



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN
DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA EN EL DEPÓSITO
DE JALES "EL LAVADERO", EN SAN FELIPE DE
JESÚS, SONORA, MÉXICO.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

PRESENTA:

I.M. FRANCISCO JAVIER MORA SÁNCHEZ

DIRECTOR: DR. AGUSTÍN GÓMEZ ÁLVAREZ

CODIRECTOR: DR. MARTÍN ANTONIO ENCINAS ROMERO

Hermosillo, Sonora

Julio, 2021

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

OFICIO DE APROBACIÓN DEL JURADO

UNIVERSIDAD DE SONORA

APROBACION DEL JURADO

de la tesis presentada por:

Francisco Javier Mora Sánchez

Esta tesis ha sido revisada por cada uno de los miembros del Jurado y por mayoría de votos la han encontrado satisfactoria.

11/junio/2021
Fecha


Dr. Agustín Gómez Álvarez
Presidente

11/junio/2021
Fecha


Dr. Martín Antonio Encinas Romero
Secretario

11/junio/2021
Fecha


Dr. Jesús Leobardo Valenzuela García
Vocal

11/junio/2021
Fecha


Dr. Martín Jara Marini
Sinodal Externo

OFICIO DE AUTORIZACIÓN DE EXAMEN DE GRADO



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ingeniería

Posgrado en Ciencias de la Ingeniería: Ingeniería Química

AUTORIZACIÓN DEL EXAMEN DE GRADO

16 de Junio de 2021.

Por medio de la presente se hace constar que el estudiante **FRANCISCO JAVIER MORA SÁNCHEZ**, ha cumplido satisfactoriamente con los requisitos académicos correspondientes para la realización del Examen de grado del programa de Maestría en Ciencias de la Ingeniería.

A handwritten signature in blue ink, reading "Abraham Rogelio Martín García".

DR. ABRAHAM ROGELIO MARTÍN GARCÍA
COORDINADOR DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA:
INGENIERÍA QUÍMICA

RESUMEN

La minería en México ha evolucionado en los últimos años y ha cooperado de gran manera con los ingresos de la nación. Sin embargo, como resultado de varios siglos de actividad, se han acumulado grandes cantidades de residuos sobre la corteza terrestre denominados “jales”, los cuales contribuyen en gran medida a la contaminación del suelo, agua y biota. Estos al quedar expuestos al agua y oxígeno pueden producir drenaje ácido de mina (DAM), el cual ha sido catalogado como uno de los problemas de contaminación más importantes en naciones que tienen o han tenido actividad minera. La presente investigación tiene la finalidad de realizar un estudio del Depósito de Jales “El Lavadero”, ubicado en San Felipe de Jesús, Sonora, México, con el propósito de evaluar la posible generación de DAM, y su afectación al medio ambiente. Es importante realizar la presente investigación debido a que estos jales pueden ocasionar problemas de contaminación en suelos agrícolas y fuentes de abastecimiento de agua como el río Sonora.

Se realizó un muestreo sistemático y a juicio en el Depósito de Jales “El Lavadero” para coleccionar muestras de jales y de un suelo agrícola aledaño, a las cuales se les determinó potencial redox (Eh) en campo. Una vez las muestras en el laboratorio, se analizó pH, C.E., CaCO₃, S, SO₄⁻², asimismo, se realizó la cuantificación de metales (Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn) totales, y solubles mediante la prueba de extracción de constituyentes tóxicos propuesta por la NOM-141-SEMARNAT-2003. Además, fueron realizadas las pruebas físicas de análisis granulométrico, así como difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (MEB). Adicionalmente se construyeron los diagramas Eh-pH (diagramas de Pourbaix) de cada metal estudiado, en un sistema metal-azufre-agua. Finalmente se llevó a cabo la prueba modificada balance ácido-base (NOM-141-SEMARNAT-2003) para establecer si los jales del Depósito “El Lavadero” son potenciales generadores de DAM. Por último, se realizó una comparación de los resultados con las Normas Oficiales Mexicanas.

Los parámetros químicos obtenidos en los jales y suelo agrícola indicaron valores oxidantes de Eh, bajos de pH (1.7 - 6.6) y altos de C.E. (4425 - 51065 $\mu\text{S/cm}$). Se encontraron cantidades muy bajas de CaCO_3 , así como concentraciones altas de azufre total y como sulfato. Respecto al contenido de metales totales en los jales se presentó el siguiente orden decreciente de concentraciones: $\text{Fe} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Mn} > \text{Cu} > \text{Cd} > \text{Cr}$. En el caso del suelo, dicho orden de concentraciones totales de elementos metálicos fue: $\text{Fe} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{Mn} > \text{Cu} > \text{Cd} > \text{Cr}$. La prueba de extracción de constituyentes tóxicos demostró que el Cd, Cu, Fe, Mn y Zn presente en los jales se encuentran asociados a fases solubles y que pueden representar un peligro para los seres vivos. Por otra parte, en el suelo, el Mn y Zn también se asocian a fases solubles y exceden los valores máximos permitidos por la Normatividad Ambiental de México.

En los diagramas Eh-pH realizados se pudo observar que los metales prevalecen como especies oxidadas solubles principalmente. En lo referente a la caracterización física de los jales y suelos, se observaron fracciones granulométricas finas y sólo en el suelo se encontró la fracción de gravas. Los análisis por DRX y MEB identificaron especies mineralógicas primarias como la pirita y esfalerita, y secundarias como la jarosita, dichas especies son comunes en los ambientes donde se genera DAM. Por último, la prueba modificada balance ácido-base demostró que los jales del Depósito "El Lavadero" presentan alto potencial de acidez (PA) respecto al potencial de neutralización (PN), presentándose la relación PN/PA inferior a 1.2, por lo tanto, se clasifican como potenciales productores de DAM. Teniendo en cuenta los resultados anteriores, el Depósito de Jales "El Lavadero" puede representar un peligro hacia el medio ambiente.

ABSTRACT

Mining activities have been growing up in the latest days and have contributed with nation's economy. However, as a result of several centuries working, mining tailings which can pollute soils, water and living beings, have been placed on the earth crust. Mining tailings when are in contact with oxygen and water can produce acid mine drainage (AMD) which is considered as one of the more important pollution problems in countries which have or have had mining operations. The objective of this research is to study the tailings deposit called "El Lavadero" located in San Felipe de Jesús, Sonora, Mexico, with the purpose of estimate the acid mine drainage generation and its impact on the environment. Is important to do this study because mining tailings can cause pollution problems in agricultural soils and water supply sources like Sonora river.

A systematic field sampling was carried out in the tailings deposit, collecting samples in mine tailings and in an agricultural soil nearby. In the field was measured redox potential and when the samples were at the laboratory, it was measured pH, C.E., CaCO_3 , S, SO_4^{2-} , and metal content (Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb and Zn), whole content and water-soluble with the test of extraction of toxic constituents (NOM-141-SEMARNAT-2003). It was carried out physical tests of granulometric analysis, X ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). Eh-pH diagrams were made for each metal in a system metal-sulfur-water. Finally, the modified acid-base balance test was carried out to determine if tailings are acid mine drainage generators. Obtained results were compared with Mexican Official Standards.

Chemical parameters obtained in mining tailings and agricultural soil showed oxidizing redox potential values, low pH values (1.7 – 6.6) and high C.E. values (4425 – 51065 $\mu\text{S}/\text{cm}$). It was found low amounts of CaCO_3 and high concentrations of sulfur and sulfates. Regarding the metal content in mining tailings, the concentrations had the next order: $\text{Fe} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Mn} > \text{Cu} > \text{Cd} > \text{Cr}$. In the soil, the order was the next: $\text{Fe} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{Mn} > \text{Cu} > \text{Cd} > \text{Cr}$. The test of extraction of toxic constituents showed that Cd, Cu, Fe, Mn and Zn in tailings are associated with soluble phases and they can represent a danger for the living beings. On the other hand, in the soil, Mn and Zn are associated

with soluble phases and exceed the limit concentrations in accordance with environmental regulations.

