuro metálico que se identificó en los jales del grupo “Jales B” (NO generadores potenciales de drenaje ácido) fue la pirita (6%). Sin embargo, la composición química sugiere la presencia de sulfuros de Zn, Pb y Cu en cantidades menores (1% de ZnS; 0.29% de PbS y 0.06% de CuFS₂). También se identificó la presencia de calcita, que al disolverse ha consumido la acidez generada por la oxidación de los sulfuros metálicos; lo que explica que los extractos de las muestras de estos jales tengan un pH cercano al neutro (pH = 6.4 –6.7)

6. Las concentraciones totales de elementos asociados con los sulfuros metálicos como Fe, Zn, Cd y Cu y los asociados con los aluminosilicatos (Al, Na, Mg, Mn) son menores en las capas “no compactas” de la zona de oxidación (ZO) con respecto a la zona de jales inalterados (ZJI); lo que se puede explicar por la pérdida de minerales sulfurados y aluminosilicatados durante los procesos de oxidación y disolución que tuvieron lugar en los jales de la ZO. Sin embargo, en la capa cementada de la ZO se registró un incremento en las concentraciones totales de Fe, Zn, As, Cu y Cd; lo que indica que la capa cementada de Fe funciona como una zona donde se acumulan los elementos liberados durante la oxidación y disolución en los jales de las capas No cementas.

Las concentraciones solubles de Zn, Cd, Cu en los jales ácidos de la ZO pueden tener su causa en el hecho de que éstos están asociados a fases sólidas de oxihidróxidos de Fe, los cuales son solubles en medio ácido; y que al disolverse liberan los elementos que forman parte de su estructura y los que están sorbidos en

su superficie. Las concentraciones solubles y movilidad de Al, Mg y Mn se deben a la disolución en medio ácido de los aluminosilicatos que los contienen (feldespatos, epidota, clorita, moscovita, etc.). Lo anterior es congruente con las concentraciones solubles (medianas) determinadas en mg/L en las capas “no compactas” de la ZO: Fe = 167.8, Zn = 324.6, Cd = 4.2, Cu = 9.8, Al = 138, Na = 0.8, Mg = 89 y Mn = 69

7. La concentración total del Pb y As, elementos asociados a los sulfuros metálicos, no muestran diferencias sustanciales entre los jales de la zona de oxidación (ZO), zona de transición (ZT) y zona de jales inalterados (ZJI), lo cual podría ser explicado por la poca movilidad del As y Pb en los jales de estudio. Las concentraciones solubles del Pb y As en los jales oxidados presentan un comportamiento similar (se registraron concentraciones solubles en términos de valores de tendencia central (mediana) iguales: 0.1 mg/L de Pb y 0.1 mg/L de As). Sin embargo, en algunas muestras de jales oxidados y ácidos (pH = 2 – 2.2) se registraron altas concentraciones de As soluble (101 y 164 mg/L).

Los análisis por SEM-EDS, MET y XRD en muestras concentradas de jales oxidados ($\varnothing < 40 \mu\text{m}$) indican que la precipitación de la beudantita es el mecanismo natural que limita la movilidad del As y Pb en los jales “El Fraile”. Así mismo, los análisis por SEM-EDS muestran que los oxihidróxidos de Fe contienen cantidades trazas de As. Esto indica que el arsénico liberado durante la oxidación de los sulfuros metálicos es retenido en los oxihidróxidos de Fe; lo que sugiere que la movilidad del As también es atenuada por sorción en los oxihidróxidos de Fe. Sin embargo, en los jales ácidos, el consumo de H^+ implica la disolución de los oxihidróxidos de Fe y en consecuencia el As sorbido puede liberarse por procesos de desorción, lo que indica que la sorción de As en oxihidróxidos de Fe no es muy importante en la inmovilización del As en los jales ácidos.

8. La prueba para estimar la peligrosidad de los jales oxidados del “talud” de “El Fraile” por la capacidad de movilidad de sus MMPT (método USEPA 1312 modificado) indica que solamente en 2 muestras de un total de 13 (que pertenecen al “talud” de Fraile Sur) se sobrepasa el límite máximo permisible de la concentración

soluble de As que hace a un residuo peligroso de acuerdo a la normatividad mexicana en materia de jales.

9. Las pruebas de extracción con pH controlado (cercano al neutro) indican que con sólo controlar el pH de los lixiviados se puede minimizar el peligro potencial que los jales ácidos y oxidados del "talud" representan para el entorno natural. Tomando en cuenta estos resultados, se recomienda realizar estudios para llevar a escala de campo los experimentos realizados en el laboratorio.

11 Las fases sólidas a las cuales están asociados los MMPT, desde el punto de vista teórico, tienen un comportamiento anfótero; por lo cual no es conveniente tratar a los jales oxidados con cal, como es costumbre, sin antes no haber realizado los cálculos estequiométricos necesarios para no elevar demasiado el pH de los lixiviados ($\text{pH} > 9.0$), ya que bajo estas condiciones se solubilizarían los MMPT.

14. Dadas las condiciones climáticas en Taxco, el uso de humedales puede ser efectivo para minimizar el peligro potencial que representan los jales oxidados del talud en el depósito "El Fraile"; para lo cual sería necesario realizar estudios adicionales que permitan valorar esta alternativa de remediación.

REFERENCIAS

Allison JD, Brown DS, Novogradac KJ (1991) MINTEQA2/PRODEFA2. A geochemical assesment model for enviromental systems: version 3.11 uer's manual. Environmental Research Laboratory, U.S. EPA/600/3-91/021. Washington, DC. USA.

Anthony JW, Bideaux RA, Bladh KW, Nichols MC (2000) Handbook of mineralogy, volume IV: arsenates, phosphates, vanadates. Mineral Data Publishing. Tucson, Arizona.

APHA, AWWA, WPCF (1989) Standard methods for the examination of water and wastewater. 17th edn. American Public Health Association, American Water Works Association and Water Pollutions Control Federations, Washington, D.C.

Appelo C, Potsma D (1993) Geochemistry, groundwater and pollution. A.A. Balkema, Rotterdam.

Armienta MA, Zamora VF, Juárez R (1987) Manual para el análisis químico de aguas naturales en campo y en laboratorio. UNAM, Instituto de Geofísica, C.U. México.

Armienta MA, Villaseñor G, Rodríguez R, Ongley LK, Mango H (2001) The role of arsenic-bearing rocks in groundwater pollution at Zimapan Valley, Mexico. *Environ Geol* 40 (4/5): 571- 581

Armienta MA, Talavera O, Morton O, Barrera M (2003) Geochemistry of metals from mine tailings in Taxco, México. *Bull Environ Contam Toxicol* 71: 387-393

ASTM (1985) Standard test method for shake extraction of solid waste with water. American Society for Testing and Materials, Designation: D 3987 – 85: 14–17

Bain JG, Blowes DW, Robertson WD, Frind EO (2000) Modelling of sulfide oxidation with reactive transport at mine drainage site. *Contam Hydrol* 41: 23-47

Barrera M (2001) Geoquímica de metales pesados en los jales de "El Fraile", municipio de Taxco, Gro., México, Tesis Maestría en Ciencias (aguas subterráneas). UACPyP del CCH, UNAM, México D.F.

Betjetin A (1970) Curso de Mineralogía. Editorial Paz, Moscú – Rusia

Bowell RJ (1994) Sorption of arsenic by iron oxides and oxyhydroxides in soils. *Appl Geochem* 9:279-286.

Blowes DW, Reardon EJ, Jambor JL, Cherry JA (1990) The formation and potential importance of cemented layers in inactive sulfide mine tailings. *Geochim Cosmochim Acta* 55: 965 –978.

Carrillo A, Drever JI (1998) Adsorption of arsenic by natural aquifer material in the San Antonio–El Triunfo mining area, Baja California, México. *Environ Geol* 35: 251–57.

Carrillo A, Morton O, González E, Rivas H, Oesler G, García V, Hernández E, Morales P, Cienfuegos E (2003) Environmental Geochemistry of the Guanajuato Mining District, Mexico. *Ore Geol Rev* 23 (3-4): 277-297

Cornell RM, Schwertmann U (1996) The iron oxides. Structure, properties, reactions, occurrence and uses. VCH, Weinheim, Federal Republic of Germany.

Costello C (2003) Acid mine drainage: Innovative treatment technologies. National Network of Environmental Management Studies Fellow for U.S. Environmental Protection Agency. Washington DC.

CRM (1999) Monografía Geológico – Minera del Estado de Guerrero. Consejo de Recursos Minerales, México.

Davis A, Ruby MV, Bloom M, Schoof R, Freeman G, Bergstrom PD (1995) Mineralogical constraints on the bioavailability of arsenic in smelter-impacted soils. *Environ Sci Tech* 30 (2): 392-399

De Cserna Z, Fries C (1981) Resumen de la geología de la hoja Taxco, Estado de Guerrero, México y Morelos. Instituto de Geología, UNAM, México.

Dold B, Fontboté L (2001) Element cycling and secondary mineralogy in porphyry copper tailings as a function of climate, primary mineralogy, and mineral processing. *J Geochem Explor* 74: 3-55

Evangelou VP, Zhang, YL (1995) A Review: Pyrite Oxidation Mechanisms and Acid Mine Drainage Prevention. *Environ Sci Tech* 25 (2): 141-199.

Faure G (1980) Principles and applications of Inorganic Geochemistry. Macmillan Publishing Company, Canada

Foster AL, Brown EG, Tingle TN, Parks GA (1998) Quantitative arsenic speciation in mine tailings using X-ray absorption spectroscopy. *Am Miner* 83: 553-568.

Fuller CC, Davis JA, Waychunas GA (1993) Surface chemistry of ferrihydrite: Part2. Kinetics of arsenate adsorption and coprecipitation. *Geochim Cosmochim Acta* 57:2271-2282.

Fukushi K, Sasaki M, Sato T, Yanase N, Amano H, Ikeda H (2003) A natural attenuation of arsenic in drainage from an abandoned arsenic mine dump. *Appl Geochem* 18: 1267-1278

Flores N (2002) Caracterización químico-mineralógica de los jales "El Fraile", Taxco de Alarcon, Guerrero. Tesis de licenciatura. Escuela Regional de Ciencias de la Tierra – UAG. Taxco El Viejo. Guerrero, México.

Frost RF, Griffin RA (1977) Effect of pH on adsorption of arsenic and selenium from landfill leachate by clay minerals. *Soil Sci Soc Am J* 41:53-57.

Gray NF (1997) Environmental impact and remediation of acid mine drainage: a management problem. *Environ Geol* 35 (1/2): 62-71.

Goldberg S (1986) Chemical modeling of arsenate adsorption on aluminium and iron oxide minerals. *Soil Sci Soc Am J* 50:1154 -1157.

Goldberg S, Glaubig RA (1988) Anion sorption on a calcareous, montmorillonitic soil-arsenic. *Soil Sci Soc Am J* 52: 1297-1300.

Goldberg S, Johnston CT (2001) Mechanism of arsenic adsorption on amorphous oxides evaluated using macroscopic measurements, vibrational spectroscopy, and surface complexation modeling. *J Colloid Interface Sci* 234: 204-216.

Goldberg S (2002) Competitive adsorption of arsenate and arsenite on oxides and clay minerals. *Soil Sci Soc Am J* 66: 413-421

Gieré R, Sidenko NV, Lazareva EV (2003) The role of secondary minerals in controlling the migration of arsenic and metals from high-sulfide wastes (Berikul gold mine, Siberia). *Appl Geochem* 18: 1347-1359.

Helawell JM (1988) Toxic substances in rivers and streams. *Environ Pollut* 50, 61-85.

Holmstrom H, Ohlander B (2001) Layers rich in Fe- and Mn oxyhydroxides formed at the tailings-pond water interface, a possible trap for trace metals in flooded mine tailings. *J Geochem Explor* 74: 189-203.

Holmstrom H, Salmon UJ, Carlsson E (2001) Geochemical investigation of sulfide-bearing tailings at Kristineberg, northern Sweden, a few years after remediation. *Sci Total Environ* 273: 111-133

IMMSA (1973) Yacimientos minerales metálicos del Distrito Minero de Taxco. Industrial Minera México. Reporte interno. México

IMMSA (1980) Estimación de reservas en los jales inactivos de Taxco, Guerrero. Reporte interno. México.

