

5 03060



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

EXPERIMENTOS DE LABORATORIO
PARA EVALUAR LOS SOLUTOS
LIXIVIABLES EN JALES DEL DISTRITO
MINERO PACHUCA-REAL DEL MONTE

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE :

MAESTRO EN CIENCIAS

(OPCION AGUAS SUBTERRANEAS)

P R E S E N T A :

EVODIO PEDRO CASTAÑEDA OVANDO

DIRECTOR DE LA TESIS:
DR. MARCOS ADRIAN ORTEGA GUERRERO

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



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.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

DEDICATORIAS

A Marce
Que siempre ha confiado en mí, brindándome
su apoyo y comprensión en los momentos difíciles

A mi Abuelita
Que nunca se dejó vencer ante la adversidad,
siendo un artífice importante en mi formación

A mi Mamá
Que ha sido un pilar importante
en el logro de mis metas

A mis hijos Geovani y Guillermo
Con todo mi cariño

A mis Hermanos
Por el apoyo recibido

AGRADECIMIENTOS

Hago patente mi agradecimiento a la Universidad Nacional Autónoma de México, en especial a los Institutos de Geología y Geofísica, por brindarme el apoyo para realizar estudios de posgrado, básicos en mi consolidación como profesionista.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo recibido para la realización de este trabajo.

A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por su apoyo y facilidades brindadas durante la realización de mis estudios de posgrado.

Mi más sincero agradecimiento al Dr. Marcos Adrián Ortega Guerrero por el apoyo y disposición brindada durante el desarrollo del presente trabajo de tesis.

De igual manera agradezco a la Dra. Ma. Aurora Armienta, Dr. Alejandro Carrillo Chávez y Dr. José Joel Carrillo Rivera, por sus acertadas correcciones y sugerencias que sirvieron para enriquecer este trabajo de tesis.

También pongo de manifiesto mi agradecimiento al Dr. Otilio Arturo Acevedo Sandoval, Director del Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, por sus acertadas sugerencias y facilidades otorgadas durante el desarrollo del trabajo experimental y analítico de esta investigación.

En forma especial agradezco al M. en C. Diego A. Córdoba Méndez, Coordinador de Investigación y Posgrado de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, por el apoyo desinteresado recibido al inicio de esta aventura que hoy culmina.

Mi agradecimiento a todas aquellas personas que de alguna manera contribuyeron a la realización del presente trabajo de tesis.

CONTENIDO

	Página
RESUMEN	
CAPITULO I INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 NECESIDAD DE ESTUDIAR LOS JALES PRODUCIDOS EN EL DISTRITO MINERO DE PACHUCA-REAL DEL MONTE	3
1.3 OBJETIVOS	5
CAPITULO 2 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	6
2.1 GEOLOGÍA	6
2.2 HIDROGEOLOGÍA	8
2.2.1 Hidrología superficial	8
2.2.2 Hidrología subterránea	9
2.3 HISTORIA DE GENERACIÓN DE JALES EN EL SITIO DE ESTUDIO	10
2.3.1 Producción de jales en el Distrito Minero Pachuca-Real del Monte	10
2.3.2 Depósito de jales en la Ciudad de Pachuca	11
2.3.3 Evolución del manejo de los jales	12
2.3.4 Agua utilizada en el beneficio de minerales	13
CAPITULO 3 METODOLOGÍA	15
3.1 RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN	15
3.2 MUESTREO DE JALES	15
3.2.1 Muestras para columnas de lixiviación	15
3.2.2 Muestras para celdas húmedas	16
3.2.3 Muestras para pruebas estáticas	16
3.3 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS JALES	16
3.4 TRABAJO EXPERIMENTAL	19
3.4.1 Celdas húmedas	19
3.4.2 Columnas de lixiviación	20
3.5 ANÁLISIS QUÍMICOS	21
3.5.1 Fase acuosa	21

	Página
3.5.2 Fase sólida	23
3.6 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	26
3.6.1 Pruebas estáticas	26
3.6.2 Pruebas cinéticas	27
3.6.3 Índices de saturación	28
CAPITULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
4.1 PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y MINERALOGICAS DE LOS JALES	29
4.2 PRUEBAS ESTÁTICAS	31
4.3 COLUMNAS DE LIXIVIACIÓN	33
4.4 CELDAS HÚMEDAS	40
4.5 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS CELDAS HÚMEDAS	49
4.6 MODELACIÓN HIDROGEOQUÍMICA	49
4.7 IMPLICACIONES	50
CAPITULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	52
5.1 CONCLUSIONES	52
5.2 RECOMENDACIONES	54
BIBLIOGRAFÍA	55
ANEXOS	

Índice de Figuras

		Página
Figura 1	Localización de los depósitos de jales y pozos de agua (cercaos) existentes en la ciudad de Pachuca, Hidalgo (adaptado de INEGI,1999)	3
Figura 2	Localización de las muestras tomadas del depósito de jales	5
Figura 3	Unidades Litoestratigráficas aflorantes (Modificado de Geyne, <i>et al.</i> , 1963)	7
Figura 4	Localización de la subcuenca del Río de Las Avenidas (Huizar, 1997)	9
Figura 5	Localización del Distrito Minero de Pachuca-Real del Monte (C.R.M., 1992)	11
Figura 6	Diagrama general de la Planta de Beneficio de Loreto (Navarro, 1998).	Anexo B
Figura 7	Regeneración de Cianuro (Navarro, 1998).	Anexo B
Figura 8	Presa de jales aguas arriba con terminología usada en minería (Wills, 1989)	14
Figura 9	Deposito de partículas por tamaño en presas de jales con terminología usada en minería (adaptado de Robertson, 1994 b)	14
Figura 10	Entradas y salidas de agua en el depósito de jales	14
Figura 11	Arreglo esquemático de una celda húmeda (modificado de Mills, 1999d)	20
Figura 12	Arreglo esquemático de una columna de lixiviación sub aérea (modificado de Mills, 1999d)	21
Figura 13	Diagrama de flujo que representa los análisis realizados a las muestras de jales utilizadas en el presente trabajo	Anexo C
Figura 14	Diagrama de flujo para la determinación de cloruros y bicarbonatos por el método volumétrico	Anexo C

	Página
Figura 15 Diagrama de flujo para determinar sulfatos por el método Turbidimetrico	Anexo C.
Figura 16 Difractograma obtenido en el análisis por DRX de la muestra JPM-1	Anexo E
Figura 17 Difractograma obtenido en el análisis por DRX de la muestra JPM-3	Anexo E
Figura 18 Difractograma obtenido en el análisis por DRX de la muestra JPM-4	Anexo E
Figura 19 Relación potencial de neutralización, NPR (NP/AP) versus azufre como sulfuro ubicación de las muestras usadas para las celdas húmedas del Distrito Minero de Pachuca-Real del Monte	33
Figura 20 Solutos lixiviados en las columnas de lixiviación (a) COL-1 y (b) COL-3	35
Figura 21 Solutos lixiviados en la columna de lixiviación COL-4	36
Figura 22 Concentración de aniones y cationes en las columnas de lixiviación	36
Figura 23 Concentración de metales lixiviados en las columnas de lixiviación	37
Figura 24 Concentración de calcio, sulfato y manganeso lixiviados en las columnas de lixiviación	38
Figura 25 Concentración acumulada de aniones y cationes en lixiviados de las columnas de lixiviación	38
Figura 26 Concentración acumulada de metales en lixiviados de las columnas de lixiviación	39
Figura 27 Concentración acumulada de calcio, sulfato y manganeso en lixiviados de las columnas de lixiviación	39
Figura 28 Difractograma obtenido en el análisis por DRX de las sales obtenidas en la COL-2	Anexo E
Figura 29 Solutos lixiviados por ciclo en las celdas húmedas: (a) JPM-1 y (b) JPM-2	42

	Página	
Figura 30	Solutos lixiviados por ciclo en las celdas húmedas: (a) JPM-3 y (b) JPM-4	43
Figura 31	Solutos lixiviados por ciclo en las celdas húmedas: (a) JPM-5 y (b) JPM-6	44
Figura 32	Cationes y aniones lixiviados por ciclo en las celdas húmedas	45
Figura 33	Concentración de calcio, sulfato, aluminio, hierro y manganeso por ciclo en lixiviados de las celdas húmedas	45
Figura 34	Concentración de metales por ciclo en lixiviados de las celdas húmedas	46
Figura 35	Concentración acumulada de cationes y aniones en lixiviados de las celdas húmedas	46
Figura 36	Concentración acumulada de calcio, sulfato, aluminio, hierro y manganeso en lixiviados de las celdas húmedas	47
Figura 37	Concentración acumulada de metales en lixiviados de las celdas húmedas	48
Figura 38	Índices de saturación de las fases minerales: $\text{Al}(\text{OH})_3$, gibsita, caolinita y anhidrita; derivados de la modelación geoquímica de los lixiviados generados en las celdas húmedas	Anexo J
Figura 39	Índices de saturación de las fases minerales: anortita, aragonita, montmorillonita Ca y calcita; derivados de la modelación geoquímica de los lixiviados generados en las celdas húmedas	Anexo J
Figura 40	Índices de saturación de las fases minerales: dolomita, yeso, $\text{Fe}(\text{OH})_{3(a)}$ y goetita; derivados de la modelación geoquímica de los lixiviados generados en las celdas húmedas	Anexo J
Figura 41	Índices de saturación de las fases minerales: hematita, melanterita, siderita y clorita; derivados en la modelación geoquímica de los lixiviados generados en las celdas húmedas	Anexo J
Figura 42	Índices de saturación de las fases minerales: crisotilo, sepiolita, sepiolita (d) y talco; derivados en la modelación geoquímica de los lixiviados generados en las celdas húmedas	Anexo J
Figura 43	Índices de saturación de las fases minerales: hausmanita, manganita, pirocroita y pirolusita; derivados de la modelación geoquímica de los lixiviados generados en las celdas húmedas	Anexo J

		Página
Figura 44	Índices de saturación de las fases minerales: rodocrosita, alunita, ilita y jarosita K; derivados de la modelación geoquímica de los lixiviados generados en las celdas húmedas	Anexo J
Figura 45	Índices de saturación de las fases minerales: feldespato K, mica K, anglesita y cerusita; derivados de la modelación geoquímica de los lixiviados generados en las celdas húmedas	Anexo J
Figura 46	Índices de saturación de las fases minerales: $\text{Pb}(\text{OH})_2$, albita, halita y smithsonita; derivados de la modelación geoquímica de los lixiviados generados en las celdas húmedas	Anexo J
Figura 47	Índices de saturación de las fases minerales: wilemita y $\text{Zn}(\text{OH})_{2(e)}$; obtenidos en la modelación geoquímica de los lixiviados derivados en las celdas húmedas	Anexo J
Figura 48	Índices de saturación de las fases minerales: $\text{Al}(\text{OH})_{3(a)}$, albita, alunita, anglesita, anhidrita, anortita, aragonita, montmorillonita y calcita; derivados de la modelación geoquímica de los lixiviados generados en las columnas de lixiviación	Anexo J
Figura 49	Índices de saturación de las fases minerales: cerusita, clorita, crisotilo, dolomita, $\text{Fe}(\text{OH})_{3(a)}$, gibsita, goetita, yeso y halita; derivados de la modelación geoquímica de los lixiviados generados en las columnas de lixiviación	Anexo J
Figura 50	Índices de saturación de las fases minerales: hausmanita, hematita, ilita, jarosita K, feldespato K, mica K, caolinita, manganita y melanterita; derivados de la modelación geoquímica de los lixiviados generados en las columnas de lixiviación	Anexo J
Figura 51	Índices de saturación de las fases minerales: $\text{Pb}(\text{OH})_2$, pirocroita, pirolusita, rodocrosita, sepiolita, sepiolita (d), siderita, smithsonita y montmorillonita; derivados de la modelación geoquímica de los lixiviados generados en las columnas de lixiviación	Anexo J
Figura 52	Índices de saturación de las fases minerales: wilemita y $\text{Zn}(\text{OH})_{2(e)}$; derivados de la modelación geoquímica de los lixiviados generados en las columnas de lixiviación	Anexo J

Índice de Fotografías

- Fotografía 1 Fotomicrografía al MOP-LT, muestra granos opacos (op) y transparentes (Tr) liberados e intercrecimiento de ambos en inclusiones (Trop), encapsulamiento y oxidación de transparentes (Trox). Objetivo 10X, Nícoles paralelos, campo horizontal de la fotografía 0.98 mm. Anexo Fotográfico
- Fotografía 2 Fotomicrografía al MOP-LT, muestra granos opacos (op) y transparentes (Tr) liberados, se muestra que los granos más pequeños se encuentran totalmente liberados, mientras que los grandes tienen inclusiones de opacos (Trop). Objetivo 10X, Nícoles paralelos, campo horizontal de la fotografía 0.98 mm. Anexo Fotográfico
- Fotografía 3 Fotomicrografía al MOP-LT, muestra granos transparentes (Tr) con encostramiento de óxidos de Fe (ox). Objetivo 40X, Nícoles paralelos, campo horizontal de la fotografía 0.25 mm. Anexo Fotográfico
- Fotografía 4 Fotomicrografía al MOP-LT, muestra granos opacos (op) incluidos en transparentes produciendo oxidación superficial en los granos transparentes (ox) y grano transparente liberado oxidado superficialmente (ox). Objetivo 20X, Nícoles paralelos, campo horizontal de la fotografía 0.50 mm. Anexo Fotográfico
- Fotografía 5 Fotomicrografía al MOP-LT, muestra granos transparentes (Tr) liberados y oxidación penetrativa en los granos transparentes por los opacos (op). Objetivo 40X, Nícoles paralelos, campo horizontal de la fotografía 0.25 mm. Anexo Fotográfico
- Fotografía 6 Fotomicrografía al MOP-LR, muestra pirita (PY), hematita (HM) y cuarzo (QZ). Objetivo 40X, Nícoles paralelos, campo horizontal de la fotografía 0.25 mm. Anexo Fotográfico
- Fotografía 7 Fotomicrografía al MOP-LR, Pirita (PY) incluida en cuarzo (QZ). Objetivo 40X, Nícoles paralelos, campo horizontal de la fotografía 0.25 mm. Anexo Fotográfico

Índice de Tablas

	Página
1. Análisis de agua de distintas minas de la ciudad de Pachuca (Geyne, et al, 1963)	13
2. Nomenclatura, peso y coordenadas geográficas de las muestras utilizadas en las columnas de lixiviación	16
3. Nomenclatura, peso y coordenadas geográficas de las muestras utilizadas en las celdas húmedas	16
4. Densidad aparente (D_a), real (D_r), porosidad (n) y textura de seis muestras antes y después de la prueba de celdas húmedas	29
5. Resultados de análisis químicos en p/p realizados a seis muestras de jales	30
6. Fases minerales determinadas por DRX en muestras sin clasificación	Anexo D
7. Fases minerales determinadas a la muestra JPM-1 clasificada a -200 mallas	Anexo D
8. Fases minerales determinadas a la muestra JPM-2 clasificada a -200 mallas	Anexo D
9. Fases minerales determinadas a la muestra JPM-3 clasificada a -200 mallas	Anexo D
10. Fases minerales determinadas a la muestra JPM-4 clasificada a -200 mallas	Anexo D
11. Fases minerales determinadas a la muestra JPM-5 clasificada a -200 mallas	Anexo D
12. Fases minerales determinadas a la muestra JPM-6 clasificada a -200 mallas	Anexo D
13. Azufre, pH de la mezcla y potencial de neutralización (NP) determinados en seis muestras de jales	32
14. Valores de potencial de neutralización (NP), potencial de acidez total (TAP), potencial neto de neutralización (NNP) y relación de potencial de neutralización (NPR)	32
15. Cationes lixiviados en la columna de lixiviación COL-1	Anexo F

	Página
16. Aniones lixiviados en la columna de lixiviación COL-1	Anexo F
17. Metales lixiviados en la columna de lixiviación COL-1	Anexo F
18. Cationes lixiviados en la columna de lixiviación COL-3	Anexo F
19. Aniones lixiviados en la columna de lixiviación COL-3	Anexo F
20. Metales lixiviados en la columna de lixiviación COL-3	Anexo F
21. Cationes lixiviados en la columna de lixiviación COL-4	Anexo F
22. Aniones lixiviados en la columna de lixiviación COL-4	Anexo F
23. Metales lixiviados en la columna de lixiviación COL-4	Anexo F
24. mg de soluto extraídos de la columna de lixiviación COL-1	Anexo F
25. mg de soluto extraídos de la columna de lixiviación COL-3	Anexo F
26. mg de soluto extraídos de la columna de lixiviación COL-4	Anexo F
27. Comportamiento de la concentración de los lixiviados de las columnas	34
28. Comportamiento de la concentración de calcio, sulfato y manganeso	37
29. Comportamiento del pH y la conductividad eléctrica	40
30. Masa lixiviada en las columnas de lixiviación	40
31. Cationes lixiviados en la celda húmeda JPM-1	Anexo G
32. Aniones lixiviados en la celda húmeda JPM-1	Anexo G
33. Metales lixiviados en la celda húmeda JPM-1	Anexo G
34. Cationes lixiviados en la celda húmeda JPM-2	Anexo G
35. Aniones lixiviados en la celda húmeda JPM-2	Anexo G
36. Metales traza lixiviados en la celda húmeda JPM-2	Anexo G
37. Cationes lixiviados en la celda húmeda JPM-3	Anexo G
38. Aniones lixiviados en la celda húmeda JPM-3	Anexo G

	Página
39. Metales lixiviados en la celda húmeda JPM-3	Anexo G
40. Cationes lixiviados en la celda húmeda JPM-4	Anexo G
41. Aniones lixiviados en la celda húmeda JPM-4	Anexo G
42. Metales lixiviados en la celda húmeda JPM-4	Anexo G
43. Cationes lixiviados en la celda húmeda JPM-5	Anexo G
44. Aniones lixiviados en la celda húmeda JPM-5	Anexo G
45. Metales lixiviados en la celda húmeda JPM-5	Anexo G
46. Cationes lixiviados en la celda húmeda JPM-6	Anexo G
47. Aniones lixiviados en la celda húmeda JPM-6	Anexo G
48. Metales lixiviados en la celda húmeda JPM-6	Anexo G
49. mg de soluto extraídos de la celda húmeda JPM-1	Anexo G
50. mg de soluto extraídos de la celda húmeda JPM-2	Anexo G
51. mg de soluto extraídos de la celda húmeda JPM-3	Anexo G
52. mg de soluto extraídos de la celda húmeda JPM-4	Anexo G
53. mg de soluto extraídos de la celda húmeda JPM-5	Anexo G
54. mg de soluto extraídos de la celda húmeda JPM-6	Anexo G
55. Comportamiento de la concentración de los lixiviados de las celdas húmedas	41
56. Comportamiento de la concentración de sulfato y calcio en los lixiviados de las celdas húmedas	41
57. Comportamiento del pH y la conductividad eléctrica en las celdas húmedas	48
58. Masa de solutos extraída en cada una de las celdas húmedas	48

	Página
59. Resultados de la celda húmeda JPM-1 con las ecuaciones recomendadas por Morin y Hutt (1997) para la interpretación de pruebas cinéticas de laboratorio	Anexo H
60. Resultados de la celda húmeda JPM-2 con las ecuaciones recomendadas por Morin y Hutt (1997) para la interpretación de pruebas cinéticas de laboratorio	Anexo H
61. Resultados de la celda húmeda JPM-3 con las ecuaciones recomendadas por Morin y Hutt (1997) para la interpretación de pruebas cinéticas de laboratorio	Anexo H
62. Resultados de la celda húmeda JPM-4 con las ecuaciones recomendadas por Morin y Hutt (1997) para la interpretación de pruebas cinéticas de laboratorio	Anexo H
63. Resultados de la celda húmeda JPM-5 con las ecuaciones recomendadas por Morin y Hutt (1997) para la interpretación de pruebas cinéticas de laboratorio	Anexo H
64. Resultados de la celda húmeda JPM-6 con las ecuaciones recomendadas por Morin y Hutt (1997) para la interpretación de pruebas cinéticas de laboratorio	Anexo H
65. Resumen de los resultados obtenidos por las ecuaciones recomendadas por Morin y Hutt (1997) para la interpretación de pruebas cinéticas de laboratorio, en particular celdas húmedas	49
66. Resultados de los análisis realizados por óxidos libres a seis muestras de jales utilizadas en la prueba de celdas Húmedas	Anexo I
67. Resultados de los análisis realizados por óxidos libres a muestras tomadas de las columnas de lixiviación a diferentes profundidades	Anexo I
68. Comparación de resultados de análisis químicos realizados a cuatro pozos cercanos al depósito de jales en estudio	51

RESUMEN

Este estudio pretende evaluar solutos lixiviables de jales generados por el Distrito Minero Pachuca-Real del Monte y su posible impacto al agua subterránea utilizando pruebas de laboratorio conocidas como estáticas y cinéticas.

Las muestras de jales utilizadas se caracterizaron física, química y mineralógicamente; a seis muestras les determinaron las siguientes propiedades físicas: densidad, porosidad, textura, color, tamaño de partícula y conductividad hidráulica. La composición química determinada por ICP indica los siguientes elementos de mayor a menor concentración: aluminio, potasio, calcio, hierro, plomo, azufre, magnesio, sodio, manganeso y zinc, en un rango comprendido entre 4.625 y 0.17 p/p. Los análisis mineralógicos establecen que en estos jales predominan las fases minerales no metálicas: cuarzo y silicatos, teniendo un alto grado de oxidación; los minerales metálicos: pirita, hematita y esfalerita, generalmente se encuentran encapsulados en las fases minerales no metálicas.

Por los resultados obtenidos en las pruebas estáticas realizadas a seis muestras de jales se consideran no generadoras de acidez. Las pruebas cinéticas: seis celdas húmedas y cuatro columnas de lixiviación, se realizaron en un período de 20 semanas y 185 días respectivamente, los lixiviados generados en estas pruebas se analizaron por ICP para determinar y cuantificar aluminio, cadmio, calcio, cobre, cromo, hierro, magnesio, manganeso, plomo, potasio, silicio, sodio y zinc; volumetría para cuantificar bicarbonato y cloruro, y espectrofotometría de absorción UV visible para cuantificar sulfato.

Las pruebas cinéticas a lo largo de la prueba presentan el siguiente comportamiento: el pH medido mostró poca variación teniendo un valor promedio entre 8.0 y 8.20, la conductividad eléctrica disminuye progresivamente, la concentración de aniones y cationes disminuye progresivamente y la concentración de metales aumenta progresivamente.

En general la concentración del lixiviado en las pruebas cinéticas esta gobernada por los iones mayores siendo el calcio y el sulfato los más importantes, mientras que por los metales el aluminio hierro y manganeso predominan en las celdas húmedas y en las columnas de lixiviación el más importante fue el manganeso.

De acuerdo a los índices de saturación calculados por el programa de computación PHREEQC Interactive 2.4.2 Alpha (Parkhurst y Appelo, 1999), la concentración de metales en los lixiviados generados en las pruebas cinéticas está gobernada por las fases minerales calcita, aragonita y dolomita y posiblemente la fase mineral que contribuye a la concentración del manganeso es la rodocrosita.

Los jales expuestos al ambiente más tiempo generan mayor concentración de metales, como queda demostrado por los resultados químicos obtenidos en la celda húmeda JPM-6. El sulfato, calcio y manganeso son los iones principales de lixiviación en los jales estudiados en laboratorio. Este proceso también se da a escala de campo donde los pozos cercanos en un radio de 100 m presentan concentraciones considerables de estos elementos en el agua subterránea.

Palabras clave: jales, pruebas cinéticas, pruebas estáticas, celdas húmedas, columnas de lixiviación

EXPERIMENTOS DE LABORATORIO PARA EVALUAR LOS SOLUTOS LIXIVIABLES EN JALES DEL DISTRITO MINERO PACHUCA-REAL DEL MONTE

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

La extracción o minado y beneficio de minerales ha sido siempre una actividad de la raza humana, proporcionando minerales metálicos y no metálicos necesarios para mantener la comodidad de nuestra vida cotidiana (Morin y Hutt, 1997). Por su naturaleza, estos minerales son minados individualmente o combinados en forma de mezclas naturales o menas. La mena es sometida a trituración, clasificación, molienda y/o beneficio para facilitar la liberación del mineral de interés económico (Wills, 1989; Morin y Hutt, 1997; Mills, 1999a). Los jales comprenden la fracción mineral no económica que es separada durante el procesamiento de los minerales, agua y los agentes químicos utilizados.

En el Anexo A se presentan detalles acerca de la generación y depósito de jales, reacciones químicas involucradas en los depósitos y su efecto en la composición química del agua lixiviada.

La disposición y manejo inadecuado de los jales ha generado diversos problemas ambientales en el mundo. Estos problemas pueden clasificarse en los siguientes grupos:

- 1) Generación de drenaje ácido y lixiviación de metales pesados (Freeze y Cherry, 1979; Blowes *et al.*, 1994).
- 2) Falla del dique del depósito que contiene los jales, ya que, por su naturaleza (tamaño de partícula), produce avalanchas de lodo cubriendo las partes más bajas con este material y algunas veces se deposita en ríos (Kelly y Spottiswood, 1990).
- 3) Contaminación eólica: el tamaño de partícula obtenido en los procesos de molienda y beneficio influye en este impacto ambiental, el mineral finamente molido es fácilmente transportado por el viento, siempre y cuando el depósito no alcance una cierta consolidación o el jal sea removido de su depósito original (Caldwell y Welsh, 1982).

- 4) Contaminación visual: este efecto actualmente tiene cierta importancia y se aprecia en localidades que en la actualidad han sido urbanizadas, dando un aspecto deprimente por la ausencia total de vegetación en estos depósitos (Caldwell y Welsh,1982).

Los riesgos de contaminación que se presentan varían de acuerdo a la composición química y asociación mineralógica de los jales, así como, la operación utilizada (Wills, 1989). Dentro de los riesgos asociados al depósito de jales se pueden mencionar los siguientes (UNEP,1996):

- ✓ El depósito puede dañar o destruir habitats valiosos y ecosistemas locales.
- ✓ La salida de efluente de un deposito puede contaminar el agua superficial.
- ✓ Donde se genera y descarga drenaje ácido, los efectos de contaminación de agua pueden ser bastante duraderos.
- ✓ La filtración de lixiviado a través de la base del depósito puede afectar la calidad del agua subterránea con reactivos químicos usados en el beneficio o componentes propios del material.
- ✓ La filtración puede producir aumento sustancial del nivel freático natural y provocar problemas de salinidad en tierras agrícolas cercanas o habitats naturales.
- ✓ Los depósitos secos pueden erosionarse por acción del viento, provocando la generación de polvo en habitats vecinos o ecosistemas.
- ✓ Diseño y protección escasos del depósito pueden ser causa de falla.
- ✓ Los grandes cambios de paisaje por los depósitos de jales pueden ser inaceptables en las áreas de importancia científica o escénica.

México es un país con una amplia historia minera, siendo el Distrito Minero de Pachuca-Real del Monte uno de los distritos de mayor tradición que ha sido explotado por más de cinco siglos, en la producción de metales preciosos de plata y oro; un depósito que contiene un volumen considerable de jales se ubica al sur de la Ciudad de Pachuca y de acuerdo a la nomenclatura asignada por la Cía Real del Monte S.A. de C.V. se conocen dos presas: Norte y Sur (Figura 1).

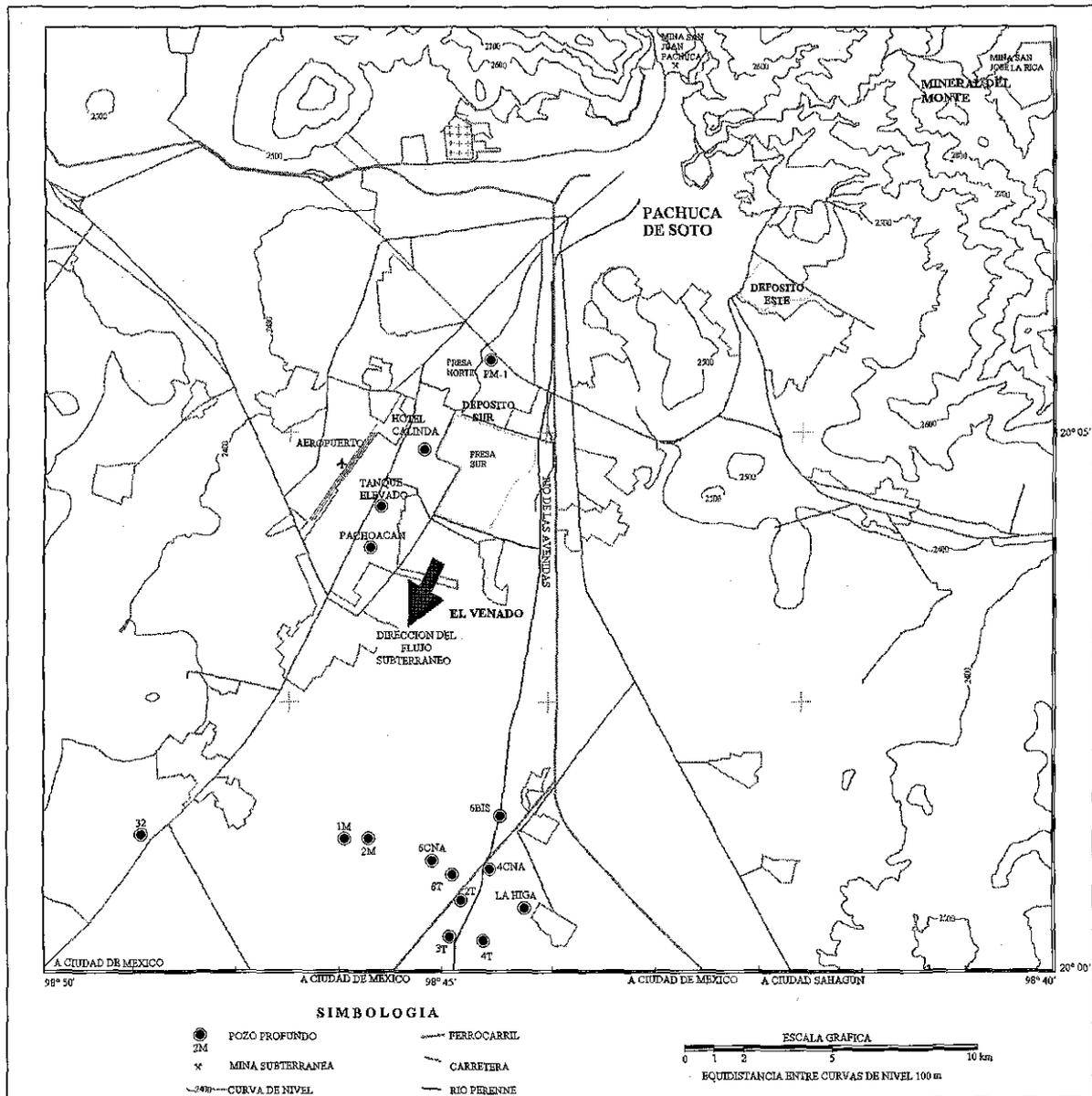


Figura 1. Localización de los depósitos de jales y pozos de agua (cercanos) existentes en la ciudad de Pachuca, Hidalgo (adaptado de INEGI,1999)

1.2 NECESIDAD DE ESTUDIAR EL DEPÓSITO DE JALES PRODUCIDOS EN EL DISTRITO MINERO DE PACHUCA-REAL DEL MONTE

La determinación del tipo de lixiviado de un depósito de jales y su composición química, da una idea más amplia del efecto que puede tener en el agua superficial y subterránea. Los métodos por los cuales es posible determinar este efecto son las pruebas estáticas y cinéticas (Mills, 1999b; Morin y Hutt, 1997).

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Una de las secuelas producidas por los jales es el drenaje ácido, medio por el cual los metales contenidos en los desechos son lixiviados y transportados en concentraciones considerables, provocando contaminación del suelo, agua superficial y agua subterránea (Blowes, *et al.*, 1988; USEPA, 1994; Cravotta *et al.*, 1994; Jonhson, 1996; Mills, 1999b; Wirt *et al.*, 1999; y Fey *et al.*, 2000). La lixiviación de metales pesados también depende del clima del lugar donde se ubica el depósito, siendo elevada en climas húmedos tropicales y baja en climas áridos (John y Leventhal, 1995).

En la actualidad los trabajos de investigación realizados en este tipo de depósitos se encaminan a la predicción del comportamiento químico de los desechos mineros antes, durante y al termino de las operaciones mineras, generando un mayor conocimiento de los efectos producidos por los desechos mineros (Blowes, *et al.*, 1988; USEPA, 1994; Cravotta *et al.*, 1994; Jonhson, 1996; Mills, 1999b; Wirt *et al.*, 1999; Fey *et al.*, 2000).

La ubicación del depósito de jales al sur de la ciudad de Pachuca es desde luego inapropiada, su operación inició hace más de 50 años, siendo en la actualidad activo, se localiza en el interior de la zona urbana de Pachuca y sobre un acuífero granular regional del que se extrae agua para abastecimiento de un sector de la Ciudad de Pachuca y de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (Carrillo y Cardona, 1997).

A la fecha no hay estudios que avalen el tipo y características de los solutos lixiviados que pudieran estarse generando en estos jales ni de su impacto en el acuífero subyacente. Los estudios hidrogeológicos disponibles se enfocan a la batería de pozos del Valle de Pachuca-Tizayuca (Carrillo y Cardona, 1997) y a las proximidades del Hotel Calinda ubicado a aproximadamente 100 m. de distancia de la Presa Sur (Figura 2) (Aplicaciones de Ingeniería, 1990). Estos estudios mencionan el riesgo potencial de los jales hacia el acuífero, pero no lo cuantifican, por tal motivo es importante realizar una evaluación cuantitativa de la composición mineralógica de los materiales que constituyen los jales y el tipo de solutos que pueden estar liberándose por efecto de intemperismo y disolución.

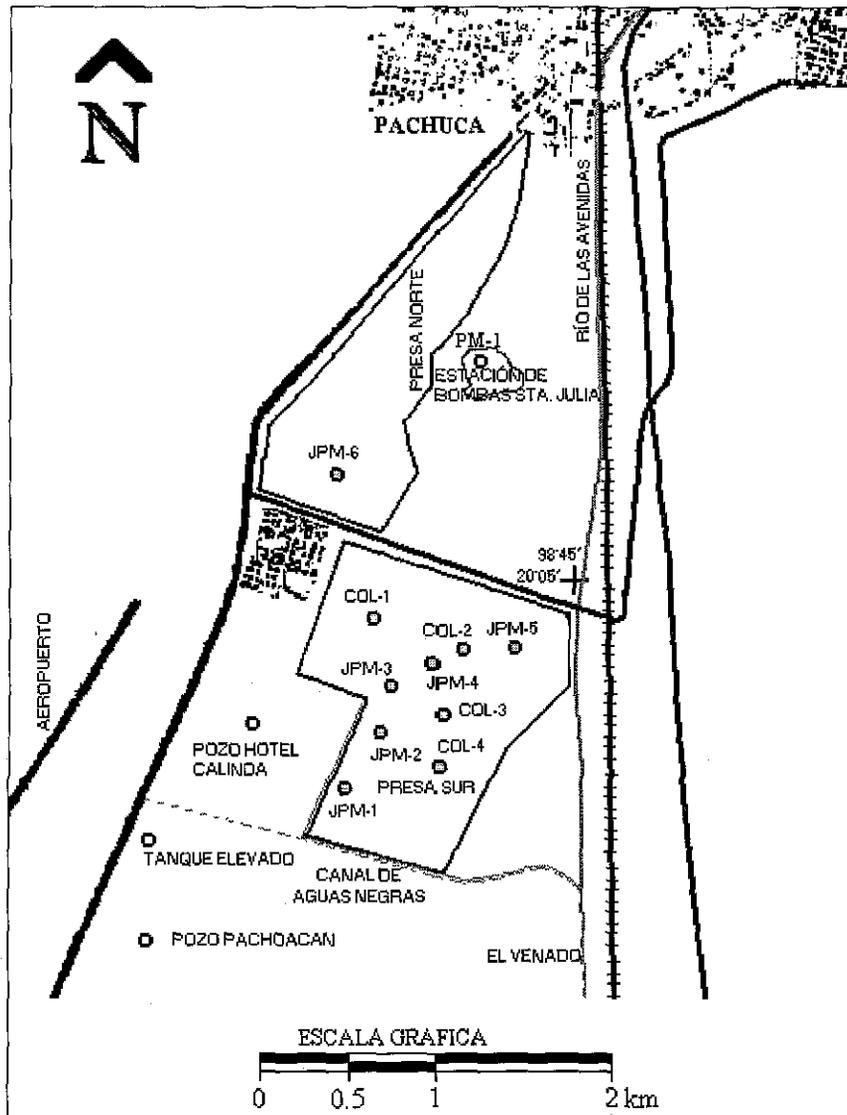


Figura 2. Localización de las muestras tomadas del depósito de jales

1.3 OBJETIVOS

Los objetivos de este trabajo de investigación son:

1. Determinar la composición química y mineralógica de los jales del Distrito Minero de Pachuca-Real del Monte.
2. Evaluar los solutos lixiviables, en muestras de jales, por medio de pruebas de laboratorio de intemperismo acelerado usando celdas húmedas.
3. Evaluar los solutos susceptibles de lixiviación a través de columnas con material de los jales en condiciones saturadas.
4. Proponer un modelo hidrogeoquímico conceptual de los procesos que controlarían la generación de lixiviados en los jales del Distrito Minero de Pachuca-Real del Monte.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPITULO 2

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

2.1 GEOLOGÍA

El depósito de jales en estudio se encuentra localizado sobre el lugar conocido como Valle de Pachuca en el Estado de Hidalgo, al norte de la Cuenca de México; esta planicie se encuentra en la Provincia Geológica del Eje Neovolcánico, constituida por rocas volcánicas terciarias y cuaternarias, su relieve está íntimamente relacionado con una intensa actividad volcánica, iniciada a principios del Terciario y desarrollada durante el Pleistoceno Inferior; el conjunto de estructuras que caracterizan el relieve de esta provincia evolucionaron sobre una paleogeografía constituida por sedimentos mesozoicos plegados que correspondían a la Sierra Madre Oriental. La evolución de los fenómenos volcánicos propició las condiciones para la formación de cuencas endorreicas, tal es el caso de la Cuenca de México, que se caracteriza por la continua acumulación de material detrítico desde comienzos del Pleistoceno hasta la fecha. La localidad más baja de esta cuenca corresponde al Lago de Texcoco (INEGI, 1992).

Las rocas que afloran en la región son unidades geológicas de tipo ígneo y forman las principales elevaciones de la región, son de composición máfica (basaltos y piroclastos asociados) en la porción occidental y sur; mientras que en la porción nor-nororiental son de tipo intermedio (andesitas y dacitas) cuya edad corresponde al Terciario. Evidencias geofísicas señalan que el espesor conjunto de la secuencia volcánica es superior a los 1,500 metros, cubiertas con material clástico de tipo aluvial de granulometría variada (arenas y gravas principalmente) y espesor variable con máximos detectados del orden de 150 metros. La estructura principal del subsuelo es una fosa tectónica de orientación NE-SW que constituye el Valle Pachuca Tizayuca avenado por el Río de las Avenidas (Carrillo y Cardona, 1997).

Las unidades litoestratigráficas que afloran regionalmente de la más reciente a la más antigua según Fries (1962) (Figura 3):

Aluvión (Qal): su acumulación de mayor volumen y espesor conocidos se encuentra en la Cuenca de México, los laboríos mineros muestran la presencia de un espesor de 120 m. En el área de aluvión al suroeste de Pachuca los pozos perforados han cortado derrames de basalto intercalados con material clástico. Consta principalmente de gravas, arenas y limos

con mezcla local de cenizas basálticas y andesíticas en una amplia planicie que se extiende desde las estribaciones de la ciudad de Pachuca, en ciertos lugares llegan a formar el componente principal.

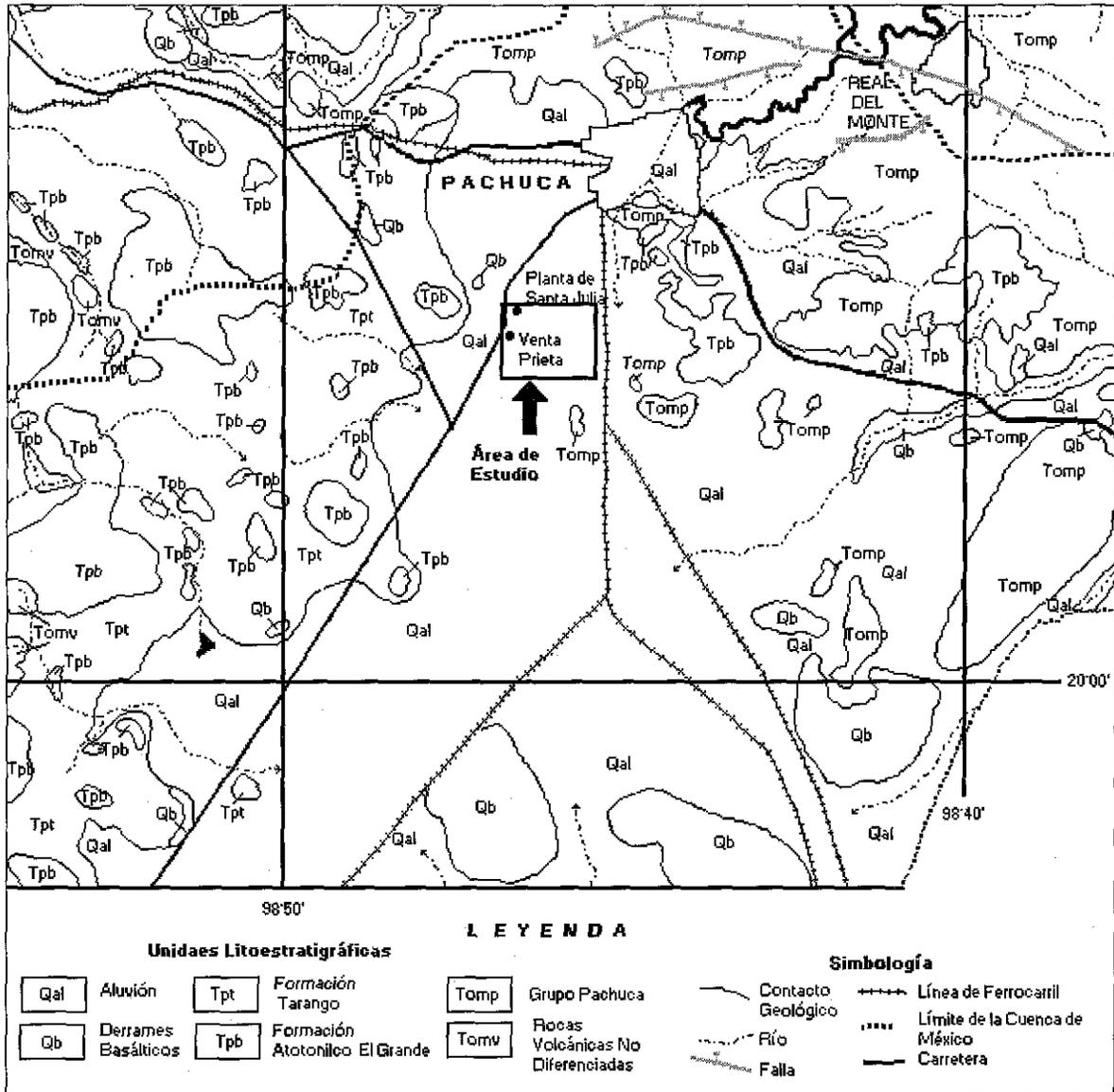


Figura 3. Unidades Litoestratigráficas aflorantes (Modificado de Geyne, et al., 1963)

Derrames Cuaternarios (Qb): formados por lavas asociadas con brechas y cenizas de origen volcánico, principalmente de composición basáltica o andesítica, localmente interdigitados con aluvión (Seegerstrom, 1961).

Formación Tarango (Tpt): está representada por depósitos clásticos medianamente consolidados, que se acumularon como relleno de amplios valles erosionados en las rocas anteriores; gran parte de esta formación fue depositada por corrientes de agua superficial,

que transportaron gravas, arenas, limos y arcillas, resultado del intemperismo de los terrenos altos y los almaceno en forma de abanicos aluviales y de capas casi horizontales sobre llanuras de inundación (Fries, 1962).

Formación Atotonilco el Grande (Tpb): los sedimentos que componen esta formación difieren poco de la Formación Tarango localizada en el área de estudio. Predominan conglomerados, arenas y arcillas, formados de partículas erosionadas de las rocas volcánicas preexistentes, con algunas intercalaciones de toba blanquizca (Fries, 1962).

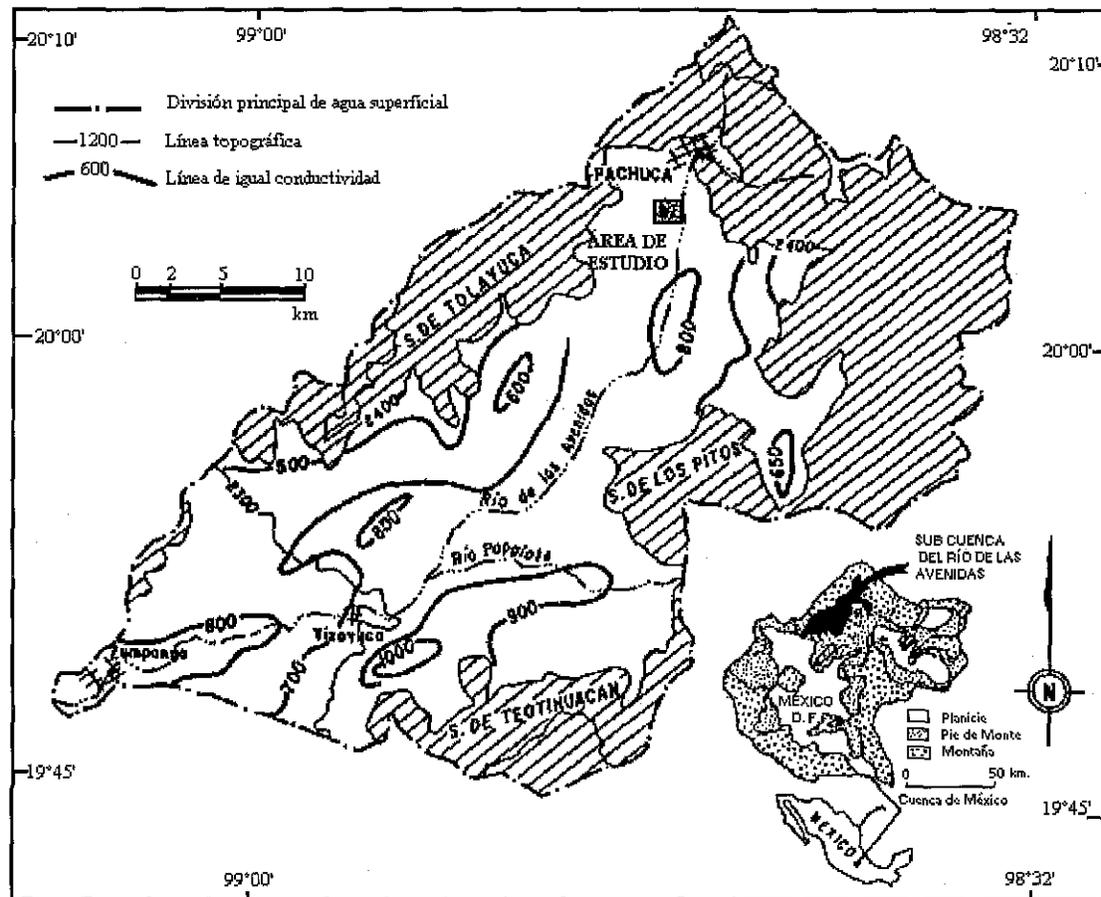
Grupo Pachuca (Tomp): Esta compuesto de rocas volcánicas de diversas edades que descansan localmente encima del Grupo el Morro, generalmente con discordancia angular (Fries, 1962). Su litología la constituyen derrames de basalto, andesita y riolita, predominando la composición andesítica y dacítica; así como de brechas y tobas volcánicas de la misma composición (Córdoba, 1992).

2.2 HIDROGEOLOGÍA

2.2.1 Hidrología superficial

El área de estudio se localiza en la en la Provincia Hidrogeológica denominada Faja Volcánica Transmexicana (Velázquez y Ordaz, 1994), en la Cuenca de México, dentro de la Sub Cuenca del Río de las Avenidas (Figura 4); tiene una superficie de 1,941 km². La precipitación media anual varía de aproximadamente 1,500 mm, en la Sierra de Pachuca a 350 mm en las partes topográficamente más bajas; las lluvias principales son de tipo orográfico y se presentan de mayo a octubre. La temperatura media anual es de aproximadamente 13 °C, siendo mayo el mes de mayor temperatura (22 a 29 °C). La evaporación potencial media anual es de 1,600 mm.

Superficialmente El Río de Las Avenidas es la corriente superficial principal que desagua la planicie en la dirección de noreste a suroeste, se origina en la Sierra de Pachuca y se compone de un flujo resultado de aguas residuales y lluvia (en época de precipitación), esta corriente no tiene contribución de agua subterránea por no presentar flujo base (Carrillo y Cardona, 1997). Las corrientes de la sub-cuenca tienen como característica desaparecer al llegar a la planicie, indicando infiltración del agua al subsuelo.



Nota: la línea de igual conductividad es referida a la conductividad eléctrica en $\mu\text{S}/\text{cm}$

Figura 4. Localización de la subcuenca del Río de las Avenidas (Huizar, 1997)

2.2.2 Hidrología subterránea

De acuerdo con el marco geológico regional y la información litológica en la planicie del Río de las Avenidas se ha definido la presencia de un acuífero de más de 1,500 m. de espesor de tipo libre formado por material fracturado representado por lavas y material granular constituido por piroclastos, gravas, arenas, limos y arcillas; por lo tanto el agua subterránea circula por material granular y fracturado. El primero constituye el relleno de la fosa tectónica y el segundo incluye principalmente a las rocas ígneas. La dirección de flujo del agua subterránea (en el plano horizontal) es del noreste al suroeste a lo largo del Valle de Pachuca-Tizayuca. La profundidad al nivel estático llega a ser superior a 100 m hacia la zona noroccidental (Matide Zacacalco) y oriental (Temazcalapa-Tezontepec); mientras que en zona la Higa-Estación Téllez es menor a 50 m. La respuesta del acuífero al bombeo es aquella de uno libre y se le ha estimado una porosidad efectiva de 0.03 (Carrillo y Cardona, 1997), con una recarga media anual en 24 Mm^3 para el periodo 1984-1991, el

coeficiente de infiltración de 0.11 y el abatimiento medio de 0.71 m/año (Ariel Consultores, 2000).

2.3 HISTORIA DE GENERACIÓN DE JALES EN EL SITIO DE ESTUDIO

El Estado de Hidalgo tiene una gran historia minera basada en su producción de plata, plomo, zinc, oro y manganeso, entre otros. Su papel como estado minero se remonta a la época virreinal, en la cual los españoles fundaron ciudades en los alrededores de las minas, como en el caso de la ciudad de Pachuca en 1502. Uno de los distritos mineros más importantes en el Estado por la enorme cantidad de plata y oro producido es el de Pachuca Real del Monte, localizado entre la ciudad de Pachuca y las inmediaciones del poblado de Real del Monte, esta ubicado en la región de yacimientos minerales del Estado de Hidalgo denominada Región Pachuca-Actopan (Figura 5).

La mineralización de este distrito se encuentra ubicada en un modelo epitermal bajo en sulfuros, encajonada en rocas andesíticas y escasamente en riolitas; su morfología es en estructura tabular (vetas), que varía ampliamente de espesor, de algunos centímetros hasta 40 m, y en longitud de 100 m a 15 km (Yta y Moreno, 1997). El yacimiento se caracteriza por una mineralogía de más de 25 especies, las más comunes son: pirita, galena, esfalerita, argentita, acantita, polibasita, estefanita, plata y oro nativo, stenbergitita, calcocita, covelita y bornita (Geyne *et al.*, 1963).

2.3.1 Producción de jales en el Distrito Minero Pachuca-Real del Monte

El mineral suministrado a la Planta de Beneficio de la Hacienda de Loreto proviene de las Unidades Mineras San Juan Pachuca y San José La Rica, sin embargo, en épocas pasadas se contaba con mineral de La Purísima Concepción y El Álamo, así como de otras minas pequeñas conocidas localmente como “terreros”; debido al desplome del precio de los metales preciosos, alto costo del proceso beneficio y disminución de las leyes de plata y oro en las diferentes vetas explotadas, todas estas pequeñas unidades cerraron. En la actualidad la ley de los minerales beneficiados se estima en 200 g/ton de plata y un g/ton de oro, que requieren un tamaño de liberación del 95% a -147 μm .

El proceso de beneficio utilizado en este Distrito Minero juega un papel importante en algunas características de los jales, ya que, se le realiza una reducción de tamaño a las partículas minerales, para obtener una mayor recuperación de plata y oro principalmente. Los minerales son oxidados superficialmente para realizar la flotación de los que contienen

oro, plata, plomo y zinc y la depresión de la ganga compuesta principalmente por cuarzo y sulfuros de hierro.

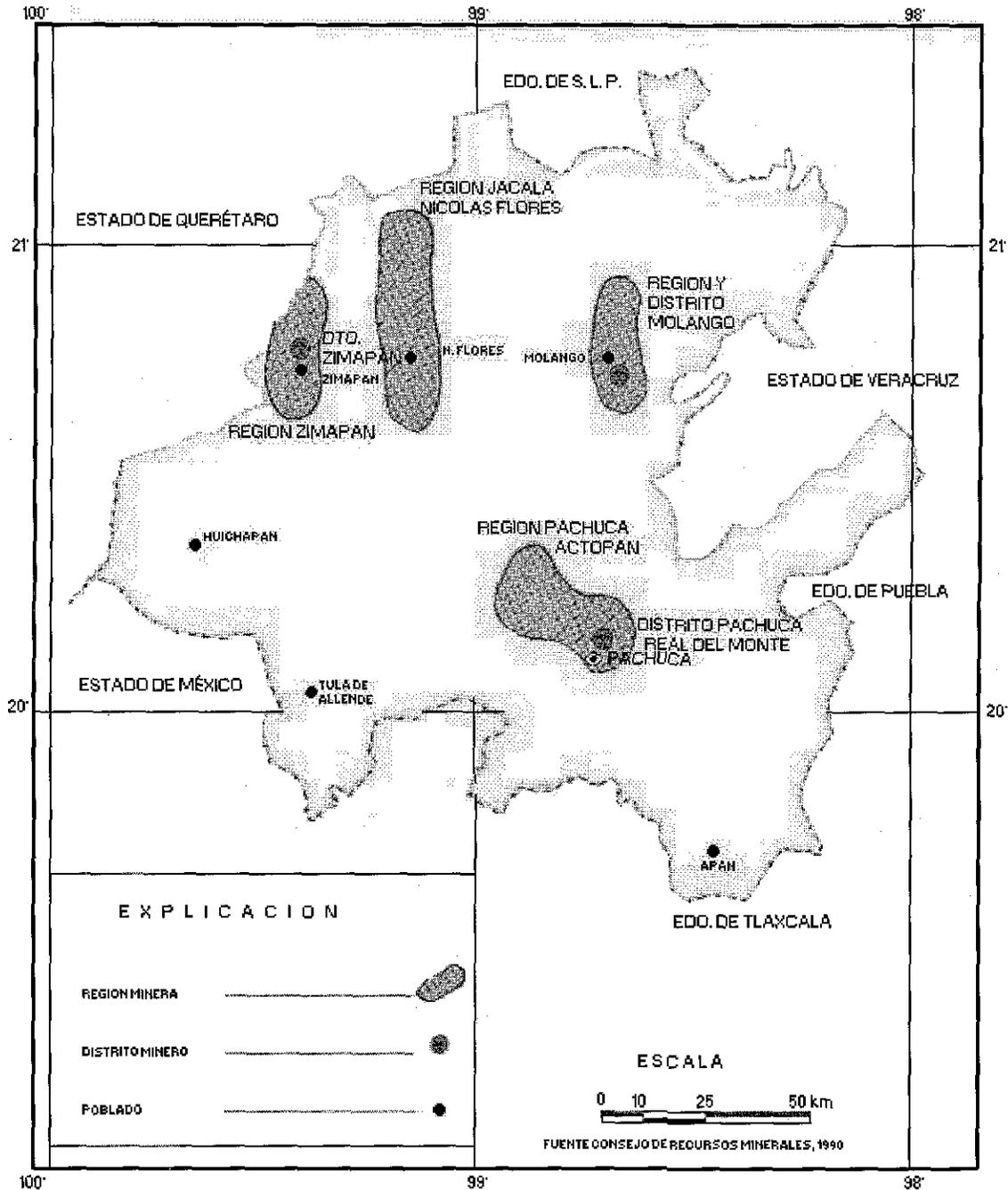


Figura 5. Localización del Distrito Minero de Pachuca-Real del Monte (C.R.M., 1992)

2.3.2 Depósito de jales en la ciudad de Pachuca

En el Anexo B se detallan las operaciones del proceso de beneficio utilizado por la Compañía Real del Monte y Pachuca, por el que se han generado los jales del Distrito Minero de Pachuca-Real del Monte y que han depositado en dos sitios de la ciudad de

Pachuca (Figura 1): al Este se encuentra el depósito de jales antiguos que en la actualidad se encuentra seco, al Sur se encuentra el depósito activo que se encuentra en un estado que va de acuoso a subacuoso. Estos depósitos se construyeron a través de la planicie y por su forma son conocidas como de aguas arriba (Figura 8).

El lugar donde se encuentra dispuesto el depósito objeto del presente trabajo de tesis no fue preparado para el almacenamiento de jales, los jales se encuentran dispuestos a ras del suelo, presentando el riesgo en caso de generar lixiviados, se transporten a través del material granular del acuífero e influir en la calidad del agua subterránea.

Los jales, en forma de pulpa son transportados por gravedad desde la planta de beneficio hasta la planta de bombeo localizada en el lugar denominado Santa Julia, por medio de una tubería de 8 pulgadas de diámetro y de aproximadamente 8 km de longitud dispuesta en el Río de las Avenidas. De la planta de bombeo los jales son enviados a la presa donde son descargados a lo largo de su perímetro, a través de una tubería de descarga; como el punto de descarga no guarda una posición permanente, los efectos de la inercia de la pulpa y gravedad específica de los minerales contenidos producen heterogeneidades a lo largo de los caminos de descarga. Las partículas de mayor tamaño y minerales pesados se depositan en lugares más cercanos al punto de descarga, mientras que las partículas más pequeñas y minerales ligeros se depositan más lejos, ocasionando que en las orillas de la presa se tenga una infiltración de agua mayor (Figura 9).