On the Eh-pH diagrams it was showed that all metals remain mainly as water soluble oxidized species. Regarding the physical tests on tailings and soil, it was showed up fine particle size fractions, and only in the soil was found the gravel fraction. The tests of XRD and SEM identified primary mineralogical species such as pyrite and sphalerite, and secondary ones such as jarosite, these species are common in environments where AMD is generated. Finally, the modified acid-base balance test showed that the tailings from “El Lavadero” deposit present a high acidity potential (AP) with respect to the neutralization potential (NP), having a ratio NP/AP less than 1.2, therefore, mining tailings are considered acid mine drainage generators. With the results above showed the tailings of “El Lavadero” may represent a danger to the environment.

DEDICATORIA

A mis padres por ser ejemplo de dedicación, esfuerzo y perseverancia, y por inculcarme los valores que ahora poseo.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	V
ABSTRACT	V
LISTA DE FIGURAS.....	XIII
LISTA DE TABLAS	XV
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1. Introducción	1
1.2. Justificación	4
1.3. Objetivo General	5
1.4. Objetivos Específicos.....	5
1.5. Hipótesis de Trabajo	5
CAPÍTULO 2.....	6
ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS.....	6
2.1. Introducción	6
2.2. Problemática Ambiental Provocada por el DAM	7

2.3. Drenaje Ácido de Mina (DAM)	9
2.3.1. Generalidades del DAM	9
2.3.2. Etapas de generación del DAM.....	10
2.3.3. Diagramas Eh-pH en estudios de predicción del DAM.....	12
2.4. Química del DAM	13
2.4.1. Reacciones de formación	13
2.4.2. Reacciones de neutralización.....	14
2.5. Microorganismos Presentes en la Producción del DAM	15
2.6. Factores que Influyen en la Formación del DAM	17
2.6.1. Factores físicos.....	17
2.6.2. Factores químicos	18
2.6.3. Factores biológicos.....	19
2.7. Predicción de la Generación del DAM	20
2.7.1. Pruebas estáticas	20
2.7.2. Pruebas cinéticas	21
2.8. Efectos del DAM en los Recursos Acuáticos	22
2.9. Estudios Realizados de Generación de DAM	25
2.10. Tratamientos Aplicados al DAM	26
2.10.1. Tratamientos pasivos	27
2.11. Depósito de Jales “El Lavadero”	31
2.11.1. Localización geográfica	31
2.11.2. Aspectos generales e historia	31
2.11.3. Características físicas de los jales.....	33

2.11.4.	Método de beneficio.....	33
2.11.5.	Geología	33
2.11.6.	Climatología	33
2.11.7.	Población y actividades económicas.....	34
2.11.8.	Fauna y vegetación	34
2.11.9.	Estudios de impacto ambiental.....	34
CAPÍTULO 3.....		35
MATERIALES Y MÉTODOS		35
3.1.	Materiales y Equipos.....	35
3.1.1.	Materiales	35
3.1.2.	Equipos.....	35
3.2.	Muestreo de Campo	36
3.3.	Tratamiento de la Muestra.....	39
3.4.	Pruebas Físicas.....	39
3.4.1.	Análisis granulométrico	39
3.4.2.	Difracción de rayos X (DRX).....	39
3.4.3.	Microscopía electrónica de barrido (MEB)	40
3.5.	Pruebas Químicas	40
3.5.1.	Potencial hidrógeno (pH), potencial redox (Eh) y conductividad eléctrica	40
3.5.2.	Azufre total (S_{total})	42
3.5.3.	Sulfatos (SO_4^{-2})	42
3.5.4.	Carbonato de calcio ($CaCO_3$)	43
3.5.5.	Metales totales (Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn)	43

3.5.6.	Prueba de extracción de constituyentes tóxicos	44
3.5.7.	Diagramas Eh-pH (diagramas de Pourbaix).....	44
3.6.	Prueba para Evaluar DAM	44
3.6.1.	Prueba estática (PM-BAB).....	44
3.7.	Normatividad Ambiental.....	46
3.8.	Control de Calidad	46
CAPÍTULO 4.....		50
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		50
4.1.	Pruebas Físicas.....	50
4.1.1.	Análisis granulométrico	50
4.1.2.	Caracterización mineralógica (DRX)	53
4.1.3.	Análisis por microscopía electrónica de barrido	55
4.2.	Parámetros y/o Pruebas Químicas.....	58
4.2.1.	Potencial hidrogeno (pH)	58
4.2.2.	Potencial redox (Eh)	60
4.2.3.	Conductividad eléctrica (C.E.)	61
4.2.4.	Azufre total (S_{total})	62
4.2.5.	Sulfatos (SO_4^{-2})	63
4.2.6.	Carbonato de calcio ($CaCO_3$)	63
4.2.7.	Metales totales	64
4.2.8.	Prueba de extracción de constituyentes tóxicos	67
4.2.9.	Modificación a la prueba de extracción de constituyentes tóxicos	70
4.2.10.	Diagramas Eh-pH.....	72

4.3. Prueba Estática (PM-BAB)	75
4.4. Acciones Correctivas y/o Preventivas Para El Tratamiento de las Soluciones Ácidas Producidas por la Generación de DAM en el Depósito de Jales “El Lavadero”	79
CAPÍTULO 5.....	80
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	80
5.1. Conclusiones.....	80
5.2. Recomendaciones.....	82
CAPÍTULO 6.....	83
BIBLIOGRAFÍA	83
ANEXOS	93
Anexo A: Resultados del control de calidad durante el análisis de los parámetros analíticos utilizados en el estudio del Depósito de Jales “El Lavadero” y suelo agrícola.	94
Anexo B: Difractogramas obtenidos por DRX en las estaciones de muestreo 1B, 2A, 3A, 4B, 5D y BC del Depósito de Jales “El Lavadero” y suelo agrícola.....	100
Anexo C: Diagramas Eh-pH para Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn en los jales del Depósito “El Lavadero” y suelo agrícola (estaciones de muestreo 1B, 2A, 3A, 4B, 5D y BC).....	107
Anexo D: Fotografías de campo del Depósito de Jales “El Lavadero” y suelo agrícola, San Felipe de Jesús, Sonora, México.	115

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Etapas de generación de DAM (Ferguson y Erickson, 1987).....	10
Figura 2. Proceso de neutralización con cal convencional (sistema de tratamiento activo) (EPA, 1983).....	26
Figura 3. Disposición de las celdas en un humedal aerobio con circulación de agua en su interior (EPA, 2000).	28
Figura 4. Disposición de las capas en humedal anaerobio (Aduvire, 2006).	29
Figura 5. Localización del área de estudio, denominado Depósito de Jales “El Lavadero” en San Felipe de Jesús, Sonora, México.....	32
Figura 6. Localización de las estaciones de muestreo en el Depósito de Jales “El Lavadero” y suelo agrícola.	37
Figura 7. Microfotografías y análisis químico puntual mediante MEB acoplada con espectrometría de rayos X por energía dispersa en los jales del Depósito “El Lavadero”, en las estaciones 1B (a), 2A (b), 3A (c), 4B (d), suelo agrícola de la estación 5D (e) y estación BC (f).	56
Figura 8. Relación entre el potencial de neutralización y el potencial de acidez de los jales del Depósito “El Lavadero” y suelo agrícola aledaño, comparada con los criterios establecidos por la Normatividad Ambiental de México.	78
Figura B1. Difractograma obtenido por DRX en los Jales de la estación 1B.....	101
Figura B2. Difractograma obtenido por DRX en los Jales de la estación 2A.....	102
Figura B3. Difractograma obtenido por DRX en los Jales de la estación 3A.....	103
Figura B4. Difractograma obtenido por DRX en los Jales de la estación 4B.....	104
Figura B5. Difractograma obtenido por DRX en el suelo agrícola de la estación 5D.	105
Figura B6. Difractograma obtenido por DRX en el material del cerro no impactado de la estación BC (blanco de campo).....	106
Figura C1. Diagrama Eh-pH del sistema Cd-S-H ₂ O en los jales del Depósito “El Lavadero” y suelo agrícola de las estaciones 1B, 2A, 3A, 4B, 5D y BC.	108
Figura C2. Diagrama Eh-pH del sistema Cr-S-H ₂ O en los jales del Depósito “El Lavadero” y suelo agrícola de las estaciones 1B, 2A, 3A, 4B, 5D y BC.	109