IMMSA (2002) Monitoreo de la calidad de agua de drenaje de la presa El Fraile, Taxco, Guerrero. Reporte interno. México

INEGI (1999) Síntesis Geográfica del Estado de Guerrero. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Aguascalientes, México

Jambor JL (1999) Nomenclature of the alunite supergroup. *Can Miner* 37: 1323-1341

Jambor JL (1994) Mineralogy of sulfide-rich tailings and their oxidation products, in Jambor JL. And Blowes DW., eds., *The environmental geochemistry of sulfide mine wastes: Mineralogical Association of Canada, Short Course Handbook*, 22: 103-132.

Jennings SR, Dollhops DJ, Inskep WP (2000) Acid production from sulfide minerals using hydrogen peroxide weathering. *Appl Geochem* 15: 235 – 243.

Johnson RH, Blowes DW, Robertson WD (2000) The hydrogeochemistry of the Nickel Rim mine tailings impoundment, Sudbury, Ontario. *Contam Hydrol* 41: 49-80

Kohlstedt DL (1985) Electron diffraction and weak-beam microscopy. J.C. White ed., *Short course in applications of electron microscopy in the earth sciences*: 31 – 61.

Lawrence RW (1990) Prediction of the behaviour of mining and processing wastes in the environment, In: *Western Regional Symp. on Mining and Mineral Processing Waste*, Berkeley, California. USA

Lawrence RW, Wang Y (1997) Determination of neutralization potential in the prediction of acid rock drainage, In: Fourth International Conference on acid rock drainage. Vancouver, BC. Canada

Ljungberg J, Ohlander B (2001) The geochemicals dynamics of oxidizing mine tailings at Laver, northern, Sweden. *J Geochem Explor* 74: 57-72.

Lindsay WL (1979) *Chemical equilibria in soils*. John Wiley & Sons, Inc. USA.

Lin Z (1997) Mobilization and retention of heavy metals in mill-tailings from Garpenberg sulfide mines, Sweden. *Sci Total Environ* 198: 13-31

Lozano R, Verma S, Girón P, Velzco F, Morán D, Viera F. Chávez G (1995) Calibración preliminar de fluorescencia de rayos-X para análisis cuantitativo de elementos mayores en rocas ígneas. *Actas INAGEQ* 1: 203-208

Manz M, Castro LJ (1997) The environmental hazard caused by smelter slags from the Sta. Maria de la Paz Mining District in Mexico. *Environ Pollut* 98: 7-13

McCarty DK (1998) Mineralogy and trace element association in an acid mine drainage iron oxide precipitate; comparison of selective extractions. *Appl Geochem* 13: 165-176

Mcgregor RG, Blowes DW, Jambor JL, Robertson WD (1998) The solid-phase controls on the mobility of heavy metals at the Copper Cliff tailings area, Sudbury, Ontario, Canadá. *Contam Hydrol* 33: 247-271.

McGregor RG, Blowes DW (2002) The physical, chemical and mineralogical properties of three cemented layers within sulfide-bearing mine tailings. *J Geochem Explor* 76: 195-207

Manning BA, Goldberg N (1997) Adsorption and stability of arsenic (III) at the clay mineral-water interface. *Environ Sci Tech* 31:2005-2011

Manahan SE (1989) *Toxicological Chemistry. A guide to toxic substances in chemistry*. Lewis Publishers, INC. Michigan, USA.

Martycak K, Zeman J, Vacek-Vesely M (1994) Supergene processes on ore deposits - a source of heavy metals. *Environ Geol* 23: 156-65

Morin KA, Hutt NM (2001) *Environmental geochemistry of minesites drainage: Practical theory and case studies*. MDAG Publishing, Vancouver, Canada.

Muhech V (2001) Acciones sugeridas para el abandono ordenado de almacenamiento de residuos mineros. Memorias del seminario "Almacenamiento de Residuos Mineros". México.

NOM-141-SEMARNAT (2003) Norma Oficial Mexicana 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. *Diario Oficial de la Federación*, 14 enero de 2004. México.

NOM-052-ECOL (1993) Norma Oficial Mexicana que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad. *Diario Oficial de la Federación*, 22 de octubre de 1993. México.

Osborne TC (1956) *Geología y depósitos minerales del distrito minero de Taxco*. Congreso Geológico Internacional, Excursiones A-4 y C-2. México.

Pierce MI, Moore CB (1982) Adsorption of arsenite and arsenate on amorphous iron hydroxide. *Water Res* 16:1246-1253.

Pirajno F (1990) Hydrothermal mineral deposits. Principles and fundamental concepts for the exploration geologist. Springer – Verlag. Berlin.

Reddy KJ, Drever JI, Hasfurther VR (1993) Geochemical modeling to predict the chemistry of leachates from alkaline solid wastes: oil shale deposits, western USA. *Appl Geochem* 2: 155-158

Rodie A, Gerits JP, Azcue JM (1995) Biogeochemical pathways of arsenic in lakes. *Environ Rev* 3:304-317

Roussel C, Néel C, Bril H (2000) Minerals controlling arsenic and lead solubility in an abandoned gold mine tailings. *Sci Total Environ* 263: 209-219.

Romero FM, Armienta MA, Carrillo A (2004) Arsenic sorption by carbonate - rich aquifer material, a control on arsenic mobility at Zimapan, Mexico. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 47 (1): 1-13

Ruby MV, Schoff R, Brattin W, Goldade M, Post G, Harnois M, Mosby DE, Casteel SW, Berti W, Carpenter M, Edwards D, Cragin D, Chappell W (1999) Advances in evaluating the oral bioavailability of inorganics in soils for use in human health risk assessment. *Environ Sci Technol* 33 (21):3697–3705.

Schecher WD, McAvoy DC (1999) MINEQL+: A chemical equilibrium modeling system, versión 4.0 for Windows. Environmental Research Software.

Sobek AA, Schuller WA, Freeman JR, Smith RM (1978) Field and laboratory methods applicable to overburdens and minesoils. Environmental Protection Agency U.S EPA-600/2-78-054. Cincinnati, Ohio

Szymanski JT (1988) The crystal structure of beudantite, $Pb(Fe,Al)_3 [As,S]O_4)_2 (OH)_6$. *Can Miner* 26: 923-932.

Stum W (1992) Chemistry of the solid-water interface. John Wiley & Sons, Inc. USA.

Stum W, Morgan JJ (1996) Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters. Third edition. John Wiley & Sons, Inc. NY, USA.

Talavera O, Armienta MA, Dótor A, Flores M, García J (2002) Metales pesados relacionados con actividades minerales en la región de Taxco, Guerrero. III Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra. Puerto Vallarta, México.

Talavera O, Yta M, Moreno R, Dótor A, Flores N, Duarte G (2004) Mineralogy and geochemistry of sulfide-bearing tailings from silver mines in the Taxco, México area to evaluate potential environmental impact. Geofísica Internacional: in press.

Tessier A, Campbell PGC, Bisson M (1979) Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. Anal Chem 51: 844-851

USEPA (1986) Method 7210: Copper (Atomic Absorption, Direct Aspiration), SW-846. Environmental Protection Agency, USA.

USEPA (1986) Method 7380: Iron (Atomic Absorption, Direct Aspiration), SW-846. Environmental Protection Agency, USA.

USEPA (1986) Method 7421: Lead (Atomic Absorption, Furnace Technique), SW-846. Environmental Protection Agency, USA.

USEPA (1986) Method 7380: Zinc (Atomic Absorption, Direct Aspiration), SW-846. Environmental Protection Agency, USA.

USEPA (1994) Method 3051: Microwave assisted acid digestion/sludges, soils, SW-846. Environmental Protection Agency, USA.

USEPA (1994a) Technical document. Acid mine drainage prediction. EPA 530-R-94-036, NTIS PB94-201829. Environmental Protection Agency, USA

USEPA (1994b) Method 7062: Arsenic (Atomic Absorption, Borohydride Reduction), SW-846. Environmental Protection Agency, USA.

USEPA (1994c) Method 1312: Synthetic precipitation leaching procedure, SW – 846. Environmental Protection Agency, USA.

USEPA (1994d) Contract Laboratory Program National Functional Guidelines for Inorganic Data Review, Environmental Protection Agency, USA

USEPA (1995) Method 9045C: Solid and waste pH. Test methods for evaluating solid wastes, SW – 846. Environmental Protection Agency, USA

USEPA (1996) Method 6010b: Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry, SW-846. Environmental Protection Agency, USA.

Van Der Hoek E, Bonouvrie P, Comans N (1994) Sorption of As and Se on mineral components of fly ash: relevance for leaching process. *Appl Geochem* 9: 403-412.

Yacamán MJ, Reyes J (1995) *Microscopía electrónica: Una visión del microcosmos*. CONACyT – CFE. México.

Walsh F, Mitchell R (1972) A pH Dependent Succession of Iron Bacteria, *Environ Sci Tech* 6 (9): 809-812

Wang Y, Reardon EJ (2001) A siderite/limestone reactor to remove arsenic and cadmium from wastewaters. *Appl Geochem* 16: 1241-1249

Wang L, Reddy KJ, Jun LC (1994) Geochemical modeling for predicting potential solid phases controlling the dissolved molybdenum in coal overburden, Powder River Basin, WY, USA. *Appl Geochem* 9: 37-43

Williams DB, Barry C (1996) *Transmission electron microscopy*. Plenum Press, New York, USA.

APENDICES

Apéndice 1 Mineralogía general por difracción de rayos X del “talud” (1) y “vaso” (2) de la parte Fraile Norte en el depósito de jales “El Fraile, Taxco – Guerrero

Apéndice 2 Mineralogía general por difracción de rayos X del “talud” (1) y “vaso” (2) de la parte Fraile Sur en el depósito de jales “El Fraile, Taxco – Guerrero

Apéndice 3 Mineralogía general por DRX en jales grises (1) y oxidados (2) de diferente origen sobre el “talud” de la zona de oxidación de jales “El Fraile” en Taxco-Guerrero

Apéndice 4 Concentración total de elementos mayores (EM) en jales del Muestreo I y II, en el depósito de jales “El Fraile”, Taxco – Guerrero

Apéndice 5 Concentración total de metales y metaloides potencialmente tóxicos (MMPT) en jales del Muestreo I y II, en el depósito de jales “El Fraile”, Taxco – Guerrero

Apéndice 6 Exactitud de los métodos y técnicas de análisis en la determinación de las concentraciones totales de EM y MMPT en las muestras de jales del depósito “El Fraile”, Taxco – Guerrero

Apéndice 7 Lecturas diarias de pH del experimento de extracción para obtener el lixiviado a partir de las muestras sólidas de jales del depósito “El Fraile”, Taxco – Guerrero

Apéndice 8 Lecturas diarias de conductividad eléctrica (CE) del experimento de extracción para obtener el lixiviado a partir de las muestras sólidas de jales del depósito “El Fraile”, Taxco – Guerrero