2.3.3 Evolución del manejo de los jales

La superficie cubierta por el depósito de jales ha ido creciendo hacia el sur de la ciudad de Pachuca, en el año de 1959 contenía aproximadamente 55, 000, 000 toneladas, con tamaño de partícula del 58% a -200 mallas y composición química: plata 47.6 y oro 0.16 g/ton, cobre 0.01, hierro 2.0, plomo 0.1, zinc 0.2 p/p de acuerdo a análisis químicos realizados por la Comisión del Fomento Minero en el año de 1959 (Geyne *et al*, 1963). Hace aproximadamente 20 años por la urbanización de esa parte de la ciudad han sido removidos los jales para realizar construcciones, tal es el caso de la Central de Autobuses, el Poliforúm José Ma. Morelos, el Estadio de Fútbol Hidalgo, algunos planteles de educación y zonas residenciales por citar algunas, dando como resultado un cambio en su depósito y propiciando que las partículas finas sean removidas por el viento, puesto que ya habían alcanzado un cierto grado de compactación. El volumen de jales actual

(aproximado) en el al área de estudio es de 9,658,680,000 m³, y ocupa una área aproximada de 4,057,610 m².

2.3.4 Agua utilizada en el beneficio de minerales

El agua utilizada en la planta de beneficio de la Cía Real del Monte, es extraída por bombeo de las diferentes unidades mineras, siendo el lugar de acopio la Unidad Minera San Juan Pachuca. El pH del agua del Distrito Minero de Pachuca-Real del Monte, es cercano a la neutralidad. La Tabla 1 muestra los resultados en mg/l de análisis de agua de diferentes minas de la Ciudad de Pachuca.

Tabla 1. Análisis de agua de distintas minas de la ciudad de Pachuca (Geyne, *et al.*, 1963).

Mina	San Juan	El Lobo	San Juan	Dos Carlos	San Rafael	Dos Carlos
Cloro (mg/l)	52	27	39	18	28	16
Sulfato (mg/l)	597	454	214	119	192	163
Carbonatos (mg/l)	187	96	46	162	92	161
Sodio (mg/l)	217	86	42	14	30	10
Potasio (mg/l)	22	23	16	ND	22	ND
Calcio (mg/l)	160	147	67	68	101	68
Magnesio (mg/l)	15	28	15	28	18	28
Hierro (mg/l)	18	ND	6	7	ND	7
Sílice (mg/l)	53	62	28	28	15	23
Óxidos de Al y de Fe (mg/l)	ND	22	ND	ND	16	ND

*ND No determinado.

Las entradas y salidas de agua en el depósito de jales aparece ilustrado en la Figura 10, las entradas son: agua de la pulpa y agua agregada por las precipitaciones pluviales y las salidas: agua decantada de la presa (utilizada principalmente en la industria de la construcción) y agua evaporada naturalmente, la infiltración en el depósito es insignificante por la baja conductividad hidráulica de los jales y ha que el volumen específico de los minerales secundarios es normalmente mayor que el de los sulfuros originales, los minerales secundarios reducen el espacio poroso en jales y en casos extremos, ocasionan formación de capas duras o "formación de costras". Este fenómeno detiene el flujo o migración del agua y permite o incrementa la contaminación del agua superficial (Aguayo, 1996). Como el tiempo de retención de la presa es de varias semanas, según Kelly y Spottiswood (1990), los reactivos orgánicos utilizados en el proceso de beneficio, en

general, se descomponen o son absorbidos precipitándose una fracción significativa de cationes y metales pesados dependiendo el pH del agua de los jales.

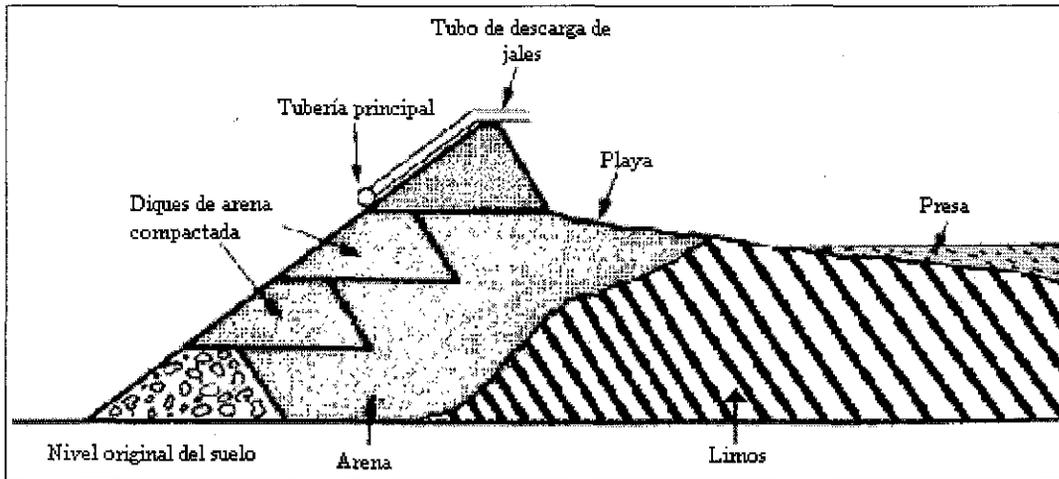


Figura 8. Presa de jales aguas arriba con terminología usada en minería (Wills, 1989)

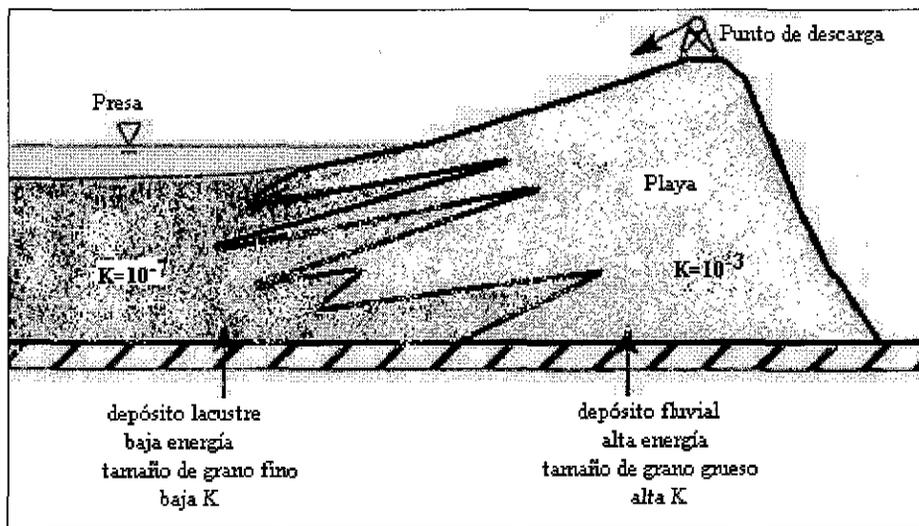


Figura 9. Depósito de partículas por tamaño en presas de jales con terminología usada en minería (adaptado de Robertson, 1994 b)

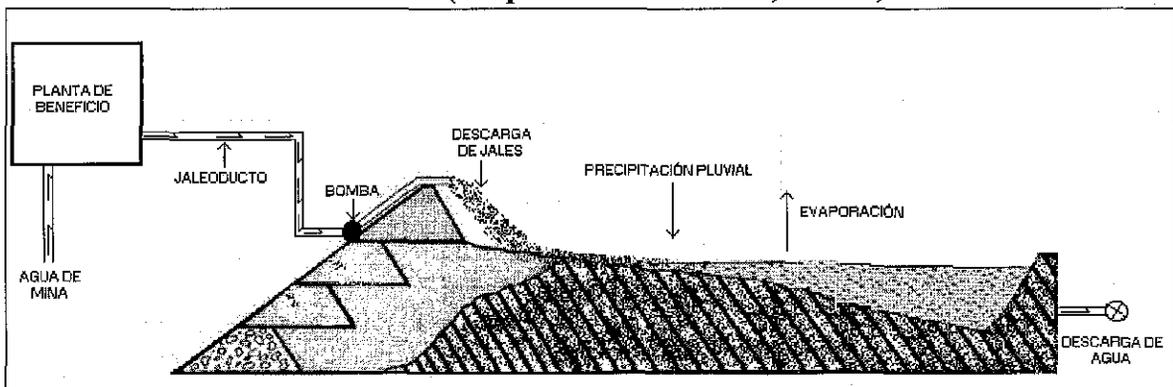


Figura 10. Entradas y salidas de agua en el depósito de jales

CAPITULO 3

METODOLOGÍA

En el presente trabajo la metodología se dividió de la siguiente manera, ordenando las actividades de acuerdo a un orden cronológico:

3.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

El análisis de la bibliografía para la realización de esta actividad se realizó con la consulta de artículos científicos, libros de texto, revistas, reportes y páginas Web en INTERNET relacionadas con el tema.

En su mayoría la información consultada se relaciona con la generación de drenaje ácido, siendo los desechos generados en la explotación del carbón los más estudiados, asimismo, se realizó una recopilación de información climática, geológica hidrológica, procesamiento de minerales y química de la zona de estudio, encaminados a tener un conocimiento más amplio del fenómeno estudiado.

3.2 MUESTREO DE JALES

Esta actividad dio inicio con el reconocimiento del depósito de jales localizado al Sur de la ciudad de Pachuca, Hidalgo o sea Presa Norte y Presa Sur, recolección de datos necesarios para el desarrollo del presente trabajo así como su ubicación geográfica con la ayuda de un GPS marca Garmin modelo 12XL. El muestreo realizado en el depósito fue de tipo puntual a profundidad (Downing, 2000a).

3.2.1 Muestras para columnas de lixiviación

Se tomaron 4 muestras con tubos de 4" de diámetro externo, 0.4 cm de espesor y 90 cm de longitud. Se usaron tubos de material plexiglas considerados químicamente inertes, para que las muestras al ser tomadas, no sufrieran alteración química.

Esta actividad se realizó en forma manual con martillo y una tabla de madera se introdujo el tubo en el depósito, cuando el tubo penetró por completo se quitó el jal que lo rodeaba con una pala, ya libre de jal con una cuchara de acero inoxidable se separó del depósito por la parte inferior, al momento se cubrió con una bolsa de plástico que se fijó al tubo con cinta "masking tape", la parte superior se aisló en la misma forma. Se tomaron datos de la ubicación geográfica de las muestras con la ayuda del GPS. La Tabla 2 muestra la nomenclatura asignada a las columnas de lixiviación, peso de muestra y

coordenadas geográficas correspondientes; la distribución de estas muestras se representa en el plano de localización (Figura 2).

Tabla 2. Nomenclatura, peso y coordenadas geográficas de las muestras utilizadas en las columnas de lixiviación.

Nomenclatura	Peso del jal (kg)	Latitud	Longitud
COL-1	8.583	20°04'50.1"	98°45'43.1"
COL-2	8.551	20°04'48.3"	98°45'31.0"
COL-3	8.978	20°04'41.5"	98°45'28.8"
COL-4	9.138	20°04'34.0"	98°45'32.4"

3.2.2 Muestras para celdas húmedas

Para las pruebas de celdas húmedas se tomaron seis muestras de barrenos de 4" de diámetro perforados en el depósito por la Compañía Real del Monte, con profundidades comprendidas entre 18 y 27 metros, cinco realizados en la Presa Sur y uno en la Presa Norte, de estos barrenos se tomaron muestras representativas, se almacenaron en bolsas de polietileno y se etiquetaron, como la cantidad de muestra tomada fue de 4 kg, ya en laboratorio por cuarteo se obtuvo una muestra representativa para realizar esta prueba.

A las muestras obtenidas en el laboratorio se les asigno la nomenclatura mostrada en la Tabla 3 y su ubicación se representa en el plano de localización (Figura 2).

Tabla 3. Nomenclatura, peso y coordenadas geográficas de las muestras utilizadas en las celdas húmedas.

Nomenclatura	Peso del jal (kg)	Profundidad (m)	Latitud *	Longitud *
JPM-1	4	21	20°04'50.1"	98°45'43.1"
JPM-2	4	24	20°04'48.3"	98°45'31.0"
JPM-3	4	27	20°04'41.5"	98°45'28.8"
JPM-4	4	26	20°04'34.0"	98°45'32.4"
JPM-5	4	24	20°04'41.8"	98°45'29.8"
JPM-6**	4	24	20°04'42.0"	98°45'32.4"

*Aproximada

**Tomada de la presa norte

3.2.3 Muestras para pruebas estáticas

Parte de las muestras tomadas para las celdas húmedas sirvieron para realizar las pruebas estáticas. La obtención de muestras representativas se hizo en el laboratorio por el método de cuarteo.

3.3 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS JALES

Las propiedades físicas determinadas a los jales son:

Tamaño de partícula

Para realizar este análisis se pesaron 100 gramos de muestra completamente seca, se agrego a una columna de tamices previamente acomodados en forma descendente de acuerdo a su abertura 100, 200 y 325 malla, el jal se coloco en el tamiz superior y se aplico movimiento de arriba hacia abajo, posteriormente la columna se separo y el material que quedaba en los tamices se pesó en una balanza analítica, cada uno de los tamices se limpió con un pincel de pelo de nylon para evitar posibles pérdidas de material, posteriormente se calculó el d_{10} por medio de la clasificación de partículas (Wills, 1989).

Otra forma de calcular el diámetro geométrico de los jales se realizo utilizando la textura obtenida en los análisis y el diagrama de Hisraky Borsnia método propuesto por Aguilar (1988).

Conductividad hidráulica vertical

Según Robertson (1994) la conductividad hidráulica de los jales es una función del tamaño de grano. Para jales arenosos una estimación aproximada de K puede ser obtenida del tamaño de grano usando la ecuación de Hazen (Freeze y Cherry, 1979 citado en Robertson, 1994).

$$K = A d_{10}^2$$

Donde:

d_{10} = es el diámetro del tamaño de grano en el que el 10 % corresponde al material más fino.

A = factor de proporcionalidad (1 cuando d_{10} se representa en mm y K en cm/s)

Otra forma de calcular la conductividad hidráulica vertical se realizó utilizando la ecuación de la Ley de Darcy (Freeze y Cherry, 1979):

$$Q = -k \left(\frac{\Delta h}{\Delta l} \right) A$$

Con parámetros de las columnas de lixiviación como: $\Delta h = 0.1104$ m, $\Delta l = 0.90$ m, $A = 0.6793$ m² y el gasto Q = la cantidad de lixiviado obtenido en las columnas COL-1, COL-3 y COL-4 en los 185 días que duró la prueba.

Densidad

Se determino la densidad aparente y la densidad real:

Densidad aparente. Se determino por el método de la probeta (Gandoy, 1991), en este método se utiliza una probeta con capacidad de 10 ml, se pesa en una balanza analítica, se le agrega el material hasta llenar la probeta, se le dan pequeños golpes en una franela tratando que el material llene por completo o casi por completo la bureta, se vuelve a pesar la bureta con el material y por diferencia se tiene el peso de la muestra de material. La fórmula es la siguiente:

$$Da = \frac{W_{muestra}}{V_{bureta}}$$

Donde:

Da = densidad aparente (g/ml)

W_{muestra} = peso de la muestra (g)

V_{bureta} = volumen de la bureta.(ml)

Densidad real. Para determinarla se utilizo el método del picnómetro (Gandoy, 1991), consiste en poner el picnómetro a peso constante, se le agrega una cantidad de muestra conocida, se pesa y posteriormente se añade agua destilada, se pesa y se calcula el valor de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$Dr = \frac{S}{S + A - (s + a)}$$

Donde:

S = peso del jal (g)

A = peso del agua (g)

s + a = peso del jal y del agua (g).

Porosidad. Para el cálculo de la porosidad se hizo uso de los valores de la Da y la Dr por medio de la siguiente relación:

$$n = 1 - \left(\frac{Da}{Dr} \right)$$

Textura. Se determino por el método de Bouyocus propuesto por Aguilar (1988).

Color. El color se determinó en las muestras húmedas y secas utilizando las Tablas de Munsell.

3.4 TRABAJO EXPERIMENTAL

El trabajo para la determinación del tipo de lixiviado producido por los jales generados por la Cía. Real del Monte se baso principalmente en pruebas cinéticas realizadas en laboratorio, eligiéndose las celdas húmedas y las columnas de lixiviación para tal fin.

3.4.1 Celdas húmedas

Para esta prueba se construyeron 6 celdas basándose en el método D5744-96 (ASTM,1996) y Price (1997), que las recomiendan con las dimensiones siguientes: 10.2 cm (4.0 pulgadas) de altura por 20.3 cm (8.0 pulgadas) de diámetro para material menor a 150 μm ; se utilizaron secciones de tubo de material plexiglas con dimensiones de 20.0 cm de diámetro externo y 19.4 cm de diámetro interno y altura de 10.0 cm (Figura 11). Para sostener la muestra en la parte inferior de la celda se colocó una placa de acrílico perforada y cubierta con una malla de polipropileno con abertura aproximada de 30 μm aproximadamente, para evitar la pérdida de muestra durante el vaciado de lixiviado.

Procedimiento de operación. En cada una de las celdas se agregó 1 kg de jal seco; el espesor aproximado de la capa formada por la muestra de jal fue de 3.0 cm. Se realizó un lavado inicial del jal agregando 750 ml de agua desionizada, vaciada por la parte superior de la celda, después de 4 horas se recolectó el lixiviado en recipientes de plástico, se midió el volumen obtenido, se filtró y se analizó pH, temperatura, conductividad eléctrica, cloruros, bicarbonatos y se prepararon los lixiviados para analizar metales disueltos y sulfato.

Posterior al lavado se iniciaron los 20 ciclos que recomienda como mínimo la Norma (ASTM,1996), llevándose a cabo de la siguiente manera: se agregó aire seco por tres días a una taza constante de 1l/min a cada celda, posteriormente se agregó aire húmedo por otros tres días. Al séptimo día se le agregaban 500 ml de agua desionizada a cada celda, se esperaba 4 horas para recolectar el lixiviado en recipientes de plástico con capacidad de 1 l, se medía el volumen obtenido, se filtraba y analizaba pH, temperatura, conductividad eléctrica, cloruros, bicarbonatos y se preparaban los lixiviados para analizar metales disueltos y sulfato.

3.4.2 Columnas de lixiviación

Como estas pruebas no tienen una estandarización definida son más flexibles, el tamaño de las columnas utilizadas es típicamente 7.6, 10.2 o 15.2 cm (3, 4 o 6 pulgadas) de diámetro, y aproximadamente 1 a más de 3 m de altura (Mills, 1999d). La diferencia con el procedimiento para celdas húmedas es pequeña. Algunos ven esta prueba como un suplemento debido a la falta de regularización del procedimiento, o confirmación de la prueba de celdas húmedas, en lugar de una alternativa a la prueba de celdas húmedas (Mills, 1999d).

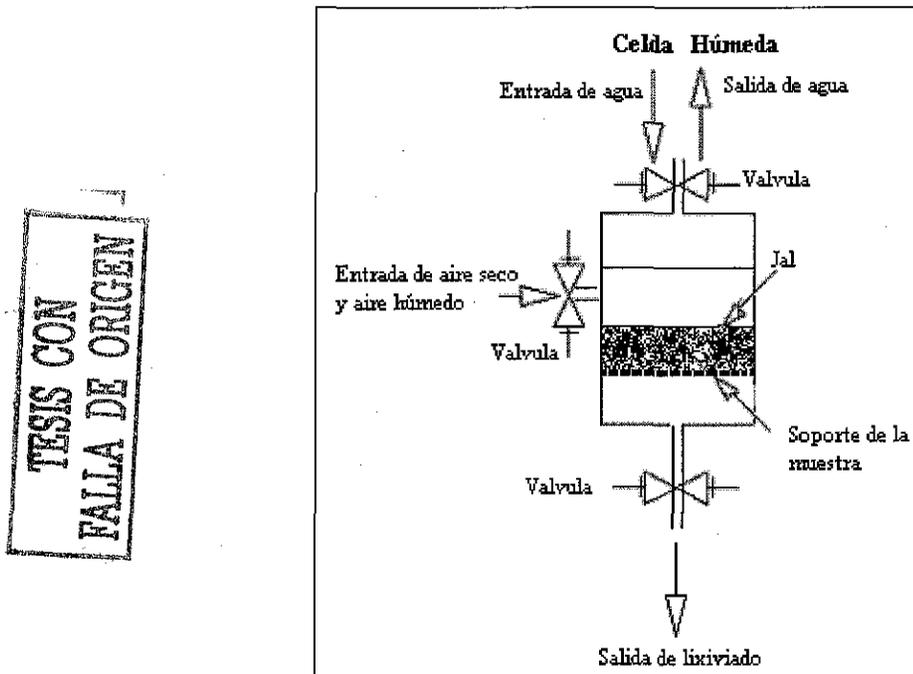
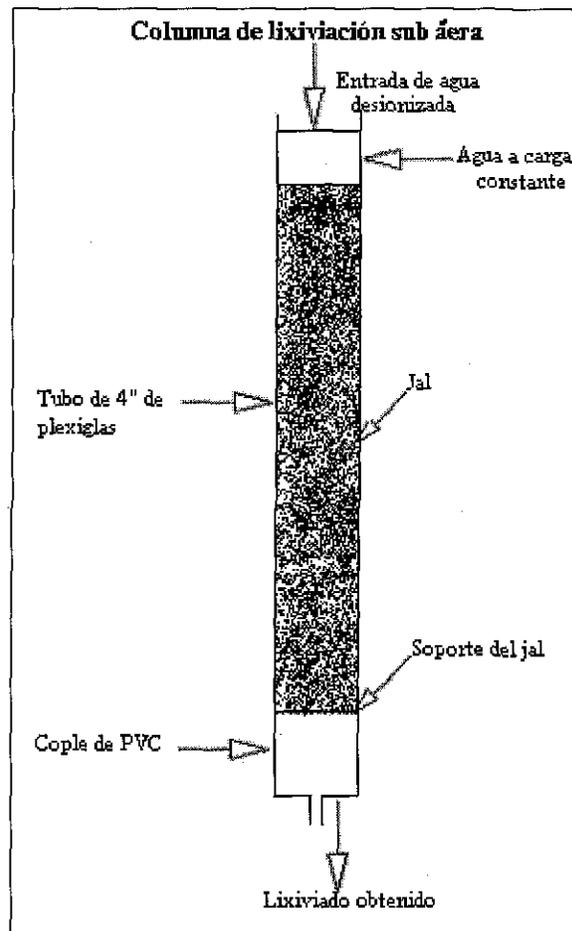


Figura 11. Arreglo esquemático de una celda húmeda (modificado de Mills, 1999d)

La prueba de columna de lixiviación utilizada fue de tipo sub acuosa que simula los efectos de infiltración de agua y lixiviación de un material colocado bajo una capa de agua sin exponerse físicamente a la atmósfera, se simula en una columna el desplazamiento lento del agua de poro por el agua desionizada agregada por la parte superior de la columna (Mills, 1999d).

En la construcción de las cuatro columnas de lixiviación se utilizaron los tubos de plexiglas utilizados en el muestreo, en el laboratorio se les puso un cople de PVC con un tapón del mismo material, previamente perforado y forrado con malla de polipropileno para evitar la pérdida de muestra (jal) al recolectar el lixiviado (Figura 12).

Procedimiento de operación. El procedimiento consistía en agregar agua por la parte superior de la columna manteniéndola a carga constante, cada semana se recolectaba el lixiviado en recipientes de plástico con capacidad de 1 l, se medía el volumen obtenido, se filtraba y analizaba pH, temperatura, conductividad eléctrica, cloruro, bicarbonato y se preparaban las muestras para analizar metales disueltos y sulfato.



**Figura 12. Arreglo esquemático de una columna de lixiviación sub aérea.
(modificado de Mills, 1999d)**

3.5 ANÁLISIS QUÍMICOS

Los análisis químicos realizados en el presente trabajo fueron de acuerdo a la naturaleza de la muestra de dos tipos: fase acuosa y fase sólida; y por los resultados obtenidos cuantitativos y cualitativos.

3.5.1 Fase acuosa

Son análisis cuantitativos realizados a los lixiviados obtenidos en las celdas húmedas y columnas de lixiviación; el primer paso para llevarlos a cabo fue la preparación de la muestra.

Preparación de la muestra. Se realizó de la siguiente manera: el lixiviado obtenido en las celdas húmedas y las columnas de lixiviación se filtraba y en el caso del análisis de metales la muestra se acidificaba con ácido nítrico (HNO_3), se almacenaban en botellas de polipropileno de 100 ml de capacidad de boca ancha, perfectamente lavadas con agua corriente, ácido clorhídrico al 5% y cuatro veces se enjuagaban con agua desionizada. Las muestras se mantenían en refrigeración a 4 °C por un periodo de 7 días hasta la realización del análisis. En cada muestra se analizaban cationes: calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+) y potasio (K^+); metales: hierro (Fe), aluminio (Al), manganeso (Mn), cobre (Cu), cromo (Cr), cadmio (Cd), níquel (Ni), zinc (Zn); silicio (Si) y aniones sulfato (SO_4^{2-}), cloruro (Cl^-), bicarbonato (HCO_3^-). Los pasos seguidos en este punto se muestran en el diagrama de flujo (Figura 13 Anexo C).

El análisis de los lixiviados previamente acondicionados se realizó por:

ICP: Para este análisis cuantitativo se utilizó un equipo marca Perkin Elmer, modelo 3000 XL, ubicado en el Laboratorio Central de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, determinándose cationes y metales, el límite de detección de este equipo es de 0.001 ppm y la confiabilidad es aceptable, las muestras eran comparadas con soluciones que contenían patrones estándar de los elementos analizados, asimismo, se corrían blancos del agua desionizada y reactivos químicos usados en las pruebas y en la preparación de la muestra. Para evitar las interferencias de los cationes a las muestras de lixiviados se les agregaba óxido de lantano al 5%.

Volumetría: Este análisis es de tipo cuantitativo y se realizaba en el momento de la obtención del lixiviado, analizándose bicarbonatos y cloruros. Los bicarbonatos se cuantificaban por el Método Volumétrico (IICT, 1999) y los cloruros por el método propuesto en PROY-NMX-AA-073-1999-SCFI (SCFI, 1999), estos análisis se realizaban por duplicado y corriendo blancos compuestos de agua desionizada y reactivos utilizados en la determinación.

Espectrofotometría de absorción UV visible: Este análisis se realizaba para cuantificar los sulfatos por medio de un espectrofotómetro marca Spectronic modelo 20 Génesis, el análisis se realizaba al momento de la obtención de los lixiviados por el Método Turbidimétrico (SCFI, 1995).

Los diagramas de flujo que representan los pasos seguidos por estos métodos se muestran en el Anexo C (Figura 14 y 15).

3.5.2 Fase sólida

Los análisis químicos efectuados en fase sólida se refieren a aquellos en los que se requirió de material sólido para realizarlos.

Preparación de la muestra. La única preparación que se le realizó a la muestra fue secarla al ambiente (de manera natural), evitando el contacto con aire y polvo, para obtener estas condiciones las muestras se colocaron en recipientes (charolas) de plástico en un cuarto libre de corrientes de aire por aproximadamente 21 días. Ya secas las muestras se procedió a realizar los análisis siguientes .

Análisis químico por digestión en medio ácido: este análisis se realizó de acuerdo con la siguiente técnica:

1. Pesar 2 gramos de muestra y colocarlos en una cápsula de platino previamente secada a 107 °C durante 4 horas, agregar agua, 5 ml de ácido perclórico, 5 ml de ácido nítrico y 20 ml de ácido fluorhídrico.
2. Calentar en una placa de calentamiento hasta la aparición de humos blancos, enfriar y añadir 70 ml de ácido fluorhídrico.
3. Calentar hasta aparición de humos blancos. Repetir la adición de ácido fluorhídrico, pero ahora calentar hasta sequedad.
4. Enfriar y agregar 25 ml de agua y 5 ml de ácido clorhídrico. Calentar hasta disolver sales.
5. Filtrar y lavar el papel filtro de seis a ocho veces con agua caliente. Guardar el filtrado en un vaso de precipitados y colocar el papel filtro con el precipitado en un crisol de platino e incinerar en una mufla de 600 a 800 °C, por una hora.
6. Sacar el crisol de la mufla y enfriar. Agregar al crisol 1 gramo de una mezcla 3:1 de carbonato de sodio y tetraborato de sodio y fundir en una mufla a 925 °C durante 25 minutos.
7. Enfriar el crisol y lixiviar el fundido en el filtrado previamente guardado añadiendo 20 ml de ácido clorhídrico 1:3. Cubrir el crisol con un vidrio de reloj y calentar hasta el desprendimiento total de la masa del crisol.

8. Enfriar y pasar la solución a un matraz volumétrico de 100 ml, lavar el crisol con un chorro de agua fino y aforar.
9. La concentración de la solución obtenida se analiza por ICP para los siguientes elementos: aluminio (Al), bario (Ba), cadmio (Cd), calcio (Ca), cromo (Cr), hierro (Fe), cobre (Cu), cobalto (Co), magnesio (Mg), plomo (Pb), zinc (Zn), manganeso (Mn), sodio (Na), potasio (K) y níquel (Ni).

Determinación de óxidos libres (Mehra y Jackson, 1960): este análisis se realizó de acuerdo a la siguiente técnica:

1. La muestra de jales fue tratada inicialmente para remover sales solubles y materia orgánica de acuerdo con las técnicas propuestas en el manual de laboratorio de suelos (IICT,1999)
2. Poner en un tubo de centrifuga de 100 ml 4 g de muestra previamente tratada para destruir materia orgánica y sales solubles.
3. Agregar a la muestra 40 ml. de solución de citrato de sodio 0.3 M y 5 ml de solución de bicarbonato de sodio 1 N.
4. Calentar la suspensión a 80 °C a baño maría y agregar 1 g de ditionito de sodio; agitar la solución constantemente por un minuto y ocasionalmente por un total de 15 minutos.
5. Agregar 10 ml de solución saturada de cloruro de sodio, mezclar la suspensión y calentar en baño maría para acelerar la floculación.
6. Centrifugar el tubo 10 a 15 minutos a 1600-2200 rpm y decantar el líquido claro sobrenadante en un matraz volumétrico de 500 ml.
7. La concentración de la solución obtenida se analiza por ICP para los siguientes elementos: aluminio (Al), manganeso (Mn), hierro (Fe), plomo (Pb) y zinc (Zn).

Microscopía Óptica: El análisis mineralógico de los jales es importante para identificar las fases minerales presentes y su posible grado de reacción geoquímica. Al tomar las muestras en el área de estudio se analizaron superficialmente concluyendo que todas las muestras presentan características similares. Para el análisis mineralógico se utilizaron los siguientes métodos:

Microscopía Óptica de Polarización de Luz Transmitida (MPO-LT) en granos: Por este método se examinó la morfología de los granos, el procedimiento es el siguiente: se puso

un poco de material seco y cribado a -100 mallas en un porta objetos, se le agrego una gota de resina (gylol), se cubrió con un portaobjetos y se analizo en un Microscopio de Polarización marca Olympus modelo BHSP, ubicado en el Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Microscopia Óptica de Luz Reflejada (MOP-LR): Con este análisis se determinaron las fases mineralógicas presentes en las muestras; se hicieron secciones pulidas a espejo con pasta de diamante, para este análisis el jal no fue cribado, el análisis se realizó en un Microscopio de Polarización marca Olympus modelo BHSP ubicado en el Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Difracción de rayos X (DRX): Se realizó con un difractómetro marca Phillips modelo X-PERT ubicado en el Laboratorio Central de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Este análisis es de tipo cualitativo y da una aproximación de las fases minerales presentes en los jales, principalmente las fases mayoritarias. Las muestras analizadas se encontraban perfectamente secas. Las fases minerales se determinaron analizando los conteos obtenidos en la prueba con la ayuda de los manuales editados por Joint Committee On Powder Diffraction Standards (1986)

Pruebas Estáticas: Para realizar estas pruebas se utilizo el método EPA-600 (ABA), también conocido como procedimiento de Sobek *et al.*, (1978) .

pH de la mezcla: Determina el tipo de lixiviado producido por los jales, se realizo con el método de Sobek *et al.*, (1978), con las modificaciones de Page et al (1982), citado en Mills (1999e)

Especies sulfurosas: Se utilizo el método EPA-600 para el análisis de azufre y sus combinaciones con otros elementos, con una pequeña modificación, la fusión de la muestra se realizo por el Método Eschka (Standard Methods, 1967), el azufre se cuantifico por el método gravimétrico de precipitación de sulfato de bario de soluciones calientes.

Potencial Total de Acidez (TAP por sus siglas en inglés): Su calculo se realizo en base a los resultados del análisis de azufre por medio de la siguiente fórmula (Morin y Hutt, 1997):

$$\text{TAP} = (\%S \text{ total}) * 31.25$$

Potencial de neutralización (NP por sus siglas en inglés): Este análisis se basó en el Método EPA-600, por este método se calculan las bases que contribuyen a la neutralización de los ácidos, se encuentra tratando una muestra con un exceso conocido de ácido clorhídrico normalizado. Se calienta la muestra y ácido para asegurar que la reacción entre el ácido y los neutralizadores se realice. El carbonato del calcio equivalente de la muestra se obtiene determinando la cantidad de ácido consumido por titulación hidróxido de sodio estandarizado.

Una prueba de burbujeo se lleva a cabo para determinar la cantidad de ácido que se debe agregar a la muestra para que reaccione con todo el carbonato de calcio presente. Se expresa como toneladas de CaCO_3 (carbonato de calcio) producidas por cada 1000 toneladas de material.

Potencial neto de neutralización (NNP por sus siglas en inglés): Este potencial se calcula con los datos obtenidos en los análisis anteriores por medio de la siguiente fórmula:

$$\text{NNP} = \text{NP} - \text{TAP}$$

Y se expresa como toneladas de CaCO_3 (carbonato de calcio) producidas por cada 1000 toneladas de material.

Relación de potencial de neutralización (NPR por sus siglas en inglés): Este potencial se obtiene de la siguiente relación:

$$\text{NPR} = \text{NP} / \text{TAP}$$

3.6 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

3.6.1 Pruebas estáticas

La valoración de los datos ABA obtenidos se logra con un gráfico que relaciona NPR y el análisis de azufre en forma de sulfuro. Muestras con $\text{NPR} < 2$ son consideradas potencialmente generadoras de acidez (Steffen, Robertson y Kirsten, 1992; citados en Mills, 1999a) y generalmente muestras que contienen menos de 0.3% de azufre en forma de sulfuro son incapaces de mantener generación ácida (Price and Errington, 1995; Precian, 1997; citados en Mills, 1999a), por lo tanto se trazan líneas paralelas al eje X y al eje Y en $\text{NPR} = 2$ y 0.3% de azufre en forma de sulfuro, con lo que se divide la gráfica en cuatro cuadrantes. Las muestras que caen en los cuadrantes $\text{NPR} > 2$ y $S < 0.3\%$,

NPR > 2 y S > 0.3%, se consideran no generadoras de acidez, mientras que las que caen en el cuadrante NPR < 2 y S > 0.3%, se consideran potenciales generadoras de acidez.

3.6.2 Pruebas cinéticas

Las ecuaciones recomendadas por Morin y Hutt (1997) para la interpretación de pruebas cinéticas de laboratorio son:

Taza de producción de acidez (APR por sus siglas en inglés):

$$\text{APR (mg CaCO}_3\text{/kg/semana)} = \text{acidez (mg CaCO}_3\text{/l)} * \text{volumen de lixiviado colectado (l)} \\ / \text{ peso de la muestra (kg)}$$

Taza de producción de sulfato (SPR por sus siglas en inglés):

$$\text{SPR (mg/kg/semana)} = \text{sulfato (mg/l)} * \text{volumen de lixiviado colectado (l)} / \text{ peso de la} \\ \text{muestra (kg)}$$

Azufre total en la celda (RS por sus siglas en inglés):

$$\text{RS (\% del original)} = \{[\% \text{ de S total inicial} - ((\text{taza de producción acumulativa de sulfato} \\ \text{(mg/kg)} * 32.06 / 96.06) / 10000)] / \text{S total inicial como \% de S}\} * 100\%$$

Azufre como sulfuro en la celda (RSS por sus siglas en inglés):

$$\text{RSS (\% del original)} = \{[\% \text{ de S como sulfuro inicial} - ((\text{taza de producción acumulativa} \\ \text{de sulfato (mg/kg)} * 32.06 / 96.06) / 10000)] / \text{S como sulfuro inicial como \% de S}\} * \\ 100\%$$

Taza de producción de sulfato por área superficial (SPRBS por sus siglas en inglés):

$$\text{SPRBS (mg/m}^2\text{/semana)} = \text{taza de producción de sulfato (mg/kg/semana)} / \text{área} \\ \text{superficial (m}^2\text{/kg)}$$

Relación molar de carbonato (CMR por sus siglas en inglés):

$$\text{CMR} = [(\text{Ca (mg/l)} / 40.08) + (\text{Mg (mg/l)} / 24.31)] / (\text{SO}_4 \text{ (mg/l)} / 96.06)$$

Relación molar de feldespato (FMR por sus siglas en inglés):

$$\text{FMR} = [(\text{Ca (mg/l)} / 40.08) + (\text{K (mg/l)} / (2/39.1)) + (\text{Na (mg/l)} / (2*22.99))] / (\text{SO}_4 \text{ (mg/l)} \\ / 96.06)$$

Relación de carbonato consumo de NP (CRNPC por sus siglas en inglés):

$$\text{CRNPC (mg CaCO}_3\text{/kg/semana)} = \text{relación molar de carbonato} * \text{consumo teórico de NP} \\ \text{(mg/kg/semana)}$$

Relación molar de feldespato consumo total de NP (FMRTNP por sus siglas en inglés):

FMRTNP (mg CaCO₃ equivalente/kg/semana) = relación molar de feldespato * consumo teórico de NP (mg/kg/semana)

% de NP contenido en la celda (RNP por sus siglas en inglés):

$$\text{RNP (\% del original)} = \{[\text{NP inicial (t CaCO}_3\text{/1000 t)} - (\text{taza acumulada de descenso de NP (mg/kg) / 1000})] / \text{NP inicial (t CaCO}_3\text{/1000 t)}\} * 100\%$$

Taza de lixiviación de metales (MTR por sus siglas en inglés):

$$\text{MTR (mg/kg/semana)} = \text{concentración de metales (mg/l)} * \text{volumen de lixiviado colectado (l)} / \text{peso de la muestra (kg)}$$

% de metales contenidos en la celda (RM por sus siglas en inglés):

$$\text{RM (\% del original)} = \{[\text{contenido inicial de metales (mg/kg)} - \text{taza acumulativa de metales lixiviados (mg/kg)}] / \text{contenido de metales inicial (mg/kg)}\} * 100\%$$

3.6.3 Índices de saturación

Para la obtención de los índices de saturación se alimentaron las concentraciones obtenidas de los diferentes análisis químicos realizados a las muestras de lixiviados al paquete de computación PHREEQC Interactive 2.4.2 Alpha (Parkhurst y Appelo, 1999), los ciclos que se consideraron son el 1,5,10,15 y 20 para las celdas húmedas y para las columnas de lixiviación: COL-1 85, 123 y 185 (días), COL-3 29, 57, 106, 146 y 185 (días), COL-4 36, 71, 123 y 185 (días).

CAPITULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y MINERALÓGICAS DE LOS JALES

El análisis de las propiedades físicas de 6 muestras de jales, antes y después de la prueba de celdas húmedas llevaron a los siguientes resultados:

Los resultados de densidad se pueden apreciar en la Tabla 4. La densidad aparente (Da) tiene un valor promedio de 1.332 kg/m^3 , mientras que la densidad real (Dr), tiene un valor promedio de: 2.498 y 2.486 kg/m^3 , observando una disminución en la densidad real promedio de 0.253% después de la prueba de celdas húmedas, debido posiblemente a la disolución de sales que se encontraban adheridas a las superficies de los granos del jal.

La porosidad (n) determinada se muestra en la Tabla 4, el valor promedio antes y después de la prueba es de 0.462928 y 0.462934 , incrementándose $6.15 \times 10^{-4}\%$, este aumento posiblemente se debe a que los granos de jal se encontraban cementados entre sí antes de la prueba y al agregarle agua, el cementante se disolvió y los granos se separaron provocando un incremento en la porosidad.

Tabla 4. Densidad aparente (Da), real (Dr), porosidad (n) y textura de seis muestras antes y después de la prueba de celdas húmedas.

Muestra	Antes						Después					
	Da (kg/m^3)	Dr (kg/m^3)	n	Arena %	Limo %	Arcilla %	Da (kg/m^3)	Dr (kg/m^3)	N	Arena %	Limo %	Arcilla %
JPM-1	1.3643	2.5385	0.4626	50	40	10	1.3643	2.5385	0.4626	44	38	18
JPM-2	1.2823	2.4715	0.4811	57	30	13	1.2823	2.4715	0.4811	46	36	18
JPM-3	1.3470	2.4900	0.4590	56	34	10	1.3470	2.4900	0.4590	53	37	10
JPM-4	1.3440	2.5933	0.4817	76	18	6	1.3440	2.5933	0.4817	73	21	6
JPM-5	1.3083	2.5817	0.4932	62	30	8	1.3083	2.5817	0.4932	60	32	8
JPM-6	1.3463	2.2432	0.3998	58	32	10	1.3463	2.2432	0.3998	47	43	10

El material tiene granulometría que va de muy fina a limosa, clasificándose de acuerdo al triángulo de clases texturales (Aguilar, 1988), en franco limoso. En la Tabla 4 se presentan los resultados obtenidos de textura, el valor promedio antes de la prueba de celdas húmedas es de: 59.83% de arenas, 30.66% de limos y 9.5% de arcillas; mientras que al finalizar la prueba es: 53.83% de arenas, 34.5% de limos y 11.66% de arcillas, existe una disminución en el porcentaje de arenas y un incremento en el porcentaje de limos y arcillas; este efecto posiblemente se debe a: 1) las partículas de mayor tamaño se disgregan y 2) los granos tienen capas superficiales compuestas por sales que se disuelven fácilmente por el agua.

El color del jal seco es gris claro y húmedo presenta color café grisáceo oscuro.

El tamaño de partícula promedio calculado de los jales es de 49 micras, el diámetro geométrico derivado de la textura, es de 28 micras, mientras que el d_{10} calculado por medio de la clasificación de partículas es de 24 micras.

La conductividad hidráulica vertical (K) para tamaños de partícula de 24 y 28 micras, es de 5.76×10^{-6} y 7.84×10^{-6} m/s respectivamente, mientras que la K calculada para las columnas de lixiviación considerando el volumen de lixiviado obtenido durante la prueba da los siguientes valores 5.02×10^{-8} , 1.20×10^{-6} y 4.40×10^{-7} m/s para la COL-1, COL-3 y COL-4 respectivamente, como se puede apreciar, el valor de K para las muestras utilizadas en las celdas húmedas es del mismo orden de magnitud con relación a la obtenida en la COL-3, mientras que con respecto al valor obtenido para la COL-4 tiene una variación de un orden de magnitud y para la COL-1 la variación es de dos ordenes de magnitud.

La composición química promedio para los elementos analizados es (Tabla 5): aluminio 4.625 p/p, bario 0.029 p/p, calcio 2.1 p/p, cadmio 10 ppm, cobalto 8.4 ppm, cromo 25.7 ppm, cobre 15 ppm, hierro 1.93 p/p, potasio 2.91 p/p, sodio 0.54 p/p, níquel 28 ppm, magnesio 0.55 p/p, manganeso 0.46 p/p, plomo 0.82 p/p, azufre 0.74 p/p y zinc 0.17 p/p.

Tabla 5. Resultados de análisis químicos en p/p realizados a seis muestras de jales.

Muestra	Al p/p	Ba p/p	Ca p/p	Cd ppm	Co ppm	Cr ppm	Cu ppm	Fe p/p	K p/p	Na p/p	Ni Ppm	Mg p/p	Mn p/p	Pb p/p	S p/p	Zn p/p
JPM-1	4.64	0.036	2.28	4.5	8.3	26	23	2.04	2.57	0.56	28	0.58	0.58	0.099	0.80	0.16
JPM-2	4.73	0.009	2.17	4.3	8.2	35	17	1.98	2.98	0.55	30	0.57	0.43	0.090	0.848	0.19
JPM-3	4.32	0.046	1.75	1.5	9	22	14	1.79	2.98	0.52	28	0.44	0.45	0.072	0.63	0.14
JPM-4	4.47	0.025	1.90	17.6	7.8	20	9	1.80	3.15	0.56	29	0.53	0.45	0.052	0.99	0.14
JPM-5	4.44	0.027	1.64	2.8	8.2	31	16	1.85	3.07	0.49	28	0.46	0.43	0.078	1.03	0.17
JPM-6	5.15	0.035	2.90	6.7	8.6	21	12	2.10	2.73	0.58	29	0.72	0.63	0.103	0.79	0.20

Los análisis mineralógicos realizados por el método de Microscopía Óptica de Polarización de Luz Transmitida (MPO-LT) en granos, llevan a los siguientes resultados:

- Las muestras presentan cierta homogeneidad y tienen predominancia de transparentes (no metálicos) en relación a opacos (metálicos).
- Los minerales transparentes son de mayor tamaño que los opacos.
- Los minerales opacos libres son pocos y en general son partículas muy finas.
- Los minerales transparentes contienen encapsulados a los minerales opacos.

- e) La oxidación está representada principalmente por limonita y escasa hematita, aunque existen partículas en las que la hematita se hace más evidente además de afectar mayor espesor del mineral.
- f) Dentro de los minerales transparentes predomina el cuarzo y en los minerales opacos la pirita, en algunas laminas se detecto apatito.

Las Fotografías 1 a 5 del Anexo Fotográfico, ilustran las características morfológicas de los jales, destacando que: los granos presentan una forma que va de angulosa a sub angulosa y considerando su tamaño son heterogéneos.

Los análisis de Microscopía Óptica de Luz Reflejada (MOP-LR) muestran que los minerales no metálicos son los más abundantes con respecto a los metálicos; los minerales metálicos reconocidos por este método son: pirita, hematita y esfalerita, con las siguientes características:

La pirita se encuentra libre en partículas de tamaño muy fino o encapsulada principalmente en cuarzo. La hematita tiene un comportamiento similar a la pirita; cuando esta libre el tamaño de partícula es muy fino o incluida en cuarzo. La esfalerita principalmente se encuentra incluida en cuarzo.

Las Fotografías 6 y 7 del Anexo Fotográfico representan minerales de hierro encontrados en las muestras en forma libre y encapsulados en cuarzo.

De acuerdo a los resultados obtenidos por DRX (Tablas 6 a 12 Anexo D), la fase mineral mayoritaria es cuarzo y en algunas muestras también la sanidina (silicato), como lo demuestran tres difractogramas obtenidos por este equipo (Figuras 16, 17 y 18 Anexo E), las fases minerales minoritarias se determinaron en muestras clasificadas a malla – 200, siendo: cianita, altaita, bornita, esfalerita, pirita, hematita, anglesita, coquimbita, jarosita, calcita, yeso, röemerita, marcasita, melanterita, copiapita, flogopita, andesina, magnesita y zincosita.

4.2 PRUEBAS ESTÁTICAS

Las pruebas estáticas realizadas por el método ABA a seis muestras de jales llevan a los siguientes resultados:

El pH de la mezcla promedio medido es de 7.81, los datos completos se dan en la Tabla 13, de acuerdo a este valor y aplicando el Criterio Universal ABA para Comprobación o Predicción de Rangos de pH en Drenaje de Sitios Mineros (Morin y

Hutt, 1997), se considera que el lixiviado generado por los jales actualmente se encuentra cercano a la neutralidad.

La Tabla 13 muestra los valores en p/p para el azufre total, azufre en forma de sulfuro y azufre en forma de sulfato y el potencial de neutralización para cada una de las muestras analizadas. La concentración promedio de azufre en p/p es: azufre total 0.744, 0.655 en forma de sulfatos y 0.078 en forma de sulfuros. El valor promedio del potencial de neutralización es de 59.96 toneladas de CaCO₃ (carbonato de calcio) producidas por cada 1000 toneladas de material.

Tabla 13. Azufre, pH de la mezcla y potencial de neutralización (NP) determinados en seis muestras de jales

Muestra	Azufre total (%)	Sulfato Lixiviado	% de azufre	Discrepancia(%)	pH	NP t CaCO ₃ /1000 t
JPM-1	0.802416	0.653357	0.126408	0.0226505	7.8	65.44
JPM-2	0.848092	0.695588	0.152603	0.010000	7.77	42.415
JPM-3	0.629292	0.560592	0.065952	0.002748	7.82	55.726
JPM-4	0.994776	0.950808	0.043968	-0.038472	7.88	59.323
JPM-5	1.027752	0.840888	0.148392	0.038472	7.75	61.805
JPM-6	0.791424	0.758448	0.032976	0	7.83	75.1414

Los valores de potencial total de acidez, potencial neto de neutralización y potencial de neutralización para las 6 muestras analizadas se muestran en la Tabla 14, el valor promedio para cada uno de ello es: 23.24 y 36.73 toneladas de CaCO₃ producidas por cada 1000 toneladas de material y de 3.09 respectivamente.

Tabla 14. Valores de potencial de neutralización (NP), potencial de acidez total (TAP), potencial neto de neutralización (NNP) y relación de potencial de neutralización (NPR)

Muestra	NP (t CaCO ₃ / 1000 t)	TAP (t CaCO ₃ / 1000 t)	NNP (t CaCO ₃ / 1000 t)	NPR
JPM-1	65.44	25.08	40.36	2.609
JPM-2	42.42	26.13	35.64	1.623
JPM-3	55.73	19.67	36.06	2.830
JPM-4	59.33	31.09	28.24	1.908
JPM-5	61.81	32.12	29.69	1.920
JPM-6	75.14	24.73	50.41	3.038

Aplicando el Criterio Universal ABA para Comprobación o Predicción de Rangos de pH de Drenaje en Sitios Mineros (Morin y Hutt, 1997), se tiene que los valores de potencial neto de neutralización (NNP) de las muestras denotan una condición indefinidamente cerca de la neutralidad o alcalina (NNP > +20 t CaCO₃/ 1000 t).

La valoración de los datos ABA obtenidos se logra con un gráfico que considera la relación de potencial de neutralización versus el análisis de azufre en forma de sulfuro.

La Figura 19 muestra los datos ABA obtenidos en las seis muestras de jales del Distrito Minero de Pachuca-Real del Monte.

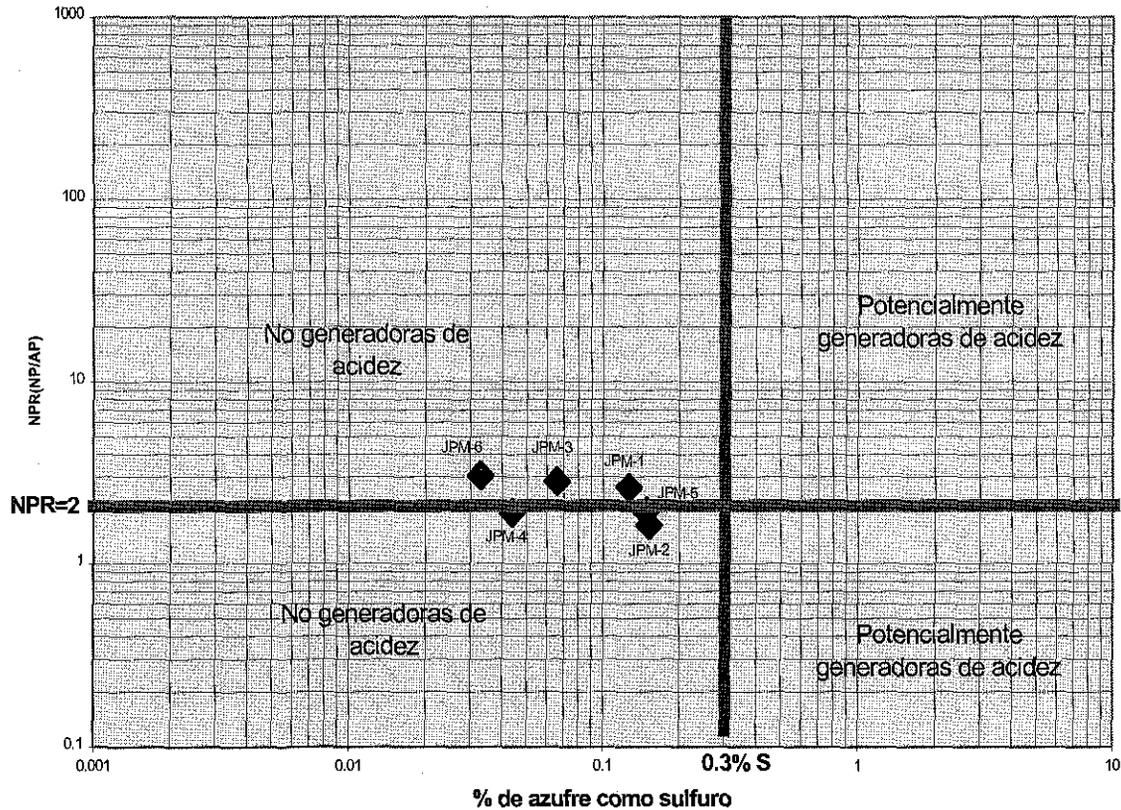


Figura 19: Relación de potencial de neutralización, NPR (NP/AP) versus azufre como sulfuro ubicación de las muestras usadas para las celdas húmedas del Distrito Minero de Pachuca-Real del Monte

De las seis muestras de jales analizadas cuatro caen en el cuadrante $NPR > 2$ y $S < 0.3\%$ y las otras dos caen en el cuadrante $NPR < 2$ y $S < 0.3\%$, lo que significa que no son potencialmente generadoras de acidez.

4.3 COLUMNAS DE LIXIVIACIÓN

Tres de las cuatro columnas de lixiviación generaron lixiviado (COL-1, COL-3 y COL-4), en la columna que no generó lixiviado (COL-2) se recolectaron las sales adheridas a la manguera para descarga de lixiviado y se analizaron por DRX. El período de obtención del primer lixiviado y la cantidad de lixiviado fue diferente para cada columna: COL-1 592 ml, COL-3 15188 ml y COL-4 5552 ml, lo que indica que el valor de conductividad hidráulica es diferente para cada una de las columnas, como se mostró en la sección de conductividad hidráulica.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Los resultados de los análisis químicos de los lixiviados obtenidos en las tres columnas de lixiviación se presentan en las Tablas 15 a 23 del Anexo F. En estas tablas se incluyen los resultados de concentración para aniones, cationes y metales; en general el anión, catión y metal de mayor concentración son: sulfato, calcio y manganeso respectivamente, su concentración en el lixiviado posiblemente se debe al arrastre que ocasiona el agua al pasar entre los granos del jal contenidos en la columna, ya que, a mayor cantidad de agua que pasa se obtiene mayor lixiviado y una mayor concentración de elementos lixiviados.

Los resultados de la masa lixiviada de aniones, cationes, sílice y metales de las columnas COL-1, COL-3 y COL-4 se presentan en las Tablas 24, 25 y 26 del Anexo F respectivamente. Estas tablas muestran que la masa total lixiviada en mg de las columnas COL-1, COL-3 y COL-4 es de: 2039.73, 26426.944 y 12260.51 respectivamente y el porcentaje de la masa total lixiviada de cationes, aniones y metales se encuentra en un rango de 28.08 a 28.73%, de 70.22 a 71% y de 0.60 a 1.379%, respectivamente.

La variación de la concentración de los elementos presentes en el lixiviado de las columnas COL-1, COL-3 y COL-4 se presentan en la Figuras 20 (a), 20 (b) y 21 respectivamente. De estas figuras se puede deducir que: el pH medido en el lixiviado obtenido no varía significativamente, la conductividad eléctrica disminuye con el tiempo, los cationes y aniones tienen mayor impacto en la concentración del lixiviado como se puede constatar en la Figura 22, mientras que los metales tienen una concentración con relación a los aniones y cationes poco significativa (Figura 23). La concentración de solutos en los lixiviados muestra una disminución con el tiempo (Tabla 27).

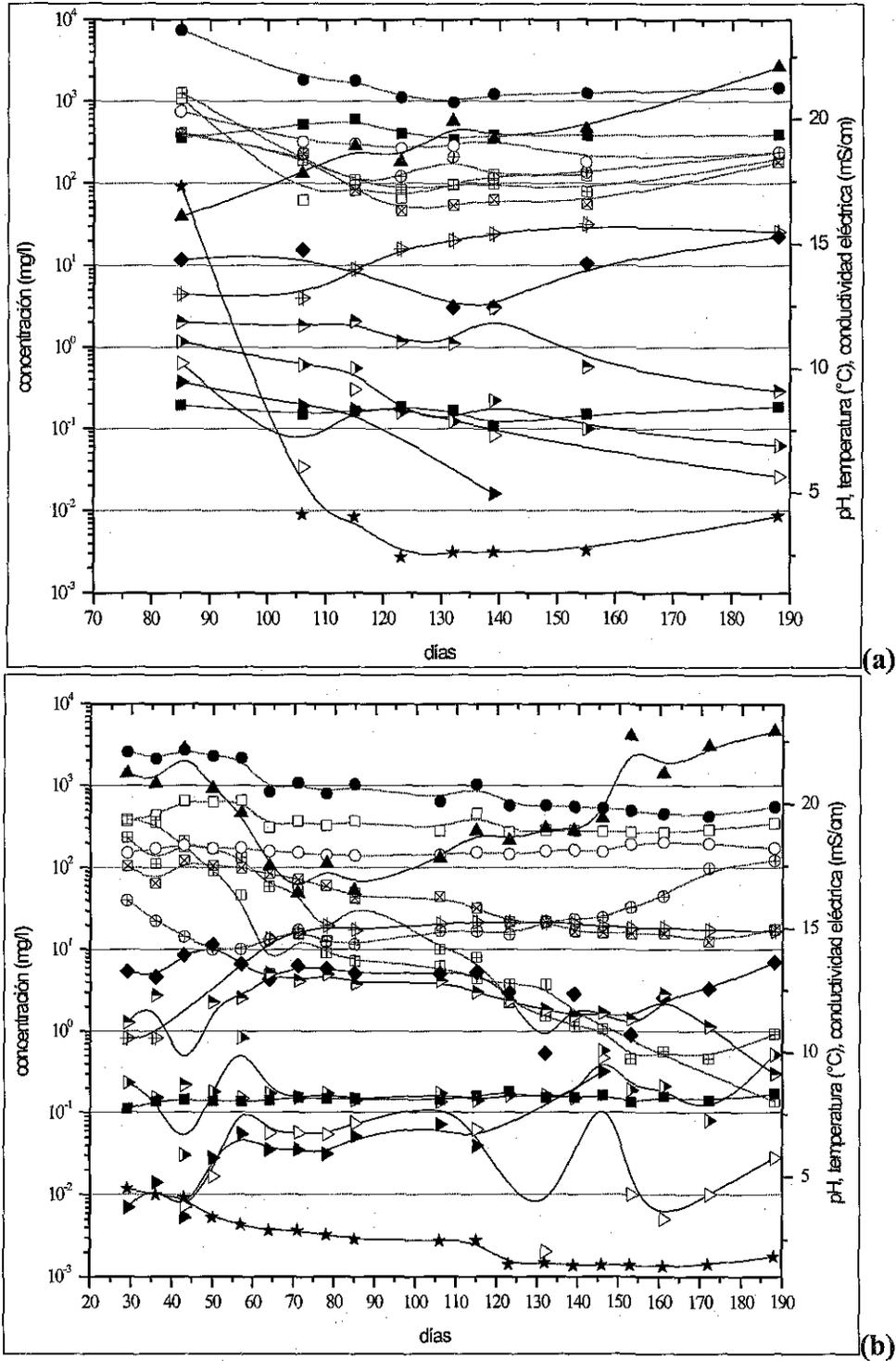
Tabla 27. Comportamiento de la concentración en lixiviados de las columnas

Columna	COL-1	COL-3	COL-4
Total (%)	- 76.6	- 68.01	- 52.30
Aniones (%)	- 77.35	- 69.30	- 54.10
Cationes (%)	- 75.1	- 66.74	- 52.54
Metales (%)	+ 1141.95	+ 739.83	+ 1506.77

Nota: El signo indica el porcentaje de disminución (-) o aumento (+) con respecto a la concentración inicial.