Figura C3. Diagrama Eh-pH del sistema Cu-S-H ₂ O en los jales del Depósito “El Lavadero” y suelo agrícola de las estaciones 1B, 2A, 3A, 4B, 5D y BC.	110
Figura C4. Diagrama Eh-pH del sistema Fe-S-H ₂ O en los jales del Depósito “El Lavadero” y suelo agrícola de las estaciones 1B, 2A, 3A, 4B, 5D y BC.	111
Figura C5. Diagrama Eh-pH del sistema Mn-S-H ₂ O en los jales del Depósito “El Lavadero” y suelo agrícola de las estaciones 1B, 2A, 3A, 4B, 5D y BC.	112
Figura C6. Diagrama Eh-pH del sistema Pb-S-H ₂ O en los jales del Depósito “El Lavadero” y suelo agrícola de las estaciones 1B, 2A, 3A, 4B, 5D y BC.	113
Figura C7. Diagrama Eh-pH del sistema Zn-S-H ₂ O en los jales del Depósito “El Lavadero” y suelo agrícola de las estaciones 1B, 2A, 3A, 4B, 5D y BC.	114
Figura D1. Diferentes perspectivas de los jales del Depósito “El Lavadero”.	116
Figura D2. DAM producido por la interacción del agua de lluvia con los jales.....	117
Figura D3. Suelo agrícola aledaño al Depósito de Jales “El Lavadero”.....	118
Figura D4. Sitio de descarga de contaminantes en el suelo agrícola provenientes del Depósito de Jales “El Lavadero” (Estación de muestreo 5D).....	119

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Principales características del impacto del DAM en el agua (Lottermoser, 2010).....	24
Tabla 2. Estudios realizados de generación de DAM a nivel nacional e internacional.....	25
Tabla 3. Localización geográfica, color y tipo de material de las estaciones de muestreo del Depósito de Jales “El Lavadero” y suelo agrícola aledaño.....	38
Tabla 4. Parámetros y métodos analíticos utilizados en el análisis de las muestras de jales del Depósito “El Lavadero” y suelo agrícola.....	41
Tabla 5. Resultados del análisis granulométrico en los jales del Depósito “El Lavadero” y suelo agrícola aledaño.....	51
Tabla 6. Caracterización mineralógica por DRX de las estaciones de muestreo del Depósito de Jales “El Lavadero” y suelo agrícola aledaño (*).	54
Tabla 7. Parámetros químicos analizados en las estaciones de muestreo del Depósito de Jales “El Lavadero” y suelo agrícola aledaño.	59
Tabla 8. Interpretación de la C.E para suelos ($\mu\text{S}/\text{cm}$) según la NOM-021-RECNAT-2000.	61
Tabla 9. Concentración (promedio \pm desviación estándar) de metales totales (mg/kg) en los jales del Depósito “El Lavadero” y suelo agrícola aledaño (*).	65
Tabla 10. Resultados de la prueba de extracción de constituyentes tóxicos (mg/L) en los jales del Depósito “El Lavadero” y suelo agrícola aledaño, en base a la NOM-141-SEMARNAT-2003.	68
Tabla 11. Comparación de los resultados (mg/L) de la prueba de extracción de constituyentes tóxicos en los jales del Depósito “El Lavadero” y suelo agrícola, considerando las adecuaciones sugeridas por Corrales-Pérez y Romero (2018).....	71
Tabla 12. Valores de potencial redox (Eh), pH, temperatura y concentración de metales (moles/L) utilizados para realizar los diagramas Eh-pH.....	73

Tabla 13. Resultados obtenidos de la prueba estática (PM-BAB) en los jales del Depósito “El Lavadero” y suelo agrícola, según la NOM-141-SEMARNAT-2003.....	77
Tabla A1. Parámetros de calidad utilizados en la calibración del equipo de absorción atómica AAnalyst 400, en el análisis de metales totales.	95
Tabla A2. Parámetros de calidad utilizados en la calibración del equipo de absorción atómica AAnalyst 400, en el análisis de metales en la prueba de extracción de constituyentes tóxicos.	95
Tabla A3. Indicadores de calidad de los datos. Parámetros analíticos realizados en el Depósito de Jales “El Lavadero”.....	96
Tabla A4. Valores de DPR obtenidos en los duplicados de campo en las estaciones de muestreo 1B y 3C.....	97
Tabla A5. Valores de DPR obtenidos en los duplicados analíticos de laboratorio en las estaciones de muestreo 2C y 3B.....	98
Tabla A6. Indicadores de calidad de los datos. Recuperación de metales totales (mg/kg) excepto Fe (%) analizados en el estándar certificado de Inorganics in Marine Sediment (NIST 2702), utilizando la técnica de espectroscopia de absorción atómica.....	99

AGRADECIMIENTO

Agradezco enormemente a mi familia, especialmente a mi padre y madre por su gran apoyo incondicional en todo momento y en mi formación profesional.

Agradezco a mis compañeros, amigos y pareja por su comprensión y buenos momentos compartidos.

A la Universidad de Sonora a través del Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia, al Posgrado en Ciencias de la Ingeniería: Ingeniería Química, y al Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por brindarme la beca para cursar la maestría.

Un agradecimiento muy especial para mi director del trabajo de investigación, el Dr. Agustín Gómez Álvarez, por el completo soporte, asesoría y paciencia brindada desde el inicio de la maestría.

A mi comité de sinodales, los doctores Martín Antonio Encinas Romero, Jesús Leobardo Valenzuela García, Martín Jara Marini, el M.C. Arturo Israel Villalba Atondo, por su enorme y valioso apoyo en las asesorías y recomendaciones para la realización del presente trabajo.

Al Dr. José Refugio Parga Torres, investigador del Instituto Tecnológico de Saltillo, por su sustancial apoyo los análisis por MEB.

A la Q.B. Ana María Pérez Villalba y a la M.S. Guadalupe Dórame Carreño, por su valiosa colaboración y asesoría en las técnicas analíticas.

Al Dr. Abraham Rogelio Martín García, por su permanente disposición para apoyarme y orientarme a lo largo de la maestría.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Introducción

La actividad minera es de gran importancia para la economía de la República Mexicana, la cual se ha estado llevando a cabo desde hace cientos de años con una evolución marcada, y contribuye de gran manera con los ingresos de la nación. Sonora es el estado líder en el sector minero de México, es el más importante extractor de cobre y el único que produce molibdeno, además extrae el 24 % del oro del país, es importante productor de plata y hierro (Secretaría de Economía, 2019). La demanda de los recursos minerales es cada vez mayor, trayendo consigo mayores impactos ambientales negativos como lo es la generación de drenaje ácido de mina (DAM), que es hoy en día de los mayores problemas ambientales causados por la actividad minera (Rivera-Uría et al., 2020). El DAM se genera a partir de que el material estéril que contiene sulfuros minerales queda expuesto a intemperismo en la superficie terrestre, llegando a cubrir grandes áreas y generando reacciones químicas, dando como resultado agua ácida proveniente de mina, que no solo se puede generar a partir de minados en operación, también puede ser causada a partir de antiguos minados de metales y carbón principalmente, cuyas operaciones se cerraron, incluso hace cientos de años (Johnston et al., 2008; Buzatu et al., 2016).

En estos sitios mineros se concentran cantidades considerables de residuos mineros conocidos como jales, que son removidos y expuestos al ambiente debido a la actividad minera, dejando geodisponibles ciertos elementos que antes no lo estaban o lo estaban de forma más reducida. Esta situación representa la principal causa del DAM cuando los jales contienen sulfuros reactivos (Aduvire, 2006; Magdaleno-Rico, 2014).