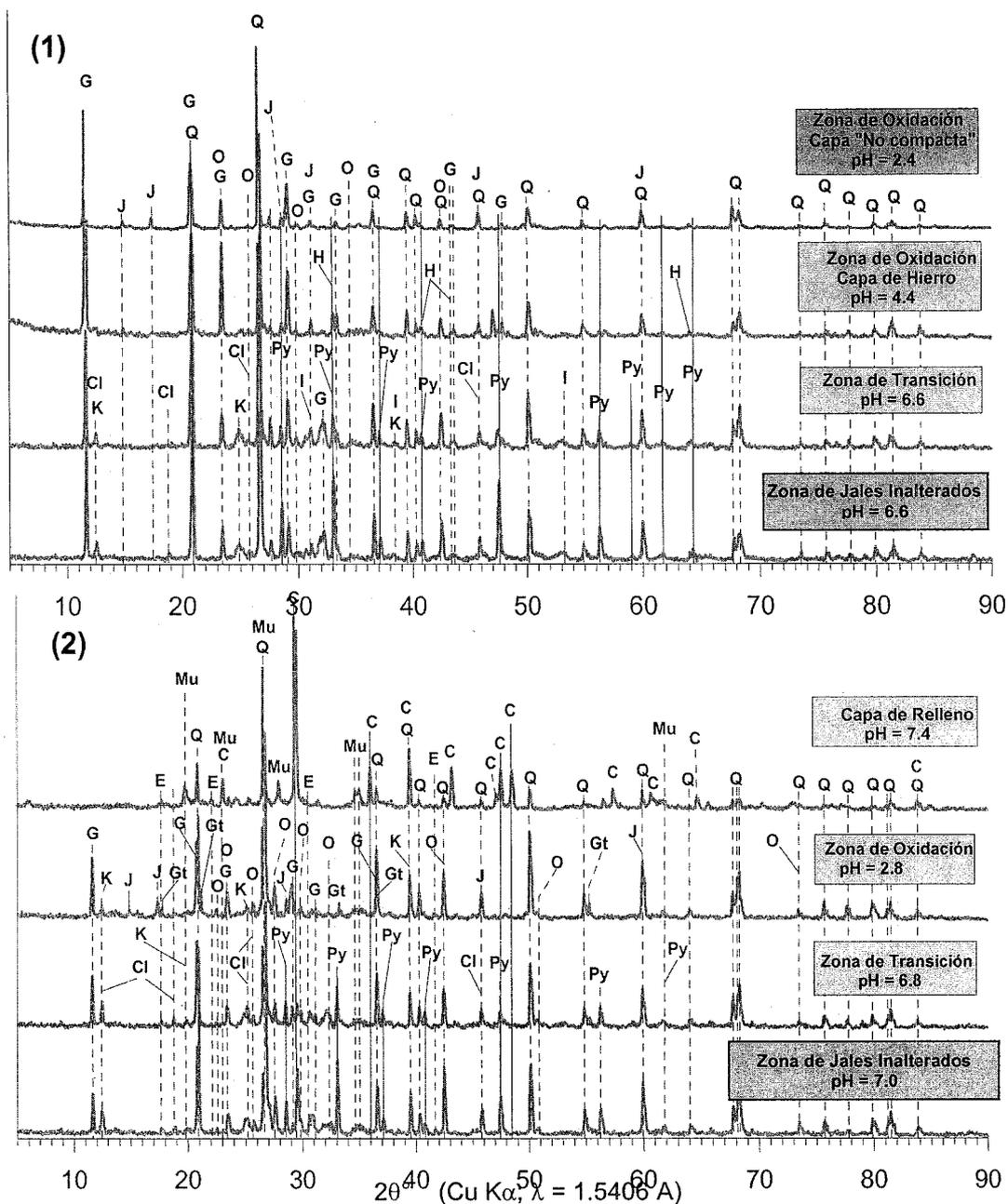
Apéndice 9 Concentración “soluble” de EM y MMPT en los lixiviados obtenidos de las muestras sólidas de jales del depósito “El Fraile”, Taxco – Guerrero

Apéndice 10 Reproducibilidad de los experimentos de extracción para obtener los lixiviados a partir de muestras sólidas de jales en el depósito “El Fraile”, Taxco – Guerrero

Apéndice 11 Índices de Saturación (IS) para diferentes minerales en jales de la zona de oxidación del depósito de jales “El Fraile”, Taxco – Guerrero

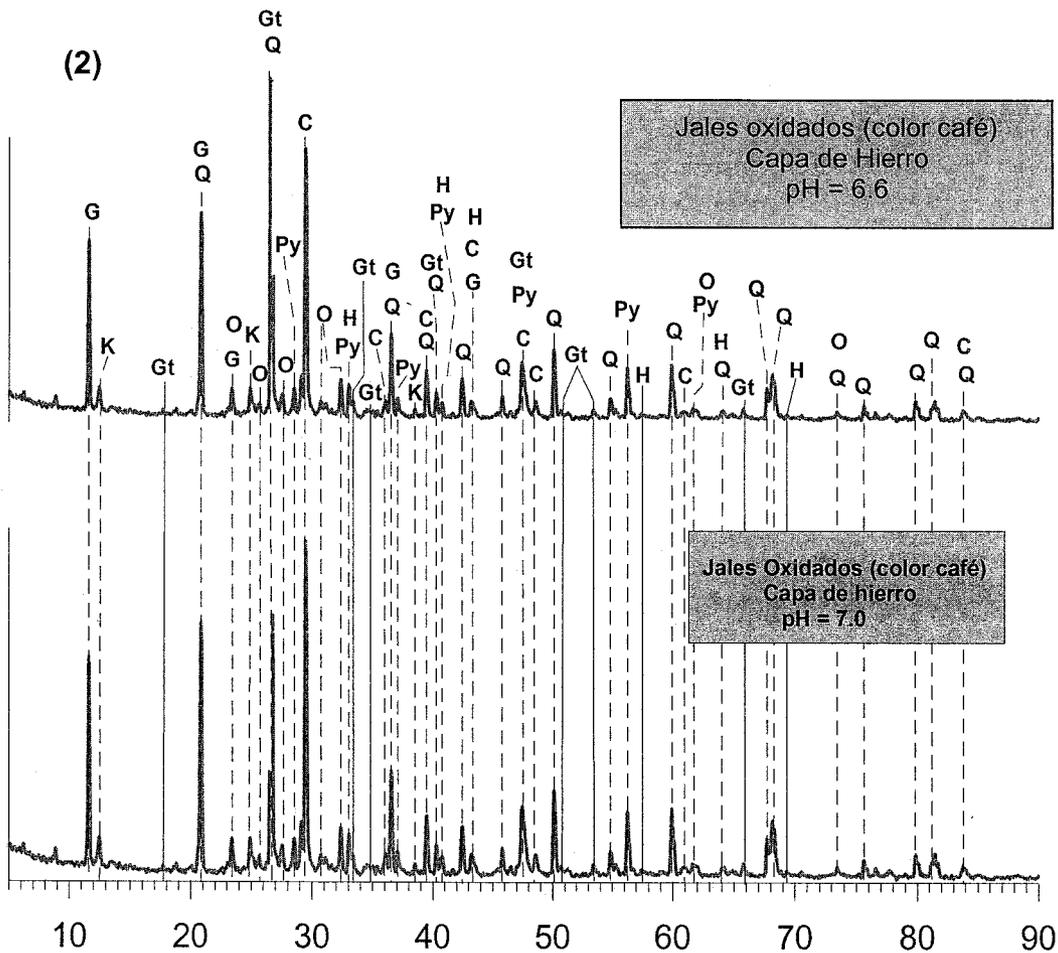
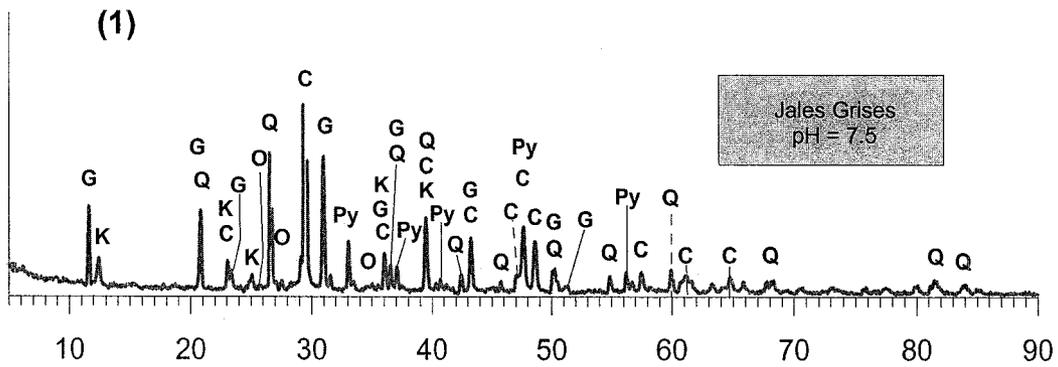
Apéndice 12 Índices de Saturación (IS) para diferentes minerales en jales de la zona de transición del depósito de jales “El Fraile”, Taxco – Guerrero

Apéndice 13 Índices de Saturación (IS) para diferentes minerales en jales de la zona de jales inalterados del depósito de jales “El Fraile”, Taxco – Guerrero



Q: cuarzo; G: yeso; J: jarosita-K; O: ortoclasa; H: hematita; Cl: clorita; K: caolinita; Py: pirita; I: ilvaíta; Gt: goetita; C: calcita; Mu: muscovita; E: epidota

Apéndice 1 Mineralogía general por difracción de rayos X del "talud" (1) y "vaso" (2) de la parte Fraile Norte en el depósito de jales "El Fraile", Taxco-Guerrero



Q: cuarzo; G: yeso; O: ortoclasa; H: hematita; K: caolinita; Py: pirita; Gt: goetita; C: calcita

Apéndice 3 Mineralogía general por difracción de rayos X en jales grises (1) y oxidados (2) con pH cercano al neutro sobre el “Talud” de la zona de oxidación de Fraile Norte en el depósito de jales “El Fraile”, Taxco-Guerrero