La tendencia que tiene la concentración de los iones mayores (cationes y aniones) en el lixiviado generado en las columnas de lixiviación es a reducirse con el tiempo y en los metales es positiva, esto quiere decir que conforme disminuyen las sales susceptibles

a ser disueltas la concentración de metales en el lixiviado se incrementa; siendo el manganeso el de mayor concentración.



□ calcio ⊕ sodio ⊞ magnesio ⊞ potasio ● sulfato ○ bicarbonato
 ⊕ cloruro ◆ silicio ▲ aluminio ▷ hierro ▽ manganeso ▷ zinc
 ▷ Cd+Cr+Cu+Ni+Pb ★ conductividad eléctrica ■ pH ▲ temperatura

Figura 20.- Solutos lixiviados en las columnas de lixiviación (a) COL-1 y (b) COL-3

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

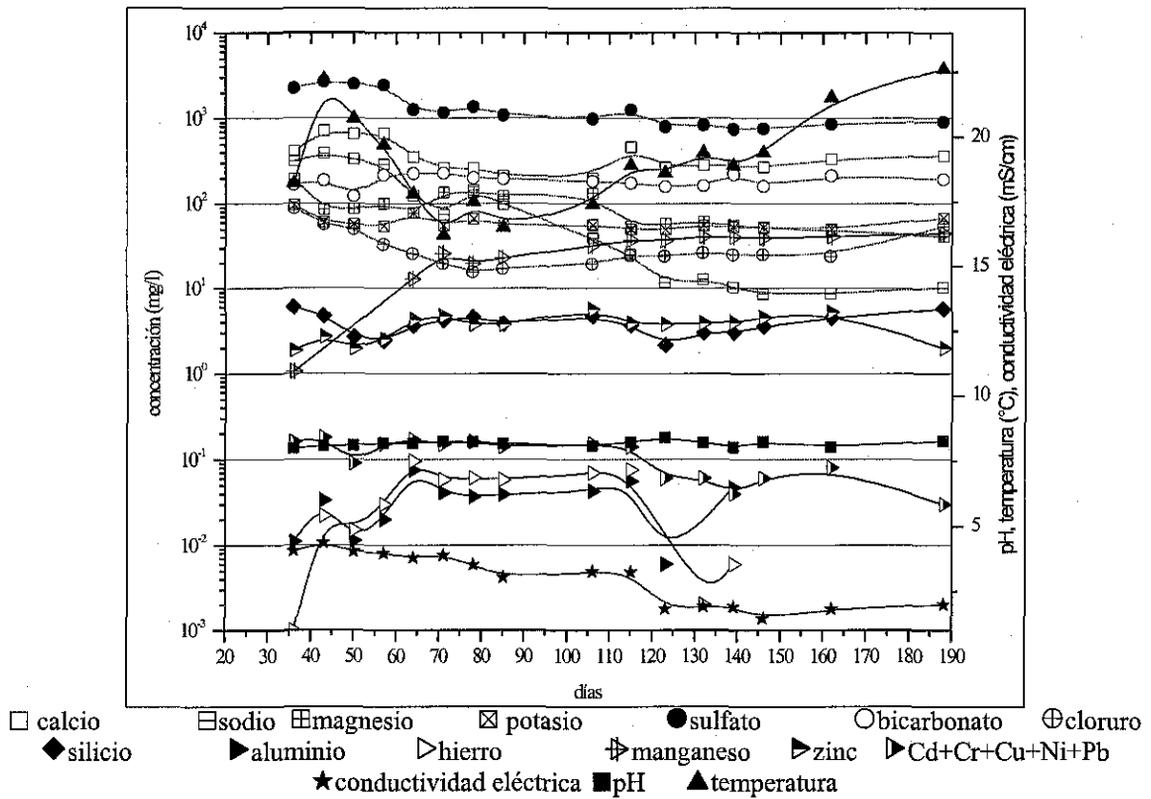


Figura 21. Solutos lixiviados en la columna de lixiviación COL-4

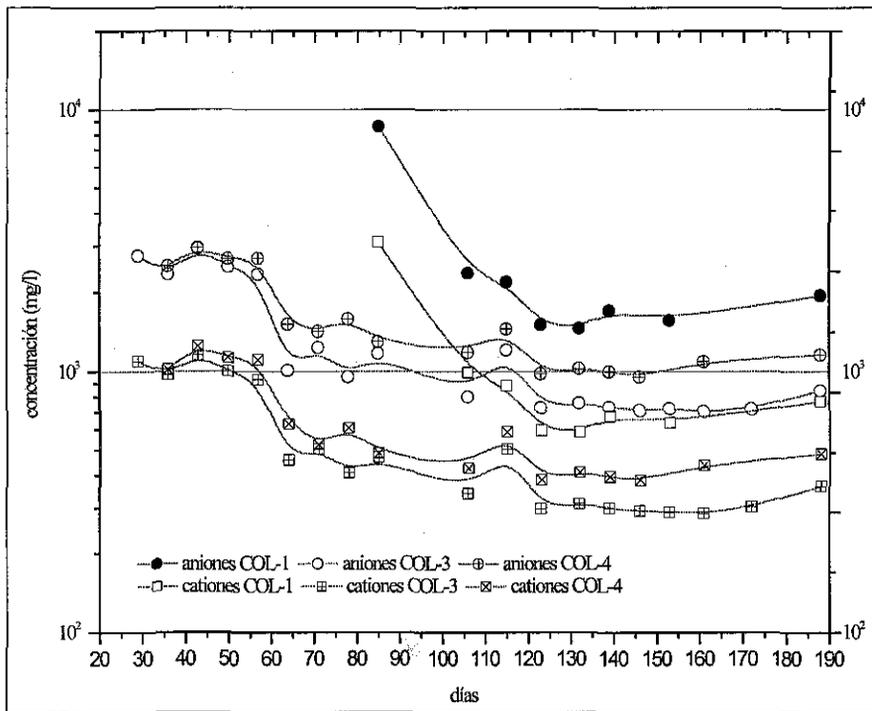


Figura 22. Concentración de aniones y cationes en las columnas de lixiviación

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

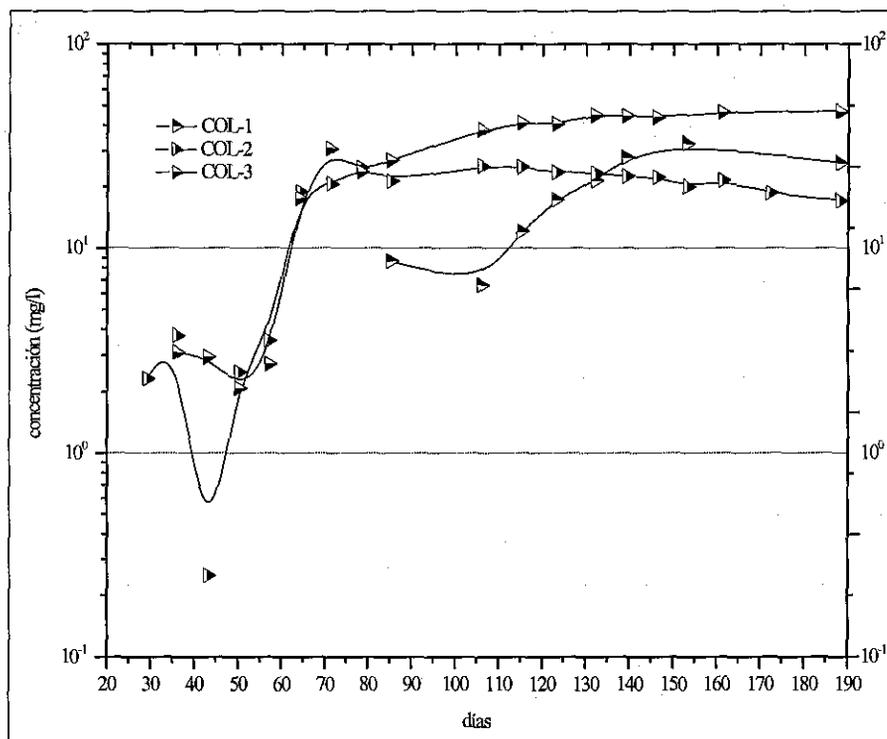


Figura 23. Concentración de metales lixiviados en las columnas de lixiviación

La evolución de la concentración de calcio, sulfato y manganeso se da en la Figura 24 y la Tabla 28 muestra el comportamiento final en porcentaje de los mismos.

Tabla 28. Comportamiento de la concentración de calcio, sulfato y manganeso

Columna	COL-1	COL-3	COL-4
Calcio (%)	- 34.78	- 46.76	- 48.81
Sulfato (%)	- 80.26	- 78.56	- 59.84
Manganeso (%)	+ 578.83	+ 2059.19	+ 4216.98

Nota: El signo indica el porcentaje de disminución (-) o aumento (+) con respecto a la concentración inicial.

La Figura 25 muestra el comportamiento de la concentración acumulada de los cationes y aniones a lo largo de la prueba, teniendo un incremento hasta los 85 días en la COL-3 y COL-4, después de este período tiende a estabilizarse; la COL-1 tiene un incremento desde el primer lixiviado obtenido hasta el final de la prueba.

La Figura 26 muestra el comportamiento de los metales de acuerdo a su concentración acumulada a lo largo de la prueba, este comportamiento en las tres columnas tiene un incremento desde inicio hasta el final de la prueba. La Figura 27 muestra el comportamiento de calcio, sulfato y manganeso de acuerdo a sus concentraciones acumuladas a lo largo de la prueba; su comportamiento es similar al mostrado por las Figuras 25 y 26, con lo que se demuestra que son los elementos que

tienen mayor impacto en la concentración de los lixiviados generados en las tres columnas de lixiviación.

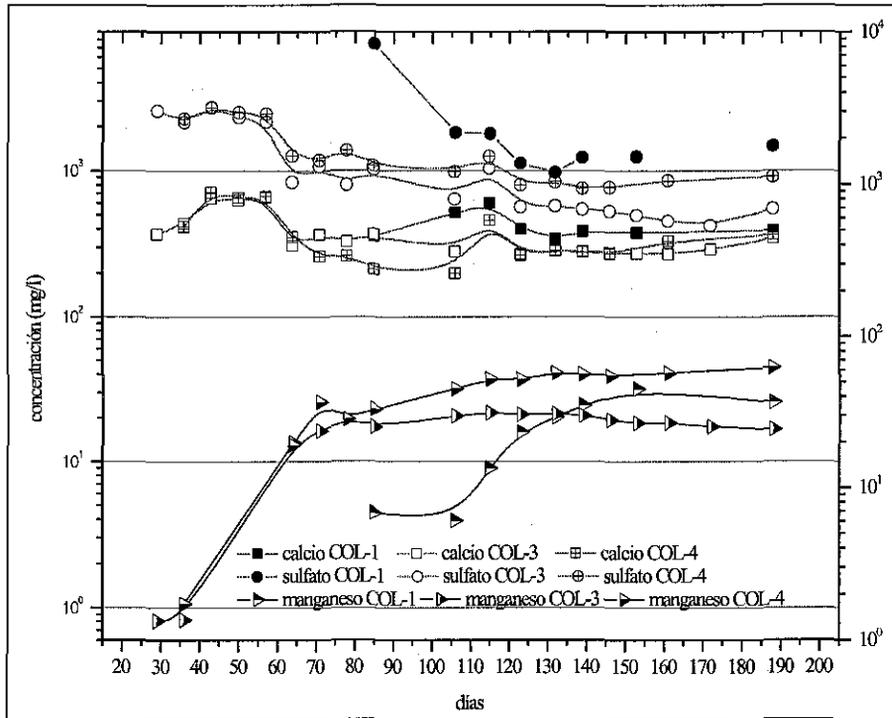


Figura 24. Concentración de calcio, sulfato y manganeso lixiviados en las columnas de lixiviación

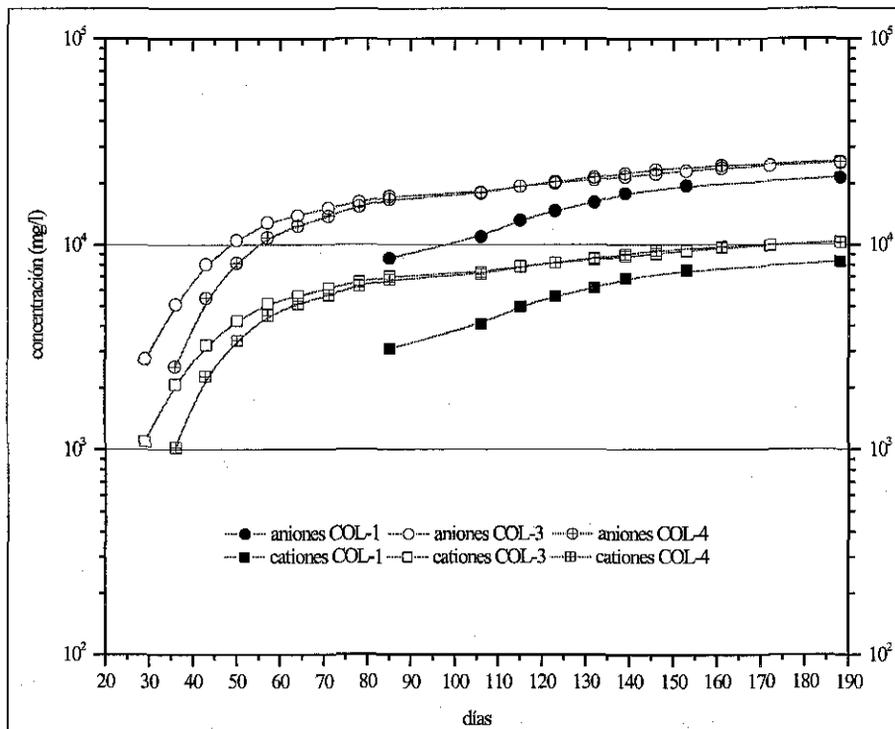


Figura 25. Concentración acumulada de aniones y cationes en lixiviados de las columnas de lixiviación

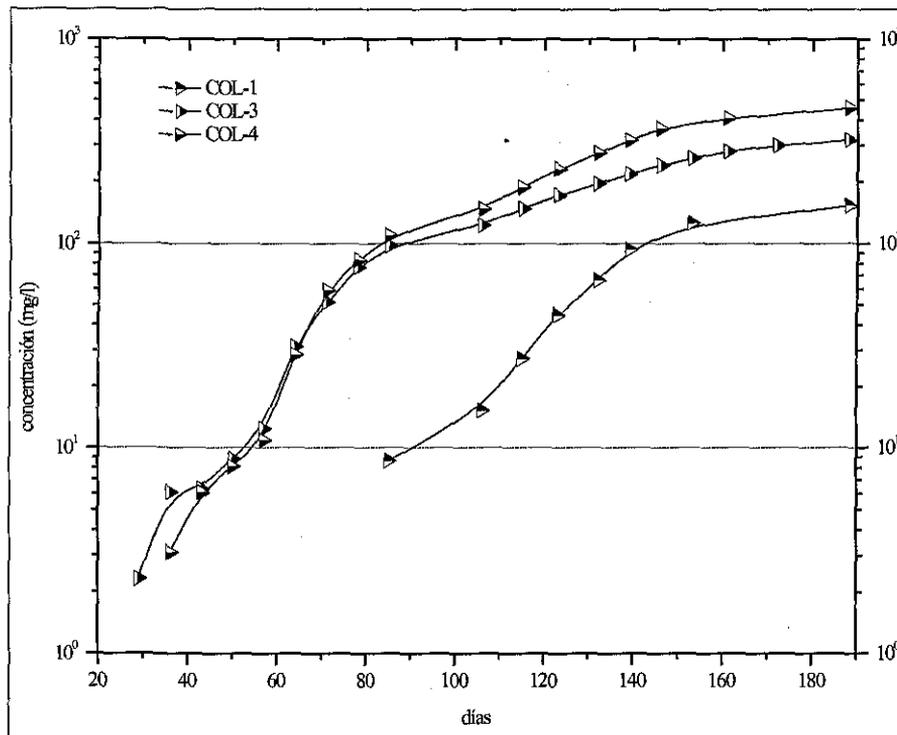


Figura 26. Concentración acumulada de metales en lixiviados de las columnas de lixiviación

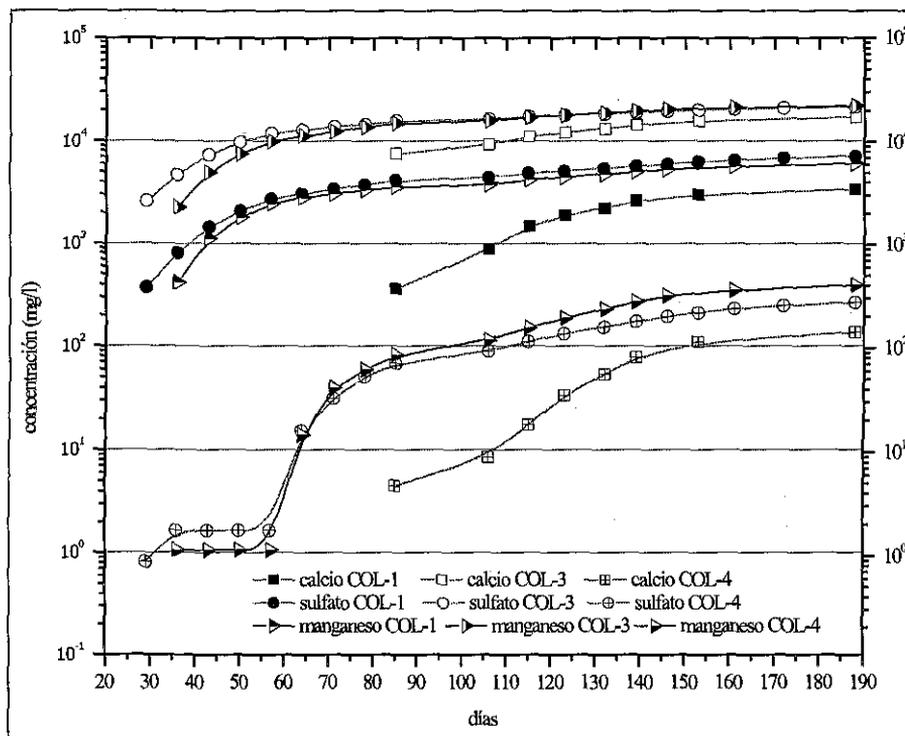


Figura 27. Concentración acumulada de calcio, sulfato y manganeso en lixiviados de las columnas de lixiviación

El pH medido en los lixiviados obtenidos en las tres columnas no tiene una variación significativa, mientras que la conductividad eléctrica tiene una tendencia a

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

decrecer con el tiempo (Tabla 29), esto es debido a que disminuye la concentración de iones mayores. La masa lixiviada de las columnas se presenta en la Tabla 30.

Considerando la masa de jales contenida en las columnas de lixiviación, el porcentaje de masa total extraída de las columnas de lixiviación es de: 0.0238, 0.294 y 0.134 %, en el siguiente orden COL-1, COL-3 y COL-4. Con lo que se comprueba que a mayor cantidad de flujo de agua dentro de los jales, existirá un mayor transporte de masa.

Tabla 29. Comportamiento del pH y la conductividad eléctrica

Columna	pH inicial	pH final	pH promedio	C. E inicial (mS/cm)	C. E final (mS/cm)
COL-1	8.51	8.46	8.25	17.3	4.07
COL-3	7.73	8.31	8.11	4.52	1.8
COL-4	8.00	8.27	8.17	4.08	1.99

Tabla 30. Masa lixiviada en las columnas de lixiviación.

Columna	Total (g)	Silicio (g)	Cationes (g)	%	Aniones (g)	%	Metales (g)	%
COL-1	2.040	0.007	0.57	28.08	1.448	71.00	0.012	0.60
COL-3	26.43	0.067	7.60	28.73	18.56	70.22	0.276	1.04
COL-4	12.26	0.023	3.45	28.21	8.62	70.41	0.169	1.38

El DRX realizado a las sales de la columna de lixiviación COL-2 (Figura 28 en Anexo E), determinó que las fases mineralógicas presentes son: yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y sulfato de sodio (Na_2SO_4). De acuerdo a este resultado se puede decir que los elementos que tendrían mayor impacto en la concentración de los lixiviados generados en esta columna son calcio y sulfato, comparando este resultado con los obtenidos en las otras tres columnas, se puede decir que el calcio y el sulfato tienen comportamiento similar, siendo los que tienen un mayor impacto en la concentración de los lixiviados obtenidos.

4.3 CELDAS HÚMEDAS

La cantidad de lixiviado obtenido en cada celda en promedio es: JPM-1 323.11 ml, JPM-2 313.84 ml, JPM-3 322.89 ml, JPM-4 371.12 ml, JPM-5 338.61 ml y JPM-6 331.33 ml; en general los resultados de los análisis realizados a estos lixiviados son similares, excepto los resultados de la celda JPM-6, la muestra usada para esta celda se tomó de la Presa Norte, depósito que cuenta con mayor tiempo de exposición al ambiente. Los resultados químicos del lixiviado en las celdas húmedas se presentan en las Tablas 31 a 48 del Anexo G e incluyen los resultados de concentración para aniones, cationes y metales. La masa lixiviada de aniones, cationes, sílice y metales de las celdas

JPM-1, JPM-2, JPM-3, JPM-4, JPM-5 y JPM-6 se presentan en las Tablas 49, 50, 51, 52, 53 y 54 del Anexo G respectivamente.

La variación de la concentración de los elementos presentes en el lixiviado de las celdas húmedas se presenta en las Figura 29 (a), 29 (b), 30 (a), 30 (b), 31 (a) y 31 (b). De estas Figuras se puede deducir que: el pH medido en el lixiviado obtenido no tiene variación significativa, la conductividad eléctrica disminuye con el tiempo, se aprecia que desde el inicio hasta el final de la prueba los cationes y aniones tienen mayor impacto en la concentración del lixiviado (Figura 32), mientras que los metales tienen una concentración en relación a los aniones y cationes poco significativa (Figura 33).

En general puede decirse que de acuerdo a los resultados de los análisis químicos realizados a los lixiviados, los iones mayores que adquieren mayor importancia en la concentración de los lixiviados generados son, calcio y sulfato, y por los metales el aluminio, hierro y manganeso, el comportamiento de los metales tiende a incrementarse con el tiempo. La concentración total de los lixiviados obtenidos tienden a disminuir con el tiempo, siendo para cada una de las celdas del primer ciclo (inicio) al ciclo 20 (final) como sigue (Tabla 55).

Tabla 55. Comportamiento de la concentración en los lixiviados de las celdas húmedas

Celda	JPM-1	JPM-2	JPM-3	JPM-4	JPM-5	JPM-6
Total (%)	- 89.30	- 92.96	- 92.52	- 94.09	- 94.29	- 75.03
Aniones (%)	- 89.22	- 92.72	- 92.60	-94.22	- 94.23	- 75.11
Cationes (%)	- 89.95	- 93.75	- 93.21	- 94.12	- 94.70	- 77.49
Metales (%)	+ 11.00	+ 774.93	+ 419.35	+ 534.25	+ 173.23	+ 2588.89

Nota: El signo indica el porcentaje de disminución (-) o aumento (+) con respecto a la concentración inicial.

El comportamiento de la concentración para el calcio y sulfato en los lixiviados producidos en las celdas húmedas se representa en la Tabla 56.

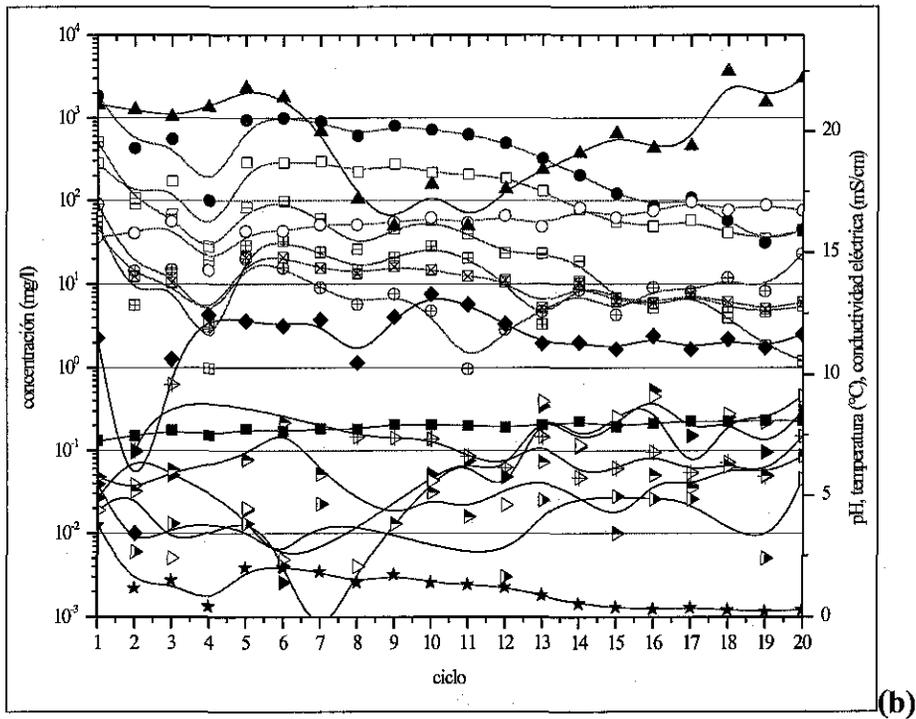
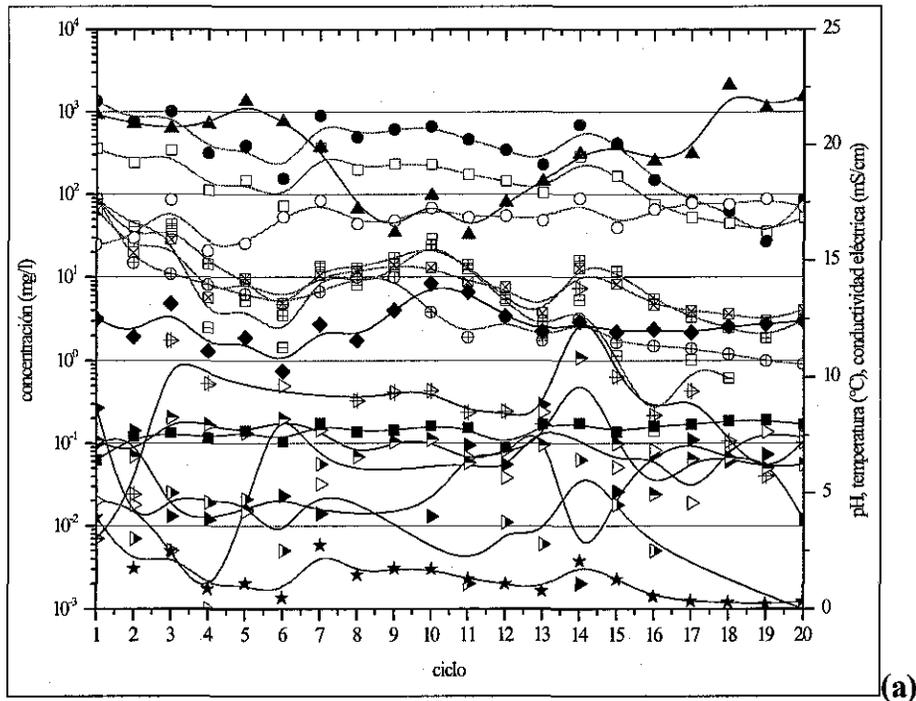
Tabla 56. Comportamiento de la concentración de sulfato y calcio en los lixiviados de las celdas húmedas

Celda	JPM-1	JPM-2	JPM-3	JPM-4	JPM-5	JPM-6
Sulfato (%)	- 93.60	- 97.59	- 98.57	- 97.87	- 99.69	- 87.80
Calcio (%)	- 82.25	- 84.80	- 87.16	- 88.17	- 90.45	- 93.64

Nota: El signo indica el porcentaje de disminución (-) con respecto a la concentración inicial.

La tendencia de la concentración de los metales es positiva para aluminio, hierro y manganeso, principalmente en la celda húmeda JPM-6 como lo muestran los resultados

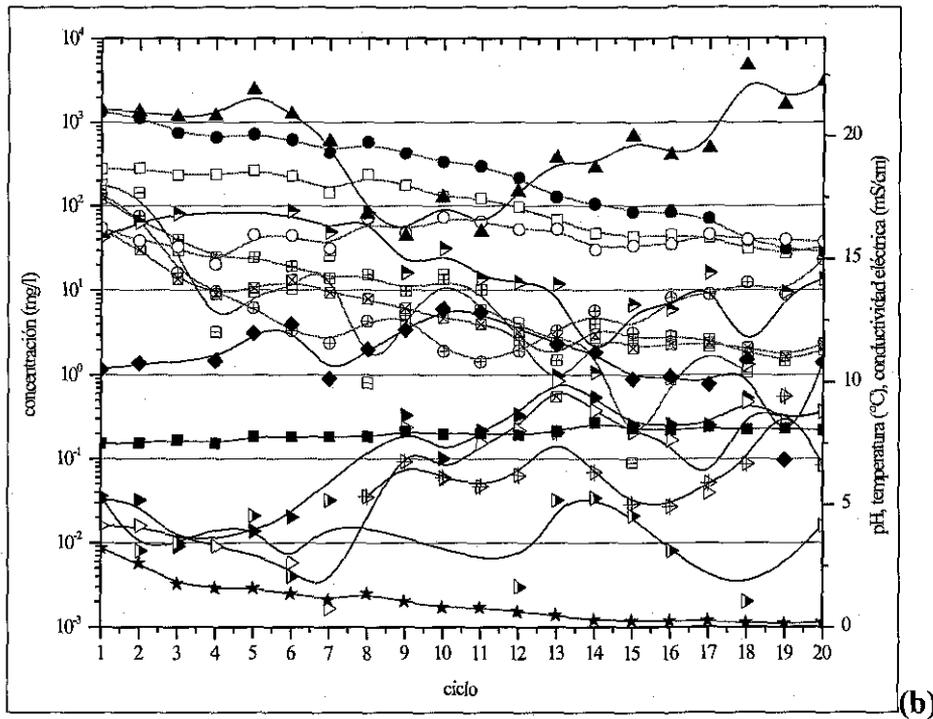
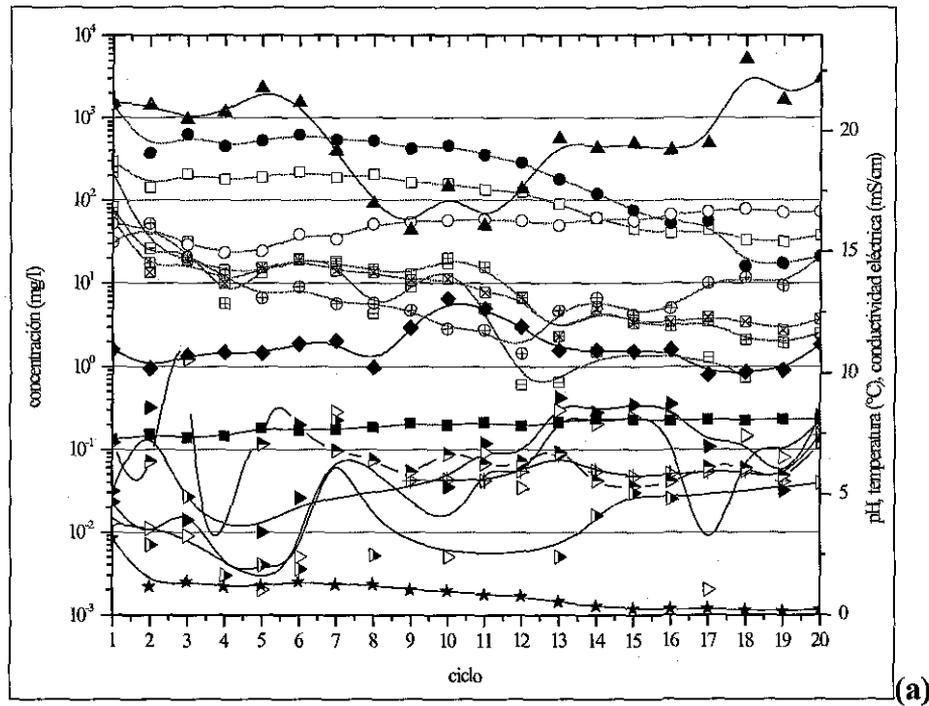
de los análisis realizados a los lixiviados obtenidos en esta celda, siendo más notorio a partir del ciclo 13 (Figura 34).



- calcio
- ◻ sodio
- ▣ magnesio
- ⊠ potasio
- sulfato
- bicarbonato
- ⊕ cloruro
- ◆ silicio
- ▶ aluminio
- ▷ hierro
- ◁ manganeso
- ▷ zinc
- ▷ Cd+Cr+Cu+Ni+Pb
- ★ conductividad eléctrica
- pH
- ▲ temperatura

Figura 29. Solutos lixiviados por ciclo en las celdas húmedas: (a) JPM-1 y (b) JPM-2

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

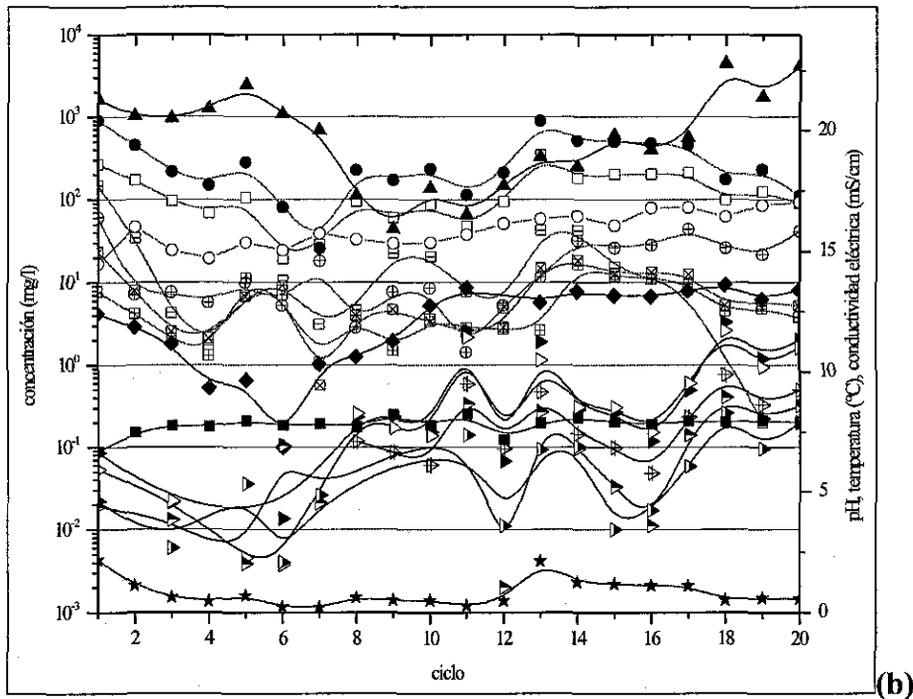
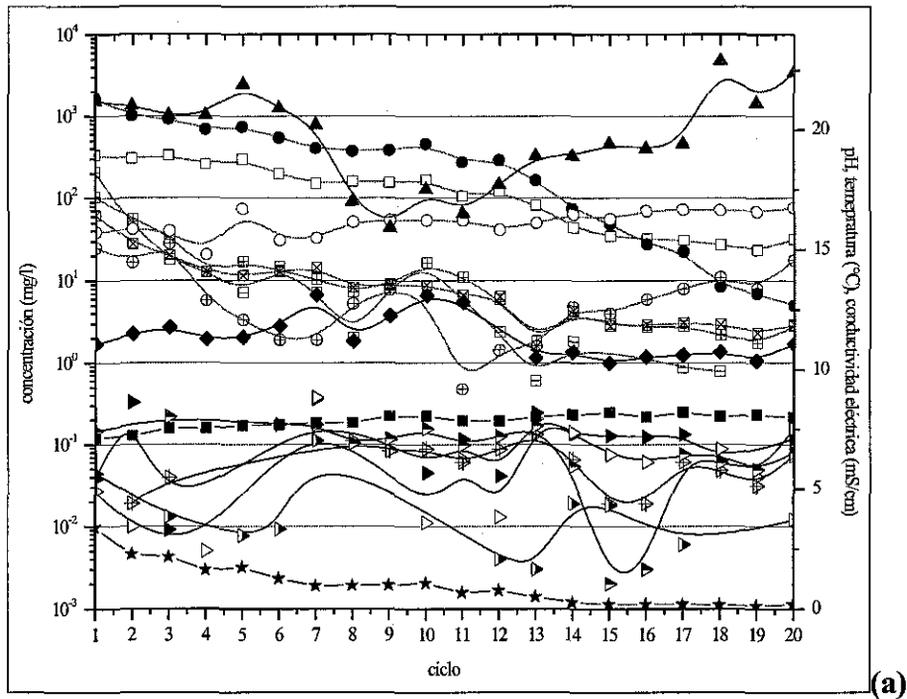


□ calcio □ sodio □ magnesio □ potasio ● sulfato ○ bicarbonato ⊕ cloruro
 ◆ silicio ▲ aluminio ▷ hierro ⊕ manganoso ▷ zinc ▷ Cd+Cr+Cu+Ni+Pb
 ★ conductividad eléctrica ■ pH ▲ temperatura

Figura 30. Solutos lixiviados por ciclo en las celdas húmedas: (a) JPM-3 y (b) JPM-4

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN



- | | | | | | | |
|-----------|------------|------------|-------------|---------------|------------------|---------------------------|
| □ calcio | ▨ sodio | ▩ magnesio | ▤ potasio | ● sulfato | ○ bicarbonato | ⊕ cloruro |
| ◆ silicio | ▲ aluminio | ▷ hierro | ▧ manganeso | ▶ zinc | ▷ Cd+Cr+Cu+Ni+Pb | ★ conductividad eléctrica |
| | | | ■ pH | ▲ temperatura | | |

Figura 31. Solutos lixiviados por ciclo en las celdas húmedas: (a) JPM-5 y (b) JPM-6

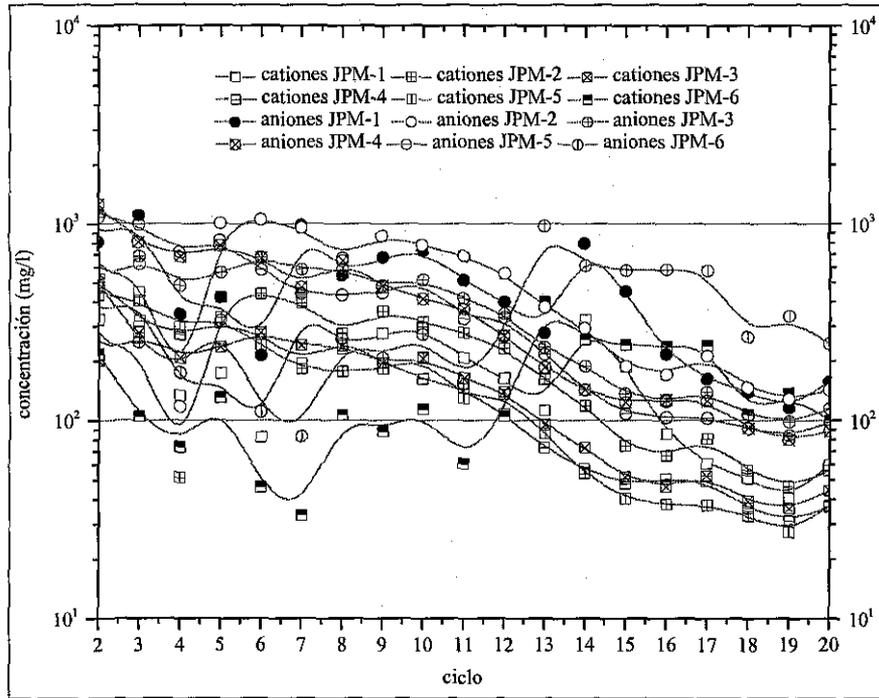
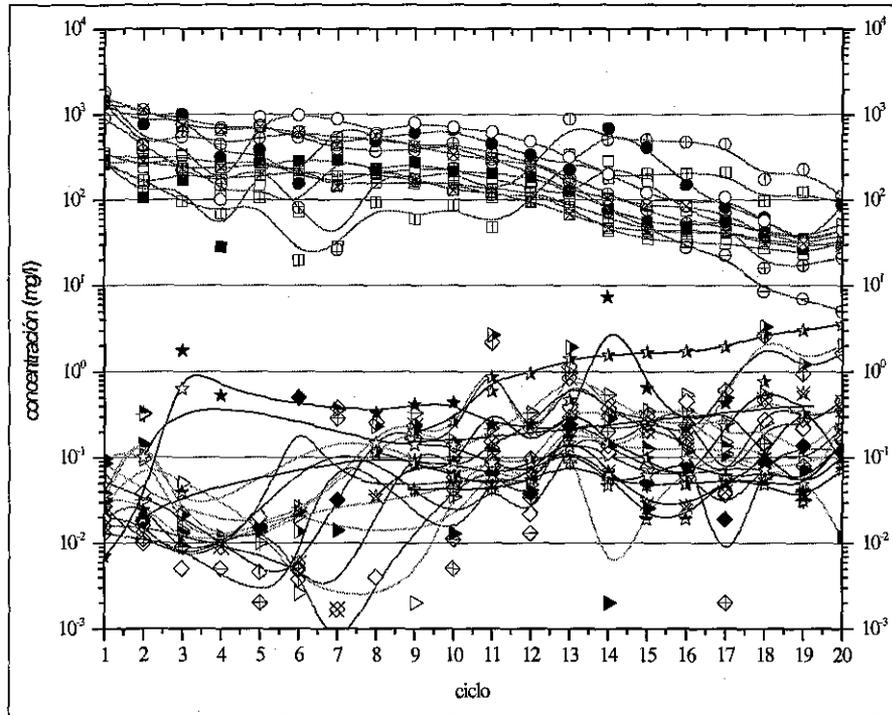


Figura 32. Cationes y aniones lixiviados por ciclo en las celdas húmedas



calcio: □ JPM-1 ■ JPM-2 ▨ JPM-3 ▩ JPM-4 ▪ JPM-5 ▫ JPM-6 sulfato: ● JPM-1 ○ JPM-2
 ⊕ JPM-3 ⊗ JPM-4 ⊖ JPM-5 ⊙ JPM-6 aluminio: ► JPM-1 ▷ JPM-2 ▸ JPM-3 ▷ JPM-4
 ▷ JPM-5 ▷ JPM-6 hierro: ◆ JPM-1 ◇ JPM-2 ⊕ JPM-3 ⊗ JPM-4 ⊖ JPM-5 ⊙ JPM-6
 manganeso: ★ JPM-1 ☆ JPM-2 ✱ JPM-3 ✲ JPM-4 ✳ JPM-5 ✴ JPM-6

Figura 33. Concentración de calcio, sulfato, aluminio, hierro y manganeso por ciclo en lixiviados de las celdas húmedas

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

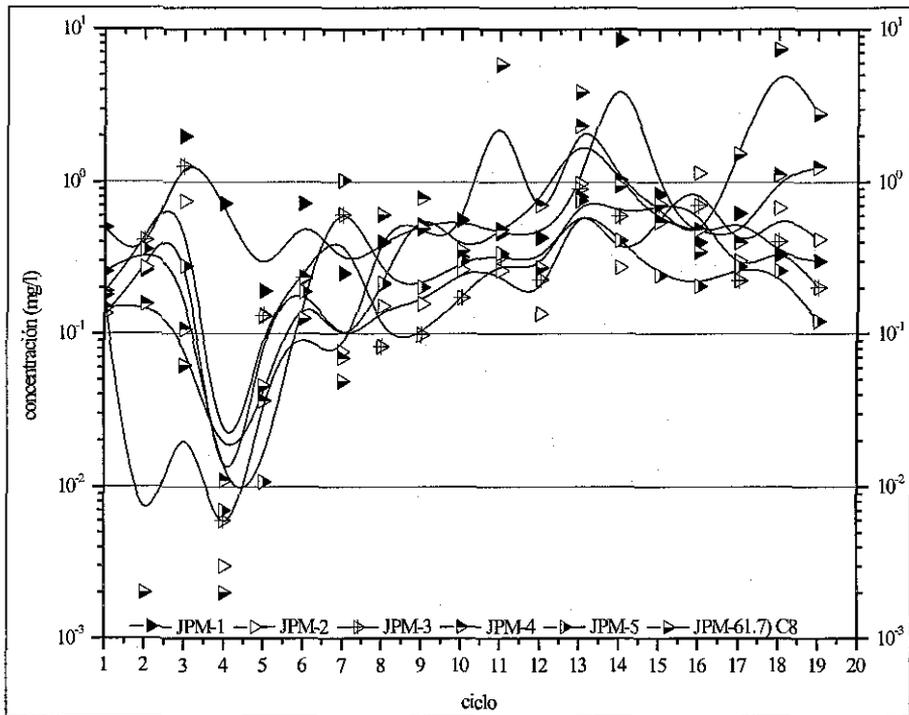


Figura 34. Concentración de metales por ciclo en lixiviados de las celdas húmedas

La Figura 35 muestra el comportamiento de los cationes y aniones de acuerdo a su concentración acumulada a lo largo de la prueba, este comportamiento tiene un incremento hasta el ciclo 12, después de este periodo tiende a estabilizarse.

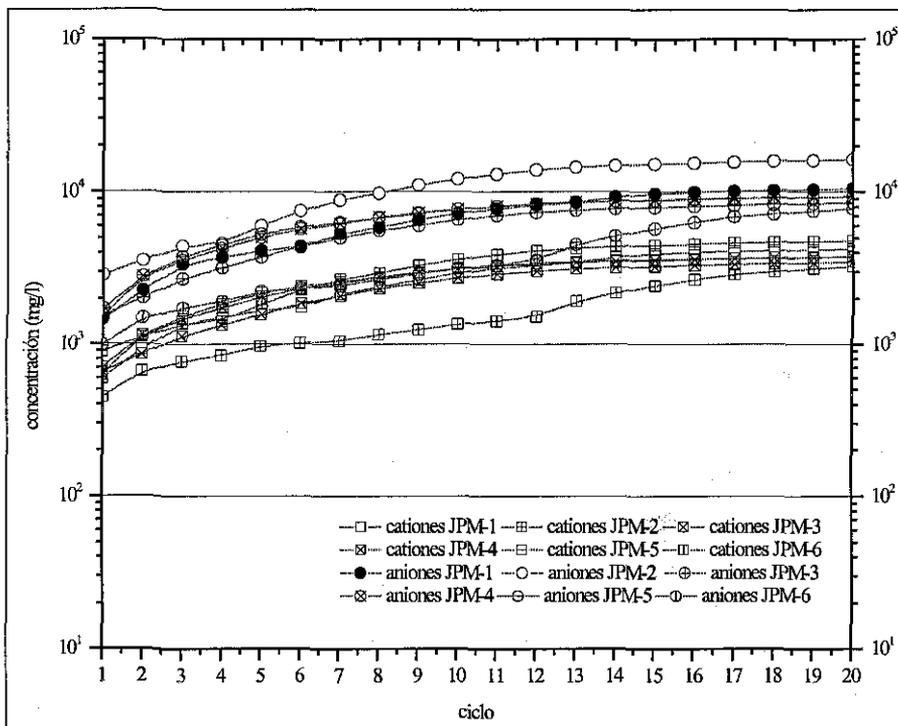
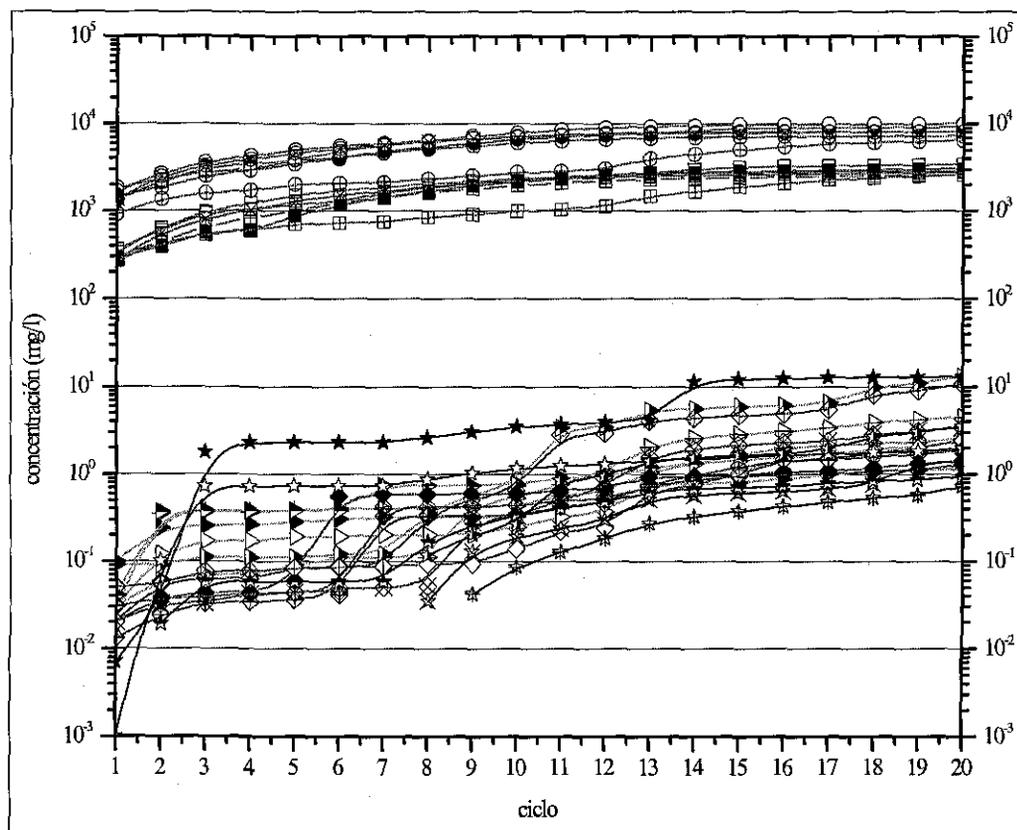


Figura 35. Concentración acumulada de cationes y aniones en lixiviados de las celdas húmedas

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La Figura 37 muestra el comportamiento de los metales de acuerdo a su concentración acumulada a lo largo de la prueba, este comportamiento en todas las celdas tiene un incremento desde el primer ciclo hasta el ciclo 20, esta figura también muestra un aumento significativo en la concentración de los metales en el ciclo 9 de la celda JPM-6. La Figura 36 muestra el comportamiento de calcio, sulfato, aluminio, hierro y manganeso de acuerdo a sus concentraciones acumuladas a lo largo de la prueba; como puede apreciarse su comportamiento es similar al mostrado por las Figuras 35 y 37. El pH medido en los lixiviados obtenidos no tiene una variación significativa, la conductividad eléctrica de los lixiviados tiene una tendencia a disminuir como avanza la prueba (Tabla 57).



calcio: □ JPM-1 ■ JPM-2 ▨ JPM-3 ▩ JPM-4 ▪ JPM-5 ▫ JPM-6 sulfato: ● JPM-1 ○ JPM-2
 ⊕ JPM-3 ⊗ JPM-4 ⊖ JPM-5 ⊙ JPM-6 aluminio: ► JPM-1 ▷ JPM-2 ▸ JPM-3 ▹ JPM-4
 ▵ JPM-5 ▽ JPM-6 hierro: ◆ JPM-1 ◇ JPM-2 ⋄ JPM-3 ⊞ JPM-4 ⋈ JPM-5 ⋊ JPM-6
 manganeso: ★ JPM-1 ☆ JPM-2 ✱ JPM-3 ✳ JPM-4 ✴ JPM-5 ✶ JPM-6

Figura 36. Concentración acumulada de calcio, sulfato, aluminio, hierro y manganeso en lixiviados de las celdas húmedas

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

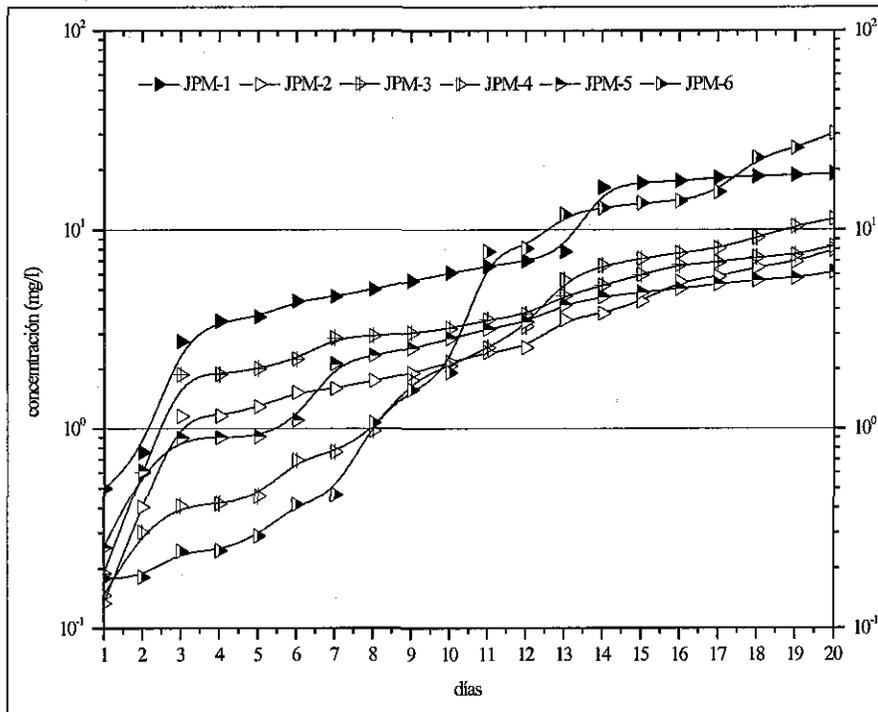


Figura 37 Concentración acumulada de metales en lixiviados de las celdas húmedas

Tabla 57. Comportamiento del pH y la conductividad eléctrica en las celdas húmedas

Celda	pH inicial	pH final	pH promedio	C. E inicial (mS/cm)	C. E final (mS/cm)
JPM-1	6.42	7.97	7.67	3.93	0.32
JPM-2	7.25	8.07	7.82	3.75	0.29
JPM-3	7.26	8.10	7.82	3.15	0.22
JPM-4	7.48	8.01	7.87	3.19	0.19
JPM-5	7.13	8.00	7.83	3.38	0.18
JPM-6	6.67	7.89	7.77	2.18	0.57

La cantidad de masa extraída en la lixiviación total en cada una de las celdas se da en la Tabla 58 .

Tabla 58. Masa de solutos extraída en cada una de las celdas húmedas

Muestra	Total (g)	Silicio (g)	Cationes (g)	%	Aniones (g)	%	Metales (g)	%
JPM-1	4.813	0.020	1.373	28.52	3.412	70.90	0.007	0.145
JPM-2	4.916	0.017	1.449	29.48	3.446	70.11	0.003	0.058
JPM-3	4.173	0.013	1.184	28.39	2.972	71.21	0.003	0.08
JPM-4	5.857	0.017	1.678	28.66	4.174	71.26	0.003	0.048
JPM-5	4.443	0.016	1.271	28.62	3.153	70.97	0.002	0.050
JPM-6	4.072	0.031	1.187	29.16	2.842	69.81	0.011	0.264

4.5 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS CELDAS HÚMEDAS.

Los resultados obtenidos por las ecuaciones recomendadas por Morin y Hutt (1997), para la interpretación de pruebas cinéticas de laboratorio, en particular celdas húmedas, se muestran en las Tablas 59 a 64 del Anexo H y son resumidos en la Tabla 65.

Tabla 65. Resumen de los resultados obtenidos por las ecuaciones recomendadas por Morin y Hutt (1997) para la interpretación de pruebas cinéticas de laboratorio, en particular celdas húmedas

Muestra	APR promedio (1×10^{-5} mg de $\text{CaCO}_3/\text{kg}/\text{semana}$)	RS al final de la prueba (%)	RMP al final de la prueba 1×10^{-6}	extracción de metales (%) 1×10^{-3}
JPM-1	2.80	67.87	4.8	28.52
JPM-2	3.31	61.13	1636	29.48
JPM-3	3.05	49.55	4.8	28.39
JPM-4	3.12	87.20	6.5	28.66
JPM-5	0.80	91.19	4.8	28.62
JPM-6	3.03	89.96	4.2	29.16

De acuerdo a estos resultados la taza de producción de acidez en promedio es del orden de 1×10^{-5} mg de $\text{CaCO}_3/\text{kg}/\text{semana}$, la variación del potencial de neutralización (NP) es insignificante, siendo del orden del 1×10^{-6} unidades de %, la extracción de metales es mínima, siendo del orden de 1×10^{-3} unidades de %; de acuerdo a estos resultados, se espera que estos jales no generen lixiviados con pH ácido y la carga de metales siga siendo mínima.

De acuerdo al análisis de óxidos libres de aluminio, hierro, manganeso, plomo y zinc en las muestras utilizadas en la prueba de celdas húmedas, al inicio y al final de la prueba, se tiene que los metales sufren una oxidación significativa, siendo más sensible el aluminio seguido por el zinc, hierro, manganeso y por último el plomo. Se tomaron muestras representativas de las columnas de lixiviación a diferentes profundidades (20, 40, 60, 80 y 90 cm) al final de la prueba, teniéndose que el aluminio es de menor concentración en forma de óxidos, y el más oxidado es el hierro. Los resultados completos se dan en las tablas 66 y 67 (Anexo I).