El DAM se forma cuando los sulfuros son oxidados químicamente. Estos al quedar en un ambiente donde hay agua y oxígeno, reaccionan produciendo la oxidación que se manifiesta en la liberación de sulfatos, acidez, metales y metaloides al medio ambiente. Los sulfuros más reactivos son los de hierro, mientras que los sulfuros de otros metales (Cu, Pb, Zn) son generalmente menos reactivos, esto se debe generalmente a que las estructuras cristalinas de estos últimos presentan mayor estabilidad, además, en ocasiones suelen formarse fases mineralógicas secundarias insolubles que son capaces de cubrir el área superficial de los sulfuros metálicos deteniendo así la oxidación química (Aduvire, 2006). Durante este proceso de oxidación, los carbonatos y aluminosilicatos presentes en el medio pueden neutralizar la acidez y aportar bases y álcalis a la solución disolviéndose y alterándose a fases secundarias como moscovita, caolinita, gibbsita, entre otras (Dold, 2010).

Los componentes más importantes que influyen en la generación del DAM son los minerales sulfurosos, el agua (vapor o líquida) y el oxígeno, si se elimina la presencia de alguno de estos se detiene la generación, de lo contrario, es difícil frenarla, requiriendo algún tipo de tratamiento. Hoy en día muchas de las investigaciones sobre el DAM son enfocadas a los métodos pasivos de tratamiento de las soluciones ácidas, cuya filosofía general se basa en modificar el pH y potencial redox de las soluciones acuosas para favorecer la generación y precipitación de fases no solubles. Además, en este tipo de tratamientos normalmente son utilizados medios naturales como diversos tipos de rocas y minerales que pueden aumentar el pH del DAM y precipitar los metales que se encuentran en forma soluble (Cervantes-Macedo, 2014).

Existen dos tipos de pruebas que se utilizan para predecir el DAM, las denominadas pruebas estáticas y dinámicas. Las primeras predicen la capacidad de formación de DAM en una muestra de una manera cualitativa, mediante la determinación de una relación entre los minerales que son capaces de generar acidez y los que tienen la capacidad de consumir o amortiguar la misma. Las dinámicas son útiles cuando se busca predecir la calidad del agua y sus características (pH, conductividad eléctrica, metales, sulfatos, etc.) de sitios mineros como depósitos de jales o terreros. Las pruebas dinámicas consisten en observar y analizar el comportamiento de una muestra bajo condiciones de

intemperismo simuladas y controladas cuyo fin es conocer ciertos parámetros, por ejemplo, la velocidad de oxidación de los sulfuros (EPA, 1994).

El presente estudio busca estimar el potencial de generación de DAM del Depósito de Jales “El Lavadero” que se ubica en el estado de Sonora, México, particularmente en el municipio de San Felipe de Jesús, el cual es producto de la explotación de yacimientos minerales. Dicho estudio se lleva a cabo en dos fases: La primera de estas se basa en realizar un muestreo en campo con el propósito de coleccionar muestras, y llevar a cabo su caracterización fisicoquímica. La segunda trata de predecir la probable generación del DAM, mediante ensayos estáticos, particularmente en la prueba modificada balance ácido base (PM-BAB), la cual evalúa la capacidad de los jales para formar el DAM, así como para neutralizarlo. En la realización de las dos etapas, se utilizan las técnicas analíticas recomendadas en las normas y/o criterios ambientales establecidos en la Normatividad Mexicana. Lo anterior ayudará a definir la dimensión actual de la posible formación del DAM del Depósito de Jales “El Lavadero”. Asimismo, evaluar su potencial de afectación a los suelos aledaños al cauce del río Sonora. Por último, en caso de que exista la generación de DAM se propondrán acciones correctivas o preventivas que ayuden en el tratamiento de las soluciones ácidas producidas.

1.2. Justificación

Cuando los residuos producidos por la industria minero-metalúrgica son formadores de DAM, los efectos sobre la fauna acuática y terrestre, así como en la flora de las áreas aledañas a la explotación minera suelen ser graves. Un gran número de cuerpos de agua naturales afectados por el DAM presentan valores de pH por abajo de 4 (EarthWorks, 2002). Existen investigaciones que han reportado el fallecimiento de una gran cantidad de fauna acuática, enfermedades en la fauna terrestre y destrucción de la flora, así como la afectación en la calidad del agua y sedimentos de ríos y lagos. El DAM además de caracterizarse por una gran acidez, contiene altas cantidades de sólidos suspendidos, cuyos niveles de sulfatos y elementos metálicos pesados (Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb, Zn) son altos, de hasta varias centenas de mg/L. Los metales pesados cuando se encuentran a una elevada concentración pueden ser peligrosos para los seres vivos, impactan negativamente los cuerpos de agua naturales y son capaces de deteriorar las estructuras que han construido los humanos. Dichos efectos son capaces de perdurar decenas e incluso centenas de años, existiendo la probabilidad de que el DAM sea conducido debido a las precipitaciones o escorrentías a sitios en los que se presenten peligros para el equilibrio ambiental, en la ecología, y en la salud de los seres vivos (Imperial-Pérez, 2010).

Para el caso del Depósito de Jales “El Lavadero”, es importante evaluar el potencial de generación de DAM, ya que se encuentra muy cerca de poblados donde las personas hacen uso de los suelos agrícolas y del agua de la zona, además se encuentra muy cerca del río Sonora, por lo que existe la posibilidad de tener afectaciones en la calidad de sus aguas y sedimentos. El río Sonora abastece de agua a la población que se localiza en los asentamientos aledaños a este río, y desemboca sus aguas en la presa El Molinito. Posteriormente, el agua es trasvasada a la presa Abelardo L. Rodríguez, que abastece a gran parte de la ciudad de Hermosillo, Sonora.

Actualmente, no se han realizado estudios para estimar la generación del DAM en el Depósito de Jales “El Lavadero”. Hay investigaciones reportadas de caracterización química que reportan altos valores de Metales Potencialmente Tóxicos (MPT) (Del Río-Salas et al., 2019). Debido a lo anterior, se realizó un estudio a nivel laboratorio con el

propósito de determinar el grado de generación del DAM proveniente del antiguo centro minero-metalúrgico “El Lavadero”, cuyos jales se encuentran en un ambiente que puede favorecer la oxidación de los sulfuros, y en caso de que sean potenciales generadores de DAM, proponer acciones de posibles tratamientos para solucionar el problema.

1.3. Objetivo General

Realizar un estudio del Depósito de Jales “El Lavadero”, con el propósito de evaluar la posible generación de DAM, y su afectación al Medio Ambiente.

1.4. Objetivos Específicos

- Realizar una campaña de muestreo de campo, para la colecta de muestras de suelos y jales del Depósito “El Lavadero”, utilizando un muestreo sistemático y a juicio.
- Realizar un estudio de caracterización de los suelos y jales a través de pruebas físicas y químicas, y de toxicidad, en base a la Norma Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003.
- Determinar el potencial de generación de DAM en los jales, a través de pruebas estáticas (prueba modificada balance ácido-base).
- Comparar los resultados encontrados con la Normatividad Ambiental Mexicana, para poder conocer si existe una posible afectación al Medio Ambiente.
- Proponer alguna acción correctiva o preventiva para el tratamiento de las soluciones ácidas producidas por la generación de DAM.