Sitio	Calve	SiO ₂		TiO ₂		Al ₂ O ₃		CaO		K ₂ O		Fe ₂ O ₃		MnO		MgO		Na ₂ O		P ₂ O ₅		PXC	Suma
		media	Desv.	media	Desv.	media	Desv.	media	Desv.	media	Desv.	media	Desv.	media	Desv.	media	Desv.	media	Desv.	media	Desv.	%	%
		%	Est.	%	Est.	%	Est.	%	Est.	%	Est.	%	Est.	%	Est.	%	Est.	%	Est.	%	Est.	%	%
Muestreo I																							
F1	F1-1	58.90	0.20	0.18	0.00	4.48	0.20	2.10	0.01	1.33	0.00	9.70	0.25	0.61	0.00	0.62	0.02	2.20	0.01	0.08	0.00	8.12	88.32
	F1-2	53.20	0.31	0.17	0.00	4.71	0.20	8.88	0.01	1.29	0.00	7.14	0.36	0.54	0.00	0.76	0.00	1.17	0.00	0.07	0.00	9.25	87.18
F2	F2-3	56.30	0.50	0.21	0.00	3.10	0.13	8.62	0.00	1.22	0.02	14.62	0.00	0.11	0.02	0.31	0.01	0.18	0.01	0.09	0.01	12.10	96.86
	F2-4	55.82	0.21	0.20	0.01	3.05	0.23	2.51	0.01	1.31	0.01	4.81	0.01	0.08	0.01	0.12	0.02	0.11	0.01	0.10	0.00	15.24	83.35
F3	F3-5	59.31	0.10	0.22	0.01	3.43	0.01	2.62	0.01	1.31	0.02	10.11	0.00	0.10	0.00	0.21	0.04	0.51	0.00	0.08	0.00	17.62	95.52
	F3-6	56.83	0.00	0.20	0.30	3.71	0.00	3.91	0.00	1.25	0.00	13.10	0.32	0.15	0.01	0.53	0.06	0.83	0.00	0.12	0.00	13.21	93.84
F4	F4-7	55.33	2.30	0.13	0.01	5.02	0.03	3.12	0.25	1.84	0.10	7.32	0.00	0.08	0.30	0.62	0.02	0.24	0.01	0.21	0.00	15.22	89.13
	F4-8	61.31	1.50	0.10	0.00	2.70	0.02	2.42	1.65	1.61	0.00	11.51	0.02	0.07	0.00	0.11	0.00	0.25	0.01	0.09	0.00	12.85	93.02
	F4-9	60.40	6.30	0.21	0.10	3.22	0.05	2.54	0.02	1.01	0.00	15.82	0.00	0.09	0.25	0.33	0.02	0.41	0.02	0.13	0.00	8.95	93.11
F5	F5-10	58.12	0.10	0.13	0.02	4.31	0.10	5.60	0.25	1.92	0.02	12.02	0.75	0.11	0.35	0.61	0.02	0.22	0.01	0.21	0.00	12.14	95.39
	F5-11	55.91	0.00	0.30	0.00	4.62	0.06	5.02	0.01	1.63	0.01	19.11	0.25	0.10	0.00	0.64	0.02	0.41	0.01	0.12	0.00	11.32	99.18
	F5-12	63.20	2.30	0.22	0.00	3.50	0.23	2.08	0.25	1.31	0.01	13.51	0.23	0.08	0.01	0.20	0.00	0.12	0.00	0.15	0.00	12.59	96.96
F6	F6-13	43.73	0.56	0.13	0.00	4.12	0.01	23.58	2.30	0.67	0.01	5.45	0.10	0.73	0.02	1.50	0.00	0.65	0.00	0.01	0.00	10.34	90.91
Muestreo II																							
P 1	M1	61.30	0.11	0.22	0.00	3.38	0.07	4.93	0.00	1.55	0.00	10.27	0.03	0.09	0.00	0.08	0.01	0.19	0.02	0.02	0.00	11.17	93.11
	M2	49.47	0.11	0.20	0.00	4.82	0.05	5.96	0.00	1.54	0.00	16.54	0.04	0.43	0.00	0.95	0.21	0.61	0.03	0.05	0.00	10.84	91.28
	M3	59.96	0.03	0.17	0.00	3.02	0.02	5.47	0.01	1.53	0.00	11.60	0.04	0.17	0.00	0.20	0.03	0.24	0.03	0.03	0.00	9.44	91.62
	M4	63.04	0.06	0.19	0.00	3.10	0.01	7.21	0.01	1.64	0.01	5.15	0.00	0.09	0.00	0.15	0.00	0.13	0.01	0.03	0.00	7.94	88.53
	M5	66.55	0.05	0.18	0.00	3.61	0.03	5.19	0.01	1.55	0.00	8.39	0.02	0.13	0.00	0.38	0.01	0.14	0.01	0.05	0.00	7.02	92.80
	M6	47.54	0.04	0.18	0.00	5.25	0.01	5.70	0.00	1.43	0.00	15.22	0.03	0.95	0.01	0.98	0.03	0.89	0.00	0.05	0.00	11.94	90.14
	M7	41.13	0.05	0.16	0.00	3.49	0.01	5.15	0.01	1.39	0.00	23.19	0.03	1.25	0.02	0.98	0.04	1.32	0.01	0.05	0.00	12.89	90.98
	M8	42.51	0.04	0.16	0.00	3.73	0.02	4.81	0.01	1.54	0.00	23.01	0.02	1.51	0.02	0.98	0.03	1.33	0.02	0.04	0.00	12.53	92.19
P 2	M9	36.99	0.10	0.51	0.00	11.78	0.11	20.20	0.00	1.79	0.01	4.59	0.01	0.14	0.00	2.11	2.37	0.50	0.02	0.12	0.00	17.59	95.96
	M10	70.93	0.06	0.35	0.00	5.07	0.03	1.99	0.00	2.20	0.00	10.06	0.02	0.09	0.00	0.83	0.10	0.23	0.04	0.08	0.00	6.49	98.30
	M11	60.02	0.06	0.29	0.01	5.55	0.03	4.30	0.01	1.91	0.01	11.72	0.02	0.66	0.01	1.59	0.01	0.67	0.04	0.08	0.00	7.42	93.87
	M12	61.23	0.13	0.34	0.00	6.03	0.04	3.99	0.02	2.00	0.01	11.12	0.03	0.42	0.00	1.53	0.11	0.60	0.04	0.10	0.00	6.96	94.14
P 3	M13	58.40	0.13	0.19	0.00	2.69	0.02	5.71	0.03	1.30	0.01	12.92	0.01	0.08	0.01	0.45	0.07	0.13	0.03	0.03	0.00	11.08	92.53
	M14	54.77	0.21	0.18	0.00	3.00	0.06	8.51	0.00	1.41	0.00	11.54	0.02	0.14	0.00	0.22	0.02	0.15	0.05	0.07	0.00	8.33	88.11
	M15	47.90	0.10	0.19	0.00	3.84	0.05	8.73	0.01	1.57	0.00	13.83	0.02	1.84	0.01	1.16	0.13	0.73	0.03	0.06	0.00	9.58	89.46
	M16	51.14	0.21	0.19	0.00	3.33	0.04	8.41	0.01	1.62	0.01	13.87	0.04	0.31	0.00	0.32	0.09	0.20	0.02	0.07	0.00	9.14	88.29
	M17	53.74	0.09	0.19	0.00	4.27	0.00	5.85	0.00	1.60	0.01	11.70	0.01	1.06	0.01	0.96	0.13	1.02	0.02	0.05	0.00	9.56	89.99
	M18	53.92	0.02	0.20	0.00	3.52	0.02	4.66	0.01	1.32	0.00	14.11	0.02	1.42	0.00	1.09	0.25	1.18	0.02	0.07	0.00	10.18	91.53
P 4	M19	56.65	9.13	0.39	0.28	7.07	6.70	6.56	3.91	1.92	0.54	8.63	2.51	0.06	0.03	0.32	0.02	0.35	0.35	0.07	0.08	12.25	94.58
	M20	65.75	7.56	0.29	0.10	4.01	2.03	3.45	1.92	1.85	0.54	9.76	2.20	0.06	0.02	0.30	0.03	0.18	0.02	0.05	0.05	12.29	98.11
	M21	53.61	4.36	0.29	0.16	5.26	2.56	3.44	0.10	1.73	0.73	16.20	5.21	0.34	0.10	0.51	0.08	0.66	0.07	0.10	0.01	14.49	97.14
	M22	62.21	0.23	0.30	0.10	5.29	1.11	4.50	0.84	1.96	0.28	9.72	0.23	0.68	0.23	1.34	0.52	0.74	0.02	0.08	0.02	6.49	93.28
P 5	M23	52.63	11.57	0.60	0.20	11.85	5.05	8.34	4.73	2.43	0.20	6.87	1.96	0.19	0.15	2.55	0.22	0.74	0.03	0.14	0.04	12.22	97.87
	M24	70.27	7.05	0.35	0.10	5.34	1.82	2.25	1.77	2.19	0.50	8.18	1.67	0.07	0.02	0.96	0.04	0.17	0.01	0.07	0.04	5.24	94.64
	M25	59.59	1.73	0.39	0.13	6.44	3.08	3.89	0.58	2.23	0.59	10.46	0.50	0.32	0.23	2.01	0.35	0.59	0.32	0.09	0.05	7.07	92.28
	M26	58.74	6.60	0.35	0.13	5.68	1.57	3.48	0.08	1.96	0.55	12.72	5.62	0.37	0.08	1.54	0.08	0.71	0.06	0.10	0.01	6.29	91.57
	M27	64.74	2.35	0.32	0.07	5.60	0.78	3.57	1.20	2.06	0.22	9.38	0.41	0.51	0.25	1.03	0.07	0.68	0.05	0.09	0.01	5.83	94.03

Apéndice 4 Concentración total de elementos mayores (EM) en jales del Muestreo I y II, en el depósito de jales "El Fraile", Taxco - Guerrero

Sitio	Clave	Zn				Pb				Cu				As			
		a	b	Promedio	DPR	a	b	Promedio	DPR	a	b	Promedio	DPR	As	b	Promedio	DPR
		mg/kg				mg/kg				%	mg/kg				mg/kg		
F 1	F1-1	27900	25500	26700	9	3916.6	4356.0	4136.3	11	499.9	590.1	545.0	17	3492.7	3125.3	3309.0	11
	F1-2	21200	ND	21200	NA	4012.1	ND	4012.1	NA	464.9	ND	464.9	NA	2950.1	ND	2950.1	NA
F 2	F2-3	800	ND	800	NA	2681.6	ND	2681.6	NA	173.1	ND	173.1	NA	2340.3	ND	2340.3	NA
	F2-4	500	600	550	18	6941.7	7756.9	7349.3	11	79.7	65.9	72.8	19	1615.6	1569.2	1592.4	3
F 3	F3-5	5400	ND	5400	NA	3223.2	ND	3223.2	NA	300.0	ND	300.0	NA	2256.3	ND	2256.3	NA
	F3-6	11900	ND	11900	NA	2495.5	ND	2495.5	NA	554.0	ND	554.0	NA	3294.1	ND	3294.1	NA
F 4	F4-7	500	ND	500	NA	1248.6	ND	1248.6	NA	77.7	ND	77.7	NA	3146.5	ND	3146.5	NA
	F4-8	800	ND	800	NA	6449.1	ND	6449.1	NA	168.7	ND	168.7	NA	1537.9	ND	1537.9	NA
	F4-9	2600	ND	2600	NA	3236.4	ND	3236.4	NA	226.5	ND	226.5	NA	3460.5	ND	3460.5	NA
F 5	F5-10	1300	ND	1300	NA	1123.7	ND	1123.7	NA	102.9	ND	102.9	NA	6592.1	ND	6592.1	NA
	F5-11	2900	ND	2900	NA	3468.4	ND	3468.4	NA	215.5	ND	215.5	NA	2031.5	ND	2031.5	NA
	F5-12	1300	1100	1200	17	2405.7	2568.9	2487.3	7	91.9	80.3	86.1	13	828.8	962.0	895.4	15
F 6	F6-13	6800	6000	6400	13	2712.4	2246.0	2479.2	19	186.3	215.3	200.8	14	871.1	1112.3	991.7	24

a: Concentración en muestra original "S". b: Concentración en muestra duplicada "D". ND: No hay datos. NA: no aplica

$$DPR = \frac{|S - D|}{|S + D|/2} \times 100. \quad [(Criterio de aceptación DPR < 20\% (USEPA 1994d)]$$

Apéndice 5 Concentración total de metales y metaloides potencialmente tóxicos en jales del Muestreo I, en el depósito "El Fraile", Taxco - Guerrero

Sitio	Clave	Zn				Pb				Cu				As				
		a	b	Promedio	DPR	a	b	Promedio	DPR	a	b	Promedio	DPR	a	b	Promedio	DPR	
		mg/kg				mg/kg				%	mg/kg				%	mg/kg		
P 1	M1	1900	1900	1900	0	3665.0	3561.0	3613.0	3	133.0	135.0	134.0	1	1364.0	1334.0	1349.0	2.2	
	M2	11900	12600	12250	6	2967.0	2941.0	2954.0	1	513.0	458.0	485.5	11	2492.0	2894.0	2693.0	14.9	
	M3	5600	5100	5350	9	5283.0	5206.0	5244.5	1	186.0	194.0	190.0	4	1455.0	1333.0	1394.0	8.8	
	M4	2300	2100	2200	9	5681.0	5695.0	5688.0	0	82.0	83.0	82.5	1	1133.0	1259.0	1196.0	10.5	
	M5	2300	2300	2300	0	1706.0	1678.0	1692.0	2	126.0	115.0	120.5	9	3233.0	3525.0	3379.0	8.6	
	M6	21900	20000	20950	9	2580.0	2690.0	2635.0	4	194.0	192.0	193.0	1	1397.0	1548.0	1472.5	10.3	
	M7	31400	34000	32700	8	3108.0	3107.0	3107.5	0	312.0	340.0	326.0	9	1476.0	1402.0	1439.0	5.1	
	M8	22700	24000	23350	6	2767.0	3032.0	2899.5	9	380.0	401.0	390.5	5	1232.0	1202.0	1217.0	2.5	
P 2	M9	2300	2600	2450	12	248.0	208.0	228.0	18	56.0	65.0	60.5	15	3.0	3.0	3.0	0.0	
	M10	1200	1400	1300	15	2141.0	2293.0	2217.0	7	108.0	124.0	116.0	14	1509.0	1773.0	1641.0	16.1	
	M11	18800	19600	19200	4	2044.0	2261.0	2152.5	10	271.0	296.0	283.5	9	1510.0	1573.0	1541.5	4.1	
	M12	16100	16300	16200	1	1841.0	1941.0	1891.0	5	245.0	268.0	256.5	9	1172.0	1476.0	1324.0	23.0	
P 3	M13	1500	1600	1550	6	4527.0	4683.0	4605.0	3	115.0	138.0	126.5	18	1353.0	1659.0	1506.0	20.3	
	M14	1500	1800	1650	18	2498.0	2888.0	2693.0	14	172.0	186.0	179.0	8	1364.0	1314.0	1339.0	3.7	
	M15	28600	26800	27700	6	3079.0	3097.0	3088.0	1	330.0	310.0	320.0	6	1797.0	1837.0	1817.0	2.2	
	M16	5700	5500	5600	4	2930.0	3087.0	3008.5	5	205.0	178.0	191.5	14	1449.0	1831.0	1640.0	23.3	
	M17	4200	3900	4050	7	4181.0	3897.0	4039.0	7	623.0	603.0	613.0	3	1377.0	1593.0	1485.0	14.5	
	M18	31500	31500	31500	0	3467.0	3472.0	3469.5	0	493.0	508.0	500.5	3	1786.0	2009.0	1897.5	11.8	
P 4	M19	4200	5500	4850	27	4112.0	4051.0	4081.5	1	171.0	171.0	171.0	0	1635.0	1864.0	1749.5	13.1	
	M20	2800	2400	2600	15	6016.0	5864.0	5940.0	3	156.0	133.0	144.5	16	1918.0	2279.0	2098.5	17.2	
	M21	14800	12900	13850	14	2859.0	2837.0	2848.0	1	354.0	430.0	392.0	19	3359.0	3359.0	3359.0	0.0	
	M22	18400	18400	18400	0	1889.0	1855.0	1872.0	2	359.0	300.0	329.5	18	1391.0	1508.0	1449.5	8.1	
P 5	M23	2700	3000	2850	11	260.0	237.0	248.5	9	44.0	50.0	47.0	13	46.0	46.0	46.0	0.0	
	M24	1900	2100	2000	10	2853.0	2870.0	2861.5	1	116.0	136.0	126.0	16	570.0	570.0	570.0	0.0	
	M25	17200	15600	16400	10	4335.0	4043.0	4189.0	7	262.0	241.0	251.5	8	668.0	668.0	668.0	0.0	
	M26	23800	27700	25750	15	3336.0	3045.0	3190.5	9	307.0	298.0	302.5	3	879.0	879.0	879.0	0.0	
	M27	20300	23900	22100	16	3377.0	3005.0	3191.0	12	268.0	259.0	263.5	3	1386.0	1660.0	1523.0	18.0	

a: Concentración en muestra original "S". b: Concentración en muestra duplicado "D". NA: no aplica

$$DPR = \frac{|S - D|}{|S + D|/2} \times 100. \quad [\text{Criterio de aceptación } DPR < 20\% \text{ (USEPA 1994d)}]$$