4.6 MODELACIÓN HIDROGEOQUÍMICA.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la modelación hidrogeoquímica se tiene que las muestras de los lixiviados generados en las celdas húmedas se encuentran saturadas con respecto a: caolinita, gibsitita, hematita, goetita, hidróxido de hierro

(Fe(OH)_{3(a)}), mica potásica, illita y montmorillonita cálcica, y las fases cercanas al equilibrio son: rodocrosita, calcita, yeso y aragonita; las Figuras 38 a 47 del Anexo J ilustran el comportamiento de los índices de saturación de durante la prueba. Para analizar el efecto que tienen algunas fases minerales en el pH del lixiviado obtenido en las celdas húmedas se consideraron en equilibrio las siguientes fases minerales: alunita, calcita, gibsita, hematita, caolinita, yeso y mica potásica; teniéndose que el pH no sufre una variación significativa.

Los resultados obtenidos en la modelación geoquímica de las muestras de lixiviados de las columnas de lixiviación denotan que se encuentran saturadas con respecto a: calcita, aragonita, dolomita, willemita, rodocrosita, talco, mica potásica, goetita, gibsita, (Fe(OH)_{3(a)}), hematita, otavita, caolinita, cuarzo, clorita, illita y hausmanita principalmente; las Figuras 48 a 52 del Anexo J ilustran el comportamiento de los índices de saturación durante la prueba. Para analizar el efecto que tienen algunas fases minerales en el pH del lixiviado obtenido en las columnas de lixiviación se consideraron en equilibrio las siguientes fases minerales: calcita, dolomita, aragonita e yeso; teniéndose que el comportamiento del pH con respecto a las tres primeras fases minerales sufre un descenso mayor a una unidad, mientras que con el yeso tiene una variación poco significativa.

De acuerdo a los índices de saturación obtenidos en la modelación geoquímica de los lixiviados generados en las celdas húmedas y las columnas de lixiviación las fases minerales que controlan la lixiviación de metales son la calcita, aragonita y dolomita; la fase mineral que aporta la concentración de manganeso al parecer es la rodocrosita.

4.7 IMPLICACIONES

Comparado con otros depósitos de jales en el mundo que generan lixiviado con concentraciones que van de 80,000 a 30, 000 mg/l de sulfato (SO₄²⁻) y 60,000 a 15, 000 mg/l de (Fe²⁺) con pH <1.5 (Blowes, *et. al*, 1988), el lixiviado producido en las pruebas cinéticas de los jales de Pachuca, es de poca envergadura; sin embargo, es necesario, continuar monitoreando este depósito con el fin de ver su evolución. Los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio dan una idea del tipo de lixiviado producido por el depósito de jales de Pachuca.

Los resultados de los experimentos de laboratorio, en los que se muestra la lixiviación preferente de los iones de sulfato y calcio, son confirmados por la presencia de estos solutos en el agua subterránea de los pozos PM1 (cerca de los depósitos de jales) y del Pozo Hotel Calinda (ubicado a una distancia de 100 m de los jales), con altos contenidos de sólidos totales disueltos. Por otro lado, los pozos de Tanque Elevado y Matilde 1 presentan características químicas muy diferentes a la de los pozos mencionados, dominando la concentración de bicarbonatos. En el caso del manganeso, este está presente en agua del pozo PM1, como es de esperarse, de acuerdo con los resultados de las pruebas cinéticas de laboratorio. En la Tabla 68 se aprecian estos resultados, así como también los límites permisibles para consumo humano (Norma NOM-128-SSA1-1996)

Tabla 68. Comparación de resultados de análisis químicos realizados a cuatro pozos cercanos al depósito de jales en estudio

Pozo	pH	STD (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Cl (mg/l)	SO4 (mg/l)	HCO3 (mg/l)	Al (µg/l)	Fe (µg/l)	Mn (µg/l)
PM1	7.845	1363.72	121	32.3	171	7.030	89.7	271	670.14	3	232	1.31
Hotel Calinda*		1342.6	180	50.82	136.65		177	231	567.3			
Tanque Elevado*		539	24	20	87		35	13	329			
Matilde 1*		694.6	44	58.08	58.38		56.64	20	457.5			
Norma	6.5- 8.5	1000			200		250	400		200	300	0.15

*Datos tomados de Aplicaciones de Ingeniería (1990).

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Los jales producidos en el Distrito Minero de Pachuca-Real del Monte se han depositado en la ciudad de Pachuca, Hidalgo en tres diferentes etapas de depositación: a) inactiva totalmente drenada, b) parcialmente saturada y c) saturada, el depósito activo se encuentra en el sitio conocido como el “Venado” ubicado 4 km al sur de la ciudad, su estado actual va de saturado a parcialmente saturado.

Los jales del Distrito Minero de Pachuca-Real del Monte se caracterizan por la predominancia de las fases minerales no metálicas en relación a las fases minerales metálicas; el cuarzo es la fase mineralógica que caracteriza a este tipo de jales (SiO_2), conteniendo granos metálicos muy pequeños en inclusiones diminutas o totalmente encapsulados, así como silicatos, por lo que su intemperismo es limitado. Los minerales metálicos determinados por microscopia óptica son: pirita, galena, esfalerita, limonita y hematita.

La composición química analizada a seis muestras de jales para nueve metales de interés es: aluminio 4.64 p/p, cadmio 6.14 ppm, cobalto 8.6 ppm, cobre 0.0152 p/p, cromo 26 ppm, hierro 1.925 p/p, manganeso 0.4955 p/p, plomo 0.082 p/p y zinc 0.1658 p/p.

Por los resultados obtenidos en las pruebas estáticas, actualmente los jales se encuentran cercanos a la neutralidad ya que el valor del pH medido en laboratorio es menor a 10.0, pero su futuro es incierto denotando una condición indefinidamente cercana a la neutralidad o alcalina de acuerdo al criterio de potencial neto de neutralización.

El pH medido en los lixiviados generados en las pruebas cinéticas realizadas en laboratorio indica que el lixiviado de los jales del Distrito Minero de Pachuca-Real del Monte es cercano a la neutralidad, ya que su valor se encuentra entre 8.0 y 8.20; lo cual es consistente con los resultados de las pruebas estáticas.

En general los lixiviados en las pruebas de columnas de lixiviación muestran una reducción progresiva en la concentración total de solutos.

El sulfato es el anión que más contribuye a la concentración; mientras que el catión dominante es el calcio. Ambos iones presentan una disminución progresiva a lo largo de los experimentos. En contraste, la concentración de metales aumenta conforme disminuye la concentración de aniones y cationes siendo el manganeso el metal que más contribuye en la concentración.

A lo largo de los 185 días la concentración acumulada presenta una tendencia al equilibrio (la curva se vuelve asintótica). La masa de disolución de cationes, aniones, metales y sílice en los 185 días es de 16.662 g, lo que equivaldría al 0.18513 % de la masa total de la muestra usada en la prueba.

Por las concentraciones de los lixiviados generados en las columnas de lixiviación, se llegó a la conclusión que los factores que controlan la concentración de los lixiviados de depósitos de jales son: la cantidad de agua almacenada en el depósito de jales, tiempo de residencia del agua dentro del jal, concentración de iones mayores en la fase sólida y el tiempo de depósito o grado de intemperismo del jal.

En las celdas húmedas en general se obtuvieron lixiviados que muestran una reducción progresiva en la concentración total a excepción de la celda JPM-6 (tomada de la Presa Norte, zona más antigua y por lo tanto más drenada), que mostró un incremento a partir del ciclo 12. El sulfato es el anión que más contribuye a la concentración; mientras que el catión dominante es el calcio. Ambos iones presentan una disminución progresiva a lo largo de los experimentos. En contraste, la concentración de metales aumenta conforme disminuye la concentración de aniones y cationes siendo el aluminio, hierro, manganeso y zinc los metales que más contribuyen en la concentración.

La celda húmeda JPM-6 tuvo un cambio significativo en la concentración principalmente de los metales dándose las concentraciones siguientes al inicio y al final de la prueba: aluminio de 0.085 a 2.02 mg/l, hierro de 0.053 a 1.62 mg/l, manganeso de 0.001 a 0.497 mg/l, plomo de 0.002 a 0.198 mg/l y zinc de 0.019 a 0.32 mg/l; esto indica que los jales de mayor tiempo de depósito potencialmente pueden liberar mayor concentración de algunos metales (principalmente aluminio, hierro, manganeso y zinc).

La masa de disolución de cationes, aniones, metales y sílice en los 20 ciclos es de 5585.77 mg, lo que equivaldría al 0.5585 % de la masa total de la muestra usada en la prueba.

Por la determinación de óxidos libres en las muestras usadas en las celdas húmedas antes y al término de la prueba, indica que las muestras sufrieron intemperismo, ya que al comparar los resultados de concentración de óxidos libres antes y después de la prueba se tiene que la concentración de óxidos libres aumenta al final de la prueba.

La velocidad de intemperismo de los metales se da de acuerdo a la siguiente serie de mayor a menor: aluminio, zinc, manganeso, hierro y plomo, siendo el aumento de su concentración original: 810%, 159%, 132%, 131% y 124% respectivamente.

El sulfato, calcio y manganeso son los iones principales de lixiviación en los jales estudiados en laboratorio. Este proceso también se da a escala de campo donde los pozos cercanos en un radio de 100 m presentan altas concentraciones de estos elementos en el agua subterránea.

5.2 RECOMENDACIONES

Los resultados que se obtuvieron reflejan la evolución del lixiviado a escala de laboratorio, donde se utilizó un método estándar de la ASTM (Celda Húmedas) y otro método aún no estandarizado (Columnas de Lixiviación). Con el fin de evaluar las condiciones más reales se sugiere realizar un estudio de detalle para conocer la composición química del agua utilizada al inicio y durante el proceso de beneficio. Esto permitirá identificar pH y elementos químicos en solución.

Se recomienda evaluar la concentración de cianuro en la pulpa, en la presa de jales y su posible migración hacia el subsuelo. Esto es importante para conocer su destino en el ambiente. Realizar un monitoreo con la ayuda de piezómetros, con el fin de analizar la evolución geoquímica del flujo y el posible transporte de solución contaminante hacia el acuífero localizado abajo del depósito.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar S., A., 1988. Métodos de análisis de suelos. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C. pp. 6-1-2 – 6-2-5.
- Aguayo S, S., 1996. Bioremediación de residuos de la Industria Minero-Metalúrgica. *Geomimet* 203: 38-48.
- Alpers, C. W, Blowes, D. W, Nordstrom, K. D. and Jambor, J. L., 1994. Secondary minerals and acid mine- water chemistry, In: Short Course Handbook, Volume 22. The Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-Wastes. Blowes, D.W. & Jambor, J. L (eds.). Waterloo, Ontario. pp 247-270.
- Alpers, C. W., and Nordstrom, K. D. 1999., Geochemical models of water-rock interactions in mining environments. In: Filipek, L. H. and Plumlee, G. S. (eds.). The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits, Part A: Processes, Techniques, and Health Issues. *Reviews in Economic Geology*. V 6A pp 289-323
- American Society for Testing and Materials, 1996. ASTM designation: D5744-96-standard test method for accelerated weathering of solid materials using a modified humidity cell, ASTM, West Conshocken, PA, 13 p.
- Ariel Consultores S.A., 2000. Condiciones hidrogeológicas en la zona de la Mina Real del Monte, Hidalgo, Comisión de Agua y Alcantarillado de Sistemas Intermunicipales, CAASIM pp 11-14
- Bayless, E. R. and Olyphant, G.A., 1993. Acid –generating salts and their relationship to the chemistry of groundwater and storm runoff at an abandoned mine site in South Western Indiana, U.S.A. *Journal of Contaminant Hydrology*, v. 12. pp 313-328.
- Bigham, M. J., 1994., Mineralogy of ochre deposits formed by sulfide oxidation. In: Blowes, D.W. & Jambor, J. L (eds.). The Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-Wastes. Short Course Handbook, Volume 22, May , 1994. Waterloo, Ontario. pp 103-132.
- BC Wild and EMCBC, 1997 Acid mine drainage: mining and water pollution issues in BC
- Blowes, D. W., Cherry, J. A. and Reardon, E. J., 1988. Geochemical evolution of four inactive sulphide-rich tailings in impoundments. In: Canada. International Conference of Control of Environmental Problems from Metal Mines, Roros, Norway, June 20-24, 1988. 32 p.
- Caldwell, J. A. and Welsh, 1982. Tailings disposal in rugged, high precipitation environments: an overview and comparative assessment. In: Ellis, D. V. ed. *Marine Tailings Disposal*. Ann Arbor Science. pp 5-62
- Carrillo, R. J. J. y Cardona, B. A., 1997. Determinación cualitativa de zonas con potencial integral de producción de un metro cúbico por segundo de agua subterránea, a

- conducir por acueducto para suministro de la Ciudad de Pachuca, Hgo. CAASIM, Pachuca, Hidalgo Febrero 1997. 23 p.
- Consejo de Recursos Minerales, 1992, Monografía geológica minera del Estado de Hidalgo, SEMIP, Subsecretaría. de Minas. 95 p.
- Córdoba, M. D., 1992. Geología del Estado de Hidalgo. Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, U.A.E.H, Pachuca, Hgo.134 p. (inédito)
- Cravotta, C. A. III, 1994. An introduction to acid rock drainage minerals as sources of sulfate an acidity-the geochemical evolution of acidic ground water at a reclaimed surface coal mine Pennsylvania environmental. In: Proceedings, Am. Chem. Soc. Symp. Ser. 550, Washington D. C.: American Soc. pp 345-364
- Downing, W., 2000a. ARD sampling and sample preparation. 14 p. (<http://www.infomine.com>).
- _____ Giroux, G., 2000b. ARD waste rock modelling. 8 p. (<http://www.infomine.com>).
- _____ Mills, C., 2000c. Quality assurance/quality control for acid rock drainage studies. 16 p. (<http://www.infomine.com>).
- _____ Gravel, J., and Mills, C., 2000d. Trace element geochemistry in acid rock drainage. 17 p. (<http://www.infomine.com>).
- _____ Mills, C., 2000e. Natural acid rock drainage and its impact upon background metal vconcentrations. 24 p. (<http://www.infomine.com>).
- Fey, L. D., Desborough A. G. and Finney J. C., 2000. Analytical results for total-digestions, EPA-1312 leach, and net acid production for twenty- three abandoned metal-mining related wastes in the Boulder River Watershed, Northern Jefferson County, Montana. U.S Geological Survey, Open File Report 00-114. 15 p.
- Filipek, L. H., Van Wyngarden, T. J., Papp, C. S. E. And Curry, J., 1999. A multi-phased approach to predict acid production from porphyry cooper-gold waste rock in an arid montane environment. In: Filipek, L. H. and Plumlee, G. S. (eds.). The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits, Part B: Case Studies and Research Topics. Reviews in Economic Geology. V 6B pp 433-445
- Freeze, R. A and Cherry, J. A, 1979. Groundwater, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.
- Fries, C. Jr., 1962. Hoja Pachuca con resumen de la geología de la Hoja Pachuca, Estados de Hidalgo y México. Carta Geológica de México, serie 1:100,000. Instituto de Geología, UNAM.
- Frind, E.O, Moison, J. W.,1994. Modelling of mill-tailings impoundments, In: Short Course Handbook, Volume 22. The Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-Wastes. Blowes, D.W. & Jambor, J. L (eds.). Waterloo, Ontario. pp18-58

- Gandoy, B. W., 1991. Manual de laboratorio para el manejo físico de suelos. Universidad Autónoma de Chapingo, México, D. F. pp. 33-46.
- Geyne, A.R., Fries, C., Segerstrom B. R. F., Wilson, I. F., 1963. Geología y yacimientos minerales del Distrito Minero de Pachuca-Real del Monte Estado de Hidalgo, México, Consejo de Recursos Naturales No Renovables Publicación 5-E.
- Gould, W.D, Bechard, G. & Lortie, L., 1994. The nature and role of microorganisms in the tailings environment. In: Short Course Handbook, Volume 22. The Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-Wastes. Blowes, D.W. & Jambor, J. L (eds.). Waterloo, Ontario. pp185-199
- Heindrich, Wm, 1970. Identificación microscópica de minerales, Ed. URMO S.A. España, pp. 100-130.
- Hornberger, R. J. and Brady K. B. C., 1995. Kinetic (leaching) test for the prediction of mine drainage quality. In: coal mine drainage prediction and pollution prevention in Pennsylvania. 41 p. (<http://www.dep.state.pa.us/deputate/minres.htm>).
- Huizar, A., 1997. Hydrochemistry of the aquifers in the Rio Las Avenidas Basin, Pachuca, Hidalgo, Mexico, Water, Air, and Soil Pollution, v 96, Netherlands. pp. 185-201.
- _____, Campos, E., Mitre, S., Alatraste, V., Méndez, G. y Juárez, S., 2001. Evaluación hidrogeológica de la subcuenca de Tecocomulco, Estados de Hidalgo, Puebla y Tlaxcala, México, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v 18, no. 1, México, D. F. pp. 55-73.
- Hyndman, W. D., 1985. Petrology of igneous and metamorphic rocks. International Series in the Earth and Planetary Sciences. Second edition Ed. Mc Graw Hill, USA, pp. 140-150.
- INEGI. 1992. Síntesis geográfica del Estado de Hidalgo. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. pp 21-24.
- _____. 1999. Carta Topográfica Pachuca F14D81 escala 1:50,000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, 1999. Manual del laboratorio de suelos, inédito, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. pp.47
- Jambor, J. L., 1994. Mineralogy of sulfide-rich tailings and their oxidation products. In: Short Course Handbook, Volume 22. The Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-Wastes. Blowes, D.W. & Jambor, J. L (eds.). Waterloo, Ontario. pp 54-101.
- _____. Blowes, D. W, _____. Major-element variations in the reactive sulfide-rich tailings at the Waite Amulet Minesite, Noranda Area, Quebec, Canada.. In: Process Mineralogy IX, Amer. Inst. Mining Eng. (A.I.M.E.). pp 511-523.

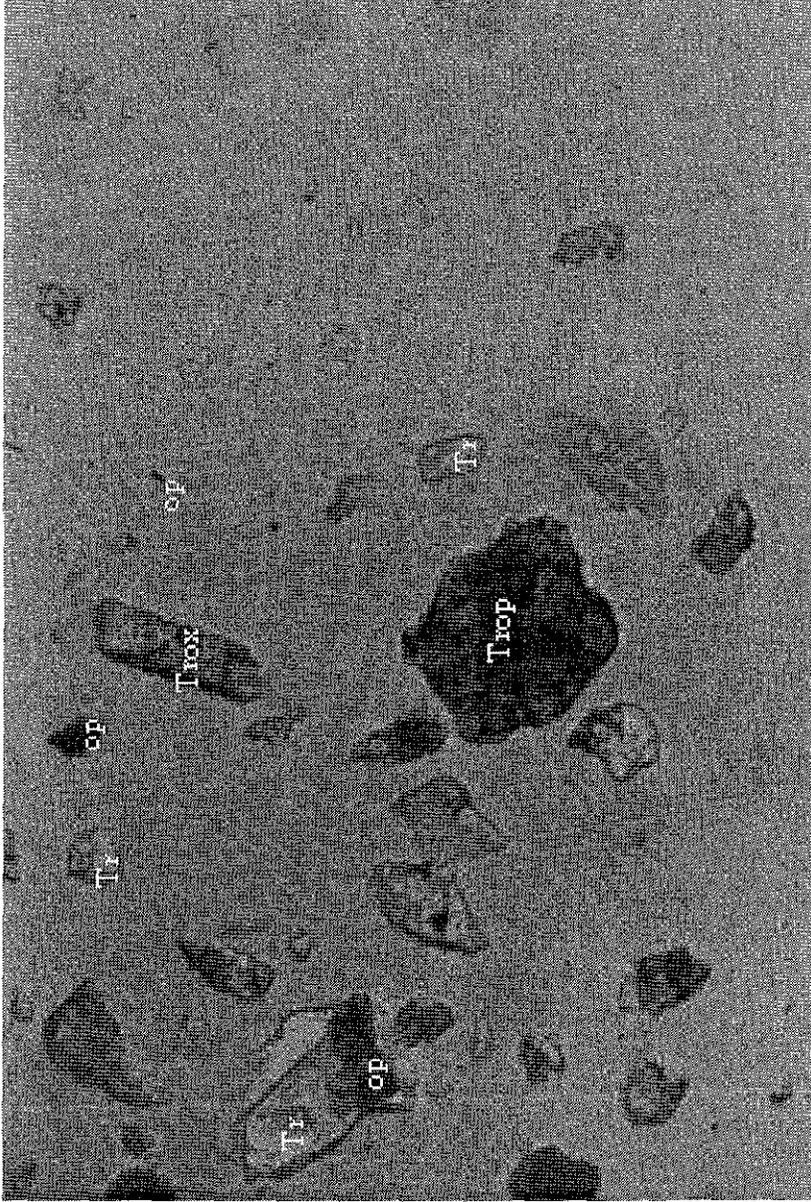
- John, A. D. and Leventhal, S. J., 1995. Bioavailability of metals. In: Cox, P. Dennis and Singer A. Donald (eds.). Mineral Deposit Models, U.S Geological Survey, Bulletin 1693. pp 10-18
- Johnson, O. K., 1996. Geochemical model of water quality in Pit Lake in oxidized tuff: Mc Donald gold mine model of post closure Pit Lake chemistry. Technical Memorandum Prepared for: Johnson Environmental Concepts and Morrison-Malerie Environmental. 18 p
- Joint Comitee On Powder Difrraction Standars, 1986. Mineral powder diffraction file search manual: chemical name, Hanawalt, Fink, mineral name. Ed. International Centre for Difracion Data.
- _____ 1986. Mineral powder diffraction file mineral name index, data cards. Ed. International Centre for Difracion Data.
- Kania, T., 1995. Laboratory methods for acid-base accounting: an update. In: Coal Mine Drainage Prediction and Pollution Prevention in Pennsylvania. 8 p. (<http://www.dep.state.pa.us/deputate/minres.htm>).
- Kelly, E. G. and Spottiswood, D. J., 1990. Disposición de las colas. En: Introducción al Procesamiento de Minerales. (Traducción al Español por la Editorial Limusa) pp 423-427.
- Kwong Y. T. J., 1993. Prediction and prevention of acid rock drainage from a geological and mineralogical perspective. Mend Project 1.32.1, 47 p.
- Lambeth, R. H., 1999. Natural attenuation of acidic drainage from sulfidic tailings at a site in Washington State. In: Filipek, L. H. and Plumlee, G. S. (eds.). The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits, Part B: Case Studies and Research Topics. Reviews in Economic Geology. V 6B pp 479-491
- Lyons, J. and De Rosa, C., 1997. Golden dreams, poisoned streams, Mineral Policy Center, Washington 1997, 243 p.
- Martínez, A. M., 2000. Estudio geohidrológico para atender la deficiencia Ag/2 presas de jales de la Auditoria Ambiental en el Distrito Minero San Dimas Tayoltita. Geomimet, no. 226, Julio Agosto/2000 pp 34-64.
- Mehra, O. P. and Jackson, M. L., 1960. Iron oxide removal from soils and clays by dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. In: Clays and Clay Minerals, Proc. 7th. Natl. Conf., 1958 (A, Swineord, ed.). Pergamon Press, Washington, D. C., pp 317-327.
- Mills, C., 1999a. Particle size distribution & liberation size. 13 p. (<http://www.infomine.com>).
- _____ 1999b. An introduction to acid rock drainage. 7 p. (<http://www.infomine.com>).
- _____ 1999c. Acid base accounting (ABA). 21 p. (<http://www.infomine.com>).

- _____ 1999d. Kinetic testwork procedures. 13 p. (<http://www.infomine.com>).
- _____ 1999e. Acid base accounting (ABA) test procedures. 21 p. (<http://www.infomine.com>).
- _____ 1999f. Kinetic testwork interpretation. 8 p. (<http://www.infomine.com>).
- Moreno, T. R., 1998. Caracterización mineralógica y química de desechos mineros (jales), aplicada a la recuperación de valores económicos en Zimapán y Pachuca, Estado de Hidalgo. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional, México, D. F. 89 p.
- Morin, A. K., Cherry, A. J., Davé, K. N., Lim, P. T., Vivyurca, J. A., 1988. Migration of acidic groundwater seepage from uranium-tailings impoundments, 1. field study and conceptual hydrogeochemical model. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2 (1988) pp 271-303
- _____, Hutt, M.N, 1997. *Environmental geochemistry of minesite drainage (practical theory and case studies)*. MDAG Publishing, Canada. 333 p.
- Navarro, Z. J. R., 1998. Estudio de factibilidad operacional de los circuitos de molienda de la Compañía Real del Monte y Pachuca. Memoria. Inédito, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Pachuca, Hidalgo. 57 p.
- Oelsner, 1965. *Atlas des principales parageneses minerals vues au microscope*. Gauthier-Villars, Paris, pp.1-45
- Parkhurst, D.L. and Appelo C:AJ., 1999. User's guide to PHREEQC (version 2)- A computer program for speciation, batch reaction, one dimensional and inverse geochemical calculations transport: U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 99-4259.
- Plumlee, G. S., Smith, K.S., Ficklin, W. H., Briggs, P. H., and Mc Hugh, J. B., 1993. Empirical studies of diverse mine land reclamation Symposium, Billings, Montana, V. 1, pp. 176-186.
- _____ Nash, J. T., 1995. Geoenvironmental models of mineral deposits fundamentals and applications. In: Cox, P. Dennis and Singer A. Donald (eds.). *Mineral Deposit Models*, U.S Geological Survey, Bulletin 1693. pp 1-9
- _____ Smith, K. S., Montour, M. R., Ficklin, W. H and Mosier, E. L., 1999. Geologic controls on the composition of natural waters and mine waters draining diverse mineral-deposit types. In: Filipek, L. H. and Plumlee, G. S. (eds.). *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits, Part B: Case Studies and Research Topics*. *Reviews in Economic Geology*. V 6B pp 373-409
- Price, W. A, 1997. DRAFT guidelines and recommended methods for the prediction of metal leaching and acid rock drainage at minesites in British Columbia, British Columbia Ministry of Employment and Investment, Energy and Minerals Division, Smithers, (April), 143 p.

- Putchelt, H., Berner, Z., Castro, J. and Rude, T., 1995. Influence of waters from sulfide mines and their dumps on surficial waters, soils, and plants, *Water Rock Interaction*, Kharacka & Chudaev. Balkema, Rotterdam ISBN 9054105496. pp. 899-900.
- Ritchie, A. I. M., 1994. Sulphide oxidation mechanisms controls and rates of oxygen transport. In: *Short Course Handbook, Volume 22. The Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-Wastes*. Blowes, D.W. & Jambor, J. L (eds.). Waterloo, Ontario. pp 201-246
- Robertson, W.D., 1994. The physical hidrogeology of mill-tailings impoudments. In: *Short Course Handbook, Volume 22. The Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-Wastes*. Blowes, D.W. & Jambor, J. L (eds.). Waterloo, Ontario. pp1-17
- _____. 1994. Iron Sulfide Oxidation mechanisms: laboratory studies. In: *Short Course Handbook, Volume 22. The Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-Wastes*. Blowes, D.W. & Jambor, J. L (eds.). Waterloo, Ontario. pp1-17
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, 1995. Determinación de sulfato mediante el Método Turbidimétrico. En: *Diario Oficial de la Federación del 24 de marzo de 1995*, México, D. F. pp. 56-57
- _____. 1999. Análisis de Agua-Determinación de cloruros totales en aguas naturales y residuales. En: *Proyecto de Norma Mexicana PROY-NMX-AA-073-1999-SCFI*, México, D. F. 1999.
- Segerstrom, K., 1961. Geología del Suroeste del Estado de Hidalgo y del Noreste del Estado de México. *Bol. Asoc. Mex. Geo. Petrol.*, v. 13, 13-4, pp. 147-168.
- Shaw, S., and Mills, C., 2000. Petrology and mineralogy in ARD prediction. 11 p. (<http://www.infomine.com>).
- UNEP, 1996. Enviromental issues in tailings impoundments. An overview. 5 p. (www.natural-resources.org)
- U. S. Enviromental Protection Agency, Office of Solid Waste, 1994. Acid mine drainage prediction. In: *Technical Document*. U. S. Enviromental Protection Agency, December 1994. 48 p
- Velázquez, A. y Ordaz, A., 1995. Provincias hidrogeológicas de México, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, tomo LII, nos. 1 y 2, noviembre de 1994. pp. 15-33.
- White, W. W. III, Lapakko, K. A. and Cox, R. L., 1999. Static-test methods most commonly used to predict acid-mine drainage: practical guidelines for use and interpretation. In: *Filipek, L. H. and Plumlee, G. S. (eds.). The Enviromental Geochemistry of Mineral Deposits, Part A: Processes, Techniques, and Health Issues. Reviews in Economic Geology*. V 6A pp 325-338

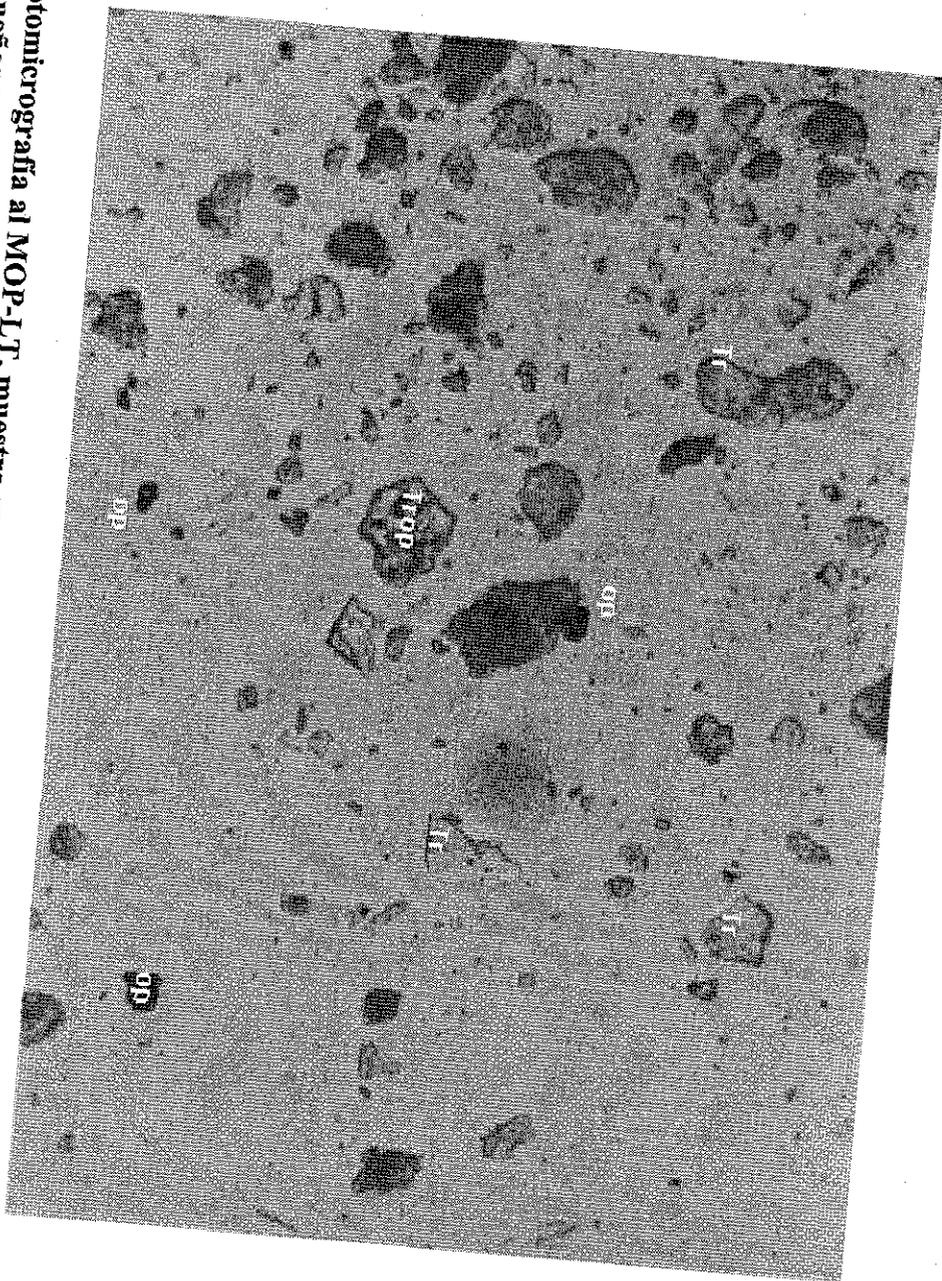
-
- Wills, B. A., 1989. Mineral processing technology. An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. Fourth Ed. Pergamon Press, New York, USA. pp. 687-697
- Wirt, L., Leib, J. K., Bove, J. D., Mast, M. A., Evans, B. J. and Meeker P. G., 1999. Determination of chemical-constituent loads during base-flow and storm-runoff conditions near historic mines in prospect gulch, upper Animas River watershed, Southwestern Colorado. U.S Geological Survey, Open File Report 99-159. 40 p.
- Yelpatyevsky, P.V., 1995. Factors controlling metal content of mining waters, Water Rock Interaction, Kharacka & Chudaev. Balkema, Rotterdam ISBN 9054105496. pp.901-904.
- Younger, P.L., 1999. Pronóstico del ascenso del nivel freático en minas subterráneas y sus consecuencias medio-ambientales, Boletín Geológico y Minero Vol 110-4 España, 1999 (407-422). pp 63-78.
- Yta, M. y Moreno T. R., (1997) La mineralización en los Distritos Mineros Pachuca-Real del Monte y Zimapán- su papel en la evolución metalogénica del Estado de Hidalgo, México. Guía de las Excursiones Geológicas II Convención sobre la Evolución Geológica de México y Recursos Asociados, Pachuca Hidalgo 1997. pp. 73-84 .

ANEXO FOTOGRAFICO
FOTOGRAFÍAS AL MICROSCOPIO ÓPTICO CON LUZ
TRANSMITIDA
FOTOGRAFÍAS AL MICROSCOPIO ÓPTICO CON LUZ
REFLEJADA



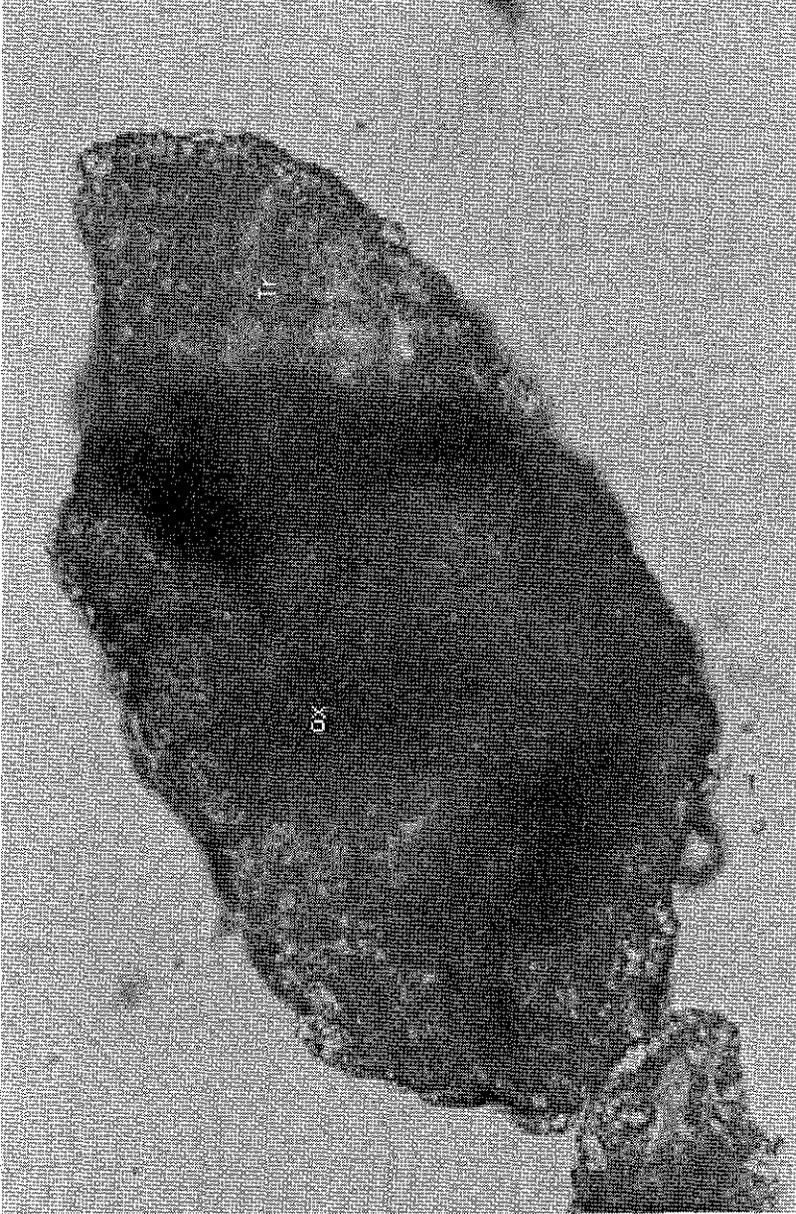
Fotografía 1.- Fotomicrografía al MOP-LT, muestra granos opacos (op) y transparentes (Tr) liberados e intercrecimiento de ambos en inclusiones (Trop), encapsulamiento y oxidación de transparentes (Trox). Objetivo 10X, Nícoles paralelos, campo horizontal de la fotografía 0.98 mm.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



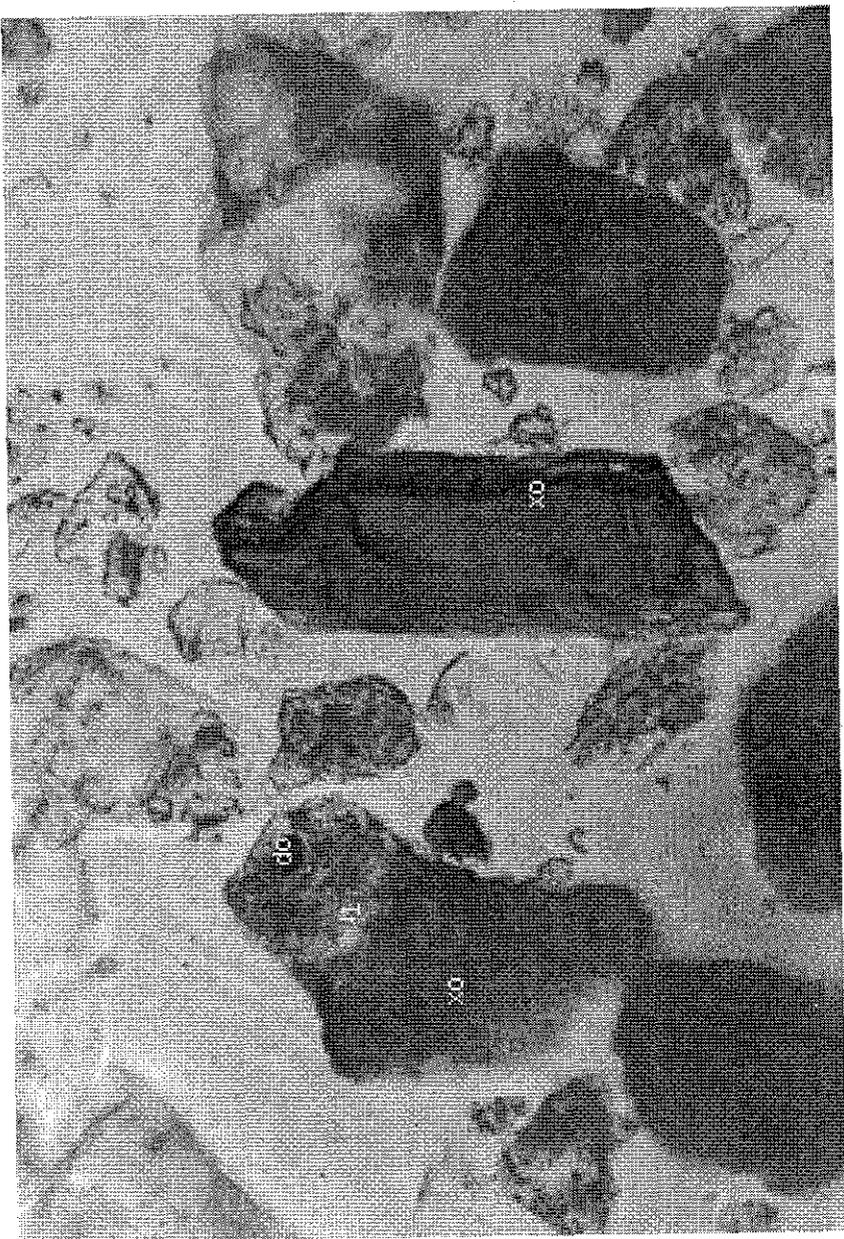
Fotografía 2.- Fotomicrografía al MOP-LT, muestra granos opacos (op) y transparentes (Tr) liberados, se muestra que los granos más pequeños se encuentran totalmente liberados, mientras que los grandes tienen inclusiones de opacos (Trop).
Objetivo 10X, Nicols paralelos, campo horizontal de la fotografía 0.98 mm.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



**Fotografía 3.- Fotomicrografía al MOP-LT, muestra granos transparentes (Tr) con encostramiento de óxidos de Fe (ox).
Objetivo 40X, Nícoles paralelos, campo horizontal de la fotografía 0.25 mm.**

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



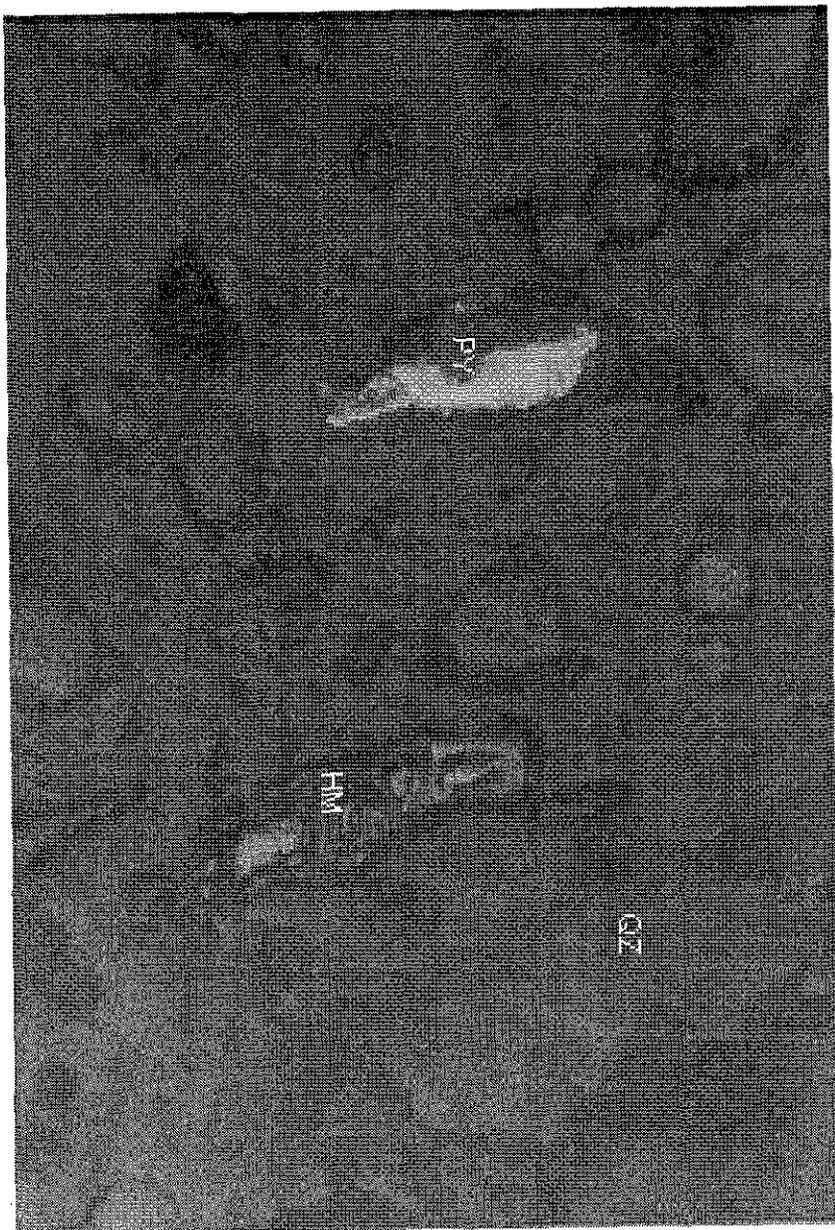
Fotografía 4.- Fotomicrografía al MOP-LT, muestra granos opacos (op) incluidos en transparentes produciendo oxidación superficial en los granos transparentes (ox) y grano transparente liberado superficialmente (ox). Objetivo 20X, Nícoles paralelos, campo horizontal de la fotografía 0.50 mm.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Fotografía 5.- Fotomicrografía al MOP-LT, muestra granos transparentes (Tr) liberados y oxidación penetrativa en los granos transparentes por los opacos (op). Objetivo 40X, Nícoles paralelos, campo horizontal de la fotografía 0.25 mm.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Fotografía 6.- Fotomicrografía al MOP-LR, muestra pirita (PY), hematita (HM) y cuarzo (QZ). Objetivo 40X, Nicoles paralelos, campo horizontal de la fotografía 0.25 mm.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Fotografía 7.- Fotomicrografía al MOP-LR, Pirita (PY) incluida en cuarzo (QZ). Objetivo 40X, Nicoles paralelos, campo horizontal de la fotografía 0.25 mm.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ANEXO A
GENERACIÓN Y DEPÓSITO DE JALES, REACCIONES QUÍMICAS
INVOLUCRADAS Y EFECTO EN LA COMPOSICIÓN DEL AGUA
LIXIVIADA

Generación y depósito de jales

En el beneficio de minerales de baja ley, la mena es triturada, molida o segregada a tamaño de arena y limo para maximizar su recuperación, creando partículas muy finas, así como, grandes áreas superficiales que incrementan la exposición de los minerales que la componen acelerando las reacciones químicas relacionadas con su liberación (Wills, 1989).

El tamaño de partícula del jal es gobernado por la finura de la molienda usada en el proceso de beneficio; desde un punto de vista geológico se clasifican como arenas (1/16-2 mm) o limos (1/16-1/256 mm) (Jambor, 1994, Robertson, 1994).

Algunas plantas de procesamiento de minerales emplean reactivos que atacan químicamente la carga total molida y los jales descargados contienen minerales que han sido alterados de su estado natural (Jambor, 1994), Morin y Hutt (1997) por la naturaleza del proceso, el jal que sale de la planta de beneficio en forma de pulpa se compone de:

- ✓ Minerales sólidos de algunas micras de tamaño mezclados con reactivos químicos.
- ✓ Precipitados sólidos y exceso de reactivos químicos sólidos del proceso de beneficio.
- ✓ Agua con sólidos disueltos derivados de la mena y procesos químicos.

Para su almacenamiento los jales son bombeados a los depósitos en forma de pulpa conteniendo entre 20 y 40 % en peso de sólidos; su descarga se realiza en uno o varios puntos que son movidos periódicamente, dando como resultado cambios en la posición del perímetro y la playa de la presa; estos cambios de ambientes de depósito que ocurren durante la vida del depósito ocasionan heterogeneidad sedimentaria (Wills, 1989; Robertson, 1994; Morin y Hutt, 1997).

Muchos almacenamientos poseen 2 ambientes de depósito diferentes: una zona de playa sub aérea con una extensión que va de decenas a algunos cientos de metros más allá del punto de descarga, y una zona lacustre donde se acumula la pulpa, las partículas sólidas se separan de la pulpa por diferencia de peso, el agua se acumula en la presa y posteriormente es decantada (Wills, 1989; Robertson, 1994; Morin y Hutt, 1997).

Las variaciones de viscosidad de la pulpa, velocidad de carga y prácticas de descarga dan como resultado que cada depósito sea estratigráficamente único; el proceso que más afecta la estratificación de un depósito de jales es la clasificación hidráulica de la partícula ocurrida durante su depósito (Robertson, 1994). Las estructuras sedimentarias

formadas en el depósito son lenticulares o sinuosas, presentando estratificación normal, escalonada o cruzada, debido a efectos del lugar, pronunciada clasificación de la partícula y redepositación de finos sobre amplias áreas, particularmente en terrenos o depósitos realizados en superficies de pendiente diferente (Jambor, 1994).

Flujo de agua en jales

Las condiciones de flujo del agua dentro de las presas de jales son específicas del sitio y dependen de varios factores como: geometría y espesor, modo de depósito, tamaño de partícula, permeabilidad de la formación del material que la rodea, elevación del nivel freático dentro del depósito, condiciones climáticas, anisotropía y heterogeneidad del depósito. (Robertson, 1994). La heterogeneidad a lo largo de la descarga tiene efectos significativos en el movimiento y química del drenaje: como en la orilla se depositan granos gruesos, materiales con buen drenaje circundan parcial o totalmente el depósito, causando que el nivel freático sea más bajo cerca del perímetro. Por su alta gravedad específica los metales pesados y minerales sulfurosos se almacenan en el perímetro, ocasionando niveles preferenciales de minerales generadores de acidez expuestos al rápido flujo de agua y entrada de aire, incrementando en estos lugares el riesgo potencial de generación de drenaje ácido (Morin y Hutt, 1997), los jales obtenidos como sedimentos finos (arcillas limosas), depositadas en las playas pueden tener un impacto ambiental mucho más bajo que los obtenidos como arenas o granos gruesos con área superficial y adsorción más baja (John y Leventhal, 1995).

La precipitación pluvial que cae en una presa de jales se divide en tres partes (Morin y Hutt, 1997):

- ✓ Una porción se evapora o es transpirada por la vegetación y regresa a la atmósfera.
- ✓ Otra parte corre en la superficie de los jales (escurrimiento).
- ✓ La tercera parte puede infiltrarse y fluir por el material ("infiltración" o flujo subterráneo).

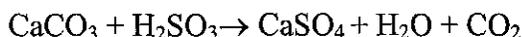
El flujo subterráneo adquiere mayor importancia, ya que, en él se da un mayor contacto e interacción química entre el agua y el jal. Por la baja conductividad hidráulica de los jales, existe poca infiltración, no así el escurrimiento y el almacenamiento de agua en la zona lacustre. De acuerdo al pH medido en el lixiviado producido en los depósitos jales, esté se clasifica en (Morin y Hutt, 1997):

Römerita ($\text{Fe}^{(2+)} \text{Fe}^{(3+)} 2 (\text{SO}_4) \cdot 14\text{H}_2\text{O}$), Coquimbita ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3(\text{H}_2\text{O})$), Copiapita ($\text{Fe}^{(2+)}\text{Fe}^{(3+)}2(\text{SO}_4)6(\text{OH})_2 \cdot 20\text{H}_2\text{O}$) y otras especies disueltas son precipitadas. Los minerales secundarios más comunes son: hidróxido de hierro $\text{Fe}(\text{OH})_3$, yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y jarosita ($\text{KFe}(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$) (Nordstrom, 1982; Dubrovski, 1986 citados en Blowes *et al.*, 1988; Bayless y Olyphant, 1993; Cravotta, 1994).

Estos minerales son llamados “sales generadoras de acidez” (SGA), la mayoría tiene un color característico (blanco y/o amarillo), que es clásico de lugares piríticos de los depósitos de jales. Son producidos durante la época seca del año en la zona no saturada y disueltas durante la época de lluvia (Younger, 1999).

Disolución de carbonatos por ácidos.

Calcita



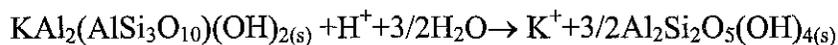
Dolomita



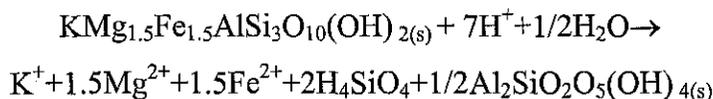
Estas reacciones representan los rápidos procesos de neutralización de acidez por la disolución de carbonatos, uno de los productos de esta disolución es el dióxido de carbono.

Disolución de minerales de ganga.

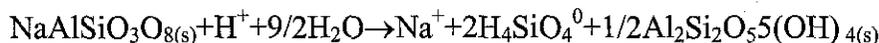
- Disolución de Muscovita



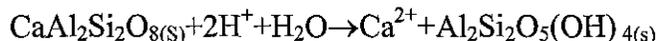
- Disolución de Biotita:



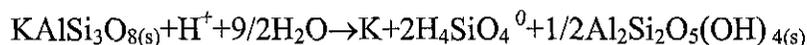
- Disolución de Albita:



- Disolución de Anortita:



- Disolución del K-feldespato



Estas reacciones describen principalmente la disolución generalmente lenta de los minerales de ganga por los productos de oxidación y la consecuente neutralización de acidez.

- Ácido: $\text{pH} < 6.0$, genera oxidación de los minerales, particularmente sulfurosos, con disolución de la gran mayoría de los metales.
- Alcalino: $\text{pH} > 9.0-10.0$, genera disolución de minerales, particularmente óxidos, hidróxidos, y algunos silicatos.
- Cercano a la neutralidad: $6.0 < \text{pH} < 9.0-10.0$, es incierto, ya que con el tiempo puede transformarse al tipo alcalino o al tipo ácido, dependiendo de la abundancia de minerales y velocidades de reacción, la concentración de metales algunas veces puede exceder niveles tóxicos.

Reacciones químicas producidas en los depósitos de jales

La velocidad con la que un depósito de jales es intemperizado y oxidado se rige por su textura, contenido de elementos (John y Leventhal, 1995), oxígeno y agua, siendo menor a temperaturas bajas (Blowes, 1988, Gould *et al.*, 1994, Morin y Hutt, 1997, Mills, 1999). Los minerales sulfurosos de grano fino, textura masiva, fibrosa o alto contenido de metales son intemperizados con mayor facilidad que los de grano grueso, cristalizados y pobres en metales (Kwong, 1993; Plumlee *et al.*, 1993). La solubilidad de los sulfuros metálicos inicia de la más soluble a la menos soluble:

$\text{MnS} > \text{FeS} > \text{NiS} \quad \text{ZnS} > \text{CdS} \quad \text{PbS} > \text{CuS} > \text{HgS}$ (Di Toro *et al.*, 1991 citado en Alpers *et al.*, 1994)

Según Ritchie (1994), las reacciones que juegan el papel más importante en dictar las condiciones físico-químicas en un depósito de jales se clasifican en oxidación de la pirita, disolución de carbonatos y disolución de minerales de ganga. Las reacciones más importantes de estas tres clases son:

Oxidación de sulfuros.

1. $\text{FeS}_2 + 7/2 \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{FeSO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4 \quad \Delta H = 1440 \text{ kJmol}^{-1}$
2. $\text{FeSO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4 + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{H}_2\text{O} \quad \Delta H = 1440 \text{ kJmol}^{-1}$
3. $\text{FeS}_2 + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 2 \text{H}_2\text{O} + 3 \text{O}_2 \rightarrow 3 \text{FeSO}_4 + 2 \text{H}_2\text{SO}_4$
4. $\text{MS} + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{H}_2\text{O} + 3/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{MSO}_4 + 2 \text{FeSO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$

La explicación de estas reacciones es la siguiente: al drenar los jales, se desarrolla una zona no saturada y el O_2 atmosférico es difundido de la superficie hacia abajo, siendo consumido rápidamente por la reacción de oxidación del azufre (Ritchie, 1994). A través de esta zona, fases minerales secundarias, conteniendo SO_4^{2-} , Fe^{2+} (Melanterita ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)),

Algunos de los efectos que se desprenden de estas reacciones son:

Precipitación de yeso. La concentración de yeso en aguas de poro puede aumentar a un nivel al que precipita, este nivel es cercano a 600 mg/l de Ca y 1300 mg/l de SO_4 dependiendo de las condiciones químicas (pH) del agua de poro. La precipitación del yeso es parte de las capas duras formadas en las presas de jales (Boorman y Watson, 1976; Blowes *et al*, 1991, citados en Ritchie, 1994).

Mitigación de metales. La precipitación y disolución de minerales secundarios puede limitar las concentraciones acuosas de metales disueltos asociados principalmente con desechos de minas inactivas (Alpers *et al*, 1994) La precipitación de minerales relativamente insolubles como la anglesita, pueden mantener bajas concentraciones de metales disueltos en el agua de poro de los jales mientras un incremento en masa de los metales se acumula en los jales sólidos (Alpers *et al*, 1994). Este efecto se puede dar por: adsorción, sales sulfatadas, sales carbonatadas y reemplazamiento.

Las reacciones químicas producidas en los depósitos de jales involucran minerales formadores de rocas, sus velocidades de reacción son lentas y probablemente son importantes en la evolución química de la composición del agua de poro a grandes periodos: estas reacciones son responsables de la concentración de iones mayores como Ca, Mg, Na, K, Al y SO_4 en el agua lixiviada (Ritchie, 1994)

La precipitación del mineral puede tomar lugar en su superficie haciendo incongruente la disolución, o en respuesta a un número de procesos que afectan a las soluciones producidas por intemperismo incluyendo oxidación, dilución, mezcla, evaporación y neutralización. Sulfatos minerales solubles formados en ambientes áridos y semiáridos pueden almacenar metales y acidez durante períodos secos y sacarlos durante periodos húmedos (Alpers *et. al*, 1994)

Efecto del pH en las reacciones

La actividad del ión hidrogeno (pH) es el factor que gobierna la especiación de los metales, solubilidad de las superficies minerales, transporte y eventualmente la biodisponibilidad de metales en soluciones acuosas, afectando la solubilidad de minerales metálicos hidróxidos y los procesos de adsorción, desorción (John y Leventhal, 1995), a pH menor aumenta la movilidad de los metales pesados (Jambor, 1994) y los elementos traza no son solubles a pH por arriba de 4.5 (Ritchie, 1994). El pH del agua de poro depende de

la presencia de varias especies minerales y sus velocidades de reacción, en el lixiviado de las minas puede encontrarse en un rango de menos 2 a 8.5 dependiendo del estado de reacciones y del marco geológico (Mills, 1985 citado en Birgham, 1994; Ritchie, 1994).

Lixiviado producido por los jales

Generalmente los mecanismos que controlan la evolución del agua de poro de los jales son: oxidación de sulfuros, disolución de carbonatos, cambios de pH y precipitación de minerales secundarios de hierro y sulfatos, su importancia se determina por la mineralogía y el marco hidrogeológico de los depósitos (Blowes *et al*, 1988).

Los jales no necesariamente son generadores de acidez, la cantidad neta de acidez producida depende en gran medida de su composición. En todos los desechos de roca y depósitos de jales algunos minerales se oxidan para producir acidez y generar condiciones para extraer elementos potencialmente dañinos, otros reaccionan neutralizándolos. Un acompañante de la neutralización es la formación de precipitados estables y la incorporación de elementos peligrosos dentro de ellos (Jambor, 1994).