1.5. Hipótesis de Trabajo

Los jales del Depósito “El Lavadero”, localizado en San Felipe de Jesús, Sonora, México, son generadores potenciales de drenado ácido de mina (DAM) con altos niveles de MPT y acidez tóxica, lo cual representa un peligro potencial en los suelos aledaños.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

2.1. Introducción

Los Metales Potencialmente Tóxicos (MPT) son todos aquellos elementos metálicos que tienen una densidad superior a 5 g/cm^3 y producen efectos negativos en la salud a pequeñas cantidades. Se incluyen en esta lista el Cd, Cr, Cu, Mn, Hg, Pb, entre otros (Navarro-Aviñó et al., 2007). Estos elementos están distribuidos considerablemente en la superficie de la tierra y no se degradan en el ambiente, pueden entrar al organismo de las personas mediante los alimentos, agua y aire. Algunos MPT desempeñan funciones esenciales en el organismo humano en concentraciones traza, pero en altos contenidos podrían presentar alta toxicidad y poner en peligro la salud, además pueden bioacumularse en la biota. Los elementos metálicos pueden entrar al medio ambiente a partir de actividades naturales y antropogénicas, siendo estas últimas las más significativas y que proporcionan mayor cantidad. Las actividades mineras y las descargas industriales son los que más impactan los cuerpos de aguas naturales al liberar mayor cantidad de metales (Ravindra et al., 2015).

Los MPT suelen encontrarse en concentraciones naturales dentro de los cuerpos de agua que no han sido afectados por actividades antropogénicas. La descarga de aguas contaminadas con metales que provienen de actividades realizadas por el hombre hacia el medio ambiente acuático es una de las más grandes preocupaciones en el mundo. Los MPT, bajo ciertas condiciones ambientales se pueden acumular en concentraciones que son tóxicas para algunos seres vivos y pueden causar severos impactos ambientales, además pueden cambiar sus características físicas, químicas y biológicas, y por ende alterando su calidad (Ömer et al., 2009).

2.2. Problemática Ambiental Provocada por el DAM

Actualmente la industria minera se encuentra dentro de las actividades del sector económico más redituables y con los nuevos desarrollos tecnológicos ha sido posible extraer minerales de yacimientos menos profundos, es decir de minas a cielo abierto con equipamientos muy eficientes y con la introducción de innovadores sistemas de lixiviación y tecnología minero-metalúrgica que resulta en costos cada vez más baratos. Con estas modificaciones en la tecnología ha sido posible llevar a cabo la minería de manera rentable en yacimientos con concentraciones del elemento de interés cada vez más bajas y han aparecido operaciones de mayor tamaño. Debido a lo anterior, las minas subterráneas han presentado una tendencia decreciente (Armendáriz-Villegas, 2016).

Los procesos mineros involucran la generación de desechos que regularmente son mayores al mineral económico (mena), esto se debe a que en el minado se implica aislar el mineral de interés de las rocas de acompañamiento no deseadas. Los desechos mineros pueden surgir de 3 etapas: extracción, procesamiento o beneficio y metalurgia. Al hablar de los remanentes en la extracción se abarcan los desechos de la perforación y voladura extraídos de minas a tajo abierto o subterráneas, es decir, el material que se tiene que remover para poder llegar al mineral de interés (Lottermoser, 2010).

Cuando una empresa minera termina su ciclo productivo, pasa al proceso de cierre, en donde puede dejar Pasivos Ambientales Mineros (PAM), los cuales se definen como aquellos depósitos o áreas donde se almacenan desechos abandonados producto de las operaciones mineras, y que pueden representar un peligro significativo en la salud de los seres vivos, así como en el ecosistema circundante (Cadillo-Nieto, 2018). La descarga de DAM proveniente de los PAM en operaciones mineras activas y en abandono es uno de los principales mecanismos mediante los cuales la minería afecta al medio ambiente (Pentreath, 1994; Armendáriz-Villegas, 2016). En la producción de DAM se forma agua con alta acidez que se debe en primer lugar a la oxidación química de los minerales sulfurosos contenidos en los residuos mineros. Los flujos ácidos que lixivian dichas rocas y minerales son capaces de poseer elevados contenidos de MPT que exceden los niveles estándar de calidad de agua y producen daños en la salud de la biota acuática y terrestre (Lottermoser, 2010).

El DAM es una de las principales preocupaciones en las unidades mineras, debido a que elementos como el Au, Cu, Ag y Mo, se encuentran normalmente en yacimientos que están compuestos de diversos tipos de sulfuros. Los minerales sulfurosos explotados por la actividad minera al dejarse sobre la superficie de la corteza terrestre reaccionan con el aire y agua, para formar ácido sulfúrico. Este último es capaz de lixiviar adicionalmente otros MPT encontrados en el material rocoso. Cuando el DAM no es tratado, puede llegar y contaminar a los cuerpos de agua naturales, ya sean subterráneos o superficiales (Cadillo-Nieto, 2018).

Una operación minera que genera DAM posee la capacidad para impactar de manera devastadora los cuerpos naturales de agua y la biota habitante de éstos en un largo periodo de tiempo. Dentro de los MPT contenidos en el DAM, especialmente el Fe, puede acumularse sobre lo profundo de un curso de agua creando un tipo de capa de limo y modificando el color del agua, tornándose a amarillo con tonalidad roja. Incluso en concentraciones bajas, estos elementos metálicos presentan alta toxicidad para los seres vivos. Los MPT presentan una alta movilización y pueden transportarse por grandes distancias al ir de forma suspendida en el agua, afectando riveras y zonas acuíferas en su largo trayecto. La biota acuática puede sufrir diversas afectaciones como problemas de reproducción, desarrollo y comportamiento, que pueden llegar en algunos casos hasta la muerte instantánea. (EarthWorks, 2002). La generación del DAM puede persistir de manera indefinida, contaminando decenas de años posteriores al cierre de las operaciones mineras (Aduvire, 2006). Dado que los efectos en el agua provocados por el DAM son severos, un gran número de explotaciones mineras en América del Norte han requerido tratar sus aguas de forma permanente (EarthWorks, 2002).

Magdaleno-Rico (2014), reporta que en México existe un gran número de PAM y minas que presentan o han presentado problemas de drenado ácido; sin embargo, los estudios realizados sobre este fenómeno son muy pocos. Actualmente los estados de Baja California, Chihuahua, Coahuila, Durango, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Michoacán, Nayarit, Oaxaca, Querétaro, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora y Zacatecas, tienen actividad minera, por lo que el riesgo de presentar problemas de generación de DAM es una realidad.

2.3. Drenaje Ácido de Mina (DAM)

2.3.1. Generalidades del DAM

La generación del DAM a partir de los minerales sulfurosos es derivada de una reacción química en donde el azufre se oxida a sulfato, procedimiento que origina acidez, produciendo una solución acuosa acidificada capaz de disolver a los MPT presentes en el material sulfuroso. Son necesarios tres factores indispensables para que se presente la generación de soluciones ácidas: minerales sulfurosos como la piritita (principal productor de acidez), disponibilidad de oxígeno y agua (Cervantes-Macedo, 2014). Las condiciones ácidas, así como los elementos que han sido solubilizados en el DAM son dependientes del tipo de sulfuro y de su capacidad para oxidarse, de los componentes químicos de los minerales y de los parámetros fisicoquímicos que influyen en las reacciones oxidantes y en la disolución de metales (Ibáñez-Zamorano, 2015).

El drenado ácido es agua de baja calidad con concentraciones de MPT y metaloides que superen los valores máximos permisibles de la Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-127-SSA1-2017, o cualquier otra, pudiendo ocasionar un impacto ambiental adverso.

Lottermoser (2010), señala que el DAM de forma general se refiere a una solución acuosa con elevada acidez (valores de pH <4), que contiene elevados niveles de Fe^{+2} y SO_4^{-2} en solución, además posee una conductividad eléctrica alta y elevadas concentraciones de MPT (y metaloides) disueltos como As, Cd, Cu, Hg, Pb, Sb, Se, Zn, etc.

El DAM normalmente tiene una tonalidad anaranjada y rojiza que se atribuye al catión Fe^{+3} , no obstante, es posible que aparezca una coloración entre verde y azul cuando el Fe soluble se presenta como Fe^{+2} , la cual comenzará a oscurecerse por su transformación a Fe^{+3} , cuando se exponga al oxígeno de la atmósfera. El DAM puede contener sólidos suspendidos relacionados a los iones disueltos que han precipitado de diversas reacciones químicas, pudiéndole proporcionar diversas tonalidades a la solución. Si el DAM está en contacto directo con el aire, se pueden presentar coloraciones cafés rojizas en los efluentes ácidos (Condor-Laguna et al., 2015).