Apéndice 5 Concentración total de metales y metaloides potencialmente tóxicos en jales del Muestreo II, en el depósito "El Fraile", Taxco – Guerrero (continuación)

Sitio	Clave	Se				Ni				Ti				Cd			
		a	b	Promedio	DPR	a	b	Promedio	DPR	a	b	Promedio	DPR	a	b	Promedio	DPR
		mg/kg			%	mg/kg			%	mg/kg			%	mg/kg			%
P 1	M1	< 0.05	< 0.05	< 0.05	NA	3.0	3.0	3.0	0	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA	10.0	9.0	9.5	11
	M2	< 0.05	< 0.05	< 0.05	NA	16.0	18.0	17.0	12	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA	99.0	85.0	92.0	15
	M3	< 0.05	< 0.05	< 0.05	NA	6.9	8.0	7.5	15	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA	49.0	44.0	46.5	11
	M4	< 0.05	< 0.05	< 0.05	NA	2.5	3.0	2.8	18	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA	22.0	21.0	21.5	5
	M5	< 0.05	< 0.05	< 0.05	NA	6.3	6.0	6.2	5	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA	11.0	10.0	10.5	10
	M6	< 0.05	< 0.05	< 0.05	NA	14.0	16.0	15.0	13	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA	298.0	276.0	287.0	8
	M7	< 0.05	< 0.05	< 0.05	NA	13.2	16.0	14.6	19	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA	387.0	380.0	383.5	2
	M8	< 0.05	< 0.05	< 0.05	NA	16.0	18.0	17.0	12	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA	263.0	284.0	273.5	8
P 2	M9	< 0.05	< 0.05	< 0.05	NA	29.0	34.0	31.5	16	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA	31.0	34.0	32.5	9
	M10	< 0.05	< 0.05	< 0.05	NA	7.5	8.5	8.0	13	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA	4.0	5.0	4.5	22
	M11	< 0.05	< 0.05	< 0.05	NA	18.0	23.0	20.5	24	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA	112.0	132.0	122.0	16
	M12	< 0.05	< 0.05	< 0.05	NA	21.0	23.0	22.0	9	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA	95.0	98.0	96.5	3
P 3	M13	< 0.05	< 0.05	< 0.05	NA	3.3	3.8	3.5	14	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA	8.0	10.0	9.0	22
	M14	< 0.05	< 0.05	< 0.05	NA	4.0	5.0	4.5	22	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA	8.0	8.0	8.0	0
	M15	< 0.05	< 0.05	< 0.05	NA	24.0	23.0	23.5	4	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA	97.0	95.0	96.0	2
	M16	< 0.05	< 0.05	< 0.05	NA	9.0	7.0	8.0	25	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA	29.0	32.0	30.5	10
	M17	< 0.05	< 0.05	< 0.05	NA	15.0	19.0	17.0	24	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA	267.0	275.0	271.0	3
	M18	< 0.05	< 0.05	< 0.05	NA	25.0	21.0	23.0	17	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA	142.0	153.0	147.5	7
P 4	M19	< 0.05	< 0.05	< 0.05	NA	5.5	4.5	5.0	20	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA	20.0	17.0	18.5	16
	M20	< 0.05	< 0.05	< 0.05	NA	7.0	7.0	7.0	0	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA	10.0	10.0	10.0	0
	M21	< 0.05	< 0.05	< 0.05	NA	13.5	16.5	15.0	20	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA	103.0	105.0	104.0	2
	M22	< 0.05	< 0.05	< 0.05	NA	15.0	15.0	15.0	0	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA	116.0	115.0	115.5	1
P 5	M23	< 0.05	< 0.05	< 0.05	NA	27.0	27.0	27.0	0	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA	19.0	16.0	17.5	17
	M24	< 0.05	< 0.05	< 0.05	NA	7.0	9.0	8.0	25	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA	2.3	2.8	2.5	20
	M25	< 0.05	< 0.05	< 0.05	NA	25.0	24.0	24.5	4	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA	113.0	109.0	111.0	4
	M26	< 0.05	< 0.05	< 0.05	NA	21.0	24.0	22.5	13	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA	112.0	117.0	114.5	4
	M27	< 0.05	< 0.05	< 0.05	NA	20.0	23.0	21.5	14	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA	99.0	98.0	98.5	1

a: Concentración en muestra original "S". b: Concentración en muestra duplicada "D". NA: no aplica

$$DPR = \frac{|S - D|}{|S + D|/2} \times 100. \text{ [Criterio de aceptación } DPR < 20\% \text{ (USEPA 1994d)]}$$

Apéndice 5 Concentración total de metales y metaloides potencialmente tóxicos en jales del Muestreo II, en el depósito "El Fraile", Taxco – Guerrero (continuación)

Sitio	Clave	Cr				Co				Ba				Ag			
		a	b	Promedio	DPR	a	b	Promedio	DPR	a	b	Promedio	DPR	a	b	Promedio	DPR
		mg/kg		%	mg/kg		%	mg/kg		%	mg/kg		%				
P 1	M1	117.0	130.0	123.5	11	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA	400	300	350	29	35.0	30.0	32.5	15
	M2	111.0	119.0	115.0	7	2.6	3.0	2.8	15	400	500	450	22	27.0	23.0	25.0	16
	M3	156.0	123.0	139.5	24	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA	530	590	560	11	36.0	31.0	33.5	15
	M4	182.0	222.0	202.0	20	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA	820	990	905	19	41.0	37.0	39.0	10
	M5	327.0	346.0	336.5	6	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA	500	498	499	0	14.0	11.0	12.5	24
	M6	90.0	106.0	98.0	16	5.5	6.5	6.0	17	620	690	655	11	9.0	8.0	8.5	12
	M7	119.0	124.0	121.5	4	5.0	6.0	5.5	18	430	470	450	9	17.0	14.0	15.5	19
	M8	86.0	93.0	89.5	8	5.0	6.0	5.5	18	510	490	500	4	16.0	18.0	17.0	12
P 2	M9	35.0	45.0	40.0	25	12.3	15.0	13.7	20	180	220	200	20	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA
	M10	174.0	139.0	156.5	22	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA	530	570	550	7	18.0	14.0	16.0	25
	M11	210.0	271.0	240.5	25	4.4	4.0	4.2	10	510	490	500	4	19.0	19.0	19.0	0
	M12	207.0	212.0	209.5	2	5.7	5.3	5.5	7	600	620	610	3	21.0	17.0	19.0	21
P 3	M13	243.0	285.0	264.0	16	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA	420	466	443	10	43.0	41.0	42.0	5
	M14	196.0	220.0	208.0	12	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA	390	384	387	2	23.0	22.0	22.5	4
	M15	271.0	279.0	275.0	3	17.0	15.0	16.0	13	432	454	443	5	24.0	21.0	22.5	13
	M16	207.0	186.0	196.5	11	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA	428	474	451	10	23.0	19.0	21.0	19
	M17	222.0	187.0	204.5	17	7.4	6.0	6.7	21	428	448	438	5	22.0	18.0	20.0	20
P 4	M18	188.0	164.0	176.0	14	16.9	15.0	16.0	12	350	384	367	9	19.0	16.0	17.5	17
	M19	216.0	174.0	195.0	22	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA	420	432	426	3	30.0	27.0	28.5	11
	M20	167.0	142.0	154.5	16	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA	460	448	454	3	49.0	43.0	46.0	13
	M21	126.0	155.0	140.5	21	2.5	2.5	2.5	2	310	276	293	12	25.0	21.0	23.0	17
P 5	M22	202.0	200.0	201.0	1	6.1	5.6	5.9	9	325	447	386	32	15.0	12.0	13.5	22
	M23	63.0	60.0	61.5	5	19.0	22.0	20.5	15	210	246	228	16	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA
	M24	271.0	328.0	299.5	19	< 0.01	< 0.01	< 0.01	NA	635	645	640	2	10.0	8.0	9.0	22
	M25	120.0	138.0	129.0	14	5.0	5.0	5.0	0	649	641	645	1	9.0	7.0	8.0	25
	M26	196.0	231.0	213.5	16	5.4	5.0	5.2	8	910	970	940	6	9.5	7.5	8.5	24
	M27	214.0	220.0	217.0	3	4.0	4.5	4.3	12	600	580	590	3	9.5	7.5	8.5	24

a: Concentración en muestra original "S". b: Concentración en muestra duplicada "D". NA: no aplica

$$DPR = \frac{|S - D|}{|S + D|/2} \times 100. \text{ [Criterio de aceptación } DPR < 20\% \text{ (USEPA 1994d)]}$$

Apéndice 5 Concentración total de metales y metaloides potencialmente tóxicos en jales del Muestreo II, en el depósito "El Fraile", Taxco – Guerrero (continuación)

Elementos Mayores (EM)										
Clave	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃
	%									
RTS3(*)	34.23	0.53	9.05	0.26	4.06	3.08	0.69	0.42	0.10	30.05
Lecturas por FRX										
RTS3 "a"	34.37	0.56	9.28	0.30	4.54	3.31	0.89	0.44	0.09	31.46
RTS3 "b"	34.32	0.56	9.26	0.30	4.57	3.31	0.79	0.44	0.09	31.45
RTS3 "c"	34.40	0.56	9.31	0.30	4.53	3.32	0.62	0.44	0.10	31.45
Promedio	34.37	0.56	9.28	0.30	4.55	3.31	0.77	0.44	0.09	31.45
Exactitud: % de recuperación (**) en la concentración de EM con relación a las reportadas en los jales de referencia										
	100.4	105.7	102.5	115.4	112.1	107.5	111.1	104.8	90.0	104.7
Metales y Metaloides Potencialmente Tóxicos (MMPT)										
Clave	Zn	Cu	Pb	As	Co	Cr	Se	Ni	Cd	Ag
	mg/kg									
RTS3(*)	0.19	2820.00	146.00	9.10	260.00	75.00	61.00	71.00	9.10	8.00
Lecturas por ICP-AES										
RTS3 "a"	0.19	2820.00	146.00	9.10	260.00	75.00	61.00	71.00	9.10	8.00
RTS3 "b"	0.17	3267.00	131.00	9.30	263.00	63.00	60.00	72.00	9.00	8.00
RTS3 "c"	0.18	2828.00	128.00	10.10	230.00	61.00		78.00	8.00	6.00
Promedio	0.18	2971.67	135.00	9.50	251.00	66.33	60.50	73.67	8.70	7.33
Exactitud: % de recuperación (**) en la concentración de EM con relación a las reportadas en los jales de referencia										
	96.94	105.38	92.47	104.40	96.54	88.44	99.18	103.76	95.60	91.67

(*) Concentraciones totales reportadas para los jales de referencia (CRM 1996. Canadian Certified Reference Materials Project. Mining and Minerals Sciences Laboratories)

(**) El % de recuperación no debe de ser mayor a $\pm 20\%$, para considerar que la exactitud de los métodos es aceptable (USEPA 1994b)

Apéndice 6 Exactitud de los métodos y técnicas de análisis en la determinación de las concentraciones totales de EM y MMPT en las muestras de jales del depósito "El Fraile", Taxco - Guerrero