El lixiviado ácido ($\text{pH} < 5$), produce un aumento de la solubilidad de algunos compuestos químicos que contienen metales como: hierro, zinc y plomo, por citar algunos, trayendo consigo un aumento de carga de metales pesados en el agua que se transporta a través de ellos generando riesgo de contaminar el suelo, agua superficial y subterránea.

Yelpatyevsky (1995) estima la entrada de metales pesados a sistemas de drenaje natural de diferentes depósitos mineros de la parte sur de Rusia y factores que controlan su entrada. Una de las conclusiones generadas por este trabajo es que depósitos pobres en sulfuros producen aguas cercanas a la neutralidad, bajo estas condiciones la concentración de metales es baja, pero tienen tres metales en cantidades anómalas (zinc, cadmio y manganeso), no se puede asegurar o descartar que no hay migración de metales al agua subterránea.

La roca caliza es comúnmente agregada a los procesos de concentración acuosos para elevar el pH posteriormente a la descarga con los sólidos de los jales, dando una fuente real de calcio para la cristalización del yeso (Jambor, 1994).

Entre los minerales secundarios las sales sulfatadas de calcio son las más comunes, su formación está estrechamente ligada a la mineralogía del depósito, calidad y cantidad de evaporación; son producidas por la evaporación del agua lixiviada rica en sulfatos, durante

períodos secos en áreas donde no existe escurrimiento de agua; por su alta solubilidad se disuelven rápidamente durante las lluvias o nevadas y tanto metales como acidez son extraídos y pueden llevar temporalmente a una degradación significativa de la calidad del agua superficial o subterránea (John y Leventhal, 1995). La lixiviación de los elementos que componen los jales es alta en climas húmedos tropicales y baja en climas áridos (John y Leventhal, 1995).

Según Plumlee y Nash (1995), el incremento en el contenido de metales y decremento del pH refleja grandes cantidades de pirita y otros minerales sulfurosos, acompañados con menores cantidades de minerales amortiguadores de acidez asociados con los depósitos y mencionan que la cantidad de metales y otros elementos adsorbidos por el sólido dependen de:

- 1) La cantidad de partículas suspendidas presentes en el agua del lixiviado.
- 2) El pH del agua, y
- 3) La especiación y concentración de los metales en el agua del lixiviado.

El zinc es un metal abundante en muchos depósitos minerales y es relativamente móvil durante el intemperismo, no es realmente adsorbido por las partículas como el plomo o el cobre, puede permanecer disuelto en un rango de valores de pH en los cuales el plomo y el cobre se encuentran adsorbidos casi en su totalidad (Plumlee y Nash, 1995).

Determinación del tipo de lixiviado producido por los depósitos de jales

La determinación del tipo de lixiviado de un depósito de jales es importante, ya que de acuerdo con el tipo de lixiviado que producen y su composición química, da una idea más amplia del efecto que pueden tener en el agua superficial y subterránea. Los métodos por los cuales es posible determinarlo son: pruebas estáticas y pruebas cinéticas (Mills, 1999b, Morin y Hutt, 1997)

Pruebas estáticas. Son pruebas que se realizan en laboratorio que envuelven la descripción de diferentes características del material del sitio estudiado, fijando los componentes que son potenciales a generar, amortiguar o neutralizar la acidez de los desechos mineros, reciben este nombre debido a que las mediciones son realizadas en un período corto (Mills, 1999c), no se toman en cuenta factores geoquímicos y ambientales que en el campo pueden alterar la interacción química entre los componentes ácidos y básicos del material analizado (BC Wild y EMCBC., 1997). Estas pruebas son una primera aproximación para

conocer el tipo de lixiviado producido por los jales, para su realización generalmente se utiliza el método EPA-600 (ABA), también conocido como procedimiento de Sobek *et al.* (1978), agrupa el material analizado de acuerdo con la cantidad total de acidez y alcalinidad determinada (Kania, 1995), dentro de potencialmente generador de acidez, potencialmente no generador de acidez y grupos inciertos (Mills, 1999c).

Pruebas cinéticas. Principalmente se diseñan y realizan en un laboratorio con una variedad de aparatos que incluyen columnas de lixiviación, celdas húmedas, reactores soxhlet (Hornberger y Brady, 1998) y reactores batch, (EPA, 1994), sin embargo, también se pueden realizar en campo. Las pruebas que se pueden realizar en campo son: columnas de lixiviación, lisímetros y celdas de gran capacidad 1000 toneladas métricas o más (EPA,1994). Son usualmente el paso siguiente a las pruebas estáticas, es un intento para idealizar algo del “mundo real”: las condiciones que afectan la velocidad de generación de acidez. Por medio de los análisis se puede observar la velocidad a la que ocurre la acidificación en largos períodos (meses). Puede dar una mejor indicación de cuando los desechos mineros pueden generar acidez, pero no llevan a predecir los niveles de pH o concentraciones de metales a futuro. Con respecto a la pruebas estáticas son más costosas y requieren mayor tiempo (BC Wild y EMCBC., 1997).

Todas las pruebas cinéticas contienen los siguientes elementos (Mills, 1999d):

- La muestra se somete a lixiviación periódica
- Colección de lixiviado para su análisis
- Cálculo de cantidad de generación ácida y de capacidad de neutralización
- Cálculo cantidad de metal extraído
- Predicción de calidad de agua

ANEXO B
OPERACIONES DEL PROCESO DE BENEFICIO UTILIZADO POR
LA COMPAÑÍA REAL DEL MONTE S.A DE C.V.

De acuerdo a Navarro (1998), las operaciones para el beneficio de minerales del Distrito Minero de Pachuca-Real del Monte realizadas por la Compañía Real del Monte se ilustran en la Figura 6, siendo las siguientes: reducción de tamaño, flotación bulk, cianuración, flotación plomo-zinc, regeneración de cianuro, precipitación y fundición, y refinación de plata y oro.

Reducción de tamaño

Esta operación consta de 2 etapas: trituración y molienda.

Trituración. En esta etapa el mineral se reduce de tamaño en seco por medio de quebradoras, se desarrolla en tres fases de trituración: primaria, secundaria y terciaria, en cada fase el material se clasifica por medio de cribas vibratorias hasta obtener el 90% de mineral a un tamaño de menos $\frac{1}{2}$ pulgada.

Molienda. Esta etapa de reducción de tamaño se realiza con el material obtenido en la trituración mezclado con agua (en húmedo), con molinos de bolas de acero. La molienda consta de tres circuitos; cada uno de los circuitos cuenta con un molino primario, uno secundario y un hidrociclón para clasificar el tamaño de partícula el cual debe estar 95% a – 100 mallas.

Flotación bulk

Este proceso involucra dos operaciones: etapa de acondicionamiento y flotación.

Etapas de acondicionamiento. En esta operación la pulpa (partículas finas de mineral y agua), se almacena en tanques espesadores donde se agregan los siguientes reactivos: modificador, promotor y espumante, estos reactivos son necesarios para preparar las partículas minerales que se desean flotar.

Flotación. La descripción de esta operación es la siguiente: la pulpa acondicionada se alimenta a las celdas de flotación; en estas celdas las partículas minerales son mantenidas en suspensión mediante agitación mecánica, asimismo, en el fondo se inyecta aire a presión para crear una corriente de burbujas de aire ascendente en las que han de adherirse los minerales sulfurosos valiosos, formando así camas de espuma de concentrado que se extrae de las celdas por derrame libre, las colas o jales (lo que no flota) son enviados a la presa de jales.

Los reactivos químicos utilizados en este proceso no alteran internamente al mineral, únicamente modifican su superficie (Wills, 1989).

Cianuración

El concentrado obtenido en la flotación con 8% de sólidos, es decantado hasta lograr un concentrado con 35% de sólidos; el agua derramada se recicla para ser utilizada en el proceso de molienda. Posteriormente este concentrado pasa al circuito de agitación, en este circuito se realiza el proceso de lixiviación donde se lleva a cabo la disolución de los valores de plata y oro, agregando una solución de cianuro de sodio (NaCN) al 10% y una "lechada" de cal (CaO) en la siguiente proporción: NaCN 1100 a 1300 g/m³ y CaO 900 a 1100 g/m³. El concentrado cianurado se alimenta a un espesador para dar inicio al lavado, donde la solución rica en plata y oro se envía a un tanque clarificador y los sólidos son bombeados al circuito de lavado a contracorriente. El proceso de lavado a contracorriente se realiza agregando solución barren para el lavado de la pulpa, provocando con esto un derrame de solución que pasa de tanque en tanque y fluye por gravedad en sentido contrario a la dirección de la pulpa, enriqueciéndose de valores de plata y oro, hasta derramar la solución en el tanque clarificador donde se encuentra la solución rica en plata y oro.

Flotación plomo zinc. Para este proceso se reciben los sólidos del lavado a contracorriente en un tanque acondicionador y se les realiza un acondicionamiento agregando colectores, promotores y espumante; las partículas son suspendidas mediante agitación mecánica, los pasos posteriores son similares a la flotación bulk.

Regeneración de cianuro

Se realiza de acuerdo a los siguientes ciclos: solución alcalina, solución barren y equilibrio líquido-gas, como se muestra en la Figura 7.

Ciclo de solución alcalina. Se realiza en tres torres de absorción (2,4,6 Figura 7), bombeando de torre en torre NaOH (hidróxido de sodio), al 5% hasta completar el ciclo

Ciclo de solución barren. Una vez establecido el flujo de solución alcalina se inicia el ciclo de solución barren, bombeando la solución alcalina a la primera torre de agotamiento (1 Figura 7) e irrigando por la parte superior con solución barren ácida para que pase a través de la solución alcalina para bombearla posteriormente a la torre 3, repitiéndose esta operación en las tres torres; después de la torre 5 la solución se agota de cianuro y es enviada a la presa de jales.

Después de que se completan los dos primeros ciclos se inicia la operación de un soplador para obtener una presión uniforme y alcanzar el equilibrio entre líquido y gas para poder inyectar ácido (HCl o H_2SO_4), una vez terminando esta operación se da inicio a la regeneración de cianuro, el cual se va concentrando hasta llegar a un 10% para regresarlo al área de cianuración.

Precipitación y fundición. La solución rica en valores de plata y oro proveniente de cianuración es desoxigenada (-0.5 ppm de O_2), después se envía a los filtros prensa; antes de llegar la solución a estos filtros se les inyecta una emulsión de polvo de zinc metálico, para precipitar la plata y el oro (Proceso Merrill-Crowe).

El precipitado obtenido es retenido en los filtros prensa, mientras que la solución estéril (barren) que contiene trazas de plata y oro es descargada en una pileta donde se almacena para reciclarla al circuito de lavado a contracorriente y al proceso de regeneración de cianuro.

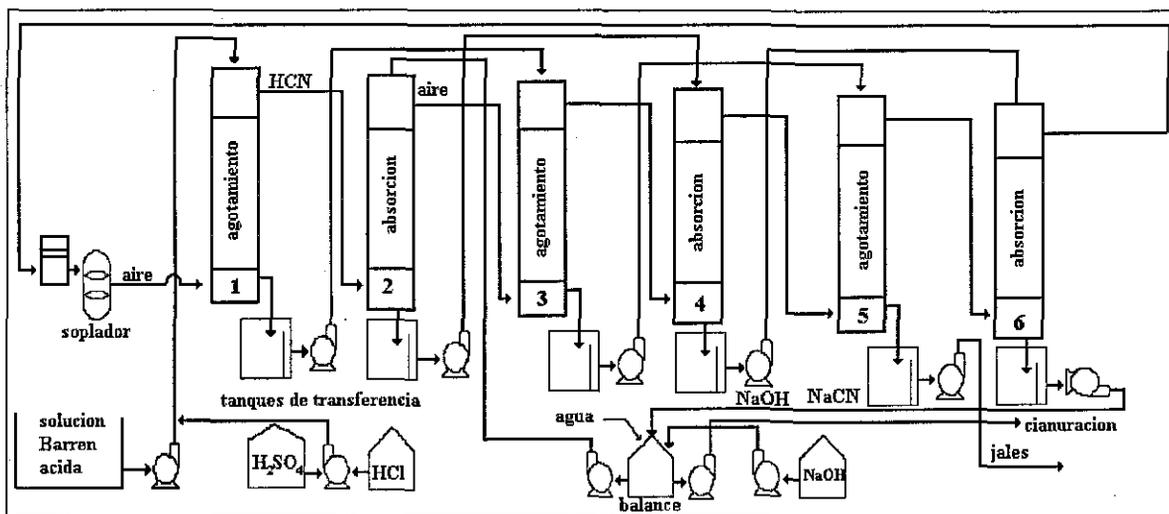


Figura 7. Regeneración de cianuro (Navarro, 1998)

El precipitado removido manualmente de los filtros prensa se alimenta en los hornos de reverbero y se funde, obteniéndose dos productos: escorias que son enviadas a fundiciones externas para su maquila y las placas o ánodos doré que tienen una pureza de 98% de plata y 0.5% de oro.

Refinación de plata y oro. Las placas doré sufren una afinación electrolítica para obtener plata fina (99.93% de plata) y oro fino (99.97% de pureza).

ANEXO C
DIAGRAMAS DE FLUJO DE ANÁLISIS REALIZADOS A
MUESTRAS DE JALES Y LIXIVIADOS OBTENIDOS EN LAS
PRUEBAS CINÉTICAS

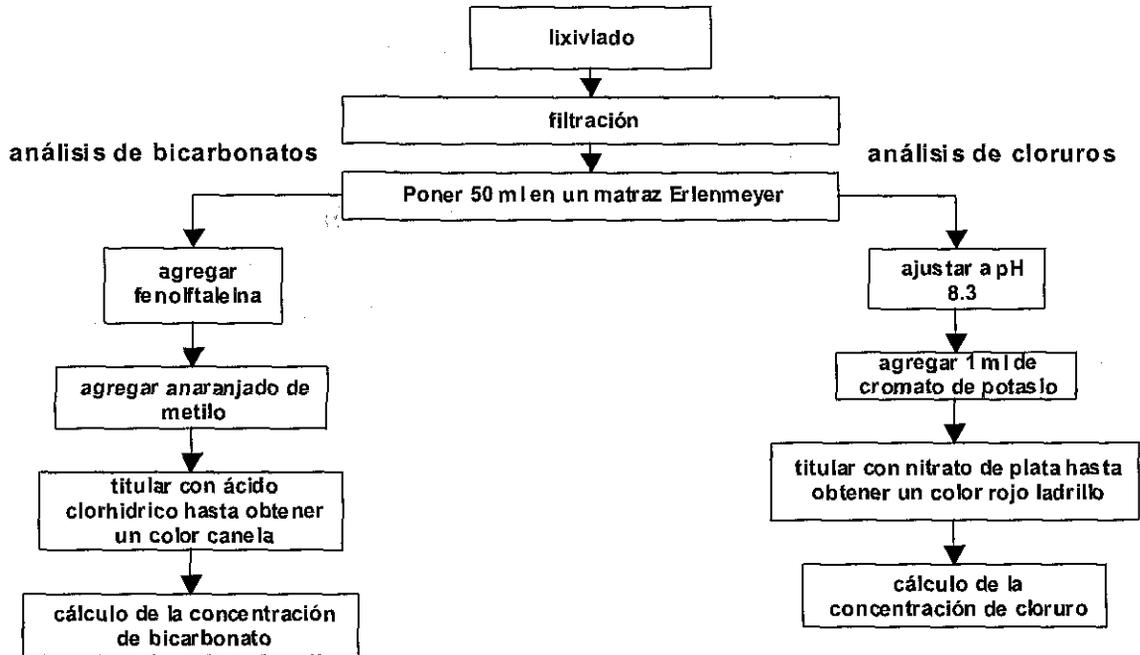


Figura 14. Diagrama de flujo para la determinación de cloruros y bicarbonatos por el método volumétrico

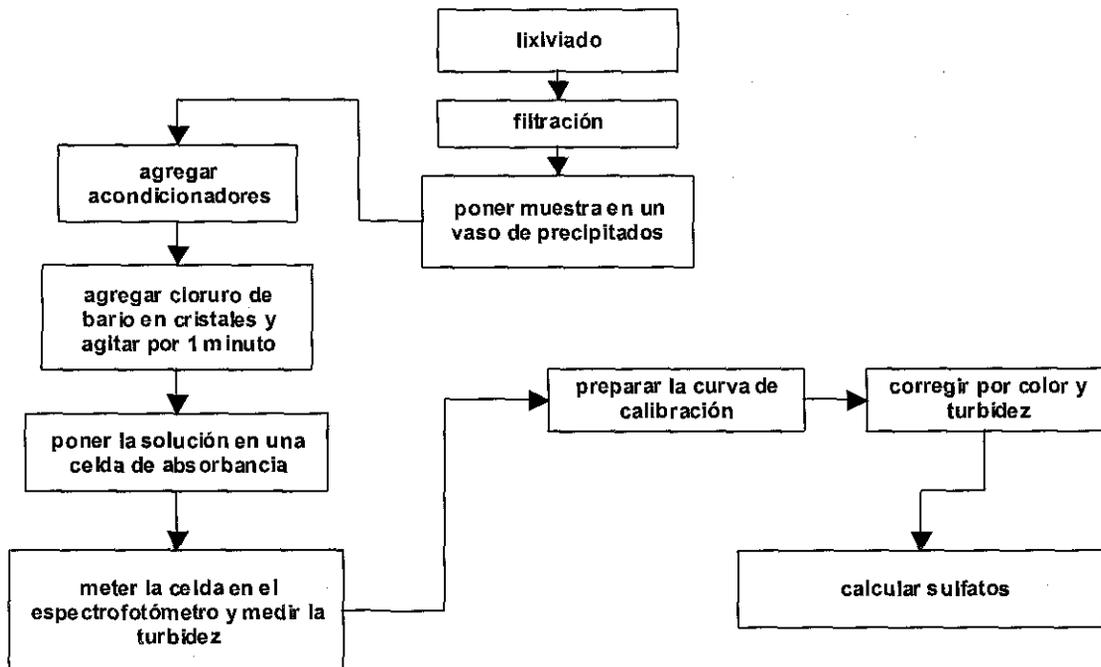


Figura 15. Diagrama de flujo para determinar sulfatos por el método Turbidimétrico

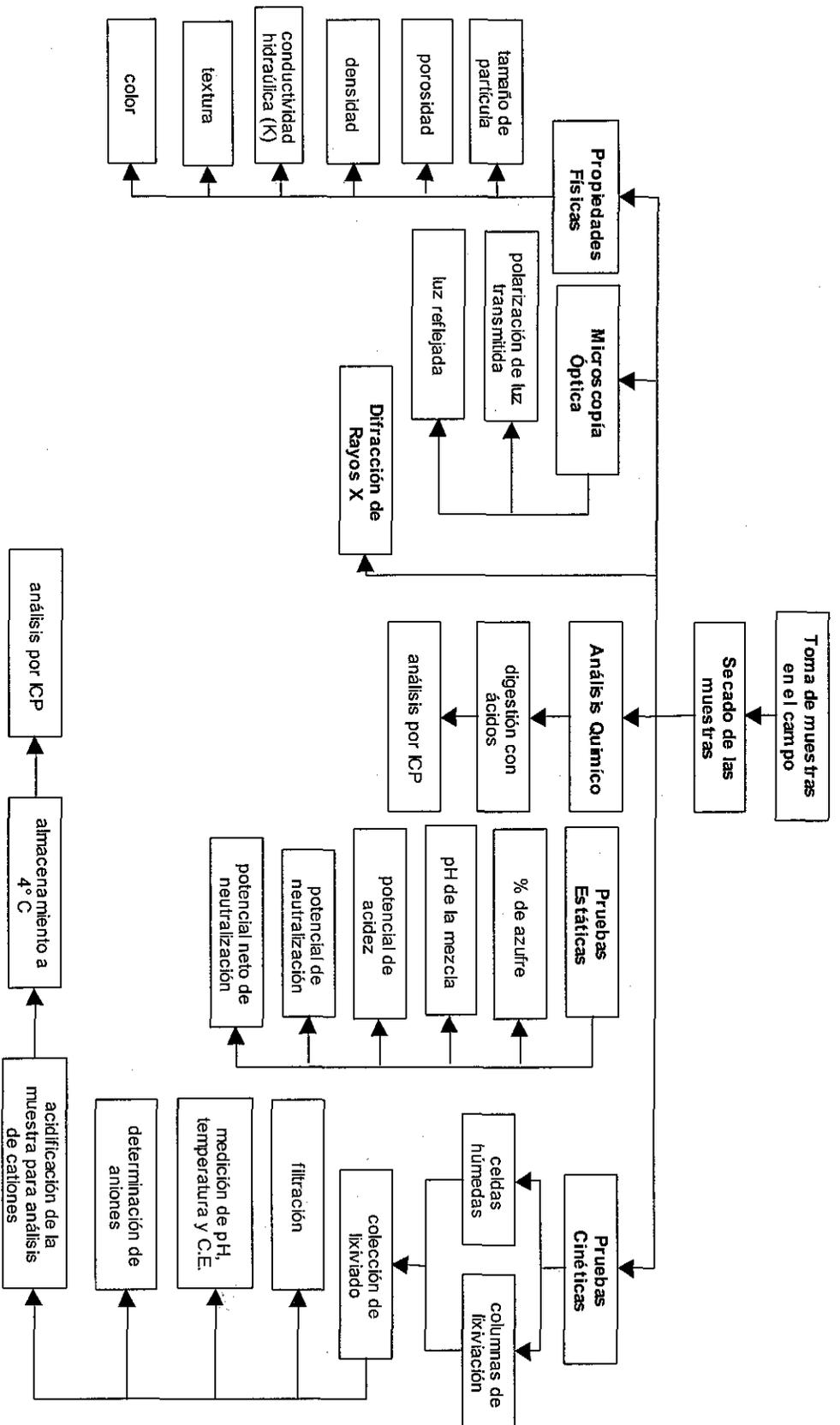


Figura 13. Diagrama de flujo que representa los análisis realizados a las muestras de jales utilizadas en el presente trabajo

ANEXO D
FASES MINERALES DETERMINADAS POR DRX.

Tabla 6. Fases minerales determinadas por DRX en muestras sin clasificación

Muestra	Mineralogía	F.May	F.min	Reflejo	d1	I/I1	d2	I/I2	d3	I/I3
JPM-1	Cuarzo	***			3.34162	100	2.28122	29.3	4.24594	21.6
	Altaíta	***			2.27458	11.5	1.38415	6	2.16547	3.6
	Kianita	***	***		1.97366	5	1.53816	4.8	1.45321	1.2
	Anglesita		***		2.01141	3.6	2.07016	3.2	1.797	2.2
JPM-2	Albita			***	1.81319	5.1	3.18799	2.4		
	Cuarzo	***			3.35522	100	2.28678	11	1.81691	8.9
	Sanidina	***			1.82183	16.4	1.37388	14.8	1.38451	9.1
	Kianita		***		1.45189	3.1	2.16921	2.4	1.59566	1.3
JPM-3	Anglesita			***	4.26815	19.8	3.00361	3.5	3.47956	2
	Cuarzo	***			3.33364	100	1.81657	16.6	1.54072	13.6
	Sanidina	***			4.23992	15.9	2.12533	8.5	1.53642	7.4
	Kianita		***		3.18241	4.4	2.00803	4.2	2.16126	3.4
	Anglesita		***		2.05762	3.8	1.7965	2.7	2.98887	2.6
	Pirita			***	2.44743	8.2	1.62956	0.5		
Altaíta			***	3.22359	8.2	1.44776	2.1			

Tabla 7. Fases minerales determinadas a la muestra JPM-1 clasificada a -200 mallas

Muestra	Mineralogía	F. may	F. min.	Reflejo	d1	V/I1	d2	V/I2	d3	V/I3
JPM-1	Cuarzo	***		***	3.33978	100	1.81809	33.5	4.24795	19.4
	Sandina	***			3.22531	10.7	1.37904	6.5	3.7755	5.3
	Coquimbita		***		3.03456	9	3.28478	4.5	2.3869	1.8
	Anglesita		***		2.06881	5.5	2.16349	5.4	2.99475	4.7
	Kianita		***		1.9285	4.2	1.66766	3.6	1.50151	2.8
	Yeso		***		1.79749	4.7	1.87332	2.3	7.56723	0.9
	Bornita		***		3.18855	3.2	1.65905	2.7	2.76434	1.6
	Marcasita			***						
	Jarosita				***					
	Pirita				***					
	Esfalerita				***					
	Hematita				***					
	Flogopita				***					
	Römerita				***					
Montmorillonita				***						

Tabla 8. Fases minerales determinadas a la muestra JPM-2 clasificada a -200 mallas

Muestra	Mineralogía	F. may	F. min.	Reflejo	d1	V/I1	d2	V/I2	d3	V/I3
JPM-2	Cuarzo	***		***	3.34532	100	1.67187	15.7	4.25904	12.1
	Altaíta		***		3.23276	5.4	1.93199	0.7	1.43957	0.7
	Coquimbita		***		3.03053	5.3	3.29133	3.5	2.38843	0.6
	Anglesita			***						
	Andesina			***						
	Yeso			***						
	Marcasita			***						
	Jarosita			***						
	Copiapita			***						
	Pirita			***						
	Esfalerita			***						
	Hematita			***						
	Magnetita			***						
	Römerita			***						
Montmorillonita				***						

Tabla 9. Fases minerales determinadas a la muestra JPM-3 clasificada a -200 mallas

Muestra	Mineralogía	F. may.	F. min	Reflejo	d1	I/I1	d2	I/I2	d3	I/I3
JPM-3	Cuarzo	***			3.33119	100.0	1.81538	23.5	2.12318	22
	Römerita		***		4.23193	23	2.11725	10.8	3.03961	2.3
	Yeso		***		2.45001	12	1.81033	12	1.79452	4.2
	Bornita		***		1.37061	10.1	1.53573	6.2	3.17797	4.6
	Hematita		***		2.69906	8	1.45169	3.3	3.65469	0.6
	Anglesita		***		3.22073	6.4	2.98545	4.3	1.44226	1.4
	Kianita		***		3.76211	5	2.00613	4.6	1.79816	4.4
	Pirita		***		1.91338	3.9	1.44595	2.4	1.56539	0.5
	Altaíta			***						
	Coquimbita			***						
	Calcita			***						
Flogopita			***							

Tabla 10. Fases minerales determinadas a la muestra JPM-4 clasificada a -200 mallas

Muestra	Mineralogía	F. may.	F. min	Reflejo	d1	I/I1	d2	I/I2	d3	I/I3
JPM-4	Cuarzo	***			3.34409	100.0	4.25601	14.2	1.37574	8.2
	Flogopita		***		1.67313	8.1	2.24066	2.8	3.94324	1.3
	Bornita		***		3.29013	4.5	1.66864	3.8	3.19247	1.6
	Kianita		***		1.45352	3.2	1.79849	2.4	2.60493	2.3
	Calcita			***	3.03204	2.7	3.8604	0.6	1.85397	0.5
	Römerita			***	4.02888	1.1	2.21065	1.1	3.67029	0.9
	Altaíta			***						
	Anglesita			***						
	Coquimbita			***						
	Yeso			***						
	Pirita			***						
Esfalerita			***							
Hematita			***							

Tabla 11. Fases minerales determinadas a la muestra JPM-5 clasificada a -200 mallas

Muestra	Mineralogía	F may	F. min	Reflejo	d1	V11	d2	V12	d3	V13
JPM-5	Cuarzo	***	***	***	3.34162	100	1.81521	17	1.3753	10.2
	Anglesita		***	***	4.25097	20.1	3.22188	5.7	2.99131	4.8
	Kianita		***	***	2.23616	4.7	1.9285	3.5	1.79799	3.3
	Rómerita		***	***	3.03305	4.2	2.55175	1.6	2.38568	1.6
	Bornita		***	***	3.18799	3.2	1.65905	1.6	2.76642	1.3
	Pirita		***	***	1.91338	3.1	1.63301	1.5	2.70899	0.4
	Coquimbita			***						
	Saridina			***						
	Yeso			***						
	Calcita			***						
Jarosita			***							
Esfalerita			***							
Hematita			***							

Tabla 12. Fases minerales determinadas a la muestra JPM-6 clasificada a -200 mallas

Muestra	Mineralogía	F may	F min	Reflejo	d1	V11	d2	V12	d3	V13
JPM-6	Cuarzo	***	***	***	3.32144	100	4.21801	19.6	1.37246	14.7
	Yeso		***	***	1.81285	20.8	1.53446	6.3	1.66766	6.1
	Anglesita		***	***	3.00856	11	1.97366	7.7	1.79321	4
	Bornita		***	***	1.36973	12.2	1.92311	3.1	2.75316	1.5
	Calcita		***	***	3.021	7	2.08377	5.4	1.90713	3.4
	Marcasita			***						
	Jarosita			***						
	Pirita			***						
	Andesina			***						
	Rómerita			***						
Willemita			***							

ANEXO E
DIFRACTOGRAMAS OBTENIDOS POR DRX
A MUESTRAS SIN CLASIFICACIÓN
A MUESTRAS CLASIFICADAS A -200 MALLAS
A MUESTRA DE SALES TOMADAS DE LA COL-2

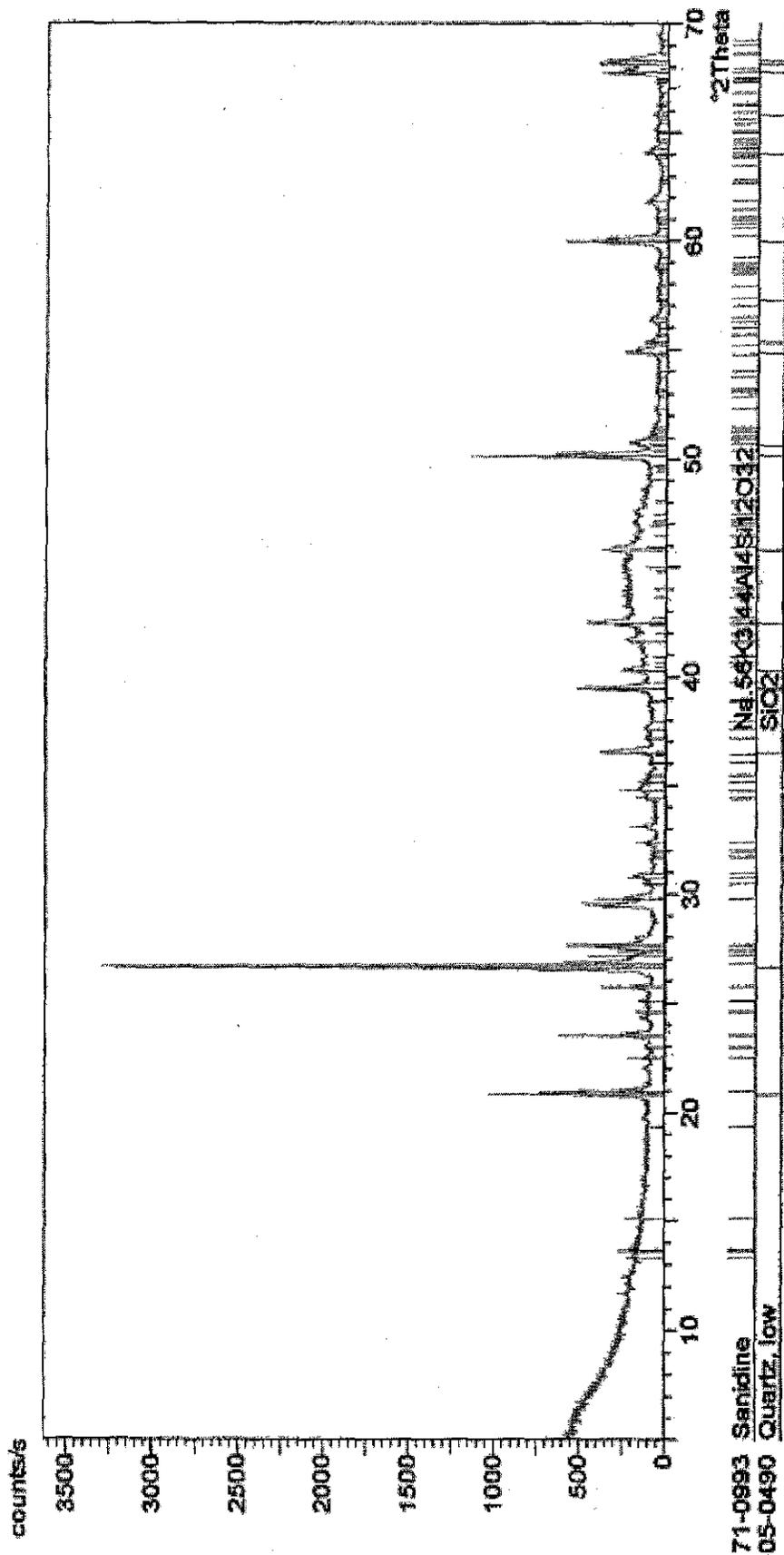


Figura 16.- Difractograma obtenido en el análisis por DRX de la muestra JPM-1

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

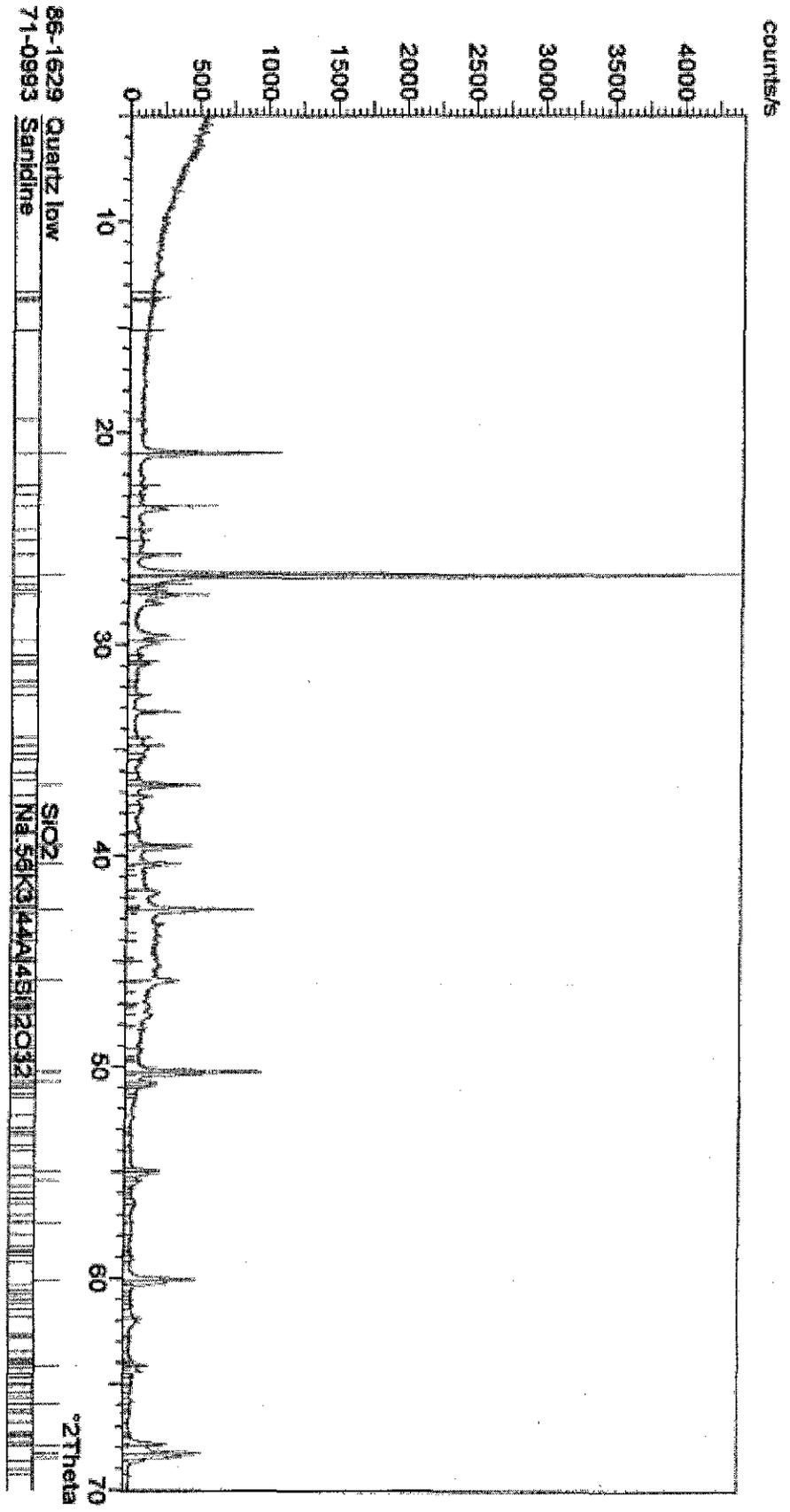


Figura 17.-Difractograma obtenido en el análisis por DRX de la muestra JPM-3

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

9A

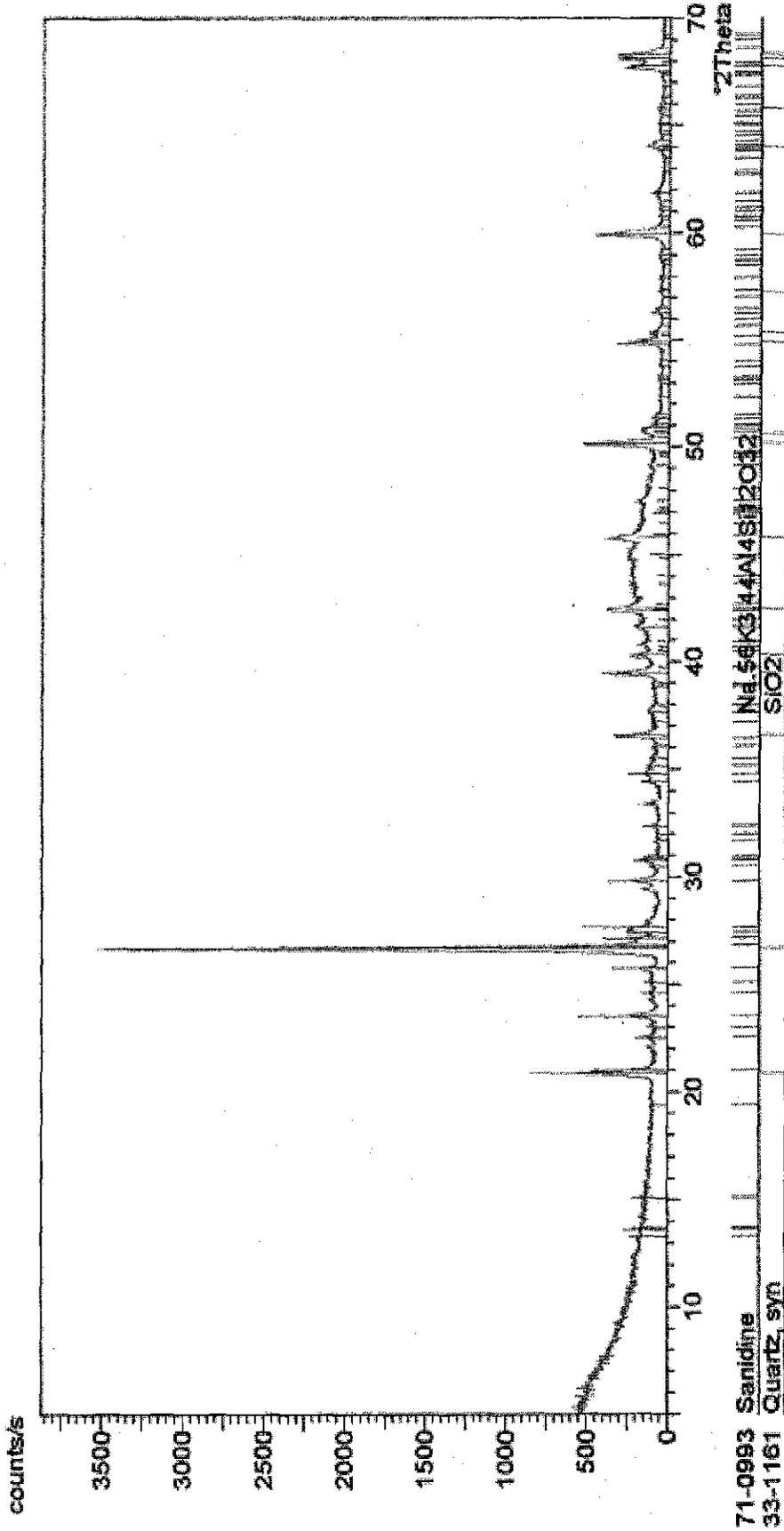


Figura 18. Difractograma obtenido en el análisis por DRX de la muestra JPM-4

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

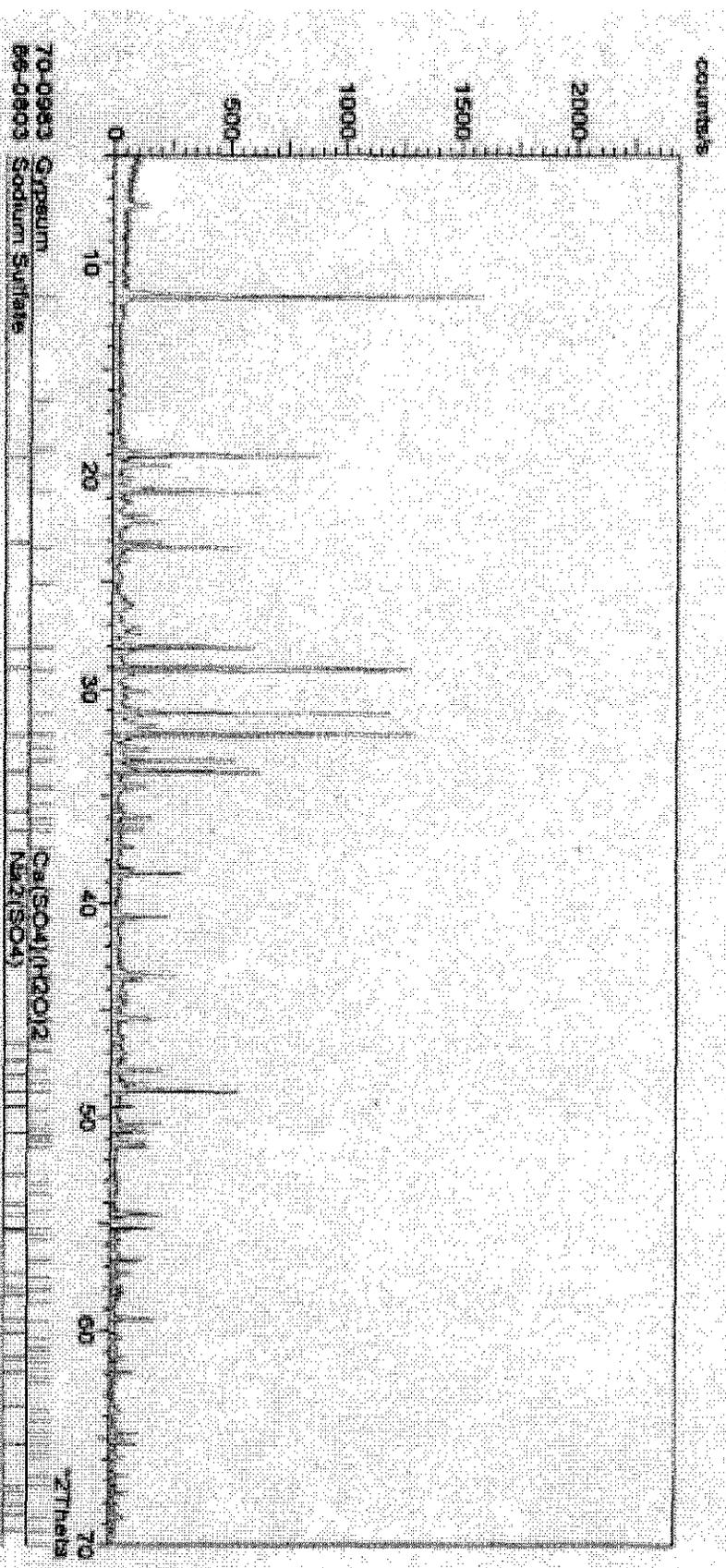


Figura 28. Difractograma obtenido en el análisis por DRX de las sales obtenidas en la COL-2

TESIS CON
FALTA DE ORIGEN

ANEXO F
RESULTADOS QUÍMICOS DEL LIXIVIADO DE LAS COLUMNAS
DE LIXIVIACIÓN
A) EN CONCENTRACIÓN
B) EN MASA LIXIVIADA



Tabla 15. Cationes lixiviados en la columna de lixiviación COL-1

días	Ca ²⁺		Na ⁺		Mg ²⁺		K ⁺		mg/l	%	total	meq/l	pH	C. E mS/c m
	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l						
85	32.5	1.62	10.6	0.53	20.6	1.03	40.6	2.03	309	11.49	49.69	8.14	4.11	
106	516.25	25.76	61.75	2.69	188.75	7.53	223.25	8.71	990.00	31.25	49.69	8.14	4.11	
115	598.50	29.86	94.34	4.10	109.25	4.23	81.23	3.28	883.31	19.96	45.03	8.28	4.02	
123	396.75	19.96	66.32	2.76	85.75	3.28	46.53	1.79	595.53	22.51	30.50	8.14	2.71	
132	342.97	17.11	56.10	2.29	94.52	3.58	78.52	3.02	588.80	25.49	30.50	8.31	2.62	
139	385	19.21	55.75	2.29	98.75	3.58	62.6	2.42	673.31	23.58	34.46	7.67	2.64	
155	378	18.86	58.51	2.42	79	3.02	55.5	2.14	638.00	20.16	32.24	8.17	2.71	
185	391	19.54	48.0	2.00	200	7.53	180	7.08	700.00	23.60	30.50	8.14	2.71	

** No detectado por el equipo (concentración <0.001 mg/l)
 Utilizado para la modelación geoquímica.

Tabla 16. Aniones lixiviados en la columna de lixiviación COL-1

días	Temp °C	SO ₄ ²⁻		HCO ₃ ⁻		Cl ⁻		mg/l		total	meq/l	TDS mg/l	error %	Si mg/l
		mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	total	total					
85	17.8	1820	37.89	76.39	317.2	5.198	6.51	230.85	13.13	2368.05	49.60	3379.97	0.08	15.35
106	17.8	1820	37.89	76.39	317.2	5.198	6.51	230.85	13.13	2368.05	49.60	3379.97	0.08	15.35
115	18.9	1790	37.26	83.00	301.34	4.94	2.69	95.48	6.00	2186.82	44.90	3082.17	0.15	**
132	19.9	970	20.19	65.70	285.18	4.67	5.87	208.17	19.10	1463.35	30.74	2076.61	-0.39	3.06
139	19.2	1230	25.61	73.72	358.56	5.88	3.25	115.36	9.37	1703.92	34.74	2408.14	-0.40	3.11
155	19.6	1250	26.03	79.28	181.78	2.98	3.82	135.56	11.65	1567.34	32.83	2248.43	-0.90	10.62
185	21.1	1470	30.00	74.70	237.0	3.89	4.74	238	16.50	1946.90	41.15	2769.41	0.83	7.50

Utilizado para la modelación geoquímica.
 ** No detectado por el equipo (concentración <0.001 mg/l)

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Tabla 17. Metales lixiviados en la columna de lixiviación COL-1

días	Al	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	total mg/l	mg/l acumulados
85	0.19	0.016	0.06	0.02	0.14	0.02	0.04	0.14	0.06	0.235	0.235
106	0.171	0.06	0.04	0.02	0.14	0.02	0.04	0.14	0.06	0.209	1.815
115	0.171	0.06	0.04	0.02	0.14	0.02	0.04	0.14	0.06	0.209	2.057
132	0.171	0.06	0.04	0.02	0.14	0.02	0.04	0.14	0.06	0.209	2.2725
139	0.171	0.06	0.04	0.02	0.14	0.02	0.04	0.14	0.06	0.209	2.4815
155	0.171	0.06	0.04	0.02	0.14	0.02	0.04	0.14	0.06	0.209	2.6905
188	0.171	0.06	0.04	0.02	0.14	0.02	0.04	0.14	0.06	0.209	2.9005
mg totales	27.61	1.1104	99.42	86.18	1142.27	187.85	118.05	6.51	0.054	0.65851	11.19
mg cationes	572.74	28.08	28.08	1448.17	71.00	71.00	71.00	12.31	0.60	0.320	0.320
% aniones	448.17	71.00	71.00	71.00	71.00	71.00	71.00	71.00	71.00	71.00	71.00
% metales	12.31	0.60	0.320	0.320	0.320	0.320	0.320	0.320	0.320	0.320	0.320

Utilizado para la modelación geoquímica.
 ** No detectado por el equipo (concentración <0.001 mg/l)

Tabla 24. mg de soluto extraídos de la columna de lixiviación COL-1

día	Ca ²⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	Si	Al	Fe	Mn	Zn	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb
85	13.31	46.76	39.34	15.05	275.65	27.94	14.35	0.43	0.014	0.024	0.16	0.074	0	0.014	0.021	0.008	0
106	69.69	25.48	8.34	30.14	245.7	42.82	31.16	2.07	0.026	0.004	0.53	0.245	0	0.032	0.0351	0.013	0
115	47.88	8.74	7.55	6.50	143.2	24.11	7.64	0.00	0.014	0.024	0.72	0.164	0	0.017	0.019	0.008	0
123	25.12	5.27	4.19	2.93	70.56	16.69	7.68	0.00	0.00006	0.00006	1.00	0.074	0	0	0	0	0.01
132	16.81	4.77	4.63	2.65	47.53	13.97	10.20	0.15	0.00005	0.00005	0.99	0.054	0	0	0	0	0.006
139	15.78	5.21	4.05	2.57	50.43	14.71	4.73	0.13	0.0007	0.00397	1.00	0.124	0.0016	0	0	0	0.007
155	44.60	14.81	9.32	6.55	147.5	21.45	15.99	1.25	0.0001	0.00012	3.75	0.068	0.0028	0	0	0	0.009
188	42.9	0.0001	22	19.8	161.7	26.17	26.29	2.47	0.0001	0.00286	3.02	0.032	0.0026	0	0	0	0.004
mg totales	27.61	111.04	99.42	86.18	1142.27	187.85	118.05	6.51	0.054	0.65851	11.19	0.809	0.0071	0.062	0.075	0.029	0.036
mg cationes	572.74	28.08	28.08	1448.17	71.00	71.00	71.00	12.31	0.60	0.320	0.320	0.320	0.320	0.320	0.320	0.320	0.320
% aniones	448.17	71.00	71.00	71.00	71.00	71.00	71.00	71.00	71.00	71.00	71.00	71.00	71.00	71.00	71.00	71.00	71.00
% metales	12.31	0.60	0.320	0.320	0.320	0.320	0.320	0.320	0.320	0.320	0.320	0.320	0.320	0.320	0.320	0.320	0.320

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Tabla 18. Cationes lixiviados en la columna de lixiviación COL-3

días	Ca ²⁺		Na ⁺		Mg ²⁺		K ⁺		mg/l		meq/l		pH	C. E. mS/cm
	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	total	%	total	%		
29	363	9.08	16.81	0.42	19.74	0.49	102	2.68	4.73	11.93	3.29	8.44	8.01	4.29
36	437	10.92	15.57	0.39	32.26	0.82	65.4	1.67	3.47	972.40	2.80	48.27	8.01	4.15
43	648	16.20	7.742	0.19	12.84	0.32	122	3.12	5.17	1156.00	3.47	60.31	8.08	3.37
50	631	15.78	4.03	0.10	7.71	0.19	107	2.74	5.23	1001.70	3.39	52.32	8.04	2.85
57	556	13.90	2.06	0.05	7.16	0.18	98.5	2.53	7.92	832.51	2.53	45.11	8.06	2.84
64	308.5	7.71	0.22	0.06	0.96	0.02	85	2.17	9.60	457.50	1.38	22.64	8.17	2.67
71	365.5	9.14	0.67	0.02	2.66	0.07	71.6	1.83	7.28	506.00	1.38	25.14	8.12	2.49
78	328	8.20	0.39	0.01	2.04	0.05	60.3	1.54	7.97	410.07	1.38	19.35	8.12	2.45
85	369.5	9.24	0.31	0.01	1.31	0.03	42.5	1.09	4.54	468.89	1.38	23.93	8.12	2.45
106	231	5.82	0.27	0.01	1.56	0.04	11.9	0.31	7.92	330.72	1.38	15.76	8.22	2.45
115	459	11.48	0.19	0.01	0.78	0.02	32.6	0.83	3.39	504.01	1.38	24.59	8.22	1.47
123	270	6.75	0.16	0.01	1.12	0.03	21.7	0.55	3.86	297.61	1.38	14.37	8.39	1.55
132	285	7.14	0.16	0.01	1.07	0.03	21.7	0.55	3.68	311.92	1.38	15.06	8.15	1.44
139	280	7.00	0.06	0.01	0.44	0.01	16.6	0.42	2.92	299.21	1.38	14.55	8.18	1.44
146	273	6.83	0.06	0.01	0.44	0.01	15	0.41	2.86	292.03	1.38	14.22	8.22	1.45
153	273	6.83	0.06	0.01	0.26	0.01	15.7	0.40	2.86	289.15	1.38	14.06	7.99	1.455
161	270	6.77	0.06	0.01	0.33	0.01	15.8	0.40	2.90	286.36	1.38	13.92	8.21	1.41
172	290	7.25	0.06	0.01	0.25	0.01	12.5	0.32	2.16	302.96	1.38	14.83	8.05	1.48
185	243	6.08	0.06	0.01	0.41	0.01	17.5	0.45	2.51	263.56	1.38	13.77	8.05	1.48

Utilizado para la modelación geoquímica.

** No detectado por el equipo (concentración <0.001 mg/l)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla 19. Aniones lixiviados en la columna de lixiviación COL-3

días	temp °C	mg/l	SO ₄ ²⁻ meq/l	%	mg/l	HCO ₃ ⁻ meq/l	%	mg/l	Cl meq/l	%	mg/l total	mg/l total	TDS mg/l	error %	Si mg/l
29	20.8	2152	44.81	92.84	172.02	2.82	5.84	22.49	0.63	1.31	2757.70	57.07	1857.91	0.01	7.4
36	22.2	2729	56.82	94.25	186.66	3.06	5.07	14.36	0.40	0.67	2930.02	60.28	4094.77	0.02	8.5
43	20.6	2313.97	48.18	93.93	172.63	2.83	5.52	10.05	0.28	0.55	2496.65	51.29	3512.34	1.00	11.5
50	17.5	839.02	17.47	85.36	159.82	2.62	12.80	13.4	0.38	1.85	1012.24	20.47	1492.92	5.04	4.32
57	16.4	1065.04	22.17	88.21	151.28	2.48	9.86	17.23	0.49	1.93	1233.55	25.14	1766.38	0.00	6.26
64	17.6	800	16.66	86.01	143.96	2.36	12.18	12.44	0.35	1.81	956.40	19.37	1397.12	-0.05	5.85
71	16.5	1023.8	21.32	89.12	139.08	2.28	9.53	11.49	0.32	1.35	1174.37	23.92	1669.68	0.02	5.11
78	18.9	1036.9	21.59	87.81	153.72	2.52	10.25	16.94	0.48	1.94	1207.56	24.59	1741.77	0.00	5.25
85	18.5	565	11.76	80.62	146.4	2.40	16.44	15.22	0.43	2.94	726.62	14.59	1050.71	-0.76	2.92
106	19	575	11.97	78.70	159.82	2.62	17.22	22.01	0.62	4.08	756.83	15.21	1092.67	-0.49	0.53
115	18.9	545	11.35	77.30	162.87	2.67	18.18	23.54	0.66	4.52	731.41	14.68	1055.93	-0.43	2.84
123	22.7	495	10.31	71.49	193.98	3.18	22.05	33	0.93	6.46	721.98	14.42	1032.03	-1.24	0.904
132	21.2	455	9.47	67.18	204.96	3.36	23.82	45	1.27	9.00	704.96	14.10	1015.42	-0.64	2.55
139	22.3	422.39	8.79	59.29	197.03	3.23	21.77	99.64	2.81	18.95	719.06	14.83	1043.93	-0.02	3.3
146															
153															
161															
172															
185															

Utilizado para la modelación geoquímica.
 ** No detectado por el equipo (concentración <0.001 mg/l)

Tabla 20. Metales lixiviados en la columna de lixiviación COL-3

días	Al	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	mg/l acumulados
21	0.007	0.006	0.01	0.026	0.00	0.00	0.003	0.00	0.00	0.00
36	0.014	0.099	0.08	0.011	0.00	0.825	0.19	0.80	73.62	6.06
43	0.005	0.0175	0.31	0.00426	2.82	*	0.0019	1.05	84.43	6.32
50	0.028	0.0505	0.04	0.02983	0.66	*	0.00266	4.02	90.83	8.81
57	0.055	0.044	0.00	0.0415	0.22	0.00	0.0025	0.00	0.00	0.00
64	0.035	0.13	0.23	0.048	0.30	71.58	**	0.29	27.04	31.20
71	0.035	0.13	0.20	0.049	0.27	78.74	0.11	0.05	20.07	51.77
78	0.031	0.10	0.18	0.049	0.22	79.03	**	0.19	19.96	76.57
85	0.051	0.11	0.21	0.066	0.35	81.17	**	0.02	17.59	97.88
106	0.022	0.005	0.18	0.049	0.22	82.15	0.002	0.00	16.00	123.89
115	0.039	0.002	**	0.051	0.25	21.7	0.018	0.29	12.03	148.03
123	**	**	**	**	**	21.1	**	0.66	9.80	171.60
132	**	**	**	**	0.01	21.4	**	0.70	7.82	194.99
139	**	**	**	**	0.002	20.8	**	0.67	6.76	217.46
146	0.013	0.028	0.00	0.019	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
153	**	0.14	**	**	0.05	18.4	**	0.80	7.00	259.76
161	**	0.13	**	**	0.02	18.5	**	0.83	13.18	281.32
172	**	0.12	**	**	0.05	17.4	**	0.29	6.02	299.92
185	**	0.00	**	**	0.00	0.00	**	0.00	0.00	0.00

* No analizado.