2.3.2. Etapas de generación del DAM.

La formación del DAM se refiere a un fenómeno dependiente del tiempo que incluye diversos factores físicos, así como varias reacciones químicas de óxido-reducción. En diversos depósitos de jales de mina, se identifica el DAM a partir del inicio de la operación, mientras que en otros hasta después de varios años. En estos últimos, la generación de agua ácida probablemente estuvo sucediendo a lo largo del transcurso de retardo anterior a la evaluación del DAM, solamente que a una baja velocidad, aunada a una amortiguación de la acidez generada. Normalmente, la formación de este fenómeno se describe mediante el desarrollo de tres periodos que se definen por el pH de la solución acuosa generada por los sulfuros minerales (Condor-Laguna et al., 2015). En la Figura 1, se representan las tres etapas de formación de DAM descritas por Ferguson y Erickson (1987). El pH del agua decrece respecto al tiempo debido a la oxidación de los sulfuros en presencia del agente oxidante (O_2 o Fe^{+3}). Mientras el pH se reduce por la oxidación química, algunos procesos de neutralización se llevan a cabo por las especies mineralógicas capaces de consumir ácido.

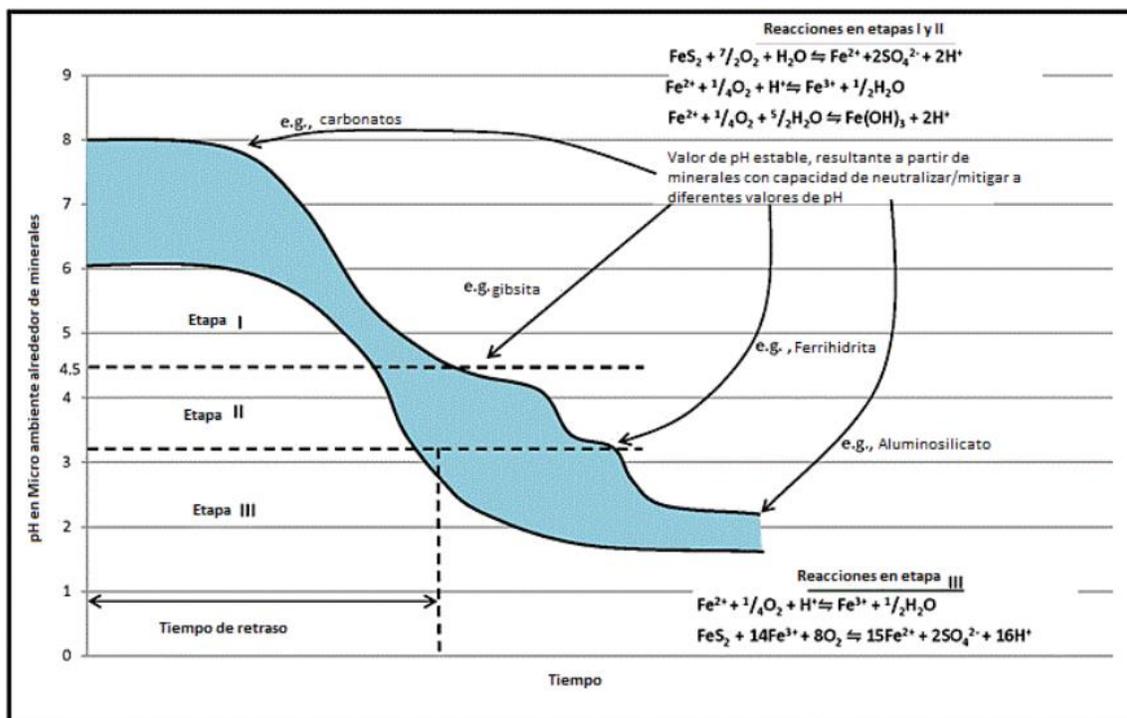


Figura 1. Etapas de generación de DAM (Ferguson y Erickson, 1987).

Las etapas de formación del DAM definidas por Ferguson y Erickson (1987) son las siguientes:

Etapas I: el drenado ácido formado en este periodo es caracterizado por contenidos altos de SO_4^{-2} , y un pH similar al neutro. La solución ácida se forma y muy pronto se neutraliza cuando el material sulfuroso, el oxígeno y el agua quedan en contacto. Al mismo tiempo que se oxidan los sulfuros, también están presentes ciertos minerales que aportan alcalinidad para aumentar el pH y lograr la precipitación del Fe como hidróxido. Los carbonatos, principalmente el de calcio (CaCO_3), contenidos en el material rocoso, son los que elevan el pH y lo conservan neutro e incluso alcalino, además, dependiendo de la naturaleza de estos minerales neutralizantes, pueden aportar a la solución metales como el calcio o magnesio. Cuando los sulfuros se oxidan, se genera Fe^{+2} disuelto, el cual, a pH neutro, se oxida rápidamente a Fe^{+3} y precipita como un hidróxido. Si hay presencia de zinc en las rocas asociadas a los sulfuros, se pueden presentar concentraciones altas de este metal en solución debido a que es soluble a pH cercanos al neutro. En general, la velocidad de generación de DAM en esta etapa es inferior en comparación con la misma de etapas siguientes debido a que el Fe^{+3} no toma el papel de oxidante.

Etapas II: mientras se sigue formando acidez y los minerales carbonatados son consumidos o se vuelven inalcanzables, el pH de la solución acuosa decrece y el fenómeno se encamina al segundo periodo. Una vez que el pH bajó a 4.5, las bacterias comienzan a oxidar a los sulfuros. Cuando la oxidación química se produce a una velocidad más rápida en las etapas II y III, el pH tiende a bajar sucesivamente. En ocasiones el pH se mantiene prácticamente constante en ciertos lapsos debido a la solubilización de especies minerales neutralizantes volviéndose solubles a cierto pH. En caso de que la generación de ácido continúe hasta haberse consumido la totalidad del material alcalino, el pH será inferior de 3.5. En este periodo, la solución del drenado no se encuentra muy lejos del pH neutro, con niveles altos de Fe^{+2} y SO_4^{-2} . En ocasiones se presenta un pH relativamente bajo, sin embargo, se pueden presentar contenidos bajos de MPT disueltos.

Etapa III: dentro de esta, la generación del DAM se lleva a cabo a una velocidad mucho mayor que la primera etapa, principalmente debido a que el Fe^{+3} actúa como oxidante. La disminución de los valores del pH aumenta la velocidad en que se oxidan los sulfuros. Aquí, el DAM es normalmente ácido, caracterizado por altos contenidos de SO_4^{-2} y MPT en forma soluble. El Fe soluble se encuentra en forma de Fe^{+3} y Fe^{+2} . El tiempo en cada etapa de generación de acidez no es igual, presentándose desde semanas hasta siglos, según los factores que persistan.

2.3.3. Diagramas Eh-pH en estudios de predicción del DAM

Los diagramas de Eh-pH, también denominados de Pourbaix, son construidos para predecir las áreas de estabilidad termodinámica de especies de un cierto metal, sus compuestos producidos a causa del intemperismo u otros procesos químicos, y sus iones asociados en un medio acuoso. Estos diagramas son elaborados mediante operaciones termodinámicas sustentadas en la ecuación de Nernst y la información de solubilidad de diferentes especies metálicas mostrando tres regiones delimitadas: una región en la cual el elemento metálico se mantiene en su estado metálico; la región de corrosión, donde el metal se presenta como ion; y la región en la que el metal genera estratos al reaccionar con el hidrógeno y oxígeno, inhibiendo la corrosión. Los diagramas de Pourbaix pueden pronosticar el comportamiento de reacciones químicas, la estabilidad y composición de las especies químicas formadas por el intemperismo (Hernández, 2012).