PERFIL 1 (P 1)																
Muestras	M 1		M 2		M 3		M 4		M 5		M 6		M 7		M 8	
Agitación días	pH	Dif.														
1	2.26		4.26		2.43		2.36		2.48		5.40		6.02		6.20	
2	2.37	0.11	4.15	0.11	2.24	0.19	2.32	0.04	2.31	0.17	5.60	0.20	6.19	0.17	6.21	0.01
3	2.26	0.11	4.32	0.17	2.17	0.07	2.40	0.08	2.36	0.05	5.63	0.03	6.38	0.19	6.30	0.09
4	2.35	0.09	4.34	0.02	2.30	0.13	2.40	0.00	2.41	0.05	5.58	0.05	6.18	0.20	6.29	0.01
5	2.32	0.03	4.32	0.02	2.29	0.01	2.37	0.03	2.38	0.03	5.91	0.33	6.26	0.08	6.35	0.06
6	2.33	0.01	4.34	0.02	2.30	0.01	2.35	0.02	2.37	0.01	5.72	0.19	6.26	0.00	6.38	0.03
7	2.33	0.00	4.36	0.02	2.28	0.02	2.36	0.01	2.36	0.01	5.74	0.02	6.27	0.01	6.40	0.02
8	2.32	0.01	4.35	0.01	2.30	0.02	2.34	0.02	2.35	0.01	5.73	0.01	6.28	0.01	6.41	0.01
PERFIL 2 (P 2)																
Muestras	M 9		M 10		M 11		M 12									
Agitación días	pH	Dif.	pH	Dif.	pH	Dif.	pH	Dif.								
1	7.27		2.91		6.76		6.94									
2	7.59	0.32	2.71	0.20	6.96	0.20	7.13	0.19								
3	7.67	0.08	2.96	0.25	7.07	0.11	7.08	0.05								
4	7.49	0.18	2.94	0.02	7.08	0.01	7.14	0.06								
5	7.50	0.01	2.92	0.02	7.06	0.02	7.09	0.05								
6	7.53	0.03	2.89	0.03	7.05	0.01	7.08	0.01								
7	7.56	0.03	2.85	0.04	7.04	0.01	7.07	0.01								
8	7.55	0.01	2.86	0.01	7.05	0.01	7.06	0.01								
PERFIL 3 (P 3)																
Muestras	M 13		M 14		M 15		M 16		M 17		M 18					
Agitación días	pH	Dif.														
1	2.53		2.25		6.96		3.75		4.26		5.98					
2	2.42	0.11	2.33	0.08	7.25	0.29	3.63	0.12	5.95	1.69	6.47	0.49				
3	2.37	0.05	2.56	0.23	7.23	0.02	4.02	0.39	6.10	0.15	6.64	0.17				
4	2.50	0.13	2.45	0.11	7.20	0.03	4.01	0.01	6.01	0.09	6.47	0.17				
5	2.49	0.01	2.23	0.22	7.21	0.01	4.00	0.01	6.01	0.00	6.50	0.03				
6	2.48	0.01	2.25	0.02	7.23	0.02	4.10	0.10	6.04	0.03	6.49	0.01				
7	2.48	0.00	2.27	0.02	7.26	0.03	4.12	0.02	6.02	0.02	6.49	0.00				
8	2.46	0.02	2.25	0.02	7.28	0.02	4.11	0.01	6.00	0.02	6.48	0.01				
PERFIL 4 (P 4)																
Muestras	M 19		M 20		M 21		M 22									
Agitación días	pH	Dif.	pH	Dif.	pH	Dif.	pH	Dif.								
1	2.32		2.01		3.15		6.83									
2	2.10	0.22	1.96	0.05	3.07	0.08	6.73	0.10								
3	2.39	0.29	2.23	0.27	3.50	0.43	7.04	0.31								
4	2.31	0.08	2.08	0.15	3.49	0.01	6.95	0.09								
5	2.25	0.06	2.03	0.05	3.48	0.01	6.87	0.08								
6	2.26	0.01	2.03	0.00	3.47	0.01	6.89	0.02								
7	2.24	0.02	2.02	0.01	3.47	0.00	6.90	0.01								
8	2.22	0.02	2.00	0.02	3.47	0.00	6.92	0.02								
PERFIL 5 (P 5)																
Muestras	M 23		M 24		M 25		M 26		M 27							
Agitación días	pH	Dif.														
1	7.17		3.96		6.32		6.82		6.90							
2	7.31	0.14	3.66	0.30	6.46	0.14	7.11	0.29	6.95	0.05						
3	7.62	0.31	4.09	0.43	6.88	0.42	7.32	0.21	7.27	0.32						
4	7.54	0.08	4.07	0.02	6.83	0.05	7.31	0.01	7.20	0.07						
5	7.39	0.15	3.96	0.11	6.50	0.33	7.13	0.18	7.06	0.14						
6	7.43	0.04	3.97	0.01	6.45	0.05	7.10	0.03	7.09	0.03						
7	7.46	0.03	3.99	0.02	6.46	0.01	7.07	0.03	7.12	0.03						
8	7.49	0.03	3.97	0.02	6.45	0.01	7.08	0.01	7.11	0.01						

Dif.: Diferencia entre las lecturas de pH cada 24 horas de agitación

Apéndice 7 Lecturas diarias de pH del experimento de extracción para obtener el lixiviado a partir de las muestras sólidas de jales del depósito "El Fraile", Taxco – Guerrero.

PERFIL 1 (P 1)																		
Muestras Agitación días	M 1		M 2		M 3		M 4		M 5		M 6		M 7		M 8			
	CE	Dif.																
1	4.97		6.34		7.22		5.64		3.83		3.23		3.03		2.89			
2	5.26	0.29	6.62	0.28	7.54	0.32	5.91	0.27	4.43	0.60	3.90	0.67	3.13	0.10	2.99	0.10		
3	5.37	0.11	6.90	0.28	7.67	0.13	6.10	0.19	4.75	0.32	4.49	0.59	3.16	0.03	3.03	0.04		
4	5.55	0.18	7.20	0.30	7.88	0.21	6.29	0.19	5.05	0.30	4.84	0.35	3.21	0.05	3.08	0.05		
5	5.72	0.17	7.37	0.17	8.10	0.22	6.49	0.20	5.19	0.14	5.09	0.25	3.25	0.04	3.14	0.06		
6	5.85	0.13	7.61	0.24	8.35	0.25	6.69	0.20	5.36	0.17	5.24	0.15	3.37	0.12	3.20	0.06		
7	5.92	0.07	7.60	0.01	8.43	0.08	6.78	0.09	5.39	0.03	5.27	0.03	3.41	0.04	3.26	0.06		
8	5.98	0.06	7.59	0.01	8.46	0.03	6.81	0.03	5.38	0.01	5.28	0.01	3.36	0.05	3.22	0.04		
PERFIL 2 (P 2)																		
Muestras Agitación días	M 9		M 10		M 11		M 12											
	CE	Dif.	CE	Dif.	CE	Dif.	CE	Dif.										
1	0.45		2.73		2.16		1.50											
2	0.65	0.20	2.87	0.14	2.26	0.10	1.70	0.20										
3	0.72	0.07	2.88	0.01	2.29	0.03	1.83	0.13										
4	0.81	0.09	2.94	0.06	2.33	0.04	2.09	0.26										
5	0.84	0.03	2.98	0.04	2.37	0.04	2.31	0.22										
6	0.87	0.03	3.07	0.09	2.41	0.04	2.52	0.21										
7	0.88	0.01	3.10	0.03	2.45	0.04	2.61	0.09										
8	0.87	0.00	3.09	0.01	2.43	0.02	2.56	0.05										
PERFIL 3 (P 3)																		
Muestras Agitación días	M 13		M 14		M 15		M 16		M 17		M 18							
	CE	Dif.																
1	3.35		4.15		2.44		4.03		2.83		2.65							
2	3.53	0.18	4.31	0.16	2.55	0.11	4.07	0.04	2.86	0.03	2.72	0.07						
3	3.59	0.06	4.40	0.09	2.60	0.05	4.12	0.05	2.91	0.05	2.77	0.05						
4	3.63	0.04	4.53	0.13	2.67	0.07	4.16	0.04	2.96	0.05	2.81	0.04						
5	3.74	0.11	4.65	0.12	2.72	0.05	4.22	0.06	3.01	0.05	2.86	0.05						
6	3.86	0.12	4.78	0.13	2.78	0.06	4.30	0.08	3.10	0.09	2.95	0.09						
7	3.95	0.09	4.84	0.06	2.83	0.05	4.36	0.06	3.14	0.04	2.99	0.04						
8	3.92	0.03	4.89	0.05	2.79	0.04	4.29	0.07	3.10	0.04	2.95	0.04						
PERFIL 4 (p 4)																		
Muestras Agitación días	M 19		M 20		M 21		M 22											
	CE	Dif.	CE	Dif.	CE	Dif.	CE	Dif.										
1	5.88		7.78		7.71		2.88											
2	6.39	0.51	7.98	0.20	8.03	0.32	3.01	0.13										
3	6.72	0.33	8.16	0.18	8.21	0.18	3.06	0.05										
4	7.11	0.39	8.45	0.29	8.45	0.24	3.08	0.02										
5	7.37	0.26	8.89	0.44	8.62	0.17	3.16	0.08										
6	7.56	0.19	9.35	0.46	8.82	0.20	3.21	0.05										
7	7.60	0.04	9.40	0.05	8.73	0.09	3.26	0.05										
8	7.61	0.01	9.49	0.09	8.76	0.03	3.19	0.07										
PERFIL 5 (P 5)																		
Muestras Agitación días	M 23		M 24		M 25		M 26		M 27									
	CE	Dif.																
1	0.38		1.80		2.52		2.17		1.48									
2	0.44	0.06	2.02	0.22	2.63	0.11	2.31	0.14	1.68	0.21								
3	0.47	0.03	2.12	0.10	2.70	0.07	2.39	0.08	1.81	0.13								
4	0.51	0.04	2.34	0.22	2.74	0.04	2.42	0.03	1.92	0.11								
5	0.54	0.03	2.39	0.05	2.81	0.07	2.49	0.07	2.05	0.13								
6	0.57	0.03	2.48	0.09	2.91	0.10	2.56	0.07	2.19	0.14								
7	0.55	0.02	2.50	0.02	2.93	0.02	2.59	0.03	2.26	0.07								
8	0.54	0.00	2.45	0.05	2.89	0.04	2.57	0.02	2.26	0.00								

CE: Conductividad eléctrica (mS/cm)

Dif.: Diferencia entre las lecturas de CE cada 24 horas de agitación

Apéndice 8 Lecturas diarias de conductividad eléctrica (CE) del experimento de extracción para obtener el lixiviado a partir de las muestras sólidas de jales del depósito "El Fraile", Taxco – Guerrero.