** No detectado por el equipo (concentración <0.001 mg/l)

Utilizado para la modelación geoquímica.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Tabla 25. mg de soluto extraídos de la columna de lixiviación COL-3

días	Ca ²⁺ mg	Na ⁺ mg	Mg ²⁺ mg	K ⁺ mg	SO ₄ ²⁻ mg	HCO ₃ ⁻ mg	Cl ⁻ mg	Si mg	Al mg	Cd mg	Cr mg	Cu mg	Fe mg	Ni mg	Pb mg	Mn mg	Zn mg
29	369.00	232.50	386.50	105.00	2565.00	152.00	40.20	5.40	0.007	0.049	0.00	0.006	0.00	0.003	0.164	0.811	1.270
36	173.05	44.35	141.77	25.90	852.19	68.12	8.91	1.83	0.006	0.039	0.00	0.004	0.00	0.003	0.012	0.327	1.093
43	271.51	87.15	74.58	51.12	1143.45	78.21	6.02	3.56	0.002	0.007	0.00	0.002	0.00	0.001	0.001	0.000	0.090
50	330.01	89.43	48.48	55.96	1210.21	90.29	5.26	6.01	0.015	0.026	0.00	0.016	0.00	0.001	0.052	0.001	1.183
57	487.41	98.08	34.18	73.19	1604.14	129.62	7.47	4.89	0.041	0.033	0.00	0.018	0.11	0.002	0.556	0.001	1.863
64	213.17	40.77	3.46	58.74	579.76	110.44	9.26	2.99	0.024	0.017	0.03	0.033	0.03	0.000	0.037	9.329	3.524
71	419.96	61.47	17.69	82.27	1223.73	173.82	19.80	7.19	0.040	0.031	0.04	0.056	0.06	0.026	0.013	18.614	4.745
78	154.16	5.97	4.26	28.34	376.00	67.66	5.85	2.75	0.015	0.012	0.02	0.023	0.02	0.000	0.022	9.212	2.327
85	213.57	28.73	4.16	24.57	591.76	80.39	6.64	2.95	0.029	0.014	0.02	0.038	0.04	0.000	0.002	9.999	2.168
106	520.80	18.60	11.61	82.77	1194.66	267.77	31.16	9.36	0.132	0.024	0.08	0.091	0.24	0.000	0.115	38.502	7.682
115	460.38	8.02	4.42	32.70	1040.01	154.18	16.99	5.27	0.039	0.002	0.00	0.051	0.06	0.018	0.073	21.765	3.009
123	237.87	1.95	3.26	19.12	497.77	128.98	13.41	2.57	0.001	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.137	18.589	2.035
132	238.55	1.27	3.10	18.16	481.28	133.77	18.42	0.44	0.001	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.136	17.912	1.532
139	182.00	0.73	0.96	10.79	354.25	105.87	15.30	1.85	0.001	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.098	13.520	0.988
146	253.83	0.97	0.00	14.77	489.19	144.70	22.70	1.75	0.289	0.000	0.02	0.176	0.42	0.000	0.323	17.814	1.532
153	215.67	0.36	0.00	12.40	391.05	153.24	26.07	0.71	0.001	0.022	0.00	0.000	0.00	0.000	0.126	14.536	1.106
161	229.50	0.48	0.00	13.43	386.75	174.22	38.25	2.17	0.001	0.023	0.00	0.000	0.00	0.000	0.152	15.725	2.414
172	305.95	0.48	0.00	13.19	445.62	207.87	105.12	3.48	0.001	0.024	0.00	0.000	0.01	0.000	0.057	18.357	1.182
185	127.65	0.34	0.05	6.48	203.50	64.32	45.33	2.57	0.000	0.008	0.00	0.006	0.01	0.000	0.016	6.179	0.110
mg totales	5404	721.65	738.48	728.87	15650.51	2485.46	442.14	67.75	0.644	0.331	0.24	0.521	1.06	0.054	2.093	231.92	39.85
mg cationes	7593.05%	cationes	28.73	mg aniones	18557.90%	aniones	70.22	mg metales	275.995%	metales	1.04	% silicio	0.01	mg totales	26426.9%		

Tabla 21. Cationes lixiviados en la columna de lixiviación COL-4

días	Ca ²⁺		Na ⁺		Mg ²⁺		K ⁺		mg/l total	%	mg/l total	pH	C. E. mS/cm
	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l					
36	713	20.74	390	13.66	84.7	16.04	96.1	2.46	1020.10	4.65	52.83	8	4.03
43	713	35.58	390	16.96	84.7	6.97	60.5	1.55	1248.20	2.53	61.06	8.1	4.37
50	655	32.68	331	14.40	86.6	7.12	57.4	1.47	1130.00	2.64	55.67	8.11	4.04
57	666	33.23	289	12.57	99	8.14	54.2	1.39	1108.20	2.51	55.34	8.2	3.97
64	352.5	17.59	123	5.35	77.5	6.38	77.5	1.98	630.50	6.33	31.30	8.175	3.795
71	260	13.02	74	2.72	136.5	11.23	55.3	1.70	529.90	5.01	26.74	8.24	3.53
78	261	13.02	144.5	6.29	136.5	11.23	66.4	1.70	608.40	5.27	32.24	8.24	3.53
85	212	10.58	97.2	4.23	122.5	10.08	55.2	1.41	486.90	5.37	26.30	8.17	3.04
106	199	9.93	39.1	1.70	132.5	10.90	56.2	1.44	426.80	6.00	23.97	8.09	3.26
115	460	22.95	25	1.09	53.6	4.41	49.8	1.27	588.40	4.28	29.72	8.22	3.24
124	265	13.22	116	4.50	53	4.77	49.5	1.27	534.10	6.40	19.77	8.22	3.24
132	283	14.12	12.7	0.55	60.5	4.98	55.3	1.41	411.50	6.71	21.07	8.21	1.92
139	277	13.82	10.3	0.45	55.5	4.57	53	1.36	395.80	6.71	20.19	8.04	1.9
146	270	13.47	8.67	0.38	52	4.28	53	1.36	383.67	6.96	19.48	8.25	1.46
162	331	16.52	8.69	0.38	48	3.95	50	1.28	437.69	5.78	22.12	8.04	1.83
185	265	13.22	100	3.64	53	4.77	49.5	1.27	438.20	6.71	20.19	8.25	1.46

Utilizado para la modelación geoquímica.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla 22. Aniones lixiviados en la columna de lixiviación COL-4

días	temp °C	mg/l	SO ₄ ²⁻ meq/l	%	mg/l	HCO ₃ ⁻ meq/l	%	mg/l	Cl ⁻ meq/l	%	mg/l total	mg/l total	TDS mg/l	error %	Si mg/l
36	18.2	266.76	7.19	89.97	167.75	7.75	5.24	89.02	7.51	7.79	2950.53	62.48	3537.70	0.39	6.07
43	22.2	2704	56.30	92.27	189.1	3.10	5.08	57.43	1.62	2.65	2950.53	61.02	4206.46	0.03	4.78
50	20.7	2508	52.22	93.82	123.22	2.02	3.63	50.25	1.42	2.55	2681.47	55.65	3816.23	0.02	2.68
57	19.7	2443	50.86	91.92	215.94	3.54	6.40	33.02	0.93	1.68	2691.96	55.33	3805.31	0.00	2.43
64	17.8	1262.75	26.29	85.59	225.7	3.70	12.04	25.84	0.73	2.37	1514.29	30.72	2165.98	0.93	3.62
71	17.5	1368	28.48	88.38	201.3	3.30	10.24	15.79	0.45	1.38	1585.09	32.23	2221.70	0.02	4.6
78	16.5	1086	22.61	85.99	195.2	3.20	12.17	17.23	0.49	1.85	1298.43	26.30	1816.15	0.00	3.82
85	17.4	980	20.40	85.17	183	3.00	12.52	19.62	0.55	2.31	1182.62	23.96	1651.87	0.03	4.72
106	18.9	1252	26.07	88.01	174.46	2.86	9.65	24.50	0.69	2.33	1450.96	29.62	2084.25	0.18	3.7
115	18.9	840	17.49	83.68	162.26	2.66	12.72	26.61	0.75	3.59	1028.87	20.90	1488.22	0.40	2.99
132	19.4	755	15.72	78.50	219.6	3.60	17.97	25.08	0.71	3.53	999.68	20.03	1442.91	0.41	3.01
139	18.9	770	16.03	82.65	161.65	2.65	13.66	25.36	0.72	3.69	957.01	19.40	1388.10	0.23	3.58
146	19.4	855	17.80	81.01	213.5	3.50	15.92	23.92	0.67	3.07	1092.42	21.97	1581.00	0.34	4.51
162	21.5	910	8.95	80.11	95.98	8.18	15.92	23.92	0.67	3.07	138.05	3.65	169.44	0.79	3.74

Utilizado para la modelación geoquímica.

Tabla 23. Metales lixiviados en la columna de lixiviación COL-4

días	Al	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	mg/l total	mg/l acumulados
30	0.033	0.066	0.003	0.008	0.002	0.000	0.005	0.069	0.187	2.714	5.10
43	0.011	0.115	0.001	0.05	0.022	*	0.18	0.007	0.24	2.95	6.05
50	0.020	0.071	0.001	0.004	0.015	*	0.29	0.006	0.29	2.08	8.13
57	0.075	0.114	0.002	0.023	0.03	*	0.33	0.004	0.15	2.72	10.85
64	0.037	0.075	0.046	0.051	0.095	12.9	**	**	4.32	17.56	28.41
71	0.039	0.06	0.044	0.053	0.061	19.6	**	**	3.75	23.61	82.71
78	0.043	0.045	0.044	0.05	0.058	23	**	**	3.76	27.00	109.71
85	0.056	0.045	0.041	0.051	0.076	31.8	**	**	5.67	37.73	147.44
106	0.019	0.04	**	**	0.002	37	**	**	3.92	41.19	188.63
115	0.005	0.01	**	**	0.006	40.9	**	**	0.04	44.86	274.13
132	0.05	0.11	**	**	**	40.3	**	**	0.033	44.42	318.55
139	0.062	0.13	0.02	0.04	**	39.2	**	**	0.014	43.83	362.38
146	0.021	0.02	0.04	0.04	**	41	**	**	**	46.38	408.77
162	0.021	0.02	0.04	0.04	**	41	**	**	**	46.38	408.77
185	0.021	0.02	0.04	0.04	**	41	**	**	**	46.38	408.77

* No analizado.

** No detectado por el equipo (concentración <0.001 mg/l)

Utilizado para la modelación geoquímica.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Tabla 26. mg de soluto extraídos de la columna de lixiviación COL-4

días	Ca ²⁺ mg	Mg ²⁺ mg	Na ⁺ mg	K ⁺ mg	SO ₄ ²⁻ mg	HCO ₃ ⁻ mg	Cl ⁻ mg	Si mg	Al mg	Cd mg	Cr mg	Cu mg	Fe mg	Ni mg	Pb mg	Mn mg	Zn mg
36	166.00	78.00	125.60	38.44	906.70	67.10	35.61	2.43	0.004	0.026	0.00	0.003	0.0004	0.0040	0.028	0.42	0.75
43	208.20	24.73	113.88	17.67	789.57	55.22	16.77	1.40	0.010	0.034	0.00	0.015	0.0065	0.0016	0.002	0.00	0.79
50	179.47	23.73	90.69	15.73	687.19	33.76	13.77	0.73	0.003	0.019	0.00	0.001	0.0041	0.0016	0.002	0.00	0.54
57	179.15	26.63	77.74	14.58	657.17	58.09	8.88	0.65	0.005	0.031	0.00	0.006	0.0081	0.0024	0.001	0.00	0.68
64	82.49	18.14	28.78	18.14	295.48	52.81	6.05	0.85	0.018	0.018	0.01	0.012	0.0222	0.0000	0.000	3.02	1.01
71	112.02	58.05	31.82	23.87	504.55	98.62	8.44	1.80	0.018	0.024	0.01	0.021	0.0249	0.0000	0.000	11.05	2.04
78	64.47	33.72	35.69	16.40	337.90	49.72	3.90	1.14	0.009	0.015	0.01	0.013	0.0151	0.0000	0.000	4.84	0.93
85	43.67	25.24	20.02	11.37	223.72	40.21	3.55	0.79	0.008	0.009	0.00	0.010	0.0119	0.0000	0.000	4.74	0.77
106	138.50	92.22	27.21	39.12	682.08	127.37	13.66	3.29	0.030	0.037	0.03	0.033	0.0487	0.0000	0.000	22.13	3.95
115	218.96	25.51	11.90	23.70	595.95	83.04	11.66	1.76	0.027	0.021	0.02	0.024	0.0362	0.0000	0.000	17.61	1.87
123	87.72	19.20	3.84	16.38	264.14	52.70	7.92	0.71	0.002	0.008	0.00	0.000	0.0003	0.0000	0.011	12.18	1.25
132	73.58	15.73	3.30	14.38	218.40	42.19	6.92	0.78	0.000	0.005	0.00	0.000	0.0005	0.0000	0.010	10.63	1.01
139	63.99	12.82	2.38	12.24	174.41	50.73	5.79	0.70	0.011	0.001	0.00	0.000	0.0014	0.0000	0.008	9.31	0.93
146	77.76	14.98	2.50	15.26	221.76	46.56	7.30	1.03	0.000	0.014	0.00	0.000	0.0003	0.0000	0.004	11.29	1.32
162	69.51	10.08	1.82	10.50	179.55	44.84	5.02	0.95	0.000	0.013	0.00	0.000	0.0002	0.0000	0.000	8.61	1.11
185	258.77	29.10	7.22	47.72	644.28	137.34	38.28	4.06	0.001	0.018	0.00	0.000	0.0007	0.0000	0.000	31.65	1.40
mg totales	2024.25	507.86	584.41	335.49	7382.84	1040.29	193.52	23.06	0.146	0.293	0.10	0.139	0.1816	0.0056	0.065	147.49	20.35
mg cationes	3452.02	% cationes	28.21	mg aniones	8616.66	% aniones	70.41	mg metales	108.78	% metales	1.37	% silicio	0.188	mg totales	12260.51		

ANEXO G
EVOLUCIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE SOLUTOS
LIXIVIADOS POR CELDA HÚMEDA
CONCENTRACIÓN Y MASA LIXIVIADA DE LAS CELDAS
HÚMEDAS: JPM-1, JPM-2, JPM-3, JPM-4, JPM-5 Y JPM-6

Tabla 31. Cationes lixiviados en la celda húmeda JPM-1

ciclo	Ca ²⁺		Na ⁺		Mg ²⁺		K ⁺		mg/l	meq/l total	pH	C. E mS/cm
	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l				
1	551	88.59	177	7.26	2620	25.77	63.81	1.6	325.30	16.34	6.42	1.73
2	239	72.98	40.3	10.73	26.20	13.19	19.80	0.51	446.06	22.75	7.42	2.49
3	338.7	74.27	35.49	6.78	43.60	15.76	28.27	0.72	133.46	6.97	7.59	0.87
4	111	79.49	2.46	1.54	14.30	16.88	5.70	0.15			7.36	
5	147.9	85.43	27.2	2.6	9.49	9.0	2.63	0.22			8.6	
6	72.4	88.38	1.44	1.53	3.50	7.04	4.87	0.12	82.21	4.09	7.22	0.49
7	365.8	90.39	12.82	2.76	13.50	5.50	10.63	0.27	402.75	20.19	8	2.73
8	198	85.27	8.136	3.05	12.80	9.09	11.70	0.30	230.64	11.59	7.64	1.47
9	233.15	83.72	11.57	3.62	17.00	10.06	14.10	0.36	275.82	13.90	7.71	1.74
10	277.8	76.03	28.9	3.71	24.74	13.7	13.13	0.33	297.01	14.93	7.89	1.77
11	171.51	81.69	12.49	5.19	14.00	10.99	8.73	0.22	206.73	10.48	7.82	1.28
12	144.71	89.16	5.3	2.85	5.52	5.61	7.56	0.19	163.09	8.10	6.96	1.08
13	103.18	92.26	2.11	1.64	2.99	4.41	3.68	0.09	111.96	5.58	7.97	0.77
14	288.26	88.51	5.31	1.42	15.90	8.05	12.80	0.33	322.27	16.25	8	2.06
15	165.8	87.03	10.4	0.8	6.0	9.16	2.5	0.21	183.43	7.43	7.6	0.74
16	75.1	86.70	0.14	0.14	5.47	10.41	4.64	0.12	85.35	4.32	7.89	0.54
17	52.5	86.24	1.01	1.45	3.32	8.99	3.94	0.10	60.77	3.04	7.97	0.34
18	44.3	87.24	0.61	1.05	2.48	8.05	3.62	0.09	51.01	2.53	8.12	0.28
19	35.3	88.39	**		1.87	7.72	3.03	0.08	40.20	1.99	8.15	0.21
20	52.8	88.16	1.1		1.03	8.11	1.03	0.13	59.33	2.91	7.97	0.32

Las muestras del ciclo 5, 6 y 7 fueron concentradas para analizarlas

** No detectado por el equipo (concentración <0.001 mg/l)

■ Utilizado para la modelación geoquímica.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla 32. Aniones lixiviados en la celda húmeda JPM-1

cielo	temp °C	mg/l	SO ₄ ²⁻ meq/l	%	mg/l	HCO ₃ ⁻ meq/l	%	mg/l	Cl ⁻ meq/l	%	mg/l total	meq/l total	TDS mg/l	error %	Si mg/l
2	20.9	765.15	15.93	95.60	29.89	0.49	2.94	14.84	0.24	1.46	1456.95	99.84	1137.10	-0.98	1.92
3	20.7	1008.7	21.00	93.60	85.4	1.40	6.20	11.01	0.18	0.80	1105.11	22.58	1556.01	0.38	4.83
4	20.9	315.8	6.58	93.29	20.74	0.34	4.82	8.14	0.13	1.89	344.68	7.05	479.44	-0.57	1.30
6	21	155.9	3.25	77.39	53.07	0.87	20.74	4.79	0.08	1.87	213.76	4.19	296.71	-1.28	0.74
7	19.9	894.6	18.63	92.60	84.18	1.38	6.86	6.70	0.11	0.55	985.48	20.12	1390.98	0.19	2.72
8	17.2	493	10.26	92.07	43.92	0.72	6.46	10.05	0.16	1.48	546.97	11.15	779.35	1.92	1.74
9	16.2	617	12.85	93.15	47.58	0.78	5.65	10.05	0.16	1.19	674.63	13.79	954.46	0.38	4.01
10		664		92.08	88.32			8.21		0.30	514.27	10.47	727.66	0.05	6.66
11	16.1	459.9	9.58	91.49	52.46	0.86	8.21	1.91	0.03	0.68	399.49	8.06	565.98	0.25	3.39
12	17.5	341.24	7.10	88.16	54.9	0.90	11.16	3.35	0.05	0.68	277.55	5.56	391.76	0.18	2.24
13	18.4	228.25	4.75	85.47	47.58	0.78	14.02	1.72	0.03	0.51	792.78	16.10	1117.96	0.48	2.91
14	19.6	700.52	14.59	90.61	89.06	1.46	9.07	3.20	0.05	0.33	216.77	4.22	304.48	1.23	2.36
15	19.3	150	3.12	74.05	65.27	1.07	25.36	1.50	0.02	0.58	162.48	3.03	225.42	0.12	2.17
16	19.6	83	1.73	57.02	78.08	1.28	42.22	1.40	0.02	0.76	138.84	2.55	192.44	-0.32	2.59
17	22.6	62	1.29	50.62	75.64	1.24	48.61	1.20	0.02	0.77	115.23	2.01	158.17	-0.38	2.74
18	21.6	27	0.56	27.99	87.23	1.43	71.19	1.00	0.02	0.82					
19				80.60											
20															

Utilizado para la modelación geoquímica.

Tabla 33. Metales lixiviados en la celda húmeda JPM-1

ciclo	Al	Ca	Co	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	total	mg/ acumulados
1	0.098	0.001	0.001	0.003	0.002	0.002	0.002	0.001	0.108	0.50	0.50
2	0.141	0.004	1.54	0.003	0.018	0.024	**	**	0.070	0.26	0.76
3	0.013	0.009	0.45	0.013	0.005	1.740	0.05	0.10	0.204	1.99	2.75
4	0.012	0.007	0.97	0.002	0.001	0.524	1.11	0.14	0.167	0.72	3.47
5	0.016	0.003	0.60	0.003	0.001	*	0.05	0.14	0.167	0.19	3.66
6	0.023	0.003	0.47	**	0.495	*	0.18	3.90	0.197	0.72	4.38
7	0.014	0.005	1.84	0.027	0.032	*	5.71	0.010	0.147	0.25	4.63
8	**	**	**	**	**	0.327	**	**	0.069	0.40	5.02
9	**	**	**	**	**	0.414	**	**	0.104	0.52	5.54
10	0.013	**	**	**	**	0.414	**	**	0.104	0.52	5.54
11	0.095	0.001	1.54	0.001	0.067	0.236	0.22	0.058	0.058	0.46	6.55
12	0.055	0.003	0.70	0.008	0.038	0.242	0.88	0.082	0.082	0.43	6.98
13	0.292	**	**	0.006	0.236	0.169	29.57	0.095	1.080	0.80	7.78
14	0.002	0.013	0.15	**	**	7.360	86.54	0.050	1.080	8.51	16.29
15	0.073	**	**	**	0.082	0.217	20.45	0.024	0.024	0.40	17.51
16	0.110	**	**	**	0.019	0.430	3.04	0.065	0.065	0.62	18.14
17	0.061	**	**	**	0.092	0.106	28.22	0.067	0.067	0.33	18.46
18	0.073	**	**	**	0.138	0.040	45.85	0.050	0.050	0.30	18.77
19	0.073	**	**	**	0.138	0.040	45.85	0.050	0.050	0.30	18.77
20	0.073	**	**	**	0.138	0.040	45.85	0.050	0.050	0.30	18.77

Las muestras del ciclo 5,6 y 7 fueron concentradas para analizarlas

* No analizado.

** No detectado por el equipo (concentración <0.001 mg/l)

Utilizado para la modelación geoquímica.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla 49. mg de soluto extraídos de la celda húmeda JPM-1

	Ca ²⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	Si	Al	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni	Pb	Zn	Mn
ciclo	mg	mg	mg	mg	mg	mg	mg	mg	mg	mg	mg	mg	mg	mg	mg	mg	mg
1	108.9	26.15	26.81	19.52	411.6	7.5	26.80	0.97	0.03	0.005	0.0003	0.073	0.006		0.003	0.033	0.002
2	67.2	11.32	7.36	5.56	215.0	8.4	4.17	0.54	0.04	0.001		0.001	0.005			0.020	0.007
3	151.7	15.90	19.53	12.67	451.9	38.3	4.93	2.16	0.01	0.004		0.006	0.002		0.001	0.091	0.780
4	56.3	1.25	7.25	2.89	160.1	10.5	4.12	0.66	0.01	0.004	0.0005	0.001	0.001	0.004	0.001	0.085	0.266
5	37.3	1.32	2.40	2.44	98.6	6.5	1.57	0.48		0.001		0.002	0.004		0.002	0.034	
6	19.3	0.38	0.93	1.30	41.6	14.2	1.28	0.20	0.01	0.001		0.005	0.132		0.002	0.053	
7	73.2	2.56	2.70	2.13	178.9	16.8	1.34	0.54		0.001		0.005	0.006	0.003	0.002	0.029	0.080
8	48.7	2.00	3.15	2.88	121.3	10.8	2.47	0.43								0.017	0.080
9	53.9	2.67	3.93	3.26	142.5	11.0	2.32	0.93								0.024	0.096
10	100.2	12.72	10.65	5.76	290.4	30.1	1.68	3.67	0.01							0.049	0.191
11	42.5	3.10	3.47	2.17	114.1	13.0	0.47	1.65	0.02		0.0002		0.017			0.014	0.059
12	36.0	1.32	1.37	1.88	85.0	13.7	0.83	0.84	0.01		0.0007	0.002	0.009			0.020	0.060
13	55.3	1.13	1.60	1.97	122.3	25.5	0.92	1.20	0.16			0.003	0.126			0.051	0.091
14	107.5	1.98	5.93	4.77	261.3	33.2	1.19	1.09		0.005					0.019	0.403	2.745
15	55.4	0.38	3.92	2.76	137.4	13.3	0.55	0.74	0.01				0.017		0.006	0.033	0.212
16	26.8	0.05	1.95	1.65	53.6	23.3	0.54	0.84	0.03				0.029		0.002	0.009	0.077
17	19.8	0.38	1.25	1.49	31.4	29.5	0.53	0.82	0.04				0.007			0.025	0.163
18	16.3	0.23	0.92	1.34	22.9	27.9	0.44	0.96	0.02				0.034			0.025	0.039
19	11.3		0.60	0.97	8.6	27.9	0.32	0.88	0.02				0.044			0.016	0.013
20	15.6		0.91	1.20	25.5	20.8	0.27	0.89					0.035			0.016	0.031
totales	1103.4	84.85	106.63	78.61	2974.0	382.1	56.77	20.48	0.72	0.022	0.0018	0.064	0.476	0.098	0.035	1.013	4.910
total cationes	1373.5	84.85	28.532	78.61	3412.9	382.1	70.898	20.48	6.98	0.022	0.1450	0.064	0.425	0.098	4811.8		

Tabla 34. Cationes lixiviados en la celda húmeda JPM-2

ciclo	Ca ²⁺		Na ⁺		Mg ²⁺		K ⁺		mg/l total	%	mg/l total	%	pH	C. E. mS/cm
	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l						
1	287.00	14.35	90.80	3.95	5.56	0.46	12.20	0.31	289.64	3.10	215.56	3.10	7.45	1.18
2	107.00	5.34	67.29	2.93	13.60	1.12	10.37	0.27	262.26	2.07	262.26	2.07	7.69	1.49
3	171.00	8.53	19.10	0.83	0.98	0.08	3.44	0.09	51.44	3.68	51.44	3.68	7.48	0.419
4	287.22	14.35	90.80	3.95	5.56	0.46	12.20	0.31	289.64	3.10	215.56	3.10	7.45	1.18
5	286.38	14.29	98.02	4.26	32.70	2.69	20.95	0.54	438.05	2.46	438.05	2.46	7.64	2.04
6	294.99	14.72	60.53	2.63	24.00	1.97	15.63	0.40	395.14	2.03	395.14	2.03	7.76	1.85
7	220.29	10.99	26.10	1.14	14.90	1.23	13.30	0.34	274.59	2.48	274.59	2.48	7.74	1.4
8	275.70	13.76	45.97	2.00	20.80	1.71	16.10	0.41	358.57	2.30	358.57	2.30	7.93	1.73
9	205.80	10.27	39.59	1.72	20.40	1.68	12.30	0.31	278.09	2.25	278.09	2.25	7.88	1.33
10	185.00	9.23	23.30	1.01	10.50	0.86	11.10	0.28	229.90	2.49	229.90	2.49	7.81	1.22
11	130.00	6.49	23.00	1.00	3.27	0.27	5.17	0.13	161.44	1.68	161.44	1.68	7.91	0.87
12	78.50	3.92	18.80	0.82	10.80	0.89	10.10	0.26	118.20	4.39	118.20	4.39	8.06	0.53
13	49.25	2.46	5.17	0.22	5.90	0.49	6.02	0.15	66.34	4.63	66.34	4.63	7.98	0.32
14	57.85	2.89	7.86	0.34	7.61	0.63	7.55	0.19	80.87	4.77	80.87	4.77	8.07	0.38
15	40.65	2.03	3.94	0.17	5.27	0.43	6.19	0.16	56.05	5.67	56.05	5.67	8.06	0.28
16	34.70	1.73	1.84	0.08	4.65	0.38	5.01	0.13	46.20	5.52	46.20	5.52	8.1	0.225
17	287.22	14.35	90.80	3.95	5.56	0.46	12.20	0.31	289.64	3.10	215.56	3.10	7.45	1.18
18	286.38	14.29	98.02	4.26	32.70	2.69	20.95	0.54	438.05	2.46	438.05	2.46	7.64	2.04
19	294.99	14.72	60.53	2.63	24.00	1.97	15.63	0.40	395.14	2.03	395.14	2.03	7.76	1.85
20	220.29	10.99	26.10	1.14	14.90	1.23	13.30	0.34	274.59	2.48	274.59	2.48	7.74	1.4

Las muestras del ciclo 5, 6 y 7 fueron concentradas para analizarlas

* No analizado.

** No detectado por el equipo (concentración <0.001 mg/l)

Utilizado para la modelación geoquímica.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Tabla 35. Aniones lixiviados en la celda húmeda JPM-2

ciclo	temp °C	mg/l	SO ₄ ²⁻ meq/l	%	mg/l	HCO ₃ ⁻ meq/l	%	mg/l	Cl ⁻ meq/l	%	total mg/l	total meq/l	TDS mg/l	error %	Si mg/l
1	20.9	430	8.953	89.33	40.52	0.6641	6.63	14.357	0.405	4.04	484.88	10.02	700.45	0.18	0.01
2	20.6	553	11.51	89.66	55.51	0.9097	7.08	14.836	0.419	3.26	623.35	12.84	886.87	0.01	1.26
3	21	100	2.082	86.65	14.64	0.2399	9.98	2.87	0.081	3.37	117.51	2.40	173.21	-0.22	4.26
4	21.4	990	20.61	94.74	42.7	0.6998	3.22	15.793	0.446	2.05	1048.49	21.76	1489.69	0.05	3.15
5	20	894.96	18.63	94.44	51.24	0.8397	4.26	9.093	0.257	1.30	955.29	19.73	1354.21	-0.01	3.76
6	17.2	609.6	12.69	92.68	51.24	0.8397	6.13	5.749	0.162	1.18	666.59	13.69	942.32	0.00	1.14
7	16.1	804	16.74	93.75	54.9	0.8997	5.04	7.657	0.216	1.21	866.56	17.86	1229.17	0.07	4.05
8	16.1	628	13.08	93.52	53.68	0.8797	6.29	0.957	0.027	0.19	682.64	13.98	966.42	0.01	5.69
9	17.6	489	10.18	89.77	65.88	1.0796	9.52	2.871	0.081	0.71	557.75	11.34	791.00	0.22	3.34
10	18.4	322.48	6.714	87.81	48.8	0.7997	10.46	4.69	0.132	1.73	375.97	7.65	539.38	1.56	1.95
11	19.1	203	4.227	72.76	81.74	1.3396	23.06	8.61	0.243	4.18	293.35	5.81	413.55	0.62	2.00
12	19.3	86	1.791	54.48	75.64	1.2396	37.72	9.09	0.256	7.80	170.73	3.29	239.47	0.53	2.40
13	19.4	108	2.249	55.38	96.38	1.5795	38.90	8.23	0.232	5.72	212.61	4.06	295.16	-0.15	1.67
14	22.5	57.55	1.198	42.93	76.86	1.2596	45.13	11.82	0.333	11.95	146.23	2.79	204.49	0.01	2.20
15	21.2	31.31	0.652	28.06	87.84	1.4395	61.95	8.23	0.232	9.99	127.38	2.32	175.34	-0.03	1.75

Utilizado para la modelación geoquímica.

Tabla 36. Metales lixiviados en la celda húmeda JPM-2

ciclo	mg/l	Al	mg/l	Cd	mg/l	Cr	mg/l	Cu	mg/l	Fe	mg/l	Mn	%	Ni	mg/l	Pb	%	Zn	mg/l	mg/l	mg/l	acumulados	
1	0.027	29.33	0.002	0.74	0.002	0.038	0.1	36.9	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032
2	0.095	35.06	0.002	0.74	0.002	0.038	0.1	36.9	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032
3	0.05	6.68	0.002	0.27	0.002	0.005	0.622	83.16	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
4	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
5	0.019	14.77	0.002	0.78	0.002	0.002	0.153	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
6	0.0026	1.13	0.0028	1.20	0.0028	0.0049	2.12	0.0049	0.0049	0.0049	0.0049	0.0049	0.0049	0.0049	0.0049	0.0049	0.0049	0.0049	0.0049	0.0049	0.0049	0.0049	0.0049
7	**	**	**	3.44	0.0026	0.0004	0.52	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004
8	**	**	**	**	**	**	2.67	0.146	0.146	0.146	0.146	97.33	0.146	0.146	0.146	0.146	0.146	0.146	0.146	0.146	0.146	0.146	0.146
9	**	**	**	**	**	**	0.00	0.141	0.141	0.141	0.141	91.56	0.141	0.141	0.141	0.141	0.141	0.141	0.141	0.141	0.141	0.141	0.141
10	0.034	19.53	0.001	0.38	0.001	0.084	32.18	0.084	0.084	0.084	0.084	32.57	0.084	0.084	0.084	0.084	0.084	0.084	0.084	0.084	0.084	0.084	0.084
11	0.075	28.74	**	**	**	0.022	16.30	0.022	0.022	0.022	0.022	45.93	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022
12	0.048	35.56	**	**	**	0.386	39.79	0.386	0.386	0.386	0.386	14.95	0.386	0.386	0.386	0.386	0.386	0.386	0.386	0.386	0.386	0.386	0.386
13	0.342	35.26	**	**	**	0.117	42.70	0.117	0.117	0.117	0.117	17.15	0.117	0.117	0.117	0.117	0.117	0.117	0.117	0.117	0.117	0.117	0.117
14	0.11	40.15	**	**	**	0.037	39.15	0.037	0.037	0.037	0.037	8.282	0.037	0.037	0.037	0.037	0.037	0.037	0.037	0.037	0.037	0.037	0.037
15	0.29	36.10	**	**	**	0.449	12.25	0.449	0.449	0.449	0.449	17.88	0.449	0.449	0.449	0.449	0.449	0.449	0.449	0.449	0.449	0.449	0.449
16	0.527	45.95	**	**	**	0.008	2.65	0.008	0.008	0.008	0.008	10.68	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
17	0.15	49.67	**	**	**	0.01	1.48	0.01	0.01	0.01	0.01	11.72	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
18	0.251	37.24	**	**	**	0.005	1.20	0.005	0.005	0.005	0.005	11.72	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
19	0.095	22.73	**	**	**	0.001	0.07	0.001	0.001	0.001	0.001	11.72	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
20	0.298	28.99	**	**	**	0.001	0.07	0.001	0.001	0.001	0.001	11.72	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001

Las muestras del ciclo 5, 6 y 7 fueron concentradas para analizarias

* No analizado.

** No detectado por el equipo (concentración <0.001 mg/l)

Utilizado para la modelación geoquímica.

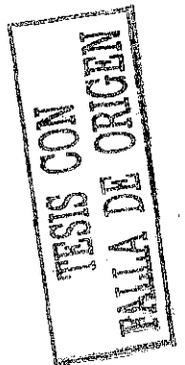


Tabla 50. mg de soluto extraídos de la celda húmeda JPM-2

ciclo	Ca ²⁺ mg	Na ⁺ mg	Mg ²⁺ mg	K ⁺ mg	SO ₄ ²⁻ mg	HCO ₃ ⁻ Mg	Cl ⁻ mg	Si mg	Al mg	Cd mg	Cr mg	Cu mg	Fe mg	Ni mg	Pb mg	Zn mg	Mn mg
1	77.83	140.25	15.24	11.33	503.25	10.07	24.74	0.63	0.007	0.003	0.0000	0.007	0.005		0.001	0.013	
2	34.13	28.97	1.77	3.89	137.17	12.93	4.58		0.030	0.001	0.00006	0.001	0.012			0.010	0.032
3	83.79	32.97	6.66	5.08	270.97	27.20	7.27	0.62	0.025	0.001		0.004	0.002	0.001		0.028	0.305
4	4.77	3.27	0.17	0.59	17.10	2.50	0.49	0.73									
5	75.83	21.91	7.71	5.52	248.42	11.27	5.31	0.96	0.005			0.003	0.005			0.020	
6	73.60	25.19	8.40	5.38	254.43	10.97	4.06	0.81	0.001	0.001			0.001			0.056	
7	62.83	12.89	5.11	3.33	190.63	10.91	1.94	0.80		0.001		0.003		0.001		0.011	
8	64.77	7.67	4.38	3.91	179.22	15.06	1.69	0.34					0.001				0.043
9	52.93	8.83	3.99	3.09	154.37	10.54	1.47	0.78	0.020							0.002	0.027
10	85.32	22.80	11.14	5.85	281.40	24.58	1.89	2.98			0.0003		0.017			0.012	0.055
11	60.51	11.64	6.00	3.62	184.63	15.78	0.28	1.67	0.022				0.025			0.005	0.025
12	56.98	7.18	3.23	3.42	150.61	20.29	0.88	1.03	0.015			0.001	0.007			0.000	0.019
13	67.99	12.03	1.71	2.70	168.66	25.52	2.45	1.02	0.179			0.013	0.202			0.038	0.076
14	32.42	7.76	4.46	4.17	83.84	33.76	3.56	0.83	0.045				0.048			0.019	0.019
15	17.62	2.11	2.20	1.97	39.16	19.97	1.38	0.54	0.065				0.082		0.009	0.003	0.020
16	16.06	1.69	1.92	1.96	28.04	24.66	2.96	0.78	0.172				0.146		0.008	0.016	0.031
17	24.12	3.28	3.17	3.15	45.04	40.19	3.43	0.70	0.063			0.003	0.015		0.008	0.015	0.023
18	14.02	1.36	1.82	2.14	19.85	26.52	4.08	0.76	0.087			0.003	0.095			0.022	0.025
19	12.08	0.64	1.62	1.74	10.90	30.57	2.86	0.61	0.033			0.002	0.076			0.017	0.017
20	12.30	0.34	1.54	1.72	12.58	21.63	6.52	0.72	0.085			0.003	0.129		0.010	0.024	0.042
21	29.96	7.76	2.24	4.52	280.07	84.87	8.84	2.28	0.958	0.009	0.0009	0.074	0.870	0.002	0.026	0.294	0.758
22	44.91	7.76	2.24	4.52	44.69	84.87	8.84	2.28	0.958	0.009	0.0009	0.074	0.870	0.002	0.026	0.294	0.758

Tabla 37. Cationes lixiviados en la celda húmeda JPM-3

ciclo	Ca ²⁺		Na ⁺		Mg ²⁺		K ⁺		mg/l		meq/l		pH	C. E mS/cm
	mg/l	%	mg/l	meq/l	mg/l	%	mg/l	%	total	%	total	total		
1	143	70.85	26.2	1.14	17.6	11.32	13.60	0.35	200.40	12.96	200.40	10.07	7.48	1.18
2	208	72.68	18.89	0.82	31.5	5.75	19.07	0.49	277.46	15.82	277.46	14.28	7.35	1.38
3	177	86.77	14.4	0.63	5.69	6.15	9.88	0.25	206.97	4.50	206.97	10.18	7.41	1.17
4	190.82	80.91	13.42	0.58	15.7	4.94	15.43	0.40	237.09	9.91	237.09	11.76	7.74	1.25
5	220.56	78.87	19.68	0.86	19.5	6.13	19.12	0.49	278.86	10.65	278.86	13.96	7.66	1.38
6	190.82	78.69	18.325	0.80	17.3	6.59	14.03	0.36	240.47	10.81	240.47	12.10	7.7	1.25
7	205.05	85.59	4.3	0.19	14.5	1.56	13.40	0.34	237.25	9.32	237.25	11.95	7.78	1.26
8	163.16	82.57	9.07	0.39	12.7	4.00	10.90	0.28	195.83	9.83	195.83	9.86	7.95	1.04
9	135	79.77	5.01	0.22	15.7	2.58	7.78	0.20	163.49	13.54	163.49	8.45	7.98	0.85
10	125	89.32	0.6	0.03	6.65	0.37	6.76	0.17	139.01	7.44	139.01	6.98	7.82	0.78
11	90.12	94.19	0.648	0.03	2.31	0.59	2.31	0.06	95.39	3.87	95.39	4.77	7.97	0.54
12	60.93	82.87	1.52	0.07	5.28	1.80	5.01	0.13	72.74	10.93	72.74	3.67	8.13	0.37
13	39.89	85.49	**		3.04		3.44	0.09	46.36	9.84	46.36	2.33	8.04	0.23
14	43.94	83.18	1.29	0.06	3.49	2.13	3.92	0.10	52.64	10.17	52.64	2.64	8.1	0.26
15	33	84.91	0.735	0.03	2.09	1.65	3.47	0.09	39.30	8.50	39.30	1.94	8.05	0.19
16	31.22	87.19	**		1.93		2.74	0.07	35.89	8.47	35.89	1.79	8.11	0.17
17	28.06	86.53	7		2		1.70	0.09	44.26	8.91	44.26	2.20	8.1	0.21

Las muestras del ciclo 5, 6 y 7 fueron concentradas para analizarlas

* No analizado.

** No detectado por el equipo (concentración <0.001 mg/l)

Utilizado para la modelación geoquímica.

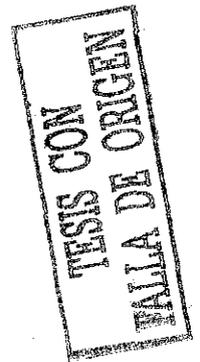


Tabla 38. Aniones lixiviados en la celda húmeda JPM-3

ciclo	temp °C	mg/l	SO ₄ ²⁻ meq/l	%	mg/l	HCO ₃ ⁻ meq/l	%	mg/l	Cl meq/l	%	total mg/l	total meq/l	TDS mg/l	error %	Si mg/l
2	21.1	375	7.81	77.75	45.75	0.75	7.47	52.64	1.48	14.79	473.39	10.04	675.15	0.14	0.95
3	20.5	634	13.20	92.56	29.28	0.48	3.36	20.58	0.58	4.07	683.86	14.26	963.95	0.07	1.36
4	20.8	448	9.33	92.73	23.18	0.38	3.78	12.44	0.35	3.49	483.62	10.06	692.08	0.60	1.48
6	21.2	627	13.05	93.58	39.04	0.64	4.59	9.09	0.26	1.84	675.13	13.95	956.13	0.02	1.90
7	19.2	546	11.37	94.03	34.16	0.56	4.63	5.74	0.16	1.34	585.90	12.09	829.03	0.05	2.05
8	17	526	10.95	91.62	51.24	0.84	7.02	5.75	0.16	1.36	582.99	11.95	821.28	0.00	0.97
9	15.9	424	8.83	89.51	54.90	0.90	9.12	4.79	0.14	1.37	483.86	9.87	682.73	-0.03	2.95
10	17.7	355.77	7.41	87.71	58.56	0.96	11.36	2.78	0.08	0.93	417.11	8.45	585.92	0.00	5.00
11	16.1	288.82	6.01	86.23	56.12	0.92	13.19	1.44	0.04	0.58	346.38	6.97	488.61	0.07	3.00
12	17.6	180	3.75	79.74	50.02	0.82	17.44	4.69	0.13	2.82	234.71	4.70	332.57	0.79	1.57
13	19.7	120	2.50	67.58	61.61	1.01	27.31	6.70	0.19	5.11	188.31	3.70	263.23	-0.38	1.58
14	19.3	120	2.50	67.58	61.61	1.01	27.31	6.70	0.19	5.11	188.31	3.70	263.23	-0.38	1.58
15	19.2	53	1.10	47.08	67.10	1.10	46.92	4.98	0.14	5.99	125.08	2.34	173.74	-0.32	1.59
16	19.2	56	1.17	43.97	73.20	1.20	45.24	10.15	0.29	10.79	139.35	2.65	193.01	-0.29	0.80
17	19.5	16	0.33	17.04	78.69	1.29	65.97	11.77	0.33	16.99	106.46	1.95	147.02	-0.40	0.86
18	23	16	0.33	17.04	78.69	1.29	65.97	11.77	0.33	16.99	106.46	1.95	147.02	-0.40	0.86
19	21.3	17.31	0.36	20.10	71.37	1.17	65.22	9.33	0.26	14.68	98.01	1.79	135.01	-0.18	0.91
20	22.7	21	0.36	20.10	71.37	1.17	65.22	9.33	0.26	14.68	98.01	1.79	135.01	-0.18	0.91

Utilizado para la modelación geoquímica.

Tabla 39. Metales lixiviados en la celda húmeda JPM-3

ciclo	Al	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	mg/l total	mg/l acumulados
1	0.032	0.001	0.24	0.011	0.04	0.00	0.00	0.00	0.071	0.41	0.188
2	0.321	0.006	0.001	0.011	2.68	0.00	0.00	0.00	0.071	0.41	0.598
3	0.014	0.013	0.004	0.009	0.71	0.00	0.00	0.79	1.218	1.268	1.866
4	**	**	**	**	0.00	0.00	100.00	0.00	**	0.003	1.869
5	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2
6	0.026	0.0036	**	0.005	2.17	0.00	0.00	0.00	0.1976	0.2322	2.232
7	**	**	0.2186	0.2858	46.98	0.00	0.04	0.61	0.0968	0.6085	2.841
8	**	0.0033	**	**	0.00	0.00	6.62	0.00	0.074	0.0792	2.92
9	**	**	**	**	0.00	43.75	0.00	0.00	0.054	0.096	3.016
10	0.023	0.007	0.58	0.00	0.042	25.00	0.00	0.00	0.088	0.172	3.188
11	0.119	0.001	0.31	0.092	28.57	13.04	0.00	0.00	0.068	0.322	3.51
12	0.067	**	**	0.034	14.91	24.12	0.00	0.00	0.071	0.228	3.738
13	0.42	**	0.005	0.297	33.00	9.67	0.00	0.00	0.091	0.9	4.638
14	0.28	**	**	0.204	34.17	9.21	0.00	2.68	0.042	0.597	5.235
15	0.24	**	**	0.224	0.055	0.05	0.00	0.00	0.041	0.702	5.942
16	0.347	**	**	0.239	34.05	7.12	0.00	3.56	0.041	0.702	6.644
17	0.107	**	**	0.002	0.89	24.11	0.00	0.00	0.061	0.224	6.868
18	0.144	**	**	0.147	36.30	13.58	0.00	0.00	0.059	0.405	7.273
19	0.032	**	**	0.08	39.60	20.30	0.00	0.00	0.049	0.202	7.475
20	0.24	**	**	0.12	0.041	0.18	0.00	0.00	**	**	**

Las muestras del ciclo 5, 6 y 7 fueron concentradas para analizarlas

* No analizado.

** No detectado por el equipo (concentración <0.001 mg/l)

■ Utilizado para la modelación geoquímica.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Tabla 51. mg de soluto extraídos de la celda húmeda JPM-3

ciclo	Ca ²⁺ mg	Na ⁺ mg	Mg ²⁺ mg	K ⁺ mg	SO ₄ ²⁻ mg	HCO ₃ ⁻ mg	Cl ⁻ mg	Si mg	Al mg	Cd mg	Cr mg	Cu mg	Fe mg	Ni mg	Pb mg	Zn mg	Mn mg
1	97.98	19.33	27.08	71.50	483.26	17.31	10.30	0.53	0.010	0.005		0.002	0.004			0.040	
2	41.47	3.94	5.10	7.60	108.75	13.27	15.27	0.28	0.093	0.002	0.0003		0.003			0.021	
3	146.43	13.43	22.18	13.30	446.34	20.61	14.49	0.96	0.010	0.009		0.003	0.006	0.0021	0.007	0.857	
4	64.96	3.63	2.09	5.28	164.42	8.51	4.57	0.54				0.001	0.001			0.032	
5	53.05	4.30	4.25	3.73	147.90	6.78	1.86	0.40	0.003	0.001		0.001	0.001	0.0001		0.051	
6	57.35	4.97	5.07	5.12	163.02	10.15	2.36	0.49	0.007	0.001		0.039	0.001	0.0009	0.001	0.017	
7	33.78	2.48	3.06	3.24	96.64	6.05	1.02	0.36					0.051			0.032	
8	88.58	5.79	6.26	1.86	227.23	22.14	2.48	0.42								0.010	0.008
9	31.65	2.11	2.46	1.76	82.29	10.65	0.93	0.57	0.014		0.0004		0.002			0.034	0.008
10	61.62	4.41	7.86	6.75	179.15	22.36	1.12	2.55	0.036		0.0003		0.028			0.020	0.017
11	40.50	2.33	4.71	1.50	106.73	17.57	0.83	1.50	0.019				0.010			0.020	0.013
12	35.75	1.93	1.90	0.17	82.60	16.05	0.41	0.86	0.222			0.003	0.157			0.048	0.016
13	47.67	1.22	1.22	0.34	95.22	26.46	2.48	0.83	0.121				0.088			0.018	0.024
14	26.38	2.17	2.29	0.66	51.96	26.68	2.90	0.68	0.138				0.097			0.014	0.019
15	17.87	1.34	1.33	0.00	30.10	22.22	1.67	0.61	0.113				0.078			0.013	0.016
16	13.04	1.12	0.99	0.00	17.33	21.94	1.63	0.52	0.042				0.001			0.024	0.021
17	17.40	1.55	1.38	0.51	22.18	28.99	4.02	0.32	0.049				0.050			0.020	0.019
18	11.32	1.19	0.72	0.25	5.49	26.99	4.04	0.30	0.011				0.027			0.017	0.014
19	10.55	0.93	0.65		5.85	24.12	3.15	0.31	0.068				0.060			0.033	0.041
20	10.43	1.01	0.69		5.75	19.89	5.66	0.50									
totales mg	907.78	79.19	74.22	72.58	2592.20	368.73	81.19	73.58	0.957	0.018	0.001	0.048	0.665	0.0031	0.045	1.324	0.253
catiónes mg	1184.77		28.39		2972.12		71.21		3.314		0.0794	silicio %	0.324	totales mg	4173.732		

Tabla 40. Cationes lixiviados en la celda húmeda JPM-4

ciclo	Ca ²⁺		Na ⁺		Mg ²⁺		K ⁺		mg/l total	meq/l total	pH	C.E mS/cm
	mg/l	%	mg/l	%	mg/l	%	mg/l	%				
1	27	71.59	7.7	20.64	12	30.25	5.2	13.46	52.40	1.54	7.36	0.9
2	282	52.84	6.24	23.45	67.3	20.79	30.4	78.2	522.70	0.78	7.49	2.6
3	235	70.26	1.30	7.82	40.2	19.81	13.77	3.52	318.86	0.352	7.63	1.76
4	235	83.20	0.14	0.99	24.3	14.18	8.94	0.229	271.43	0.229	7.48	1.58
5	206	83.67	2.2	2.69	24.6	22.66	10.5	22.75	310.87	0.275	7.77	1.59
6	229.17	82.81	0.45	3.25	19.25	11.47	13.35	0.341	272.05	0.341	7.75	1.36
7	145.31	74.19	1.13	11.58	13.97	11.76	9.42	0.241	194.63	0.241	7.77	1.1
8	235.46	88.72	0.8	0.26	15.3	9.50	7.82	0.2	259.38	0.2	7.75	1.36
9	174.8	88.29	0.19	1.92	9.84	8.19	6.14	0.157	195.13	0.157	7.97	1.05
10	256	77.11	0.676	8.03	15.3	11.36	17.7	11.27	162.46	11.27	8.33	0.8
11	124	83.79	0.255	3.46	10.2	3.92	4	0.102	144.05	0.102	7.91	0.8
12	96.9	91.15	0.18	3.39	2.53	3.36	3.19	0.082	106.74	0.082	7.82	0.63
13	68.2	93.39	0.104	2.86	1.49	3.36	0.55	0.014	72.63	0.014	7.98	0.49
14	47.17	81.70	0.12	4.15	4.01	11.45	3.03	0.077	56.95	0.077	8.33	0.28
15	43.2	88.78	0.004	9.16	2.67	8.88	2.08	0.053	48.01	0.053	8.09	0.76
16	44.61	87.15	0.038	1.49	2.82	9.08	2.27	0.058	50.58	0.058	8.02	0.25
17	42.39	85.17	0.094	3.80	2.6	8.61	2.35	0.060	49.50	0.060	8.15	0.25
18	31.22	86.26	0.046	2.56	1.8	8.20	2.1	0.054	36.18	0.054	8.06	0.18
19	27.89	89.55	**	0.00	1.46	7.73	1.65	0.042	31.00	0.042	8.11	0.145
20	22.1	86.08	**	0.00	1.9	8.83	2.22	0.059	36.68	0.059	8.01	0.19

Las muestras del ciclo 5,6 y 7 fueron concentradas para analizarias

* No analizado.

** No detectado por el equipo (concentración <0.001 mg/l)

Utilizado para la modelación geoquímica.

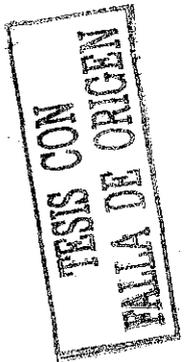


Tabla 41. Aniones lixiviados en la celda húmeda JPM-4

ciclo	Temp. °C	mg/l	SO ₄ ⁻ meq/l	%	mg/l	HCO ₃ ⁻ meq/l	%	mg/l	Cl ⁻ meq/l	%	mg/l total	mg/l total	TDS mg/l	error %	SI mg/l
1	21.1	1142.3	23.782	90.90	38.779	0.6355	3.09	75.615	2.133	6.02	1256.65	26.55	1780.8690	0.15	1.369
2	21	755.8	15.736	93.89	32.94	0.5398	4.09	16.27	0.459	2.02	805.01	16.73	1123.9780	-0.13	0
3	20.8	647.9	13.489	95.62	20.13	0.3299	2.97	9.572	0.27	1.41	677.60	14.09	950.5010	0.02	1.46
4	21.9	622	12.95	92.81	44.835	0.7348	6.69	3.35	0.0945	0.50	670.19	13.78	946.4476	0.11	3.98
5	20.9	440	9.1609	92.80	31.72	0.5198	6.69	2.393	0.0675	0.50	474.11	9.75	669.7084	0.13	0.898
6	19.8	573	11.93	88.42	70.76	1.1596	10.92	4.307	0.1215	0.66	648.07	13.21	909.6570	0.12	2
7	16.8	428	8.9111	89.01	47.58	0.7797	9.90	5.2664	0.1486	1.10	480.85	9.84	680.1564	0.20	3.4
8	15.9	300.88	6.2644	81.72	65.88	1.0796	17.89	1.436	0.0405	0.39	368.20	7.38	518.2420	0.00	5.51
9	17.5	214.52	4.4663	79.78	52.46	0.8597	19.51	1.914	0.054	0.71	268.89	5.38	376.3320	-0.70	**
10	17.7	128.73	2.6802	69.53	53.07	0.8697	28.66	3.35	0.0945	1.81	185.15	3.64	262.4010	0.00	2.3
11	19.1	106	2.207	74.52	30.5	0.4998	21.44	5.74	0.1619	4.04	142.24	2.87	202.0556	0.21	1.84
12	18.7	84	1.7489	66.07	35	0.5736	27.53	8.136	0.2295	6.40	127.14	2.55	179.1371	0.04	0.939
13	20	70.78	1.4737	56.27	46	0.7539	36.57	8.997	0.2538	7.15	125.78	2.48	176.4389	0.05	0.762
14	19.5	39	0.812	42.69	40	0.6555	43.79	12.347	0.3483	13.52	91.35	1.82	130.1448	-0.27	1.51
15	22.9	31	0.6454	38.75	40	0.6555	50.00	8.997	0.2538	11.25	80.00	1.55	112.3375	-0.02	0.0966
16	21.3	28.5	0.5954	22.25	37	0.6064	41.87	12.857	0.6253	17.88	38.33	1.88	127.6897	-0.19	1.39
17	22.2														

Utilizado para la modelación geoquímica.

Tabla 42. Metales lixiviados en la celda JPM-4

ciclo	Al	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	mg/l total	mg/l acumulados
1	0.032	0.008	0.001	0.016	10.32	0.016	0.001	0.099	63.87	0.155	0.301
2	0.009	0.005	0.001	0.001	0.94	0.001	0.001	0.086	81.13	0.106	0.407
3	**	**	**	0.009	100.00	**	**	**	0.00	0.009	0.416
4	0.036	0.006	0.0006	0.0057	2.46	0.0057	0.001	0.2035	87.14	0.2336	0.684
5	0.0203	0.004	**	0.0017	2.49	0.0017	**	0.0336	49.86	0.0674	0.7515
6	**	0.0001	**	**	0.00	0.035	**	0.175	83.33	0.21	0.9615
7	0.00	**	**	0.233	29.87	0.093	**	0.125	16.03	0.78	1.7415
8	0.329	0.21	**	0.153	31.48	0.047	**	0.068	13.99	0.486	2.5465
9	0.218	**	**	0.153	31.48	0.047	**	0.086	12.23	0.703	3.2495
10	0.332	**	0.001	0.219	31.15	0.063	**	0.021	11.85	2.321	5.5705
11	0.968	**	**	0.841	36.23	0.205	**	0.021	1.06	1.0289	6.5994
12	0.541	**	**	0.374	36.35	0.069	**	0.021	0.068	0.546	7.1454
13	0.541	**	**	0.374	36.35	0.069	**	0.021	0.068	0.546	7.1454
14	0.255	**	**	0.167	34.36	0.027	**	0.029	5.97	0.486	7.6314
15	0.247	**	**	0.039	9.73	0.051	**	0.064	15.96	0.401	8.0324
16	0.531	**	**	0.471	42.60	0.087	**	0.0146	1.32	1.1056	9.138
17	0.285	**	**	0.281	22.57	0.56	**	0.119	9.56	1.245	10.383
18	0.285	**	**	0.281	22.57	0.56	**	0.119	9.56	1.245	10.383
19	0.285	**	**	0.281	22.57	0.56	**	0.119	9.56	1.245	10.383
20	0.285	**	**	0.281	22.57	0.56	**	0.119	9.56	1.245	10.383

Las muestras del ciclo 5, 6 y 7 fueron concentradas para analizarlas

* No analizado.