Los diagramas de Eh-pH son útiles en los estudios del DAM debido a que permiten conocer la estabilidad química en condiciones de intemperismo. Frecuentemente los cambios en las estaciones, por ejemplo, modifican los niveles freáticos, influyendo en gran medida en la forma química de los metales. Es importante conocer los valores de Eh y pH del lugar estudiado para poder llevar a cabo la construcción de dichos diagramas (Sánchez-Rondán, 2015).

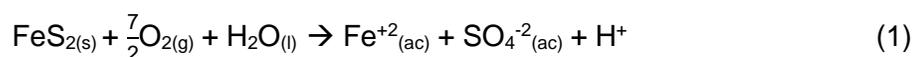
2.4. Química del DAM

2.4.1. Reacciones de formación

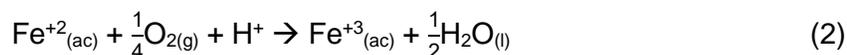
La formación del DAM, así como su neutralización, dependen de muchas de reacciones químicas relacionadas entre sí. Las partes principales que intervienen en la creación del DAM es el material sulfuroso, microorganismos, agua o aire húmedo, temperatura y el oxígeno o Fe^{+3} como oxidantes. La ausencia del agua o del agente oxidante paralizará la oxidación generadora de acidez. Las bacterias casi siempre juegan un rol fundamental acelerando la velocidad de formación del DAM, la extinción de estos microorganismos provocará que la generación de acidez sea más lenta (Aduvire, 2006).

Diversos investigadores señalan que las reacciones químicas que representan la formación del DAM se ilustran mejor mediante la oxidación de los sulfuros minerales de hierro, especialmente la pirita (FeS_2), el sulfuro mineral con mayor abundancia en el planeta y el más común como fuente de DAM (EPA, 1994; Nordstrom y Alpers, 1999; López et al., 2002; Aduvire, 2006; Dold, 2010; Condor-Laguna, 2015). A continuación, se describe la química de formación de DAM basada en las reacciones químicas descritas por los autores mencionados.

Primeramente, la pirita reacciona con el agua y el oxígeno formando SO_4^{-2} , Fe^{+2} , así como iones H^+ . La reacción química que representa la oxidación de la pirita por el O_2 , se ilustra a continuación:

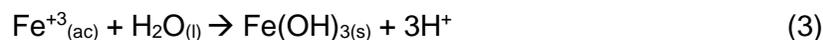


Después, el Fe^{+2} hace reacción con el O_2 formando Fe^{+3} como se muestra en la ecuación siguiente:

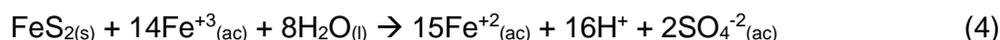


El Fe^{+3} tiende a precipitar como hidróxido a ciertos valores de pH de la solución acuosa. Si el pH supera el valor de 3.5, el Fe^{+3} puede precipitar por hidrólisis y presentarse en forma de hidróxido de hierro (III). Este compuesto se manifiesta como sólidos color rojo

normalmente observados en los depósitos de residuos mineros generadores de DAM. A lo largo de esta reacción química, se genera acidez adicional en forma de iones H^+ .

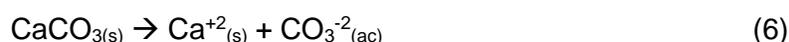
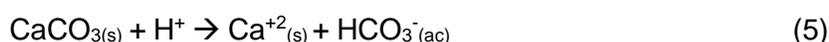


Cuando se continua con la generación de acidez y los minerales alcalinos han sido consumidos, el Fe^{+3} tiende a ser el nuevo agente oxidante y es capaz de oxidar a los sulfuros. Para el caso particular de la pirita, se lleva a cabo la siguiente reacción química:

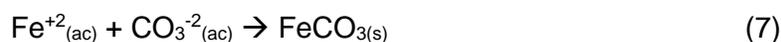


2.4.2. Reacciones de neutralización

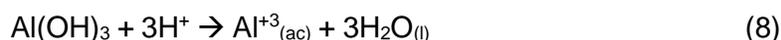
En un depósito de residuos mineros que genera DAM, también existe material alcalino que puede neutralizar la acidez. Posterior a la oxidación de un sulfuro, se generan nuevos productos que tienden a ser transportados por el agua, ya sea en solución, o como precipitado; este último como resultado de la reacción con minerales alcalinos capaces de elevar el pH de la solución (Cervantes-Macedo, 2014). Lottermoser (2007), sostiene que hay una gama de especies mineralógicas alcalinas capaces de elevar el pH de la solución y que ayudan con la neutralización del DAM, estos son los carbonatos, hidróxidos, silicatos y la arcilla. El principal es el carbonato de calcio (calcita), mediante la liberación de HCO_3^- y CO_3^{-2} :



La calcita es el carbonato que existe en mayor cantidad, en ocasiones se encuentra con cantidades pequeñas de dolomita. Dentro de los minerales alcalinos, es el más efectivo consumidor de acidez, debido a que es el que presenta mayor reactividad, y contrario a los otros minerales alcalinos, presenta mayor solubilidad a menor temperatura. La generación de HCO_3^- y CO_3^{-2} al disolverse la calcita puede originar carbonatos metálicos secundarios. (Lottermoser, 2007). Por ejemplo, para la siderita ($FeCO_3$) se tiene:



La siderita formada también puede ser parte de los minerales principales en las rocas. Esta presenta menor solubilidad que el carbonato de calcio, es capaz de aumentar el pH en el rango de 4.5 a 6, mientras que la calcita normalmente neutraliza el DAM elevando el pH hasta un valor de 8. Una vez que se han agotado los carbonatos, los próximos minerales que reaccionarán y producirán alcalinidad, normalmente serán los hidróxidos, Estos al consumir ácido generan un ion metálico y agua (Lottermoser, 2007). En el caso del $\text{Al}(\text{OH})_3$:



Generalmente, los materiales rocosos presentan cierta cantidad de sulfuros generadores de acidez junto con la presencia de minerales consumidores de la misma. Un balance entre las dos clases de mineral, así como su nivel de reactividad, indicarán si el material rocoso es capaz de generar soluciones acuosas ácidas o no. Los materiales alcalinos elevarán el pH de la solución hasta cierto nivel y precipitará también una cantidad de Fe (Lottermoser, 2007).

2.5. Microorganismos Presentes en la Producción del DAM

La presencia de microorganismos tiene mucha influencia en la generación del DAM, es bien conocido que algunas bacterias son capaces de aumentar la velocidad de los procesos oxidativos, acrecentando las condiciones que producen un posible DAM. La aportación bacteriana en la oxidación de minerales sulfurosos y del Fe presenta cierta complejidad debido a que en este proceso pueden participar una gran variedad de microorganismos. La bacteria *Thiobacillus ferrooxidans* frecuentemente desempeña el papel principal en cuanto a la oxidación natural en el medio ambiente (Aduvire, 2006). Esta bacteria puede desempeñar la oxidación de formas reducidas de azufre (sulfuros), además puede oxidar el Fe^{+2} a Fe^{+3} , que este último a su vez, puede ocupar el rol de oxidante. Otros microorganismos que actúan como catalizadores en la oxidación de los sulfuros son *Thiooxidans* y *Sulfolobus*. La rapidez de oxidación de las bacterias varía según el área de superficie del sulfuro, disponibilidad de O_2 y CO_2 , nutrientes, pH y temperatura (Magdaleno-Rico, 2014).

La bacteria *Thiobacillus ferrooxidans* presenta mayor actividad en soluciones de pH menor a 3.3, siendo capaz de oxidar minerales sulfurosos de Fe, Sb, Ga, Mo, As, Cu, Cd, Co, Ni, Pb y Zn. Si las circunstancias no son favorables, las bacterias influirán mínimamente en la generación de DAM, por el contrario, cuando la aceleración bacteriana es significativa, se involucran más factores para determinar el grado de actividad y la velocidad asociada a la generación de acidez (Ata y Soner, 2006; Fernández-Reyes, 2019).