Sitio	Clave	pH	CE	Zn	Cd	Fe	Pb	Cu	Ca	Mg	Mn	As	Al	Na	Ni	K	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	Error % Balance de Cargas
			mS/cm	mg/L																
P 1	M1	2.3	5.98	390	4.23	630.8	< 0.01	9.93	445	81.9	109	4.02	121	0.8	0.25	0.9	5121.00	< 0.5	NA	7.0
	M2	4.4	7.59	2435	25.03	6.78	0.62	4.65	411	350	600	0.102	182	0.8	1.19	1.5	6730.50	1.25	18.3	8.5
	M3	2.3	8.46	1309	18.20	314.4	< 0.01	16.75	437	238	328	0.026	288	1.5	0.67	1.3	6853.20	< 0.5	NA	0.2
	M4	2.3	6.81	696	8.92	444.5	0.09	18.04	441	152	159	0.063	326	0.2	0.44	0.1	5378.00	< 0.5	NA	4.5
	M5	2.4	5.38	325	4.38	166.8	< 0.01	9.78	466	89.0	96.4	0.198	155	1.0	0.29	0.8	3625.60	< 0.5	NA	3.3
	M6	5.7	5.28	1259	71.37	1.68	1.12	0.03	399	91.1	620	0.043	< 3	0.3	0.51	1.0	4868.40	2.05	48.8	6.8
	M7	6.3	3.36	425	26.07	3.34	0.39	<0.005	456	39.3	233	0.036	< 3	0.8	0.13	2.0	2640.80	1.63	45.75	8.0
	M8	6.4	3.22	322	24.55	1.57	0.69	<0.005	473	41.0	232	0.029	< 3	0.6	0.52	2.0	2493.20	1.26	36.6	7.3
P 2	M9	7.6	0.87	0.14	0.01	0.37	< 0.01	<0.005	154	6.7	0.8	0.001	< 3	1.1	0.00	0.9	390.66	1.2	115.9	9.3
	M10	2.9	3.09	50.4	0.55	5.78	< 0.01	2.15	492	35.0	16.9	0.061	44.3	0.7	0.13	0.7	2047.40	< 0.5	NA	9.9
	M11	7.1	2.43	5.8	0.51	1.00	0.17	0.02	530	21.3	23.8	0.052	< 3	1.0	0.00	2.1	1571.00	0.84	57.95	6.8
	M12	7.1	2.56	11.2	0.37	1.04	0.30	0.01	516	38.6	13.5	0.007	< 3	0.5	0.04	2.0	1579.30	7.73	12.2	5.5
P 3	M13	2.5	3.92	106.7	1.11	28.98	0.05	2.10	492	14.70	31.20	0.010	35.4	0.8	0.08	0.5	2277.70	< 0.5	NA	13.4
	M14	2.3	4.89	257.9	3.09	49.02	0.10	4.87	462	59.60	119	0.012	73.1	0.5	0.20	0.2	2867.60	< 0.5	NA	7.7
	M15	7.3	2.79	1.70	0.03	0.41	0.13	0.01	491	125.0	6.10	0.010	< 3	1.4	0.00	2.3	1976.20	0.87	82.35	9.4
	M16	4.1	4.29	645.3	3.62	1.48	0.11	0.53	436	147.0	397	0.046	12.8	1.6	0.53	1.8	3714.60	0.69	24.4	5.2
	M17	6.0	3.1	223.3	19.28	0.35	1.12	0.14	470	60.40	195	0.058	< 3	0.9	0.00	1.8	2331.00	0.88	48.8	7.1
	M18	6.5	2.95	129.6	4.23	0.30	1.85	0.01	494	51.70	192	<0.001	< 3	0.7	0.38	2.0	2183.30	3.91	48.8	7.4
P 4	M19	2.2	7.61	432.1	4.50	2568	< 0.01	18.33	442	123	69.0	164.0	370	0.7	0.53	0.6	10085.50	< 0.5	NA	4.0
	M20	2.0	9.49	396.5	4.20	2288	< 0.01	15.56	433	108	57.9	101.0	277	1.9	0.47	1.3	8237.00	< 0.5	NA	7.5
	M21	3.5	8.76	2415	30.60	659	< 0.01	38.21	395	257	421	0.365	337	1.3	1.16	0.6	8540.50	< 0.5	NA	7.1
	M22	6.9	3.19	11.10	0.33	1.41	0.16	0.03	473	223	29.2	0.053	< 3	0.4	<0.02	0.3	2278.90	0.76	73.2	5.7
P 5	M23	7.5	0.54	2.20	0.00	1.02	0.05	<0.005	96	3.28	0.05	0.002	< 3	1.3	<0.02	0.6	126.18	1.64	60.8	15.2
	M24	4.0	2.45	36.70	0.41	1.51	0.12	1.13	509	20.8	9.60	0.020	8.38	0.9	<0.02	1.2	1533.70	< 0.5	NA	3.6
	M25	6.5	2.89	126	4.53	1.69	0.11	0.02	507	63.7	90.0	0.022	< 3	1.2	0.03	2.5	1479.20	3.4	36.6	9.3
	M26	7.1	2.57	9.2	0.42	0.33	0.04	0.03	519	57.0	21.7	0.012	< 3	1.3	<0.02	2.9	1574.30	0.73	21.35	2.0
	M27	7.1	2.26	15.5	0.97	0.54	0.27	0.02	449	38.4	16.0	0.009	< 3	1.1	<0.02	3.0	1208.80	5.77	33.55	1.7

NA: no aplica

Relación sólido – extractante de la prueba de extracción: 50 g jales – 150 ml de agua destilada

Apéndice 9 Concentración “soluble” de EM y MMPT en los lixiviados obtenidos de las muestras sólidas de jales del depósito “El Fraile”, Taxco – Guerrero.

Clave	Lecturas	pH	CE	Zn	Cd	Fe	Pb	Cu	Ca	Mg	Mn	As	Al	Na	K	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
			mS/cm	mg/L													
M 1	a	2.3	5.98	390	4.23	630.8	< 0.01	9.93	445	81.9	109	4.02	121	0.8	0.9	5121.00	< 0.5
	b	2.2	5.96	401	4.29	640	< 0.01	9.90	452	81.8	109	4.39	124	0.6	0.8	4944.4	< 0.5
	DPR %	7.6	0.3	2.7	1.4	1.4	NA	0.3	1.6	0.1	0.2	8.8	2.4	28.6	11.8	3.5	NA
M 10	a	2.9	3.09	50.4	0.55	5.78	< 0.01	2.15	492	35.0	16.9	0.061	44.3	0.7	0.7	2047.40	< 0.5
	b	2.6	3.13	48.7	0.55	7.91	< 0.01	2.27	492	34.6	16.4	0.055	47.0	0.6	0.6	1974	< 0.5
	DPR %	8.0	1.3	3.4	0.0	31.1	NA	5.4	0.0	1.1	3.0	10.3	5.9	15.4	24.0	3.7	NA
M 19	a	2.2	7.61	432.1	4.50	2568	< 0.01	18.33	442	123	69.0	164.0	370	0.7	0.6	10085.50	< 0.5
	b	2.4	7.32	396	4.20	2343	< 0.01	16.91	444	114	63.2	144	343	0.6	0.5	8941.6	< 0.5
	DPR %	7.8	3.9	8.7	6.9	9.2	NA	8.1	0.5	7.6	8.8	13.0	7.6	15.4	18.2	12.0	NA
M 24	a	4.0	2.45	36.70	0.41	1.51	0.12	1.13	509	20.8	9.60	0.020	8.38	0.9	1.2	1533.70	< 0.5
	b	3.8	2.47	40.8	0.45	1.66	0.10	1.20	516	21.1	9.6	0.019	9.05	0.9	1.4	1505.2	< 0.5
	DPR %	5.2	0.8	10.6	9.3	9.5	18.2	6.0	1.4	1.4	0.0	5.1	7.7	0.0	15.4	1.9	NA

a: concentración en muestra original "S". b: Concentración en muestra duplicada "D". NA: no aplica

$$DPR = \frac{|S - D|}{|S + D|/2} \times 100. \text{ [Criterio de aceptación } DPR < 20\% \text{ (USEPA 1994d)]}$$

Apéndice 10 Reproducibilidad de los experimentos de extracción para obtener los lixiviados a partir de muestras sólidas de jales en el depósito "El Fraile", Taxco - Guerrero

Mineral	Fórmula	M1	M3	M4	M5	M10	M13	M14	M15	M19	M20	M24	Zona de Oxidación		
		Capas No Compactas											Capa de Fe		
		pH	2.3	2.3	2.3	2.4	2.9	2.5	2.3	7.3	2.2	2.0	4.0	4.4	4.1
Sulfato-Al	Al(OH)SO ₄	-0.4	0.0	0.0	-0.1	-0.1	-0.6	-0.5		0.0	-0.4	0.3	1.9	0.5	1.2
	Al ₄ (OH) ₁₀ SO ₄	-16.6	-15.8	-15.3	-15.3	-12.1	-16.5	-17.4		-16.4	-18.6	-3.7	4.2	-2.9	-3.9
Alunita	KAl ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	-5.2	-4.1	-4.9	-4.2	-2.6	-5.5	-6.3		-4.8	-5.9	2.1	7.9	3.0	2.7
Anhidrita	CaSO ₄	0.0	-0.1	-0.1	-0.1	0.0	0.0	-0.1	0.0	-0.1	-0.1	0.0	-0.1	0.0	-0.1
Boehmita	AlOOH	-5.5	-5.2	-5.0	-5.0	-3.9	-5.2	-5.6		-5.4	-6.0	-1.3	0.9	-1.1	-1.7
Calcita	CaCO ₃								0.0				-5.6		
Diásporo	AlOOH	-3.8	-3.5	-3.3	-3.3	-2.2	-3.5	-3.8		-3.7	-4.3	0.4	2.6	0.6	0.1
Ferridrita	Fe(OH) ₃	-2.0	-2.4	-2.2	-2.2	-2.1	-2.6	-3.0	2.8	-1.8	-2.3	-0.1	1.0	-0.1	0.9
	Fe(OH) ₂ Cl _{0.3}								7.1				6.2	5.2	
Sulfato-Fe	Fe ₂ (SO ₄) ₃	-17.9	-18.5	-18.3	-19.1	-22.1	-20.6	-20.2	-38.7	-16.7	-16.9	-24.9	-24.3	-24.7	-18.7
Gibbsita	Al(OH) ₃	-5.7	-5.4	-5.2	-5.2	-4.1	-5.4	-5.7		-5.6	-6.2	-1.4	0.7	-1.3	-1.8
Goetita	FeOOH	2.4	2.0	2.2	2.2	2.2	1.8	1.4	7.2	2.6	2.1	4.3	5.4	4.3	5.3
Yeso	CaSO ₄ ·2H ₂ O	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1
Hematita	Fe ₂ O ₃	9.7	9.0	9.5	9.3	9.5	8.6	7.8	19.3	10.2	9.2	13.5	15.8	13.7	15.7
Jarosita-Na	NaFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	4.1	3.3	3.1	3.2	1.7	1.5	0.8	3.6	5.1	4.4	4.4	7.0	5.0	9.9
Jarosita-K	KFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	7.5	6.6	6.1	6.5	5.1	4.7	3.8	7.1	8.4	7.6	7.9	10.7	8.4	12.9
Jarosita-H	H ₃ OFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	7.3	6.3	6.9	6.2	4.3	4.5	4.2	1.5	8.5	7.5	5.8	8.1	6.1	11.7
Maghemita	Fe ₂ O ₃	-0.7	-1.4	-0.9	-1.1	-0.9	-1.8	-2.6	8.9	-0.2	-1.2	3.2	5.4	3.3	5.3
Sulfato-Mn	MnSO ₄	-8.1	-7.6	-8.0	-8.2	-8.9	-8.7	-8.1	-9.4	-8.3	-8.4	-9.2	-7.3	-7.5	-7.5
Antlerita	Cu ₃ (OH) ₄ SO ₄	-14.5	-13.9	-13.8	-14.1	-13.9	-15.6	-15.4	-5.4	-14.3	-15.2	-10.3	-7.2	-11.1	-8.2
Brochantita	Cu ₄ (OH) ₆ SO ₄	-21.4	-20.7	-20.4	-20.8	-20.2	-22.7	-22.5	-5.9	-21.1	-22.6	-14.6	-10.3	-15.7	-12.2
Langita	Cu ₄ (OH) ₆ SO ₄ ·H ₂ O	-22.9	-22.1	-21.9	-22.2	-21.7	-24.1	-23.9	-7.4	-22.6	-24.0	-16.1	-11.8	-17.1	-13.6
Tenorita	CuO	-7.5	-7.3	-7.2	-7.2	-6.8	-7.6	-7.7	-1.1	-7.5	-7.9	-4.9	-3.7	-5.1	-4.6
Sulfato-Cu	CuSO ₄	-9.5	-9.3	-9.3	-9.6	-10.2	-10.2	-9.9	-13.3	-9.3	-9.4	-10.5	-9.9	-10.8	-8.9
Chalcantita	CuSO ₄ ·5H ₂ O	-3.9	-3.7	-3.7	-3.9	-4.6	-4.6	-4.2	-7.6	-3.7	-3.8	-4.9	-4.2	-5.1	-3.3
Ferrita-Cu	CuFe ₂ O ₄	0.0	-0.6	0.0	-0.2	0.4	-1.4	-2.2	16.0	0.5	-1.0	6.4	9.9	6.2	8.8
Zincita	ZnO	-9.5	-9.0	-9.2	-9.3	-9.0	-9.5	-9.6	-1.8	-9.7	-10.1	-6.9	-4.5	-5.7	-6.4
Sulfato-Zn	ZnSO ₄ ·H ₂ O	-4.4	-3.9	-4.2	-4.5	-5.3	-5.0	-4.6	-6.8	-4.4	-4.5	-5.5	-2.9	-4.2	-3.6
Bianchita	ZnSO ₄ ·6H ₂ O	-3.2	-2.7	-3.0	-3.3	-4.1	-3.8	-3.5	-5.6	-3.2	-3.3	-4.3	-2.5	-3.0	-2.5
Goslarita	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	-3.0	-2.5	-2.8	-3.2	-4.0	-3.6	-3.3	-5.5	-3.0	-3.1	-4.1	-2.3	-2.8	-2.3
Sulfatos-Cd	CdSO ₄	-7.2	-6.5	-6.9	-7.2	-8.1	-7.7	-7.3	-9.3	-7.2	-7.2	-6.6	-6.4	-7.2	-6.3
	CdSO ₄ ·H ₂ O	-5.6	-5.0	-5.3	-5.6	-6.5	-6.2	-5.8	-7.8	-5.6	-5.7	-6.4	-4.8	-5.7	-4.8
	CdSO ₄ ·2.7H ₂ O	-5.4	-4.8	-5.1	-5.4	-6.3	-6.0	-5.5	-7.6	-5.4	-5.5		-4.6	-5.4	-4.5
Cerusita	PbCO ₃								-0.5			-1.4	-4.7		
Anglesita	PbSO ₄			-1.6			-1.8	-1.5	-2.0				-0.7	-1.4	
Arseniatos-M	AlAsO ₄ ·2H ₂ O	-6.6	-8.6	-8.0	-7.5	-7.3	-9.1	-9.2		-4.9	-5.6	-6.2	-3.8	-5.8	-4.9
	Ca ₃ (AsO ₄) ₂ ·6H ₂ O	-26.2	-30.7	-29.8	-28.1	-26.6	-30.0	-30.9	-12.2	-23.6	-24.9	-22.9	-20.9	-22.4	-23.6
	Cu ₃ (AsO ₄) ₂ ·6H ₂ O	-15.5	-19.4	-18.4	-17.6	-18.1	-21.5	-21.3	-12.8	-12.1	-13.6	-15.2	-11.1	-15.6	-11.0
	FeAsO ₄ ·2H ₂ O	-2.5	-5.1	-4.4	-4.0	-4.8	-5.8	-6.0	-5.9	-0.6	-1.2	-4.3	-2.9	-4.0	-1.6
	Mn ₃ (AsO ₄) ₂ ·8H ₂ O	-18.6	-21.7	-21.7	-20.7	-21.6	-24.1	-23.3	-8.5	-16.6	-18.1	-18.4	-10.9	-13.1	-14.0
	Pb ₃ (AsO ₄) ₂			-27.2			-28.1	-28.2	-11.1			-20.0	-15.7	-19.7	
Zn ₃ (AsO ₄) ₂ ·2.5H ₂ O	-18.5	-21.5	-21.3	-20.7	-21.7	-24.1	-23.8	-11.8	-15.8	-17.1	-18.4	-10.7	-14.1	-13.4	
Ferrita-Mg	MgFe ₂ O ₄		-9.9	-9.5	-9.7	-8.8	-11.0	-11.6	10.3	-9.1	-10.6	-2.8	1.3	-1.7	-0.8
Lepidocrosita	FeOOH	1.5	1.1	1.4	1.3	1.4	0.9	0.5	6.3	1.7	1.2	3.4	4.5	3.9	4.5