** No detectado por el equipo (concentración <0.001 mg/l)

Utilizado para la modelación geoquímica.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Tabla 52. mg de soluto extraídos de la celda húmeda JPM-4

ciclo	Ca ²⁺ mg	Na ⁺ mg	Mg ²⁺ mg	K ⁺ mg	SO ₄ ²⁻ mg	HCO ₃ ⁻ mg	Cl ⁻ mg	Si mg	Al mg	Cd mg	Cr mg	Cu mg	Fe mg	Ni mg	Pb mg	Zn mg	Mn mg
1	90.42	58.41	39.93	17.29	441.61	18.12	45.17	0.38	0.011	0.005		0.007	0.005			0.020	
2	88.83	45.05	21.20	9.58	359.81	12.22	23.82	0.43	0.010	0.003			0.005			0.031	
3	192.70	24.51	32.96	11.29	619.76	27.01	13.34	0.00	0.007	0.004		0.001	0.001		0.003	0.071	
4	87.42	1.19	9.04	3.33	241.02	7.49	3.56	0.54			0.0004		0.003				
5	175.83	6.29	16.26	7.11	476.58	30.24	4.11	2.07	0.009	0.004	0.0004			0.001	0.008		
6	129.94	5.83	10.91	7.57	352.67	25.42	1.90	2.26	0.012	0.002		0.010	0.003		0.001	0.115	
7	48.39	8.63	4.65	3.14	146.52	10.56	0.80	0.30					0.001			0.011	
8	139.63	0.47	9.07	4.64	339.79	41.96	2.55	1.19								0.104	0.021
9	45.45	1.13	2.56	1.60	111.28	12.37	1.37	0.88	0.086				0.061			0.033	0.024
10	61.48	7.37	6.45	2.27	162.28	34.99	0.91	2.91	0.048				0.028			0.048	0.029
11	44.02	2.08	3.62	1.42	106.81	23.39	0.51	1.96	0.077				0.054			0.024	0.017
12	25.58	1.09	0.67	0.84	56.63	13.85	0.51		0.088		0.0003	0.001	0.058			0.023	0.017
13	39.69	1.39	0.87	0.32	74.92	30.89	1.95	1.34	0.563			0.006	0.489		0.012	0.160	0.119
14	16.98	0.99	1.44	1.09	38.16	10.98	2.07	0.66	0.195			0.005	0.135		0.008	0.004	0.025
15	16.42	0.03	1.00	0.79	32.60	12.92	1.20	0.34	0.095				0.079		0.008	0.014	0.011
16	17.26	0.34	1.09	0.88	32.51	13.55	3.15	0.36	0.099				0.065		0.003	0.011	0.010
17	18.95	0.97	1.16	1.05	31.64	20.56	4.02	0.34	0.110			0.001	0.017			0.029	0.023
18	11.80	0.40	0.68	0.79	14.74	15.12	4.67	0.57	0.201				0.178			0.006	0.033
19	9.79		0.51	0.58	10.88	14.04	3.16	0.03	0.100				0.099			0.042	0.197
20	10.87		0.65	0.77	9.55	12.40	7.66	0.47	0.121				0.119		0.005	0.042	0.028

Tabla 43. Cationes lixiviados en la celda húmeda JPM-5

ciclo	Ca ²⁺		Na ⁺		Mg ²⁺		K ⁺		meq/l total	pH	C. E mS/cm
	mg/l	%	mg/l	meq/l	mg/l	%	mg/l	meq/l			
1	305.11	67.78	45.1	1.96	55.4	8.73	28.10	0.72	433.71	7.22	2.26
2	330.00	79.55	18.09	0.79	35.6	3.80	20.27	0.52	403.96	7.54	2.16
3	258.20	86.99	12.9	0.56	12.6	3.79	12.90	0.33	296.60	7.54	1.61
4	198.41	82.78	14.755	0.64	13.2	5.37	12.95	0.33	239.31	7.69	1.26
5	150.62	83.06	7.15	0.31	10.4	3.44	14.33	0.37	182.50	7.76	0.962
6	159.39	89.81	2	0.09	7.33	0.98	8.29	0.21	177.01	7.77	0.967
7	154.84	85.06	8.67	0.38	9.16	4.15	8.87	0.23	181.54	8.04	0.979
8	106.04	80.03	5.62	0.24	11	3.70	6.68	0.17	129.34	7.85	0.67
9	120.00	88.74	2.38	0.10	5.98	1.53	6.43	0.16	134.79	7.84	0.76
10	81.63	94.90	0.602	0.03	1.84	0.61	1.61	0.04	85.68	8.02	0.5
11	43.78	80.23	1.8	0.08	4.25	2.88	4.32	0.11	54.15	8.1	0.27
12	32.06	84.22	**	**	2.74	0.00	2.91	0.07	37.70	8.02	0.19
13	30.72	81.62	0.869	0.04	2.78	2.01	3.08	0.08	37.45	8.21	0.19
14	27.11	82.34	0.782	0.03	2.2	2.07	2.94	0.08	33.03	8.03	0.16
15	23.28	85.22	**	**	1.73	0.00	2.31	0.06	27.32	8.09	0.12
16	11.56	83.86	**	**	2.77	0.00	2.92	0.06	18.8	8.09	0.12

Las muestras del ciclo 5, 6 y 7 fueron concentradas para analizarias

* No analizado.

** No detectado por el equipo (concentración <0.001 mg/l)

Utilizado para la modelación geoquímica.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla 44. Aniones lixiviados en la celda húmeda JPM-5

ciclo	temp °C	mg/l	SO ₄ ²⁻ meq/l	%	mg/l	HCO ₃ ⁻ meq/l	%	mg/l	Cl ⁻ meq/l	%	mg/l total	meq/l total	TDS mg/l	error %	Si mg/l
1	21	1022.9	21.298	94.81	42.264	0.6926	3.08	16.75	0.4725	2.10	1081.94	22.46	1518.2810	0.00	2.269
2	20.6	924.6	19.25	92.97	40.26	0.6598	3.19	28.236	0.7965	3.85	993.10	20.71	1400.0340	-0.01	2.697
3	20.6	686	14.283	96.61	20.74	0.3399	2.30	5.743	0.162	1.10	712.48	14.78	1011.0370	0.09	1.949
4	20.9	547.32	11.395	95.29	31.11	0.5098	4.26	1.91	0.0539	0.45	580.34	11.96	822.6359	0.00	2.8
5	20.2	405	8.4322	93.42	32.94	0.5398	5.98	1.914	0.054	0.60	439.85	9.03	630.0510	0.13	6.68
6	17	377	7.8493	88.82	51.24	0.8397	9.50	5.264	0.1485	1.68	433.50	8.84	612.5670	0.10	1.84
7	15.9	383	7.9742	87.88	53.68	0.8797	9.70	7.786	0.2196	2.42	444.47	9.07	629.9660	0.06	3.76
8	16.5	273.67	5.6979	86.45	53.68	0.8797	13.35	0.479	0.0135	0.21	327.83	6.59	463.0210	0.16	5.51
9	17.7	289.5	6.0275	89.33	41.48	0.6798	10.07	1.436	0.0405	0.60	332.42	6.75	467.4760	0.00	1.15
10	18.9	164.61	3.4272	79.85	50.02	0.8197	19.10	1.6	0.0451	1.05	216.23	4.29	303.8140	0.00	1.36
11	18.9	74.5	1.5511	56.91	63.44	1.0397	38.14	4.786	0.135	4.95	142.73	2.73	198.6457	-0.05	1.36
12	19.2	27.9	0.5809	30.61	70.15	1.1496	60.58	5.93	0.1673	8.81	103.98	1.90	143.0566	0.04	1.17
13	19.4	22.5	0.4685	24.88	72.56	1.1891	63.15	7.99	0.2254	11.97	103.05	1.88	142.0172	-0.12	1.24
14	22.9	8.5	0.177	10.68	71.46	1.1711	70.67	10.96	0.3092	18.66	90.92	1.66	125.5711	-0.43	1.36
15	21.1	7	0.1457	9.73	68.74	1.1265	75.22	7.99	0.2254	15.05	83.73	1.50	112.2278	-4.71	1.06

Utilizado para la modelación gequímica.

Tabla 45. Metales lixiviados en la celda húmeda JPM-5

ciclo	Al	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	mg/l total	mg/l acumulados
1	0.003	0.004	0.009	0.001	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.329	0.013	0.019	0.001	2.79	5.31	0.019	0.019	0.019	0.358	0.612
3	0.009	0.013	0.001	0.001	0.36	13.98	0.039	0.039	0.039	0.279	0.891
4	**	**	**	0.005	100.00	0.00	**	**	**	0.005	0.896
5	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
6	0.0093	4.99	**	**	36.93	0.00	0.0092	4.94	95.01	0.186	1.09
7	0.3589	0.0007	0.0594	0.3774	0.11	0.00	0.050	0.174	17.05	1.022	2.112
8	**	**	**	**	0.083	51.64	**	**	48.36	0.213	2.325
9	**	**	**	**	0.083	41.50	**	**	58.50	0.2	2.525
10	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075
11	0.115	0.004	0.066	0.066	19.47	17.70	0.066	0.066	28.91	0.339	3.165
12	0.041	0.004	0.013	0.013	4.81	32.22	0.013	0.013	46.30	0.27	3.435
13	0.243	0.004	0.206	0.206	27.39	17.55	0.206	0.168	22.34	0.752	4.187
14	0.133	0.003	0.1399	0.1399	33.96	16.02	0.1399	0.054	13.11	0.412	4.598
15	0.088	0.006	0.061	0.061	29.61	9.22	0.061	0.003	1.46	0.206	5.046
16	0.123	0.006	0.061	0.061	29.61	9.22	0.061	0.003	1.46	0.206	5.046
17	0.133	0.006	0.088	0.088	34.11	18.60	0.088	0.076	27.54	0.276	5.322
18	0.063	0.006	0.04	0.04	33.33	25.83	0.04	0.059	22.87	0.258	5.580
19	**	**	**	**	33.33	25.83	**	0.049	40.83	0.12	5.700
20	0.118	0.006	0.118	0.118	33.33	25.83	0.118	0.006	0.006	0.006	0.006

Las muestras del ciclo 5, 6 y 7 fueron concentradas para analizarlas

* No analizado.

** No detectado por el equipo (concentración <0.001 mg/L)

■ Utilizado para la modelación geoquímica.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla 53. mg de soluto extraídos de la celda húmeda JPM-5

ciclo	Ca ²⁺ mg	Na ⁺ mg	Mg ²⁺ mg	K ⁺ mg	SO ₄ ⁻ mg	HCO ₃ ⁻ mg	Cl ⁻ mg	Si mg	Al mg	Cd mg	Cr mg	Cu mg	Fe mg	Ni mg	Pb mg	Zn mg	Mn mg
1	106.59	66.54	33.59	19.86	529.91	12.48	8.04	0.546	0.012	0.008		0.006	0.009			0.047	0.006
2	90.62	13.39	16.45	8.35	303.81	12.55	4.97	0.674	0.098				0.003				
3	147.18	8.07	15.88	9.04	412.37	17.96	12.59	1.203	0.004	0.006						0.097	0.017
4	59.64	2.98	2.91	2.98	158.47	4.79	1.33	0.450					0.001				
5	96.46	2.32	5.57	3.77	242.09	24.26	1.09	0.668		0.001					0.001		
6	73.81	5.49	4.91	4.82	203.60	11.57	0.71	1.042		0.003		0.012				0.066	
7	31.18	1.48	2.15	2.97	83.84	6.82	0.40	1.383	0.074				0.078			0.036	0.044
8	63.60	0.80	2.92	3.31	150.42	20.44	2.10	0.734								0.041	0.044
9	38.56	2.16	2.28	2.21	95.37	13.37	1.94	0.936								0.029	0.021
10	65.21	6.42	6.41	3.48	179.23	20.99	2.62	2.592	0.018				0.004			0.061	0.034
11	35.10	1.86	3.64	2.21	90.58	17.77	0.16	1.824	0.038				0.022			0.032	0.020
12	37.68	0.75	1.88	2.02	90.90	13.02	0.45		0.013		0.001		0.004			0.039	0.027
13	47.67	0.35	1.07	0.94	96.13	29.21	0.93	0.672	0.142			0.002	0.120			0.098	0.077
14	17.99	0.74	1.75	1.78	30.62	26.07	1.97	0.559	0.055				0.057			0.022	0.027
15	13.95		1.21	1.13	19.63	22.37	1.62	0.402	0.052				0.030			0.001	0.008
16	11.44		0.98	1.04	9.96	25.04	2.12	0.418	0.044				0.022			0.001	0.007
17	12.38	0.35	1.12	1.24	9.07	29.24	3.22	0.500	0.054	0.001	0.002		0.033			0.031	0.025
18	10.14	0.29	0.82	1.10	3.18	26.73	4.10	0.509	0.024				0.015			0.022	0.018
19	8.45		0.63	0.84	2.54	24.95	2.90	0.385					0.046			0.018	0.011
20	9.36		0.82	0.87	1.49	22.42	5.26	0.508	0.035						0.004	0.023	0.022
totales	977.04	113.99	107.04	73.93	2713.21	382.07	58.52	16.003	0.661	0.020	0.004	0.020	0.445	0.000	0.030	0.665	0.363
aniones	1271.93	28.62	107.04	73.93	3153.79	382.07	70.97	16.003	2.209	0.020	0.004	0.020	0.360	0.000	2443.937		
cationes																	

Tabla 46. Cationes lixiviados en la celda húmeda JPM-6

ciclo	Ca ²⁺		Na ⁺		Mg ²⁺		K ⁺		mg/l		meq/l		pH	C. E mS/cm
	mg/l	%	mg/l	%	mg/l	%	mg/l	%	total	%	total	%		
1	26.56	80.67	1.492	14.13	4.2	3.27	7.97	0.204	217.22	1.93	20.93	1.93	6.67	2.15
2	170.75	91.85	0.187	3.59	2.1	3.32	2.532	0.065	104.72	1.24	10.56	1.24	7.47	1.12
3	95.8	93.51	0.075	2.06	1.3	2.94	2.12	0.054	73.29	1.49	3.64	1.49	7.75	0.64
4	68.15	43.23	0.97	20.44	7.025	25.80	9.22	0.236	46.19	10.53	2.24	10.53	7.75	0.64
5	19.41	85.69	0.136	8.19	1.06	5.25	0.565	0.014	33.25	0.87	1.66	0.87	7.82	0.198
6	28.5	88.18	0.200	3.76	3.96	6.13	4.01	0.103	106.49	1.93	5.32	1.93	7.7	0.614
7	93.92	71.12	0.969	23.09	1.49	2.92	4.71	0.120	88.26	2.87	4.20	2.87	8.2	0.508
8	59.793	16.07	0.896	11.37	2.84	7.78	2.47	0.063	60.56	2.10	3.00	2.10	8.24	0.28
9	47.4	78.75	0.213	4.08	2.74	4.33	2.87	0.073	104.64	1.41	5.21	1.41	7.17	0.49
10	86.2	87.43	1.849	9.50	2.64	1.12	14.9	0.381	401.04	1.96	19.46	1.96	7.85	2.11
11	47.4	70.95	1.836	14.53	16.5	10.75	18.6	0.476	256.90	3.77	12.63	3.77	8.08	1.26
12	94.14	56.0	0.476	4.05	11.38	7.96	13.36	0.342	236.20	2.91	11.76	2.91	7.81	1.11
13	341	87.55	0.355	2.97	9.88	6.79	12.6	0.322	240.63	2.69	11.97	2.69	7.94	1.1
14	179.6	90.56	0.009	0.13	4.5	6.89	5.35	0.137	107.35	2.55	5.37	2.55	7.9	0.52
15	200.5	91.78	0.2	0.13	4.87	5.87	5.93	0.152	136.50	2.22	6.82	2.22	7.96	0.6
16	209.98	87.55	0.009	0.13	4.87	5.87	5.93	0.152	136.50	2.22	6.82	2.22	7.96	0.6
17	97.5	90.56	0.009	0.13	4.87	5.87	5.93	0.152	136.50	2.22	6.82	2.22	7.96	0.6
18	125.5	91.78	0.2	0.13	4.87	5.87	5.93	0.152	136.50	2.22	6.82	2.22	7.96	0.6
19	125.5	91.78	0.2	0.13	4.87	5.87	5.93	0.152	136.50	2.22	6.82	2.22	7.96	0.6
20	125.5	91.78	0.2	0.13	4.87	5.87	5.93	0.152	136.50	2.22	6.82	2.22	7.96	0.6

Las muestras del ciclo 5, 6 y 7 fueron concentradas para analizarlas

* No analizado.

** No detectado por el equipo (concentración <0.001 mg/l)

Utilizado para la modelación geoquímica.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla 47. Aniones lixiviatos en la celda húmeda JPM-6

ciclo	temp. °C	mg/l	meq/l	%	mg/l	meq/l	%	mg/l	meq/l	%	total mg/l	total meq/l	TDS mg/l	error %	Si mg/l
2	20.6	450.65	9.38268	90.66	46.6214	0.76403	7.38	7.179	0.20251	1.96	504.45	10.35	724.56	1.02	2.89
3	20.5	217	4.51801	88.00	24.4	0.39987	7.79	7.6572	0.216	4.21	249.06	5.13	355.65	0.68	1.81
4	20.9	149	3.10223	86.55	19.52	0.3199	8.93	5.743	0.162	4.52	174.26	3.58	248.08	0.73	0.52
5	21.9	79	1.68845	88.12	24.4	0.39987	7.58	10.05	0.2833	4.30	119.58	2.23	157.07	0.12	0.1
6	20.7	81	1.68645	75.46	24.4	0.39987	17.89	5.264	0.14849	6.64	110.66	2.23	157.07	0.12	0.1
7	20	26	0.54133	31.95	39.04	0.63979	37.77	18.186	0.513	30.28	83.23	1.69	117.54	-1.03	1.02
8	17.3	223.905	4.66177	88.25	32.94	0.53982	10.22	2.871	0.08099	1.53	259.72	5.28	368.06	0.31	1.25
9	15.9	170.78	3.55569	83.63	29.28	0.47984	11.29	7.657	0.21599	5.08	207.72	4.25	298.42	-0.66	1.95
10	17.4	114.45	2.38289	89.77	37.82	0.6198	20.37	1.436	0.04051	1.33	153.71	3.04	228.81	-0.66	8.67
11	16.5	210	4.37227	81.56	51.24	0.83972	15.67	5.264	0.14849	2.77	266.50	5.36	371.42	-1.43	5.73
12	17.7	900.9	18.757	93.58	58.56	0.95969	4.79	11.582	0.32671	1.63	971.04	20.04	1381.69	-1.47	7.86
13	18.9	516.78	10.7595	84.70	63.44	1.03966	8.18	32.0468	0.904	7.12	612.27	12.70	877.97	-0.29	7.86
14	18.5	475.5	9.90006	82.46	79.91	1.30957	10.91	28.218	0.796	6.63	583.63	12.01	826.98	-1.04	6.81
15	19.2	455	9.47325	78.73	80.52	1.31957	10.97	43.958	1.24	10.31	579.48	12.03	829.61	-0.27	7.99
17	22.8	176	3.66438	67.51	62.22	1.01967	18.79	26.375	0.744	13.71	264.59	5.43	388.74	-0.52	9.45
18	21.4	230	4.78867	70.34	85.4	1.39954	20.56	21.979	0.62	9.11	337.38	6.81	482.97	0.11	6.31
19	21.4	230	4.78867	70.34	85.4	1.39954	20.56	21.979	0.62	9.11	337.38	6.81	482.97	0.11	6.31

Utilizado para la modelación geoquímica.

Tabla 48. Metales lixiviados en la celda húmeda JPM-6

ciclo	Al	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	mg/l total	mg/l acumulados
1	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	**	**	**	**	**	**	**	**	**	0	0.179
3	0.021	0.003	**	0.022	35.48	**	1.61	3.23	20.97	0.062	0.241
4	**	**	**	**	**	**	**	**	**	0	0.241
5	0.025	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
6	0.0135	0.00298	0.002	0.00375	2.99	0.001042	0.83	0.001974	83.05	0.1255116	0.411
7	**	0.00086	**	**	**	0.000032	0.07	**	44.56	0.04682	0.458
8	0.232	**	**	0.257	42.41	0.117	19.31	**	**	0.606	1.064
9	0.238	**	**	0.17	34.48	0.085	17.24	**	**	0.493	1.557
10	0.238	**	**	0.179	37.12	0.585	9.97	2.30	5.71	5.87	7.778
11	2.631	**	0.005	2.179	35.66	0.095	34.93	0.135	0.74	0.002	8.050
12	0.067	**	0.003	0.097	29.38	0.465	12.00	**	6.92	0.268	11.924
13	1.91	**	0.001	1.138	33.05	0.145	15.41	0.074	10.10	0.095	12.865
14	0.288	**	**	0.311	42.28	0.098	15.57	0.073	3.18	0.346	13.924
15	0.26	**	0.001	0.152	43.93	0.048	13.87	0.017	9.20	0.011	15.446
16	0.118	**	**	0.603	39.62	0.231	15.18	0.057	5.54	0.14	22.794
17	0.49	**	**	2.61	35.52	0.762	10.37	0.25	7.95	0.407	25.574
18	3.31	**	**	0.94	33.81	0.324	11.65	0.092	2.78	0.221	25.574
19	1.2	**	**	0.003	49.86	0.497	10.68	0.19	6.8	0.65	10.279
20	0.02	**	**	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001

Las muestras del ciclo 5, 6 y 7 fueron concentradas para analizarlas

* No analizado.

** No detectado por el equipo (concentración <0.001 mg/l)

Utilizado para la modelación geoquímica.

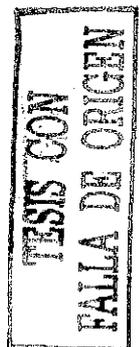


Tabla 54. mg de soluto extraídos de la celda húmeda JPM-6

ciclo	Ca ²⁺ mg	Na ⁺ mg	Mg ²⁺ mg	K ⁺ mg	SO ₄ ²⁻ mg	HCO ₃ ⁻ mg	Cl ⁻ mg	Si mg	Al mg	Cd mg	Cr mg	Cu mg	Fe mg	Ni mg	Pb mg	Zn mg	Mn mg
1	86.60	48.25	2.54	7.53	295.03	5.47	19.97	1.37	0.03	0.0036	0.0013	0.002	0.017		0.0007	0.006	
2	56.52	11.35	1.39	2.64	149.17	15.43	2.38	0.96									
3	36.21	1.62	0.79	0.96	82.03	9.22	2.89	0.68	0.01	0.0011				0.0004	0.0008	0.005	
4	14.86	0.37	0.28	0.46	32.48	4.26	1.25	0.11									
5	28.15	1.88	3.03	1.81	74.77	8.17	2.69	0.18		0.0007		0.008	0.001	0.0004	0.0010	0.001	
6	6.77	3.67	2.45	3.22	28.27	8.52	1.84	0.03		0.0010				0.0004		0.036	
7	7.70	0.84	0.29	0.15	7.02	10.54	4.91	0.28		0.0002		0.006	0.001		0.0005	0.006	
8	33.81	1.66	1.43	1.44	80.61	11.86	1.03	0.45	0.08				0.093				0.042
9	14.11	5.26	0.35	1.11	40.30	6.91	1.81	0.46	0.06				0.040				0.020
10	32.15	7.69	1.34	1.27	87.24	11.38	3.21	1.98	0.06				0.051				0.022
11	14.79	2.45	0.89	0.77	35.71	11.80	0.45	2.71	0.82		0.0016		0.680		0.0421	0.105	0.183
12	27.21	1.41	0.79	0.83	60.69	14.81	1.52		0.02		0.0009	0.002	0.028			0.001	0.027
13	179.03	22.31	1.39	7.82	472.97	30.74	6.08	3.01	1.00		0.0005	0.009	0.597		0.0389	0.141	0.244
14	73.82	17.34	6.78	7.64	212.40	26.07	13.17	3.23	0.12			0.012	0.128		0.0300	0.039	0.060
15	75.76	5.76	4.47	4.79	189.88	18.35	9.86	2.61	0.10	0.0014	0.0038		0.115			0.012	0.037
16	75.19	4.11	4.27	5.01	178.31	29.97	10.58	2.55	0.04				0.057		0.0064	0.004	0.018
17	86.93	3.38	4.09	5.22	188.37	33.34	18.20	3.31	0.20				0.250		0.0236	0.058	0.096
18	35.30		1.63	1.94	63.71	22.52	9.55	3.42	1.20			0.003	0.945		0.0905	0.147	0.276
19	40.16	0.06	1.56	1.90	73.60	27.33	7.03	2.02	0.38		0.0003	0.001	0.301		0.0294	0.071	0.104
20	24.21		1.01	1.40	29.37	24.66	11.05	2.18	0.54				0.431		0.0527	0.085	0.132
totales	949.26	139.43	40.76	57.91	2381.93	331.35	129.48	31.58	4.67	0.0082	0.0083	0.024	3.743	0.0008	0.3165	0.717	1.260
cationes	1187.16		29.16		2842.76		69.81		10.76				0.774		4072.413		
aniones																	

ANEXO H
INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS CINÉTICAS DE
LABORATORIO POR EL MÉTODO DE MORIN Y HUTT (1997)

Tabla 59. Resultados de la celda húmeda JPM-1 con las ecuaciones recomendadas por Morin y Hutt (1997) para la interpretación de pruebas cinéticas de laboratorio

APR	SPR	RS	RSS	SPRBS	CMR	FMR	CRNPC	FMRTNP	RMP	MTR	RM
1.24E-05	411.57	78.53	1.77	3.72	0.89	159.87	3.86E-04	6.91E-02	99.9999993	0.1530	99.9998903
1.40E-05	215.01	77.64	-3.90	1.94	0.88	107.50	2.00E-04	2.43E-02	99.9999990	0.7306	99.9993666
6.38E-05	451.90	75.76	-15.83	4.09	0.98	92.29	4.63E-04	4.38E-02	99.9999983	0.8902	99.9987285
1.75E-05	160.11	75.09	-20.06	1.45	1.02	43.34	1.72E-04	7.29E-03	99.9999980	0.3666	99.9984657
1.08E-05	98.62	74.68	-22.66	0.89	1.00	62.18	1.04E-04	6.44E-03	99.9999979	0.0471	99.9984320
2.39E-05	41.63	74.51	-23.76	0.38	1.20	69.98	5.25E-05	3.06E-03	99.9999978	0.1921	99.9982942
2.81E-05	178.92	73.76	-28.49	1.62	1.04	39.11	1.95E-04	7.35E-03	99.9999975	0.0499	99.9982585
1.80E-05	121.28	73.26	-31.69	1.10	1.07	63.75	1.36E-04	8.12E-03	99.9999973	0.0974	99.9981886
1.83E-05	142.53	72.67	-35.45	1.29	1.01	64.53	1.52E-04	9.66E-03	99.9999971	0.1197	99.9981029
5.01E-05	290.40	71.46	-43.12	2.63	0.97	86.47	2.97E-04	2.64E-02	99.9999966	0.2451	99.9979272
2.17E-05	114.06	70.98	-46.13	1.03	1.01	66.53	1.21E-04	7.97E-03	99.9999964	0.1136	99.9978458
2.29E-05	84.97	70.63	-48.38	0.77	1.08	59.77	9.64E-05	5.33E-03	99.9999963	0.1066	99.9977694
4.25E-05	122.34	70.12	-51.61	1.11	1.14	41.57	1.46E-04	5.34E-03	99.9999961	0.4277	99.9974628
5.54E-05	261.29	69.03	-58.50	2.36	1.08	43.67	2.95E-04	1.20E-02	99.9999957	3.1724	99.9951887
2.21E-05	137.35	68.46	-62.13	1.24	1.08	41.82	1.56E-04	6.03E-03	99.9999955	0.2774	99.9949898
3.88E-05	53.55	68.24	-63.54	0.48	1.34	60.26	7.56E-05	3.39E-03	99.9999954	0.1432	99.9948872
4.92E-05	31.37	68.11	-64.37	0.28	1.67	104.10	5.52E-05	3.43E-03	99.9999953	0.2359	99.9947181
4.65E-05	22.88	68.01	-64.98	0.21	1.87	122.24	4.50E-05	2.94E-03	99.9999953	0.1203	99.9946319
4.65E-05	8.64	67.98	-65.20	0.08	3.41	213.88	3.09E-05	1.94E-03	99.9999953	0.0963	99.9945628
3.47E-05	25.54	67.87	-65.88	0.23	1.60	89.47	4.30E-05	2.40E-03	99.9999952	0.0858	99.9945013

APR Taza de producción de ácido (mg CaCO₃/kg/wk)

SPR Taza de producción de sulfato (mg/kg/wk)

RS Azufre total en la celda (% del azufre original)

RSS Azufre como sulfuro en la celda (% del azufre como sulfuro original)

SPRBS Taza de producción de sulfato por área superficial (mg/m²/wk)

CMR Relación molar de carbonato

FMR Relación molar de feldespatos

CRNPC Relación de carbonato consumo de NP (mg CaCO₃/kg/wk)

FMRTNP Relación molar de feldespatos consumo total de NP (mg CaCO₃ equivalente/kg/wk)

RMP % de NP contenido en la celda

MTR Taza de lixiviación de metales

RM % de metales contenidos en la celda

Tabla 60. Resultados de la celda húmeda JPM-2 con las ecuaciones recomendadas por Morin y Hutt (1997) para la interpretación de pruebas cinéticas de laboratorio

APR	SPR	RS	RSS	SPRBS	CMR	FMR	CRNPC	FMRTNP	RMP	MTR	RM
1.68E-05	509.25	82.82	12.01	4.55	0.49	350.38	2.59E-04	1.85E-01	99.9999968	0.037	99.9999733
2.15E-05	184.90	82.09	8.97	1.67	0.65	287.05	1.26E-04	5.57E-02	99.9999983	0.059	99.9999301
4.53E-05	305.81	80.89	3.94	2.76	0.84	170.33	2.69E-04	5.47E-02	99.9999975	0.070	99.9998793
4.17E-06	10.00	80.85	3.78	0.09	0.71	276.18	7.43E-06	2.90E-03	99.9999975	0.003	99.9998769
1.88E-05	885.48	77.36	-10.79	8.00	0.85	139.85	7.94E-04	1.30E-01	99.9999953	0.039	99.9998487
1.83E-05	980.10	73.51	-28.91	8.86	0.82	149.76	8.48E-04	1.54E-01	99.9999929	0.064	99.9998019
1.82E-05	800.95	70.35	-40.09	7.24	0.90	108.25	7.54E-04	9.11E-02	99.9999909	0.021	99.9997867
2.51E-05	371.61	68.89	-46.20	3.36	0.96	88.12	3.76E-04	3.48E-02	99.9999900	0.008	99.9997807
1.76E-05	646.42	66.35	-56.83	5.84	0.92	101.56	6.27E-04	6.90E-02	99.9999884	0.007	99.9997754
4.10E-05	507.51	64.35	-65.18	4.59	0.88	129.19	4.71E-04	6.89E-02	99.9999871	0.058	99.9997329
2.63E-05	394.38	62.80	-71.67	3.57	0.91	107.18	3.79E-04	4.44E-02	99.9999862	0.058	99.9996903
3.38E-05	239.12	61.86	-75.60	2.16	0.99	96.15	2.49E-04	2.41E-02	99.9999856	0.030	99.9996666
4.25E-05	103.99	61.45	-77.31	0.94	1.01	109.83	1.10E-04	1.20E-02	99.9999853	0.443	99.9993447
5.63E-05	41.21	61.29	-77.99	0.37	1.14	196.62	4.92E-05	8.51E-03	99.9999852	0.103	99.9992691
3.33E-05	14.88	61.23	-78.23	0.13	1.30	154.78	2.03E-05	2.42E-03	99.9999852	0.166	99.9991480
4.11E-05	7.40	61.20	-78.35	0.07	1.64	199.10	1.28E-05	1.55E-03	99.9999851	0.350	99.9988920
6.70E-05	11.66	61.15	-78.55	0.11	1.56	212.93	1.91E-05	2.61E-03	99.9999851	0.113	99.9988096
4.42E-05	3.31	61.14	-78.60	0.03	2.05	279.28	7.15E-06	9.72E-04	99.9999851	0.215	99.9986521
5.09E-05	0.98	61.13	-78.62	0.01	3.24	368.05	3.34E-06	3.79E-04	99.9999851	0.136	99.9985526
3.61E-05	1.94	61.13	-78.65	0.02	2.82	289.82	5.74E-06	5.89E-04	99.9999851	0.258	99.9983640

APR Taza de producción de acidez (mg CaCO₃/kg/wk)

SPR Taza de producción de sulfato (mg/kg/wk)

RS Azufre total en la celda (% del azufre original)

RSS Azufre como sulfuro en la celda (% del azufre como sulfuro original)

SPRBS Taza de producción de sulfato por área superficial (mg/m²/wk)

CMR Relación molar de carbonato

FMR Relación molar de feldespato

CRNPC Relación de carbonato consumo de NP (mg CaCO₃/kg/wk)

FMRTNP Relación molar de feldespato consumo total de NP (mg CaCO₃ equivalente/kg/wk)

RMP % de NP contenido en la celda

MTR Taza de lixiviación de metales

RM % de metales contenidos en la celda

Tabla 61. Resultados de la celda húmeda JPM-3 con las ecuaciones recomendadas por Morin y Hutt (1997) para la interpretación de pruebas cinéticas de laboratorio

APR	SPR	RS	RSS	SPRS	CMR	FRM	CRNPC	FMRTNP	RMP	MTR	RM
2.88E-05	483.26	60.37	-17.86	4.37	0.71	238.97	3.59E-04	1.21E-01	99.9999991	0.062	99.9999502
2.21E-05	108.75	59.79	-23.36	0.98	1.10	146.17	1.26E-04	1.67E-02	99.9999999	0.119	99.9998549
3.44E-05	446.34	57.42	-45.95	4.03	0.98	90.18	4.61E-04	4.23E-02	99.9999990	0.895	99.9991380
1.42E-05	164.42	56.55	-54.27	1.49	1.00	77.86	1.72E-04	1.34E-02	99.9999977	0.001	99.9991371
1.13E-05	147.90	55.77	-61.75	1.34	0.97	83.25	1.51E-04	1.29E-02	99.9999975	0.036	99.9991079
1.69E-05	163.02	54.90	-70.00	1.47	0.97	92.77	1.65E-04	1.59E-02	99.9999971	0.060	99.9990595
1.01E-05	96.64	54.39	-74.89	0.87	0.96	86.14	9.77E-05	8.74E-03	99.9999970	0.109	99.9999724
3.69E-05	227.23	53.18	-86.39	2.05	1.04	57.80	2.49E-04	1.38E-02	99.9999965	0.033	99.9999461
1.78E-05	82.29	52.75	-90.56	0.74	1.04	72.79	8.99E-05	6.29E-03	99.9999964	0.019	99.9999309
3.73E-05	179.15	51.80	-99.62	1.62	1.00	88.63	1.88E-04	1.67E-02	99.9999960	0.067	99.9998771
2.93E-05	108.73	51.23	-105.03	0.96	1.08	57.53	1.22E-04	6.45E-03	99.9999958	0.097	99.9997997
2.68E-05	82.60	50.79	-109.21	0.75	1.13	47.29	9.79E-05	4.10E-03	99.9999957	0.065	99.9987475
4.41E-05	95.22	50.29	-114.02	0.86	1.25	29.28	1.25E-04	2.93E-03	99.9999955	0.476	99.9983960
4.45E-05	51.96	50.01	-116.65	0.47	1.39	93.61	7.59E-05	5.11E-03	99.9999954	0.259	99.9981689
3.70E-05	30.10	49.85	-118.18	0.27	1.60	84.91	5.05E-05	2.68E-03	99.9999954	0.280	99.9979346
3.66E-05	17.33	49.76	-119.05	0.16	2.03	123.54	3.70E-05	2.25E-03	99.9999953	0.230	99.9977506
4.83E-05	22.18	49.64	-120.18	0.20	2.13	158.78	4.95E-05	3.70E-03	99.9999953	0.089	99.9976795
4.50E-05	5.49	49.61	-120.45	0.05	5.46	462.95	3.15E-05	2.67E-03	99.9999953	0.139	99.9975882
4.02E-05	5.85	49.58	-120.75	0.05	4.76	301.65	2.93E-05	1.85E-03	99.9999953	0.068	99.9975135
3.31E-05	5.75	49.55	-121.04	0.05	4.81	335.28	2.91E-05	2.03E-03	99.9999952	0.213	99.9973429

APR Taza de producción de acidez (mg CaCO₃/kg/wk)

SPR Taza de producción de sulfato (mg/kg/wk)

RS Azufre total en la celda (% del azufre original)

RSS Azufre como sulfuro en la celda (% del azufre como sulfuro original)

SPRBS Taza de producción de sulfato por área superficial (mg/m²/wk)

CMR Relación molar de carbonato

FMR Relación molar de feldespato

CRNPC Relación de carbonato consumo de NP (mg CaCO₃/kg/wk)

FMRTNP Relación molar de feldespato consumo total de NP (mg CaCO₃ equivalente/kg/wk)

RMP % de NP contenido en la celda

MTR Taza de lixiviación de metales

RM % de metales contenidos en la celda

Tabla 62. Resultados de la celda húmeda JPM-4 con las ecuaciones recomendadas por Morin y Hutt (1997) para la interpretación de pruebas cinéticas de laboratorio

APR	SPR	RS	RSS	SPRS	CMR	FRM	CRNPC	FMRITNP	RMP	MTR	RM
3.02E-05	441.61	98.00	-29.12	3.99	0.85	220.07	3.93E-04	1.02E-01	99.9999992	0.048	99.99999531
2.04E-05	359.81	96.79	-56.44	3.25	0.82	188.81	3.12E-04	7.14E-02	99.9999986	0.049	99.99999258
4.50E-05	619.76	94.71	-103.48	5.60	0.96	78.63	6.22E-04	5.12E-02	99.9999975	0.087	99.99989593
1.25E-05	241.02	93.90	-121.78	2.18	1.02	32.22	2.58E-04	8.16E-03	99.9999971	0.004	99.99998564
5.04E-05	476.58	92.30	-157.95	4.31	1.02	43.46	5.10E-04	2.18E-02	99.9999962	0.023	99.99993885
4.24E-05	352.67	91.12	-184.72	3.19	1.01	59.44	3.72E-04	2.20E-02	99.9999956	0.132	99.9997572
1.76E-05	146.52	90.63	-195.84	1.32	0.92	106.08	1.41E-04	1.63E-02	99.9999953	0.023	99.9997198
6.99E-05	339.79	89.49	-221.64	3.07	1.09	28.16	3.89E-04	1.00E-02	99.9999947	0.126	99.9996236
2.06E-05	111.28	89.11	-230.08	1.01	1.07	39.14	1.25E-04	4.58E-03	99.9999945	0.203	99.9994684
5.83E-05	162.28	88.57	-242.40	1.47	1.07	77.25	1.82E-04	1.32E-02	99.9999942	0.153	99.9993517
3.90E-05	106.81	88.21	-250.51	0.97	1.12	47.42	1.26E-04	5.32E-03	99.9999941	0.173	99.9992197
2.31E-05	56.63	88.02	-254.81	0.51	1.13	50.22	6.72E-05	2.99E-03	99.9999940	0.186	99.9990776
5.15E-05	74.92	87.77	-260.50	0.68	1.32	29.79	1.04E-04	2.34E-03	99.9999938	1.351	99.9980439
1.83E-05	38.16	87.64	-263.39	0.34	1.22	83.29	4.87E-05	3.34E-03	99.9999938	0.370	99.9977605
2.15E-05	32.60	87.53	-265.87	0.29	1.33	47.86	4.55E-05	1.64E-03	99.9999937	0.208	99.9976017
2.26E-05	32.51	87.42	-268.33	0.29	1.41	63.57	4.80E-05	2.17E-03	99.9999936	0.188	99.9974578
3.43E-05	31.64	87.32	-270.74	0.29	1.58	97.48	5.25E-05	3.24E-03	99.9999936	0.179	99.9973206
2.52E-05	14.74	87.27	-271.86	0.13	2.10	133.05	3.25E-05	2.08E-03	99.9999936	0.418	99.9970008
2.34E-05	10.88	87.23	-272.68	0.10	2.34	102.15	2.68E-05	1.17E-03	99.9999935	0.437	99.9966664
2.07E-05	9.55	87.20	-273.41	0.09	3.00	153.66	3.01E-05	1.54E-03	99.9999935	0.315	99.9964254

APR Taza de producción de acidez (mg CaCO₃/kg/wk)

SPR Taza de producción de sulfato (mg/kg/wk)

RS Azufre total en la celda (% del azufre original)

RSS Azufre como sulfuro en la celda (% del azufre como sulfuro original)

SPRS Taza de producción de sulfato por área superficial (mg/m²/wk)

CMR Relación molar de carbonato

FMR Relación molar de feldespato

CRNPC Relación de carbonato consumo de NP (mg CaCO₃/kg/wk)FMRITNP Relación molar de feldespato consumo total de NP (mg CaCO₃ equivalente/kg/wk)

RMP % de NP contenido en la celda

MTR Taza de lixiviación de metales

RM % de metales contenidos en la celda

Tabla 63. Resultados de la celda húmeda JPM-5 con las ecuaciones recomendadas por Morin y Hutt (1997) para la interpretación de pruebas cinéticas de laboratorio

APR	SPR	RS	RSS	SPRS	CMR	FRM	CRNPC	FMRTNP	RMP	MTR	RM
3.31E-05	529.91	98.28	2.92	4.79	0.73	209.53	4.08E-04	1.17E-01	99.9999991	0.082	99.9999352
1.39E-05	303.81	97.29	-3.91	2.75	0.93	100.99	2.96E-04	3.22E-02	99.9999985	0.107	99.9998509
1.51E-05	412.37	95.95	-13.19	3.73	1.01	63.63	4.36E-04	2.76E-02	99.9999978	0.124	99.9997525
4.97E-06	158.47	95.44	-16.75	1.43	0.97	56.98	1.62E-04	9.48E-03	99.9999975	0.002	99.9997511
6.28E-06	242.09	94.65	-22.20	2.19	1.05	40.75	2.66E-04	1.04E-02	99.9999971	0.004	99.9997481
8.03E-06	203.60	93.99	-26.77	1.84	0.96	75.05	2.06E-04	1.61E-02	99.9999967	0.070	99.9996925
4.94E-06	83.84	93.72	-28.66	0.76	0.99	86.81	8.74E-05	7.64E-03	99.9999966	0.212	99.9995251
5.51E-06	150.42	93.23	-32.04	1.36	1.09	48.17	1.72E-04	7.61E-03	99.9999963	0.086	99.9994573
3.68E-06	95.37	92.92	-34.19	0.86	1.06	69.46	1.07E-04	6.96E-03	99.9999961	0.050	99.9994176
5.79E-06	179.23	92.34	-38.22	1.62	1.01	76.82	1.91E-04	1.45E-02	99.9999958	0.118	99.9993246
3.69E-06	90.58	92.04	-40.26	0.82	1.09	69.44	1.03E-04	6.61E-03	99.9999957	0.112	99.9992359
3.37E-06	90.90	91.75	-42.30	0.82	1.08	51.78	1.03E-04	4.94E-03	99.9999955	0.085	99.9991686
1.57E-06	96.13	91.44	-44.46	0.87	1.23	23.59	1.24E-04	2.38E-03	99.9999953	0.439	99.9988215
2.96E-06	30.62	91.34	-45.15	0.28	1.63	136.98	5.25E-05	4.41E-03	99.9999953	0.169	99.9988677
1.89E-06	19.63	91.27	-45.59	0.18	1.95	109.99	4.01E-05	2.27E-03	99.9999952	0.098	99.9986108
1.79E-06	9.96	91.24	-45.82	0.09	3.14	186.33	3.29E-05	2.07E-03	99.9999952	0.074	99.9985525
2.07E-06	9.07	91.21	-46.02	0.08	3.76	302.99	3.56E-05	2.89E-03	99.9999952	0.113	99.9984635
1.83E-06	3.18	91.20	-46.09	0.03	8.67	758.79	2.89E-05	2.53E-03	99.9999952	0.096	99.9983872
1.40E-06	2.54	91.19	-46.15	0.02	8.95	627.86	2.39E-05	1.68E-03	99.9999952	0.044	99.9983525
1.45E-06	1.49	91.19	-46.18	0.01	17.29	1112.06	2.70E-05	1.73E-03	99.9999952	0.130	99.9982497

APR Taza de producción de acidez (mg CaCO₃/kg/wk)

SPR Taza de producción de sulfato (mg/kg/wk)

RS Azufre total en la celda (% del azufre original)

RSS Azufre como sulfuro en la celda (% del azufre como sulfuro original)

SPRS Taza de producción de sulfato por área superficial (mg/m²/wk)

CMR Relación molar de carbonato

FMR Relación molar de feldespato

CRNPC Relación de carbonato consumo de NP (mg CaCO₃/kg/wk)

FMRTNP Relación molar de feldespato consumo total de NP (mg CaCO₃ equivalente/kg/wk)

RMP % de NP contenido en la celda

MTR Taza de lixiviación de metales

RM % de metales contenidos en la celda

Tabla 64. Resultados de la celda húmeda JPM-6 con las ecuaciones recomendadas por Morin y Hutt (1997) para la interpretación de pruebas cinéticas de laboratorio

APR	SPR	RS	RSS	SPRBS	CMR	FRM	CRNPC	FMRTNP	RMP	MTR	RM
9.11E-06	295.03	98.76	-26.56	2.67	0.74	229.22	2.29E-04	7.10E-02	99.9999995	0.058	99.9999614
2.57E-05	149.17	98.13	-41.66	1.35	0.94	118.17	1.48E-04	1.85E-02	99.9999992	0.001	99.9999608
1.54E-05	82.03	97.78	-49.96	0.74	1.10	44.80	9.45E-05	3.86E-03	99.9999991	0.023	99.9999453
7.09E-06	32.48	97.64	-53.25	0.29	1.13	40.56	3.86E-05	1.38E-03	99.9999990	0.001	99.9999448
1.38E-05	74.77	97.33	-60.82	0.68	1.06	74.12	8.34E-05	5.82E-03	99.9999989	0.012	99.9999368
1.42E-05	28.27	97.21	-63.68	0.26	0.92	357.89	2.72E-05	1.06E-02	99.9999988	0.044	99.9999078
1.76E-05	7.02	97.18	-64.39	0.06	2.79	176.15	2.06E-05	1.30E-05	99.9999988	0.013	99.9998991
1.98E-05	80.61	96.84	-72.55	0.73	1.08	57.32	9.10E-05	4.85E-03	99.9999987	0.219	99.9997547
1.15E-05	40.30	96.67	-76.63	0.36	0.87	196.62	3.70E-05	8.32E-03	99.9999986	0.117	99.9996776
1.90E-05	87.24	96.30	-85.46	0.79	0.94	125.48	8.65E-05	1.15E-02	99.9999984	0.131	99.9995908
1.97E-05	35.71	96.15	-89.07	0.32	1.09	117.26	4.09E-05	4.40E-03	99.9999984	1.831	99.9983799
2.47E-05	60.69	95.90	-95.21	0.55	1.13	52.45	7.18E-05	3.34E-03	99.9999983	0.079	99.9983279
5.12E-05	472.97	93.90	-143.08	4.28	0.92	84.06	4.56E-04	4.18E-02	99.9999974	2.034	99.9969832
4.35E-05	212.40	93.01	-164.58	1.92	0.96	158.59	2.14E-04	3.54E-02	99.9999971	0.367	99.9967275
3.06E-05	189.88	92.20	-183.80	1.72	1.05	81.81	2.09E-04	1.63E-02	99.9999967	0.270	99.9965493
4.99E-05	178.31	91.45	-201.84	1.61	1.11	79.22	2.07E-04	1.48E-02	99.9999964	0.130	99.9964635
5.56E-05	188.37	90.66	-220.91	1.70	1.19	72.94	2.36E-04	1.44E-02	99.9999961	0.630	99.9960469
3.75E-05	63.71	90.39	-227.36	0.58	1.43	58.41	9.56E-05	3.91E-03	99.9999960	2.660	99.9942882
4.55E-05	73.60	90.08	-234.80	0.67	1.39	50.69	1.08E-04	3.92E-03	99.9999958	0.890	99.9936997
4.11E-05	29.37	89.96	-237.78	0.27	2.11	91.43	6.51E-05	2.82E-03	99.9999958	1.238	99.9928811

APR Taza de producción de acidez (mg CaCO₃/kg/wk)
 SPR Taza de producción de sulfato (mg/kg/wk)
 RS Azufre total en la celda (% del azufre original)
 RSS Azufre como sulfuro en la celda (% del azufre original)
 SPRBS Taza de producción de sulfato por área superficial (mg/m²/wk)
 CMR Relación molar de carbonato
 FMR Relación molar de feldespato
 CRNPC Relación de carbonato consumo de NP (mg CaCO₃/kg/wk)
 FMRTNP Relación molar de feldespato consumo total de NP (mg CaCO₃ equivalente/kg/wk)
 RMP % de NP contenido en la celda
 MTR Taza de lixiviación de metales
 RM % de metales contenidos en la celda

ANEXO I
RESULTADOS DE ANÁLISIS POR ÓXIDOS LIBRES

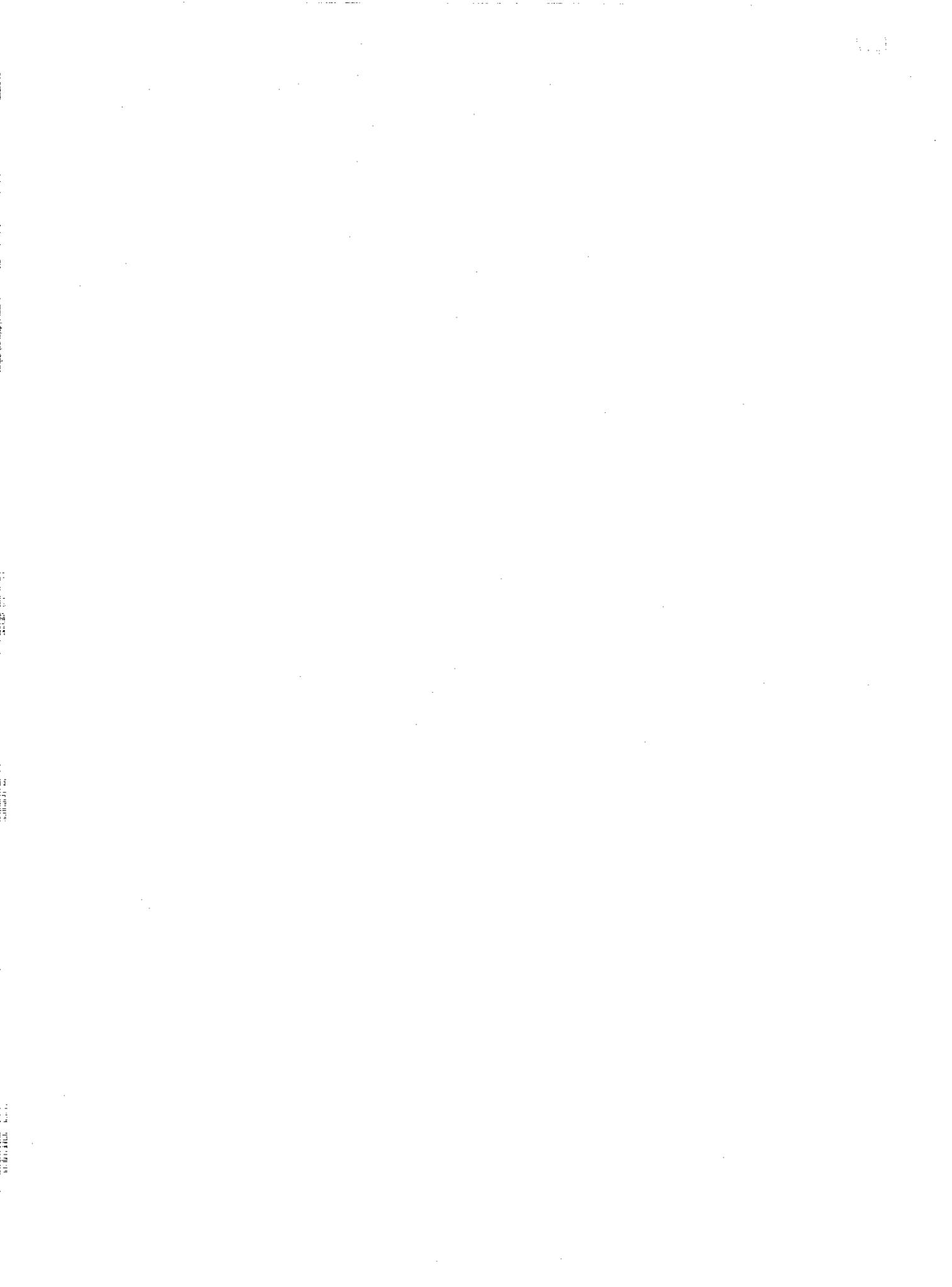


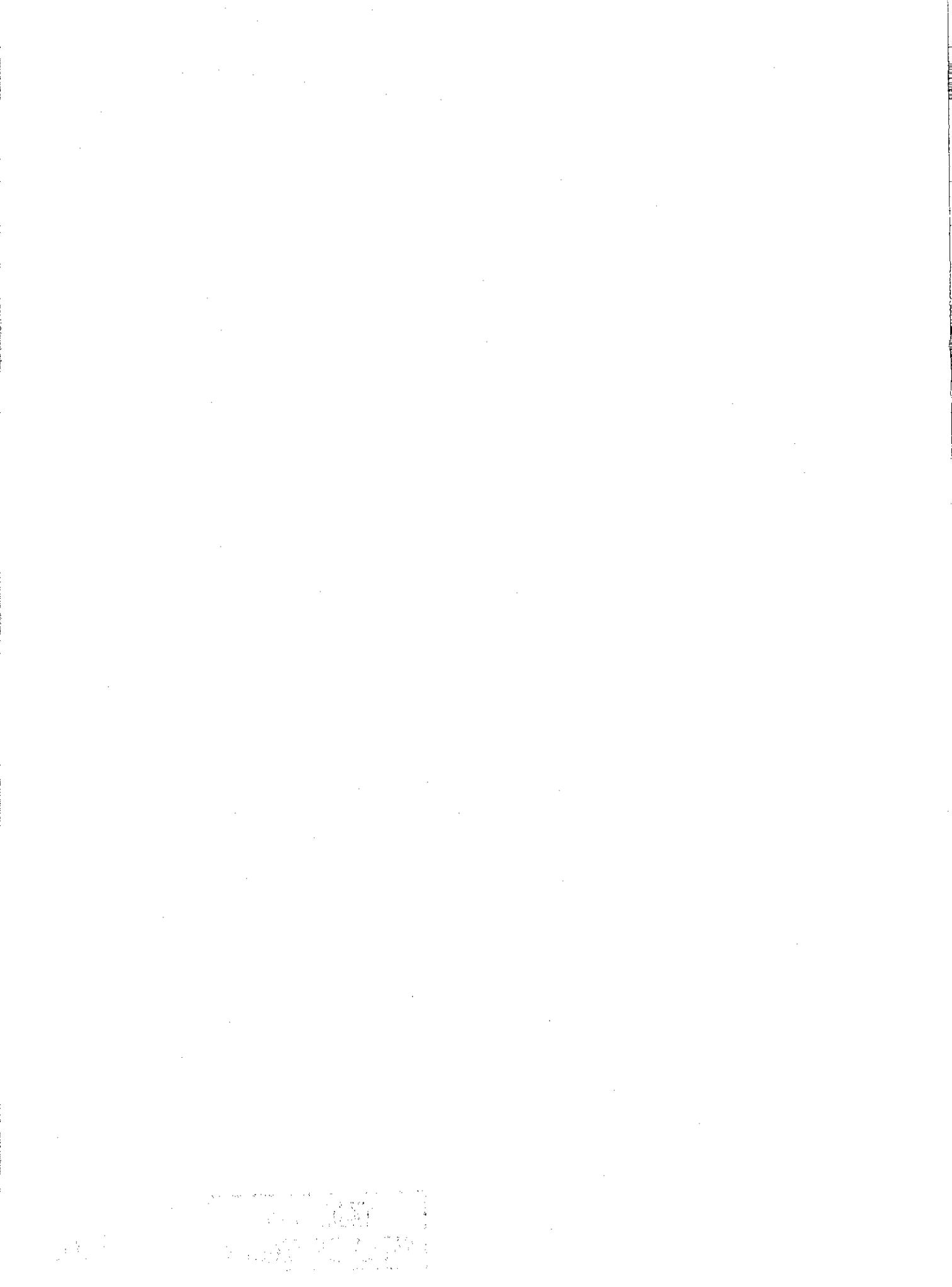
Tabla 67 Resultados de análisis por óxidos libres realizados a seis muestras de jales utilizadas en la prueba de celdas húmedas

Muestra	Aluminio (p/p)			Hierro (p/p)			Manganeso (p/p)			Plomo (p/p)			Zinc (p/p)		
	inicial	final	oxidado	inicial	final	oxidado	inicial	final	oxidado	inicial	final	oxidado	inicial	final	oxidado
JPM-1	0.011	0.14	0.134	0.846	1.264	0.419	0.592	0.896	0.304	0.064	0.071	0.007	0.222	0.407	0.185
JPM-2	0.016	0.08	0.067	1.110	1.458	0.348	0.715	0.977	0.262	0.057	0.073	0.015	0.188	0.328	0.140
JPM-3	0.013	0.10	0.088	0.885	1.198	0.312	0.625	0.821	0.196	0.029	0.036	0.008	0.247	0.374	0.127
JPM-4	0.007	0.02	0.012	0.731	0.827	0.096	0.592	0.769	0.177	0.024	0.036	0.012	0.257	0.392	0.134
JPM-5	0.007	0.05	0.043	0.712	1.062	0.350	0.583	0.656	0.073	0.025	0.026	0.0006	0.242	0.328	0.087
JPM-6	0.0008	0.006	0.005	0.817	0.906	0.089	0.650	0.698	0.048	0.025	0.027	0.002	0.140	0.179	0.039

Tabla 68. Resultados de los análisis realizados por óxidos libres a muestras tomadas de las columnas de lixiviación a diferentes profundidades

Muestra	Profundidad (cm)	Al (% óxido libre)	Fe (% óxido libre)	Mn (% óxido libre)	Pb (% óxido libre)	Zn (% óxido libre)
COL-1	20	0.0025	0.675	0.692	0.031	0.143
	40	0.0134	1.127	0.389	0.043	0.083
	60	0.0288	1.304	0.417	0.038	0.258
COL-2	80	0.0342	1.004	0.508	0.076	0.280
	95	0.0085	1.075	0.517	0.047	0.204
	20	0.0498	1.212	0.742	0.092	0.256
COL-3	40	0.0212	1.442	0.615	0.054	0.408
	60	0.0101	1.119	0.552	0.070	0.498
	80	***	0.737	0.525	0.044	0.389
COL-4	95	***	0.458	0.496	0.036	0.188
	20	0.0089	0.521	0.525	0.036	0.425
	40	***	0.585	0.558	0.054	0.367
COL-4	60	0.0052	0.792	0.737	0.043	0.871
	80	***	0.610	0.725	0.045	0.467
	95	0.0192	0.595	0.527	0.054	0.297
COL-4	20	***	0.407	0.431	0.024	0.086
	40	0.1140	1.069	0.796	0.063	0.287
	60	0.0257	0.871	0.692	0.045	0.349
COL-4	80	0.0147	0.939	0.764	0.050	0.500
	95	0.0009	0.656	0.527	0.037	0.383

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



ANEXO J

**ÍNDICES DE SATURACIÓN DE FASES MINERALES DE LOS
LIXIVIADOS OBTENIDOS EN LA MODELACIÓN GEOQUÍMICA
EN LAS PRUEBAS CINÉTICAS DE LABORATORIO:**