Apéndice 11 Índices de Saturación (IS) para diferentes minerales en muestras de jales en la zona de oxidación del depósito de jales "El Fraile", Taxco – Guerrero

Mineral	Fórmula	M6	M11	M17	M22	M25
	pH	5.7	7.1	6.0	6.9	6.5
Anhidrita	CaSO ₄	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1
Aragonita	CaCO ₃	-2.1	-0.4	-1.8	-0.6	-1.3
Calcita	CaCO ₃	-1.9	-0.3	-1.6	-0.5	-1.1
Ferrihidrita	Fe(OH) ₃	1.8	3.0	1.5	3.0	2.7
	Fe(OH) _{2.7} Cl _{0.3}		7.4	6.2	7.4	7.4
Sulfato-Fe	Fe ₂ (SO ₄) ₃	-30.3	-37.2	-33.3	-35.8	-34.5
Goetita	FeOOH	6.2	7.4	5.9	7.3	7.1
Yeso	CaSO ₄ ·2H ₂ O	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1
Hematita	Fe ₂ O ₃	17.5	19.8	16.7	19.7	19.1
Jarosita-Na	NaFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	5.3	4.6	3.5	4.8	5.3
Jarosita-K	KFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	9.2	8.2	7.1	8.1	9.0
Jarosita-H	H ₃ OFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	5.5	2.8	2.9	3.7	4.1
Maghemita	Fe ₂ O ₃	7.1	9.4	6.4	9.3	8.7
Rodocrosita	MnCO ₃	0.1	0.2	-0.2	0.1	-0.1
Sulfato-Mn	MnSO ₄	-7.3	-8.8	-7.8	-8.7	-8.3
Antlerita	Cu ₃ (OH) ₄ SO ₄	-8.7	-4.6	-5.3	-4.4	-5.9
Brochantita	Cu ₄ (OH) ₆ SO ₄	-11.4	-4.9	-6.6	-4.9	-7.1
Langita	Cu ₄ (OH) ₆ SO ₄ ·H ₂ O	-12.8	-6.4	-8.1	-6.3	-8.5
Tenorita	CuO	-3.3	-0.9	-1.9	-1.0	-1.7
Sulfato-Cu	CuSO ₄	-12.1	-12.8	-11.5	-12.4	-12.5
Chalcantita	CuSO ₄ ·5H ₂ O	-6.4	-7.1	-5.8	-6.7	-6.8
Ferrita-Cu	CuFe ₂ O ₄	11.9	16.6	12.6	16.4	15.1
Smithsonita	ZnCO ₃	-0.2	-1.0	-0.7	-0.9	-0.4
Carbonato-Zn	ZnCO ₃ ·H ₂ O	0.1	-0.7	-0.4	-0.6	-0.2
Zincita	ZnO	-2.2	-1.6	-2.2	-1.7	-1.4
Sulfato-Zn	ZnSO ₄ ·H ₂ O	-3.9	-6.3	-4.7	-6.0	-5.0
Bianchita	ZnSO ₄ ·6H ₂ O	-2.7	-5.1	-3.5	-4.8	-3.8
Goslarita	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	-2.5	-4.9	-3.3	-4.6	-3.6
Otavita	CdCO ₃	2.0	1.4	1.7	1.0	1.6
Sulfatos-Cd	CdSO ₄	-5.9	-8.1	-6.5	-8.3	-7.2
	CdSO ₄ ·H ₂ O	-4.4	-6.6	-4.9	-6.7	-5.7
	CdSO ₄ ·2.7H ₂ O	-4.1	-6.4	-4.7	-6.5	-5.4
Cerusita	PbCO ₃	-0.9	-0.5	-0.6	-0.6	-1.1
Anglesita	PbSO ₄	-0.5	-1.7	-0.5	-1.6	-1.6
Arseniatos-M	Ca ₃ (AsO ₄) ₂ ·6H ₂ O	-16.5	-11.0	-14.5	-11.9	-13.4
	Cu ₃ (AsO ₄) ₂ ·6H ₂ O	-13.4	-10.0	-9.7	-9.8	-11.3
	FeAsO ₄ ·2H ₂ O	-3.8	-4.6	-4.4	-4.3	-4.3
	Mn ₃ (AsO ₄) ₂ ·8H ₂ O	-6.5	-5.6	-6.2	-6.1	-6.2
	Pb ₃ (AsO ₄) ₂	-10.8	-9.0	-8.9	-9.6	-10.9
	Zn ₃ (AsO ₄) ₂ ·2.5H ₂ O	-7.2	-9.0	-7.7	-9.0	-7.3
Ferrita-Mg	MgFe ₂ O ₄	5.0	9.7	4.8	10.1	8.3
Lepidocrosita	FeOOH	5.4	6.5	5.0	6.5	6.2

Apéndice 12 Índices de Saturación (IS) para diferentes minerales en muestras de jales en la zona de transición del depósito de jales "El Fraile", Taxco – Guerrero

Mineral	Fórmula	M7	M8	M12	M18	M26	M27
	pH	6.3	6.4	7.1	6.5	7.1	7.1
Anhidrita	CaSO ₄	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1
Aragonita	CaCO ₃	-1.2	-1.2	-0.8	-1.2	-0.9	0.8
Calcita	CaCO ₃	-1.1	-1.1	-0.7	-1.1	-0.7	1.0
Ferrihidrita	Fe(OH) ₃	2.8	2.5	3.5	1.9	2.5	2.7
	Fe(OH) _{2.7} Cl _{0.3}	7.5	7.2	8.1	6.7	6.9	6.8
Sulfato-Fe	Fe ₂ (SO ₄) ₃	-32.5	-33.6	-36.3	-35.5	-38.2	-48.5
Goetita	FeOOH	7.1	6.9	7.9	6.3	6.9	7.1
Yeso	CaSO ₄ ·2H ₂ O	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1
Hematita	Fe ₂ O ₃	19.3	18.8	20.7	17.6	18.8	19.2
Jarosita-Na	NaFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	6.4	5.3	5.7	3.1	3.2	-1.6
Jarosita-K	KFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	10.2	9.1	9.7	6.9	6.9	2.2
Jarosita-H	H ₃ OFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	5.6	4.4	4.2	2.1	1.3	-5.2
Maghemita	Fe ₂ O ₃	8.9	8.4	10.3	7.2	8.4	8.8
Rodocrosita	MnCO ₃	0.4	0.4	-0.4	0.3	-0.3	1.3
Sulfato-Mn	MnSO ₄	-7.7	-7.8	-9.0	-7.8	-8.8	-9.0
Antlerita	Cu ₃ (OH) ₄ SO ₄			-5.2	-6.9	-3.8	-6.8
Brochantita	Cu ₄ (OH) ₆ SO ₄			-5.8	-8.4	-3.9	-6.7
Langita	Cu ₄ (OH) ₆ SO ₄ ·H ₂ O			-7.2	-9.9	-5.3	-8.1
Tenorita	CuO			-1.1	-2.1	-0.6	-0.4
Sulfato-Cu	CuSO ₄			-13.0	-12.7	-12.5	-15.9
Chalcantita	CuSO ₄ ·5H ₂ O			-7.3	-7.0	-6.9	-10.2
Ferrita-Cu	CuFe ₂ O ₄			17.3	13.2	15.9	16.5
Smithsonita	ZnCO ₃	0.1	0.0	-1.1	-0.4	-1.2	0.2
Carbonato-Zn	ZnCO ₃ ·H ₂ O	0.4	0.3	-0.8	-0.1	-0.9	0.4
Zincita	ZnO	-1.4	-1.3	-1.3	-1.5	-1.3	1.8
Sulfato-Zn	ZnSO ₄ ·H ₂ O	-4.4	-4.5	-6.0	-4.9	-6.1	-6.5
Bianchita	ZnSO ₄ ·6H ₂ O	-3.2	-3.3	-4.8	-3.7	-4.9	-5.3
Goslarita	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	-3.0	-3.1	-4.6	-3.5	-4.7	-5.1
	Zn ₄ (OH) ₆ SO ₄						3.4
Otavita	CdCO ₃	2.4	2.4	0.9		0.9	2.8
Sulfatos-Cd	CdSO ₄	-6.4	-6.4	-8.3		-8.2	-8.1
	CdSO ₄ ·H ₂ O	-4.8	-4.8	-6.7		-6.6	-6.5
	CdSO ₄ ·2.7H ₂ O	-4.6	-4.6	-6.5		-6.4	-11.1
Cerusita	PbCO ₃	-0.6	-0.3	-0.4	0.1	-1.3	-0.1
Anglesita	PbSO ₄	-1.0	-0.8	-1.3	-0.4	-2.1	-2.7
	Pb(OH) ₂						1.4
hidrocerusita	Pb(OH) ₂ ·2PbCO ₃						0.6
Arseniatos-M	AlAsO ₄ ·2H ₂ O						
	Ca ₃ (AsO ₄) ₂ ·6H ₂ O	-14.1	-13.8	-12.8		-12.3	-8.9
	Cu ₃ (AsO ₄) ₂ ·6H ₂ O			-12.5		-10.5	-17.0
	FeAsO ₄ ·2H ₂ O	-3.7	-4.2	-5.0		-5.7	-9.0
	Mn ₃ (AsO ₄) ₂ ·8H ₂ O	-5.5	-5.3	-8.1		-7.0	-3.8
	Pb ₃ (AsO ₄) ₂	-10.0	-9.1	-9.5		-11.5	-9.4
	Zn ₃ (AsO ₄) ₂ ·2.5H ₂ O	-6.3	-6.5	-9.9		-9.7	-7.1
Ferrita-Mg	MgFe ₂ O ₄	7.8	7.5	10.9	6.6	9.1	12.9
Lepidocrosita	FeOOH	6.3	6.0	7.0	5.4	6.0	6.2

Apéndice 13 Índices de Saturación (IS) para diferentes minerales en muestras de jales en la zona de jales inalterados del depósito de jales "El Fraile", Taxco - Guerrero