A) CELDAS HÚMEDAS

B) COLUMNAS DE LIXIVIACIÓN

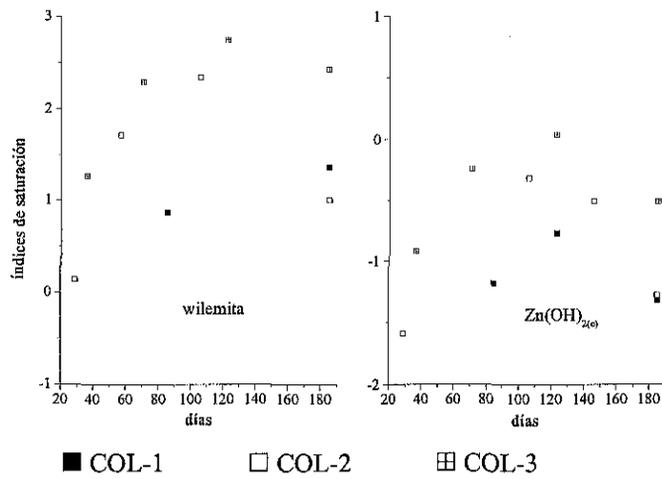
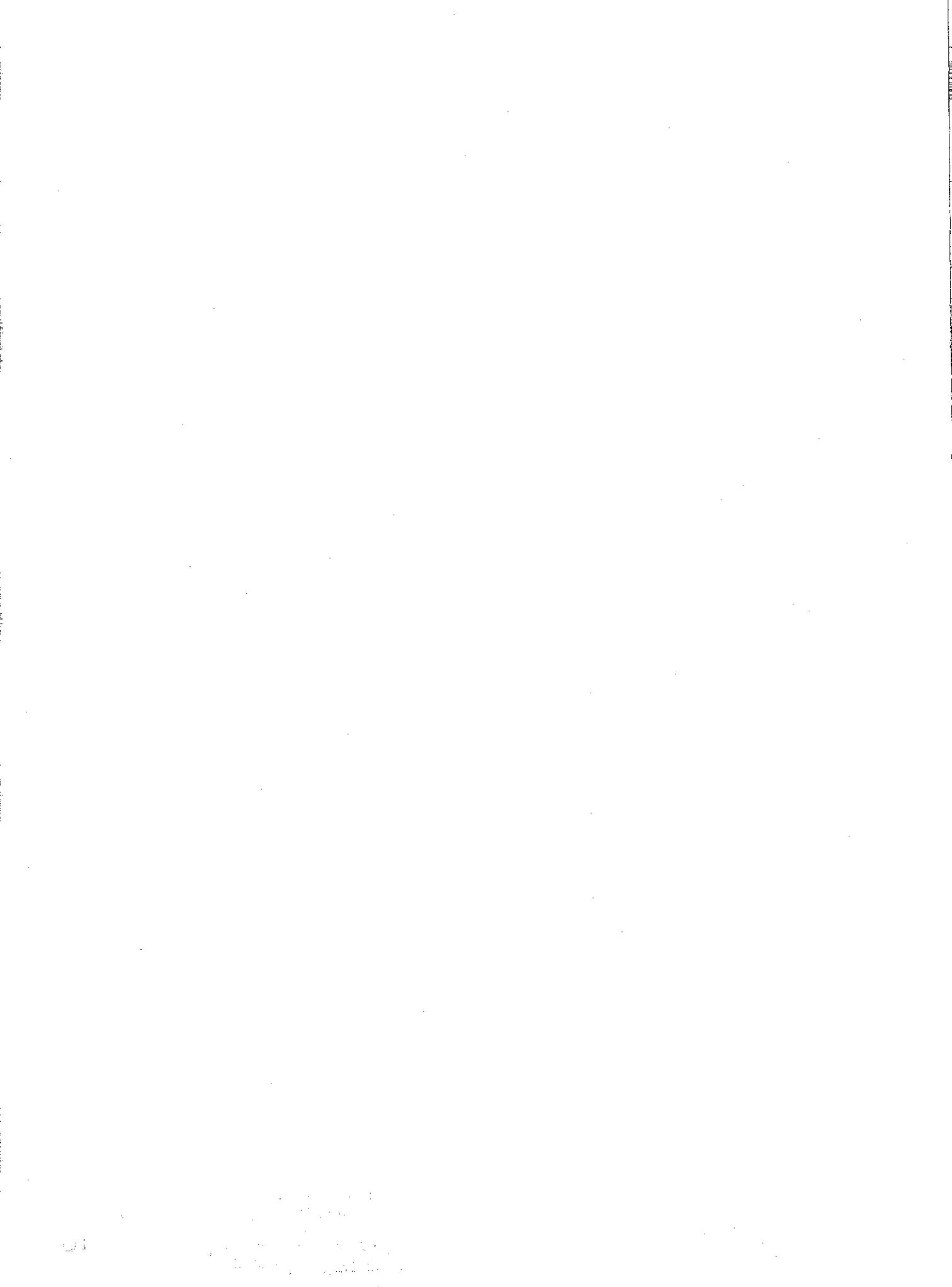


Figura 52. Índices de saturación de las fases minerales: wilemita y Zn(OH)_{2(e)}; derivados de la modelación geoquímica de los lixiviados generados en las columnas de lixiviación



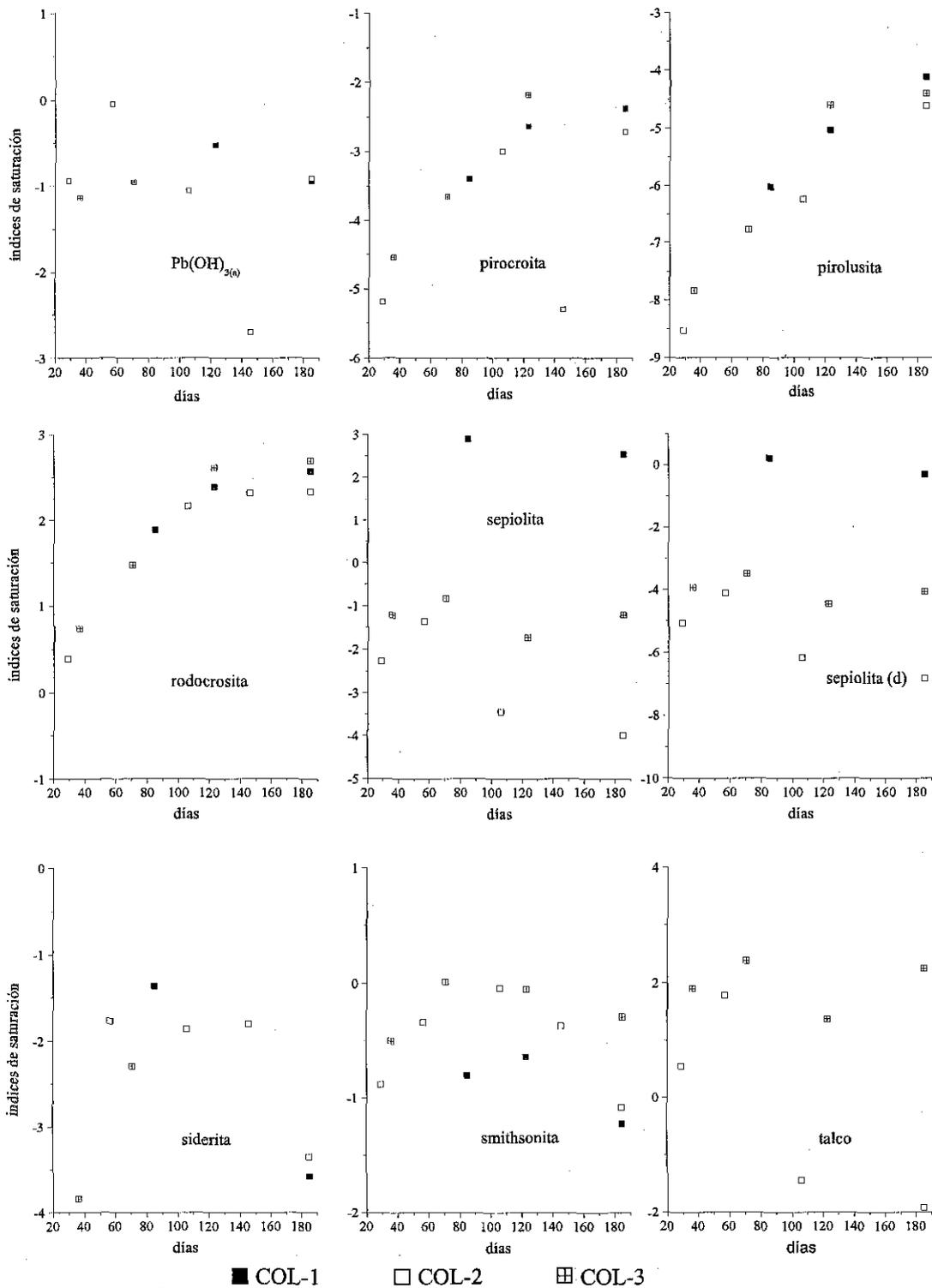


Figura 51. Índices de saturación de las fases minerales: $Pb(OH)_2$, pirocroita, pirolusita, rodocrosita, sepiolita, sepiolita (d), siderita, smithsonita y montmorillonita; derivados de la modelación geoquímica de los lixiviados generados en las columnas de lixiviación

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

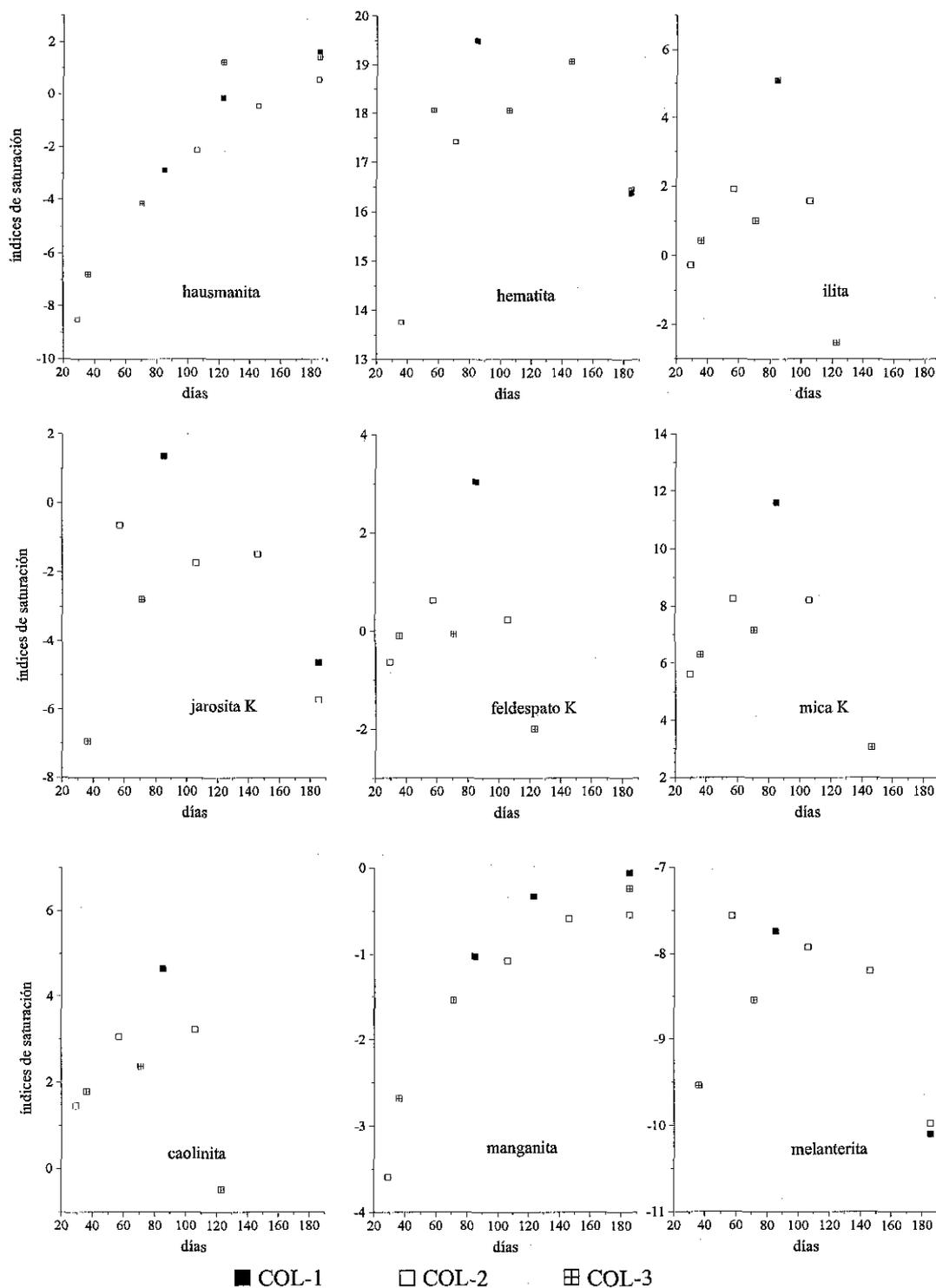


Figura 50. Índices de saturación de las fases minerales: hausmanita, hematita, ilita, jarosita K, feldespato K, mica K, caolinita, manganita y melanterita; derivados de la modelación geoquímica de los lixiviados generados en las columnas de lixiviación

145

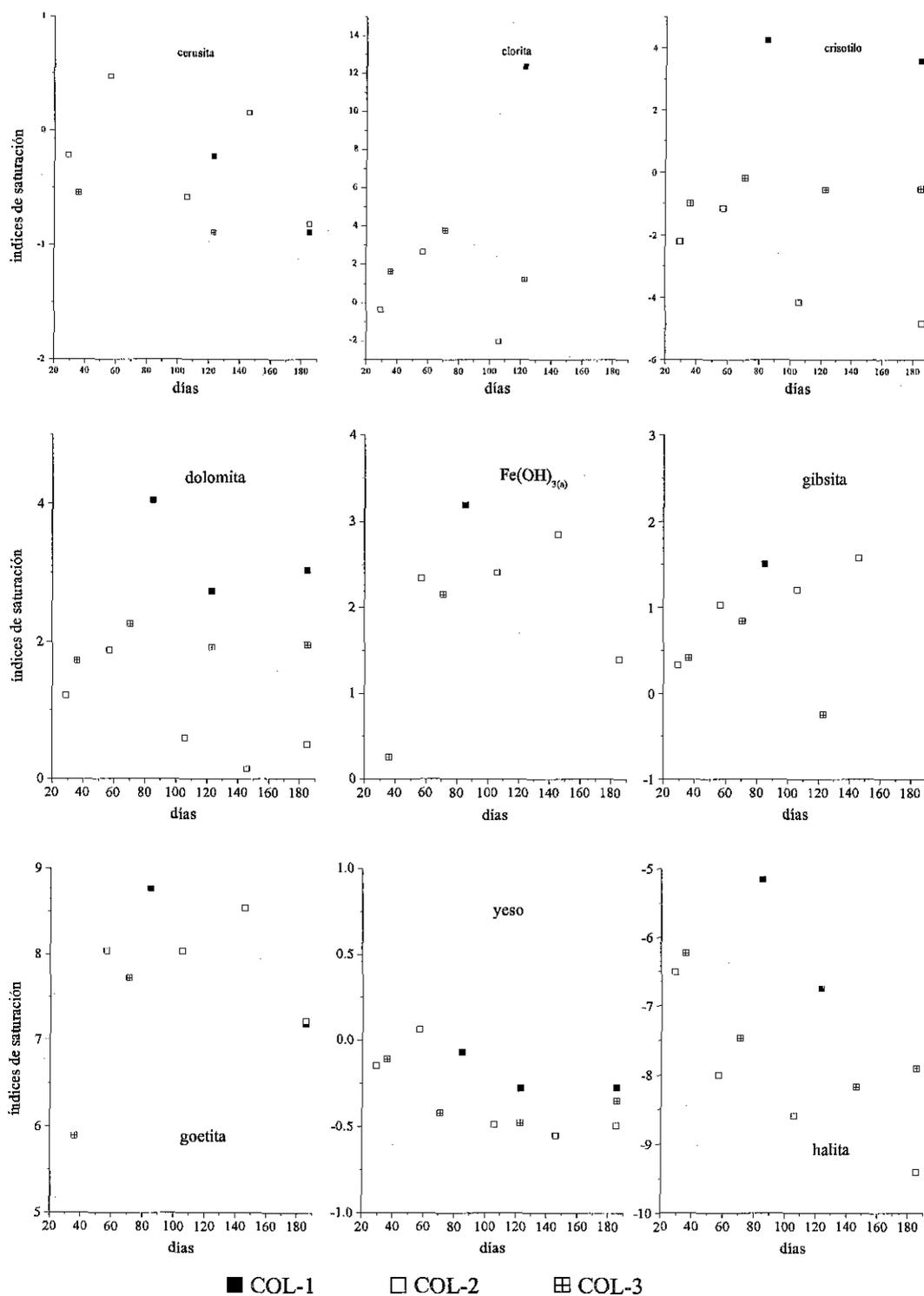


Figura 49. Índices de saturación de las fases minerales: cerusita, clorita, crisotilo, dolomita, $\text{Fe}(\text{OH})_{3(a)}$, gibsita, goetita, yeso y halita; derivados de la modelación geoquímica de los lixiviados generados en las columnas de lixiviación

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

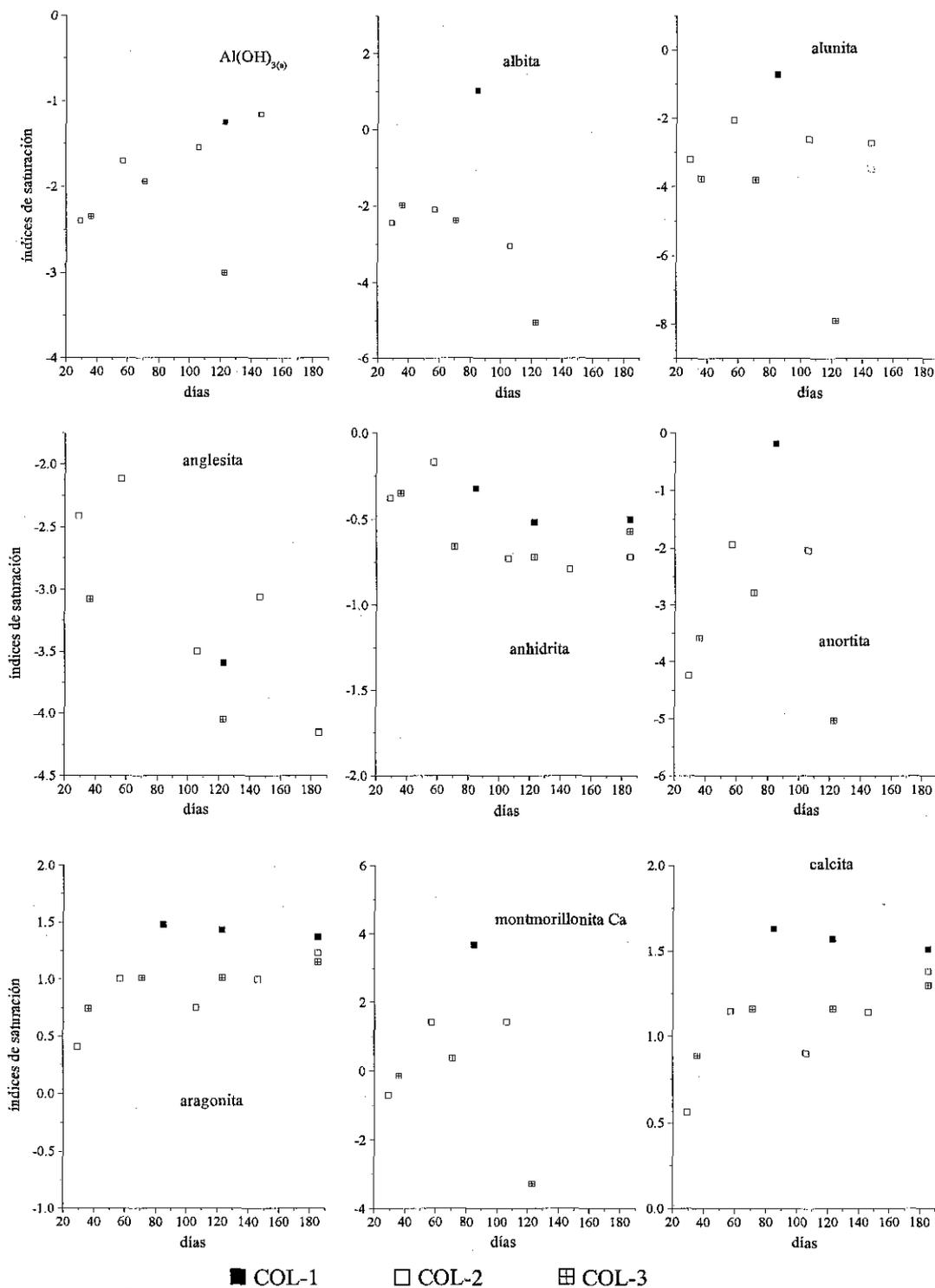
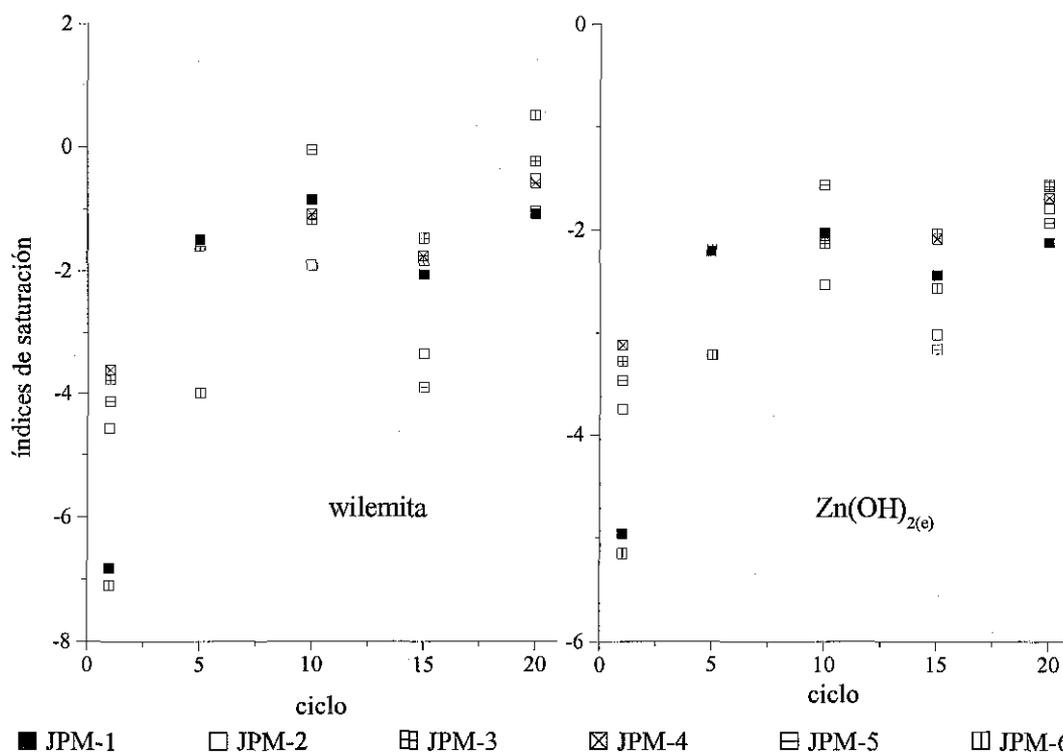


Figura 48. Índices de saturación de las fases minerales: Al(OH)_{3(a)}, albita, alunita, anglesita, anhidrita, anortita, aragonita, montmorillonita y calcita; derivados de la modelación geoquímica de los lixiviados generados en las columnas de lixiviación



■ JPM-1 □ JPM-2 ▨ JPM-3 ▩ JPM-4 ▤ JPM-5 ▥ JPM-6
Figura 47. Índices de saturación de las fases minerales: wilemita y Zn(OH)_{2(e)}; obtenidos en la modelación geoquímica de los lixiviados derivados en las celdas húmedas

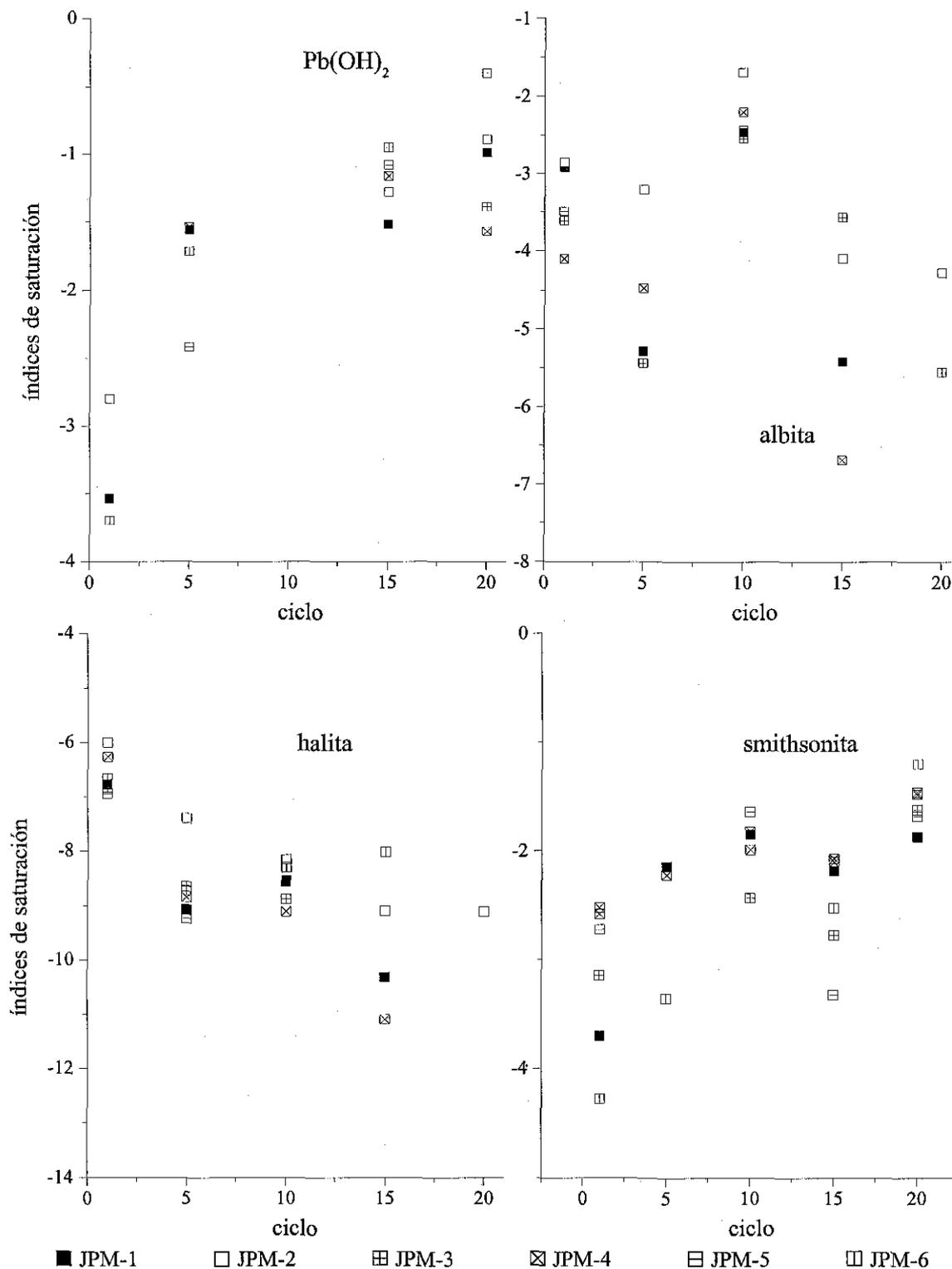
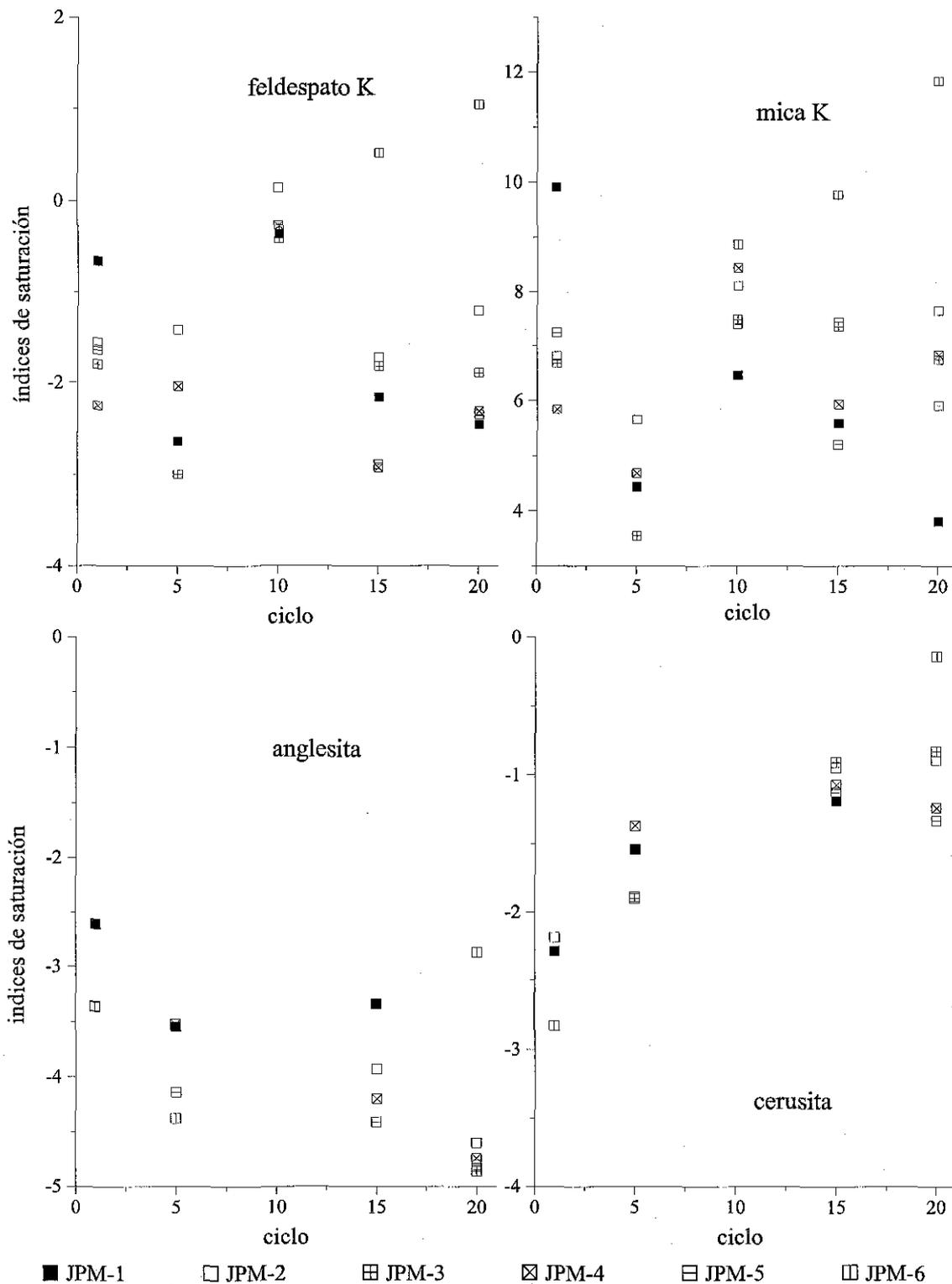


Figura 46. Índices de saturación de las fases minerales: $Pb(OH)_2$, albita, halita y smithsonita; derivados de la modelación geoquímica de los lixiviados generados en las celdas húmedas



■ JPM-1 □ JPM-2 ▨ JPM-3 ▩ JPM-4 ▤ JPM-5 ▥ JPM-6
Figura 45. Índices de saturación de las fases minerales: feldespato K, mica K, anglesita y cerusita; derivados de la modelación geoquímica de los lixiviados generados en las celdas húmedas

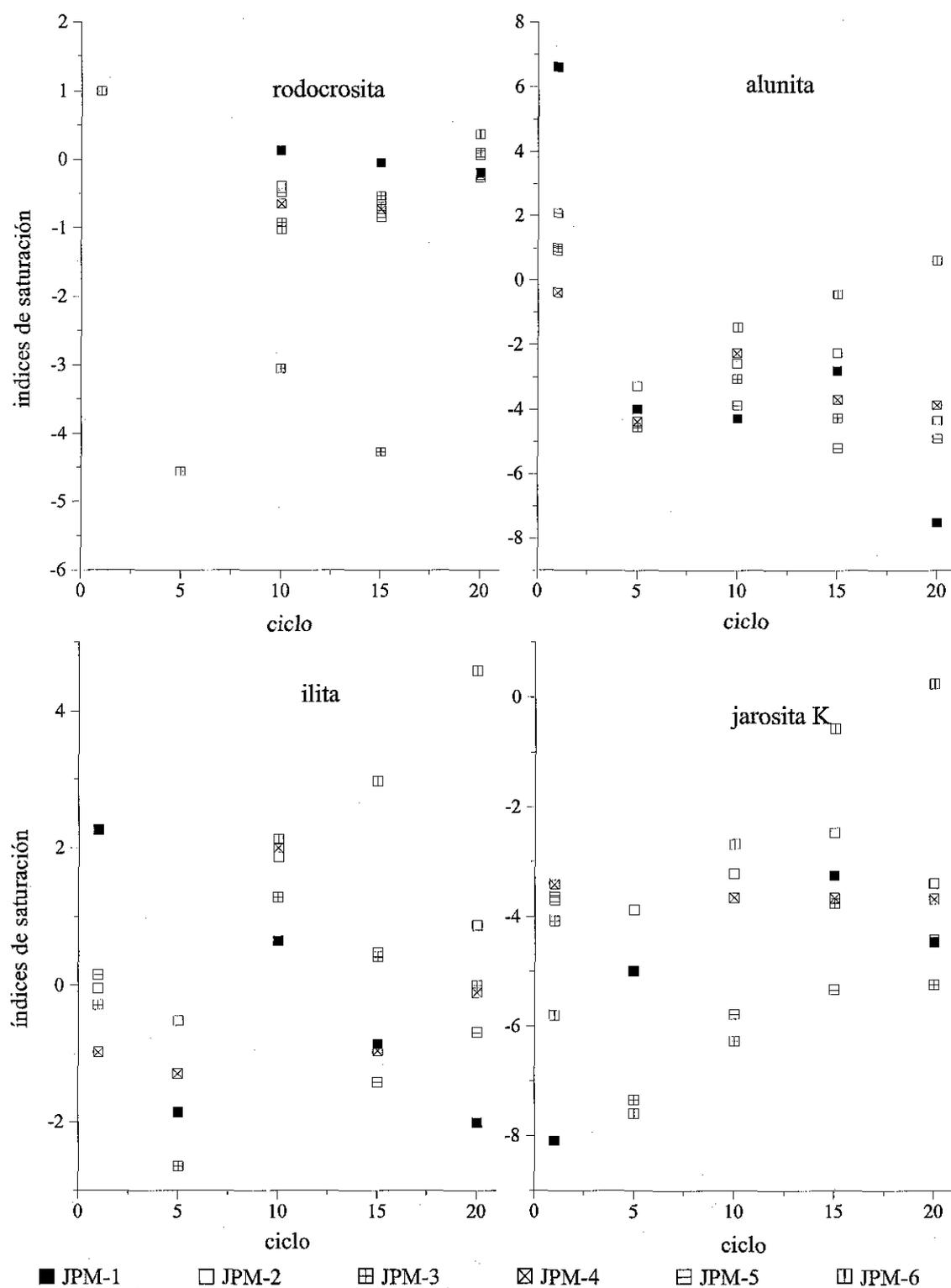


Figura 44. Índices de saturación de las fases minerales: rodocrosita, alunita, ilita y jarosita K; derivados de la modelación geoquímica de los lixiviados generados en las celdas húmedas

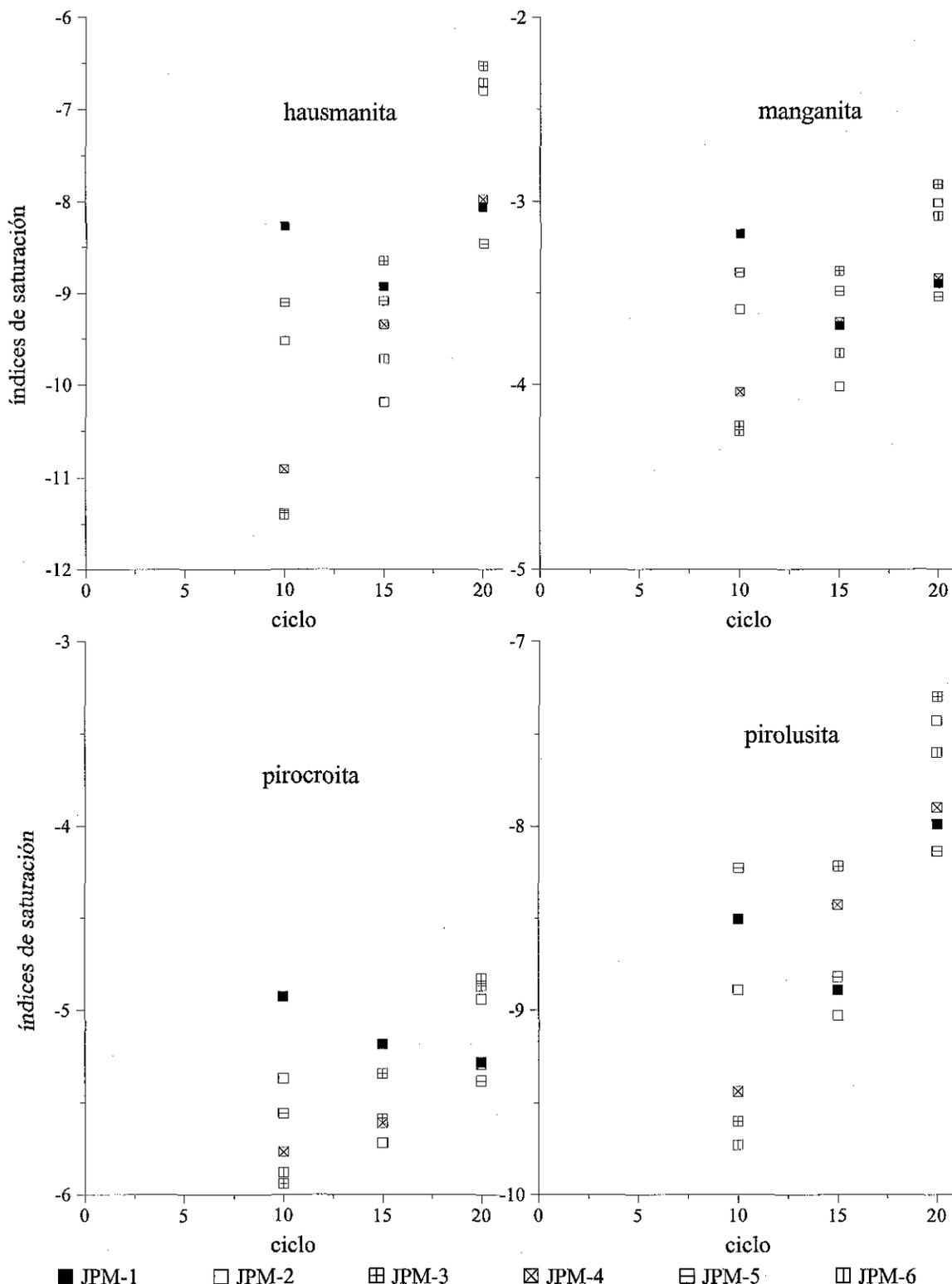
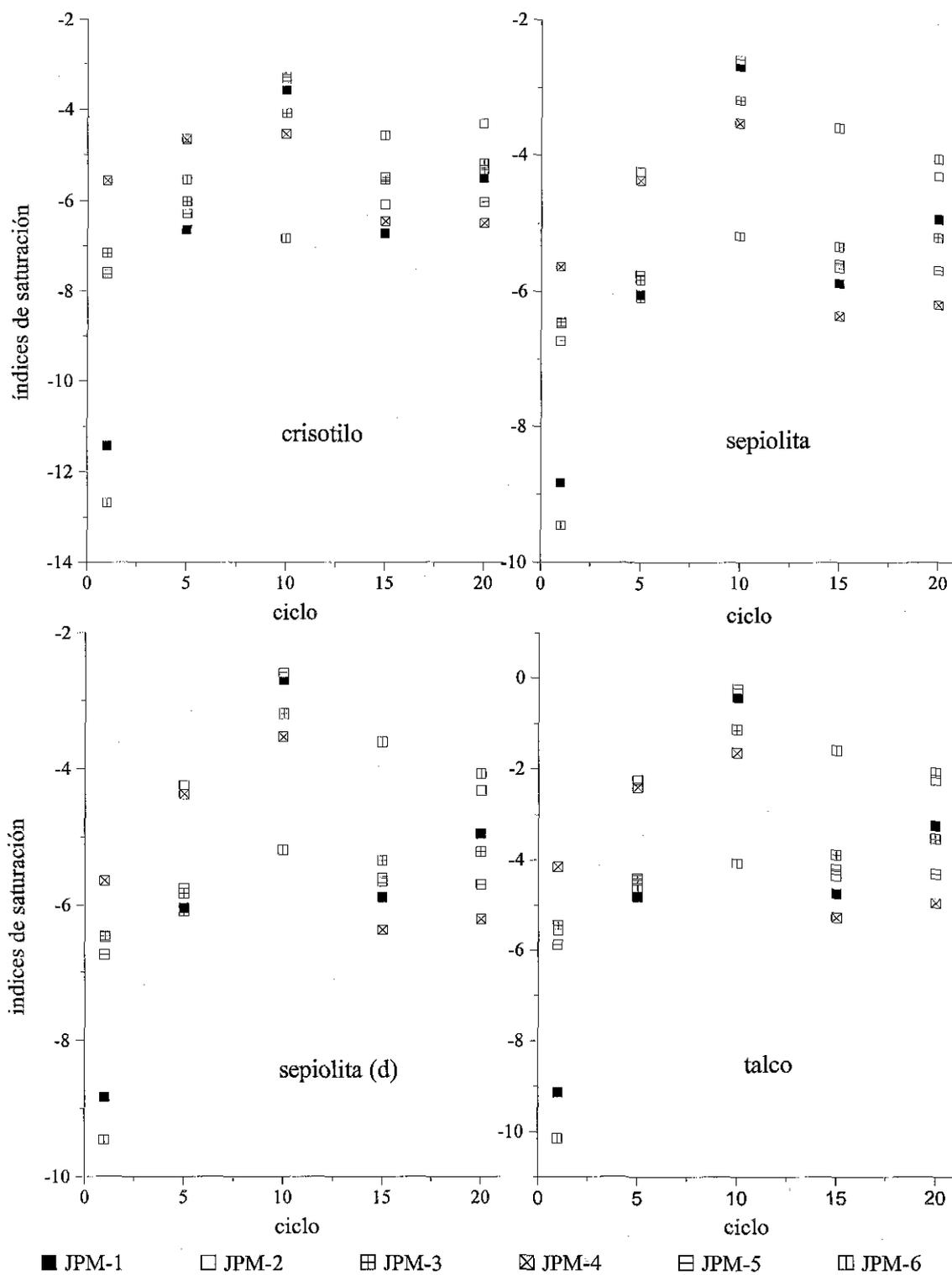


Figura 43. Índices de saturación de las fases minerales: hausmanita, manganita, pirocroita y pirolusita; derivados de la modelación geoquímica de los lixiviados generados en las celdas húmedas



■ JPM-1 □ JPM-2 ▨ JPM-3 ▩ JPM-4 ▤ JPM-5 ▥ JPM-6
Figura 42. Índices de saturación de las fases minerales: crisotilo, sepiolita, sepiolita (d) y talco; derivados en la modelación geoquímica de los lixiviados generados en las celdas húmedas

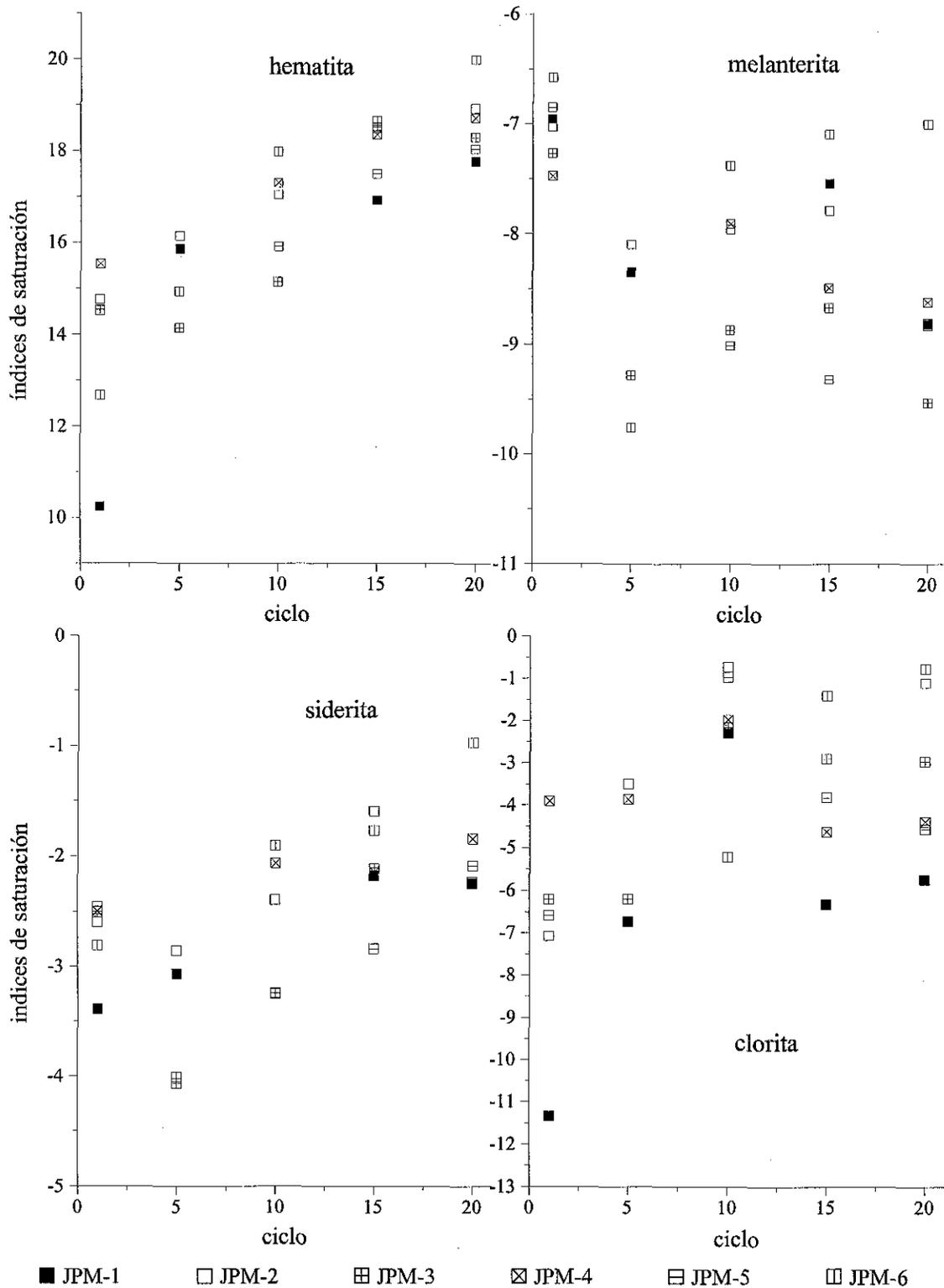


Figura 41. Índices de saturación de las fases minerales: hematita, melanterita, siderita y clorita; derivados en la modelación geoquímica de los lixiviados generados en las celdas húmedas

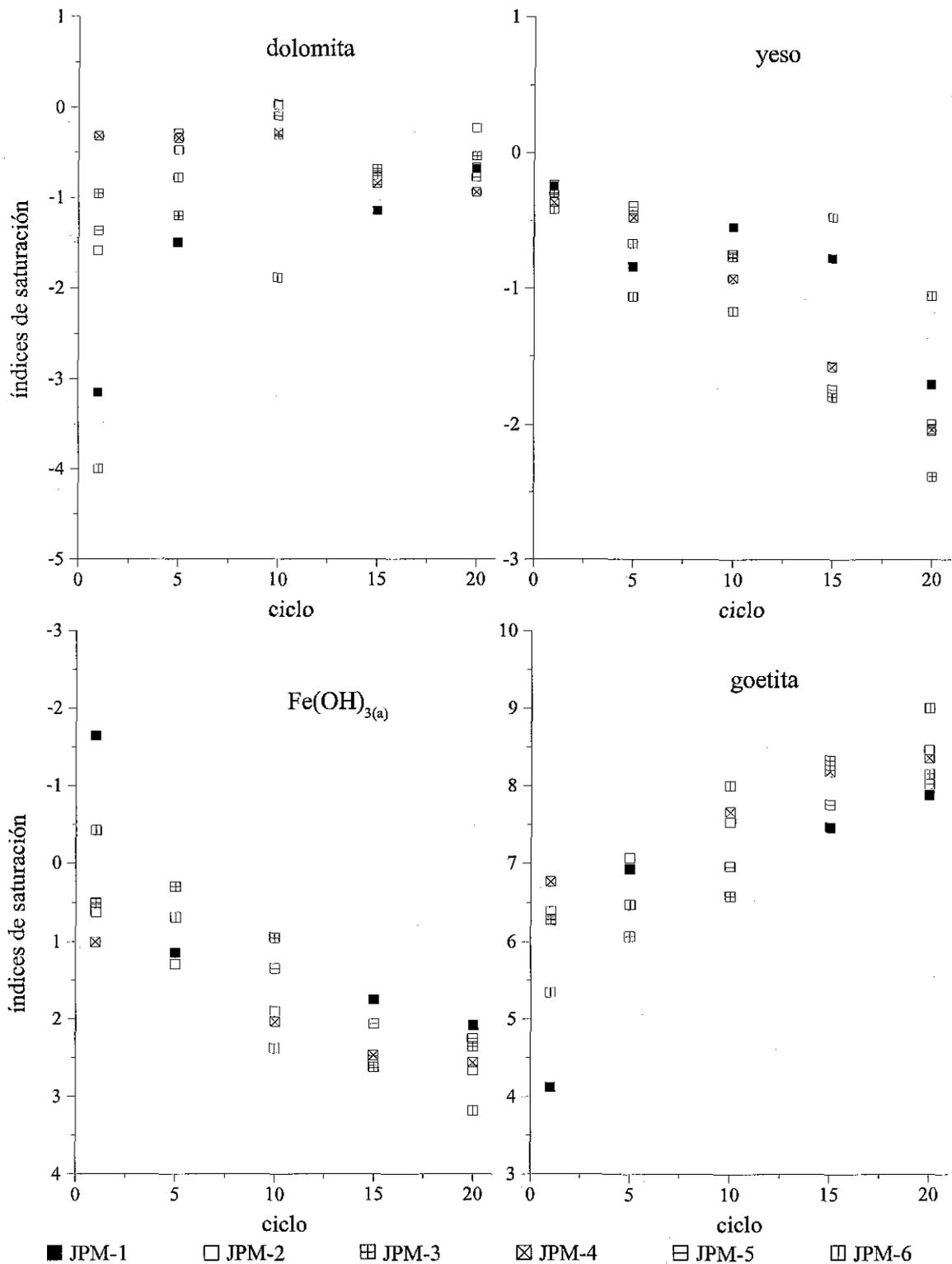


Figura 40. Índices de saturación de las fases minerales: dolomita, yeso, Fe(OH)_{3(a)} y goetita; derivados de la modelación geoquímica de los lixiviados generados en las celdas húmedas

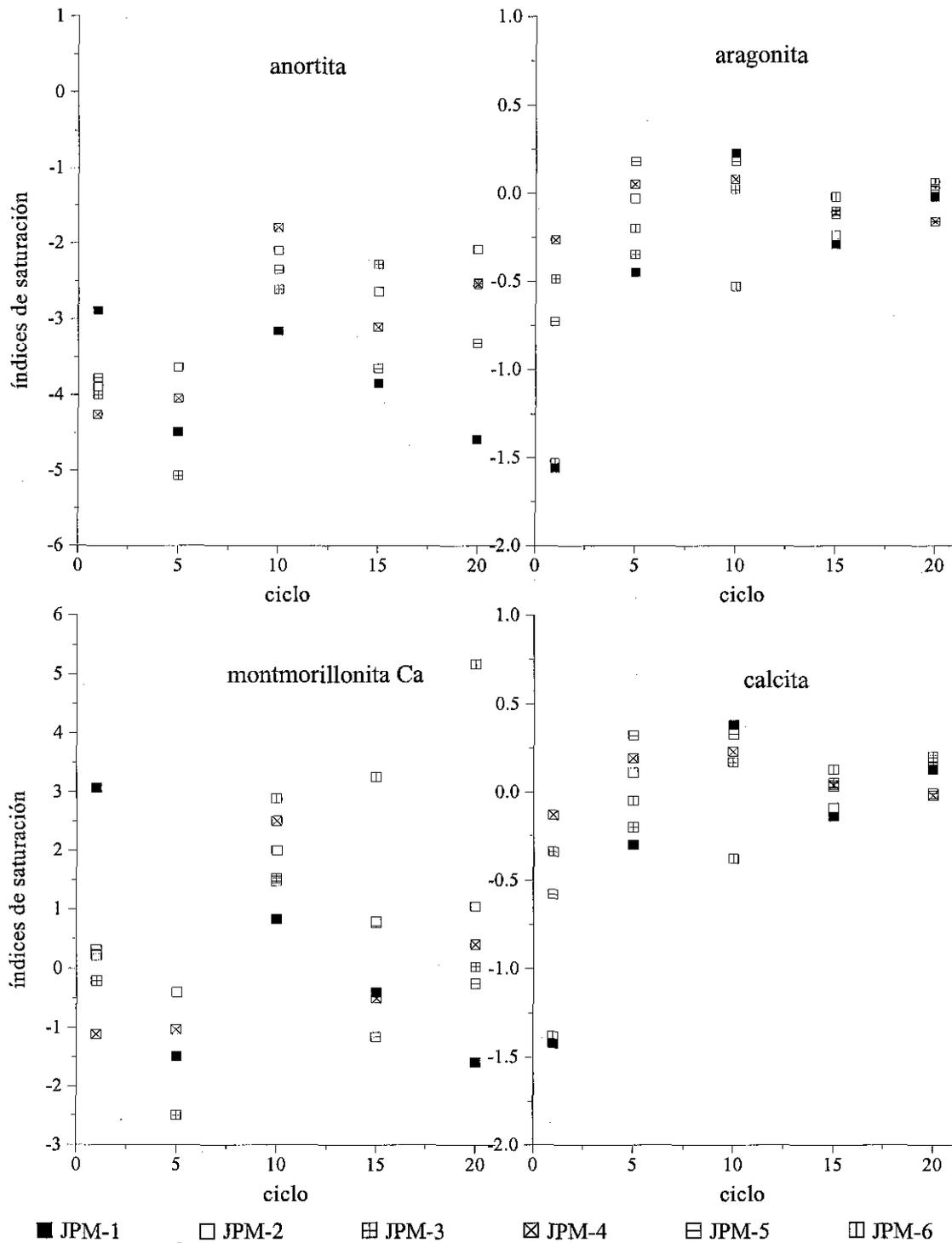


Figura 39. Índices de saturación de las fases minerales: anortita, aragonita, montmorillonita Ca y calcita; derivados de la modelación geoquímica de los lixiviados generados en las celdas húmedas

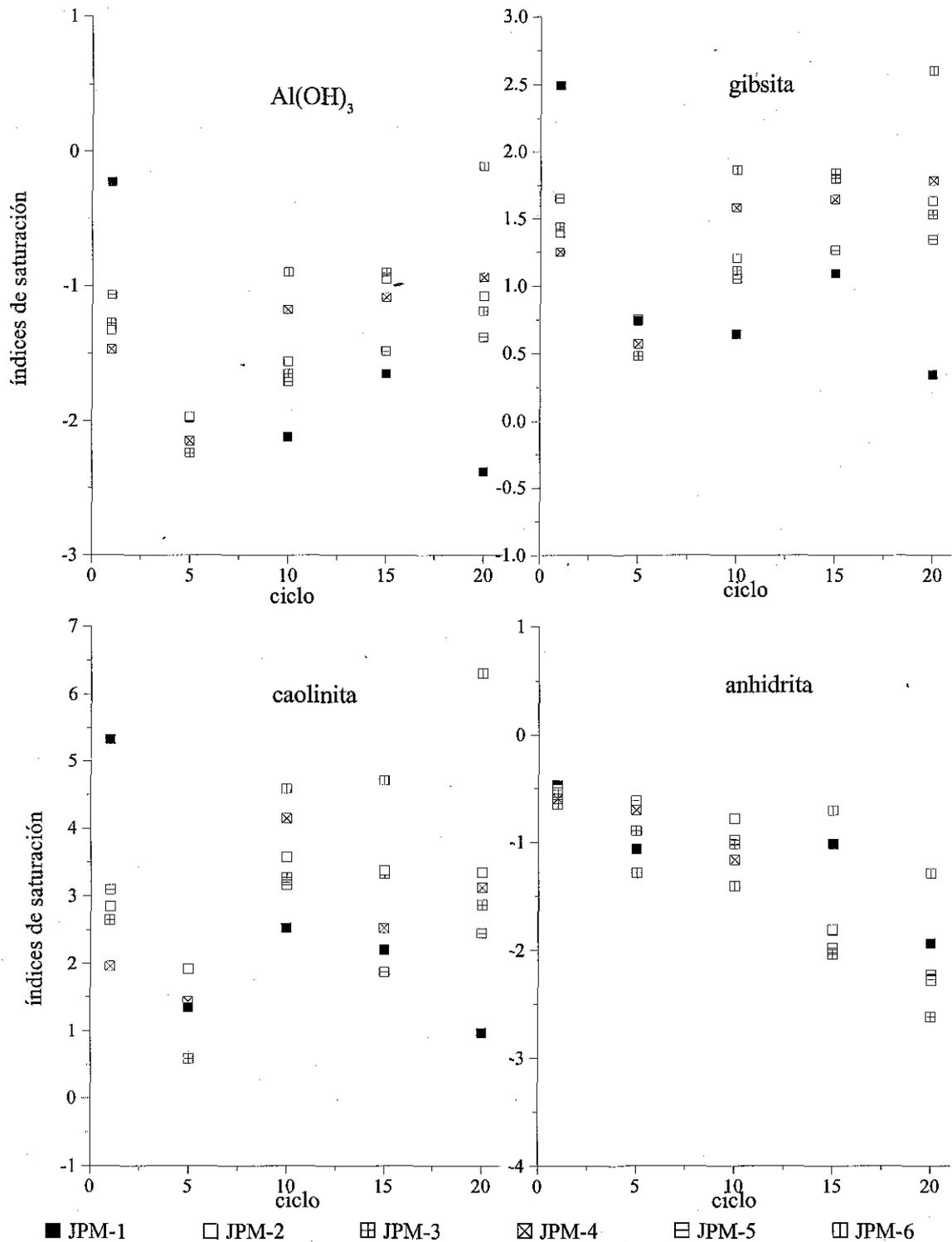


Figura 38. Índices de saturación de las fases minerales: Al(OH)₃, gibbsite, caolinita y anhidrita; derivados de la modelación geoquímica de los lixiviados generados en las celdas húmedas