Las bacterias *Leptospirillum ferrooxidans* y *Thiobacillus ferrooxidans* obtienen energía oxidando sulfuros de hierro Fe^{+2} a Fe^{+3} , catalizan la reacción incrementando su velocidad aproximadamente 100 veces con respecto a la correspondiente de la oxidación sin el aporte de bacterias (Dold, 2014). El alimento principal para la mayoría de las bacterias presentes es el dióxido de carbono, fósforo y el nitrógeno, que pueden encontrarse en las zonas mineras (Pozo-Antonio et al., 2017). Adicionalmente, se deben contemplar aquellos elementos tóxicos para los microorganismos. Para la bacteria *Thiobacillus ferrooxidans* son nocivos el Hg, Cu, Ni y U. Además, ha sido comprobado que la pirita permanece estable al momento de ser atacada por la bacteria mencionada cuando contiene cierta cantidad de Ti (Aduvire, 2006).

Las especies bacterianas, tales como *Thiobacillus Ferrooxidans* se caracterizan por poseer cinco propiedades (Jensen y Webb, 1995; Fernández-Reyes, 2019):

Quimiolitotrofo: la energía para el crecimiento la obtienen mediante la oxidación de hierro ferroso o de los compuestos de azufre reducido.

Autótrofo: utiliza el CO_2 para obtener C natural acompañado de N y P necesarios para el crecimiento, junto con oligoelementos minerales de K^+ , Mg^{+2} , Ca^{+2} , Na^+ y Co^{+2} .

Aerobio: promueve el crecimiento a una temperatura entre $20^{\circ}C$ y $40^{\circ}C$ y la oxidación del hierro con una temperatura óptima cercana a $33^{\circ}C$.

pH: el crecimiento acidófilo se genera entre pH 1 y 4.5 alcanzando el óptimo entre 2 y 2.3. La supervivencia no se alcanza arriba de 6.5 ni inferior a 1.

Localización: se producen generalmente en aguas de DAM en minería metálica y de carbón.

Según Jensen y Webb (1995), la disolución de los sulfuros metálicos por bacterias se produce por dos mecanismos:

Mecanismo directo: las bacterias se adhieren al área superficial del sulfuro solubilizando los metales mediante la reacción química siguiente:



Mecanismo Indirecto: las bacterias oxidan el hierro ferroso a férrico en estado acuoso, liberando este último el metal a través de una reacción química:



2.6. Factores que Influyen en la Formación del DAM

Existen diversos factores que influyen en la formación del DAM. La comprensión de estos factores que controlan la velocidad y la magnitud de la generación de ácido, así como de los procesos químicos, constituyen la clave para predecir el potencial de generación de DAM en una muestra de roca. Del mismo modo, es fundamental para identificar la tecnología apropiada, que sirva para prevenir o controlar la generación del mismo (Condor-Laguna et al., 2015). Los factores mencionados generalmente se clasifican en físicos, químicos y biológicos.

2.6.1. Factores físicos

Temperatura: este parámetro influye sobre la población bacteriana que participa en la oxidación, su desarrollo idóneo se presenta entre los 28 y 30°C. Cuando se superan los 35°C se vuelven casi inactivas, cesando a temperaturas inferiores; sin embargo, se han observado bacterias activas a 4°C en algunos países (Aduvire, 2006).

Área superficial expuesta de los sulfuros metálicos: el tamaño de partícula de los sulfuros minerales susceptibles a la oxidación interviene en la reacción química. Cuando se trata de partículas finas existe mayor área de superficie, de esta manera se acelera la velocidad de reacción (García-Balboa, 1998). La industria minera ayuda a incrementar la superficie expuesta del mineral debido a sus procesos de extracción mediante explosivos hasta su reducción de tamaño en los procesos metalúrgicos (Ata y Soner, 2006).

Cristalografía del sulfuro (pirita): las piritas poco cristalinas o con defectos estructurales tienen una red cristalina imperfecta, esto provoca que el mineral sea más susceptible a la digestión química (Cervantes-Macedo, 2014).

2.6.2. Factores químicos

pH: para el caso de la pirita, cuando se libera hierro ferroso y posteriormente es oxidado a férrico, a pH menor a 3.5, este último permanece en solución y se convierte en el oxidante principal del proceso de generación de DAM sustituyendo al oxígeno. Por abajo de un pH de 3, el hierro férrico puede oxidar a la pirita a una velocidad mayor que el oxígeno, en un rango de 10 a 100 veces mayor. Dependiendo del pH de la solución pueden precipitar minerales secundarios como la goetita o jarosita, producto de la hidrólisis férrica, cuando existen estas reacciones de hidrólisis se libera acidez adicional (Dold, 2014).

Otro aspecto importante del pH es que también influye directamente sobre las bacterias, cuando este se encuentra entre 2 y 4, la velocidad de formación del DAM llega a su punto más alto, debido a que corresponde al rango de pH ideal para el desarrollo de la población bacteriana involucrada en la generación de acidez (García-Balboa, 1998).

Potencial redox: brinda una estimación del nivel de oxidación de los minerales sulfurosos, además, sirve como herramienta para conocer si se está llevando a cabo la generación de DAM. Cuando el potencial redox es elevado significa que existen condiciones ambientales de carácter oxidante que pueden propiciar la oxidación de sulfuros y por lo tanto, la formación de DAM. Contrariamente, cuando este es bajo significa que prevalecen condiciones reductoras (Aduvire, 2006).

Presencia de oxígeno: este elemento juega un papel imprescindible en la generación del DAM, ya que es el agente oxidante principal. La velocidad de oxidación (Ec. 1) puede variar según la abundancia de oxígeno disponible. El oxígeno que se encuentra en su estado gaseoso influye en el proceso al igual que el que se encuentra en estado líquido. Si hay ausencia de oxígeno los procesos de generación de DAM se inhiben (García-Balboa, 1998; Aduvire, 2006; Fernández-Reyes, 2019).

Presencia de agua: el agua es un factor esencial y reactivo para la oxidación de la pirita. Cualquiera que sea el rol del agua en la oxidación del sulfuro, es importante como medio de transporte, la humectación y el secado alternado de sulfuros aceleran el proceso de oxidación. Debido a esto, los productos de oxidación pueden disolverse y al ser retirados por la humectación (presencia de agua) dejarían superficies de pirita frescas y expuestas para su posterior oxidación (Cervantes-Macedo, 2014).

Relación Fe^{+2}/Fe^{+3} : el Fe^{+3} oxida a la pirita más rápidamente que el oxígeno. Por lo tanto, la cantidad de Fe^{+3} producida, controla la cantidad de pirita que puede ser atacada químicamente, dando como resultado que la velocidad de oxidación de hierro ferroso a férrico sea la etapa limitante en la oxidación abiótica de la pirita (Cervantes-Macedo, 2014).

2.6.3. Factores biológicos

Bacterias y sus nutrientes: Los microorganismos en circunstancias ideales de desarrollo influyen sustancialmente como catalizadores de la reacción química, ya que oxidan a los sulfuros y además oxidan el Fe^{+2} a Fe^{+3} . El Mg, As, P y N, son indispensables en el desarrollo de las bacterias. Adicionalmente el CO_2 juega un papel esencial debido a que brinda carbono aprovechable para la población bacteriana litoautótrofa, principal causante de las oxidaciones.

2.7. Predicción de la Generación del DAM

Es importante predecir el potencial de generación de DAM de manera anticipada para que de esta manera se puedan prevenir problemas de generación de acidez a futuro. Según la Agencia de Protección Ambiental (EPA, 1994), basándose en la información recabada en los diferentes ensayos de predicción de DAM se pueden tomar decisiones adecuadas para mitigar y controlar la generación futura del DAM proveniente de los depósitos mineros

Los métodos de predicción del DAM se dividen en ensayos estáticos y cinéticos, utilizados frecuentemente en la planificación y operación de un nuevo proyecto minero y en el monitoreo de los depósitos estériles que ya existen. Los periodos del plan de ensayos para predecir la formación del DAM en un nuevo proyecto minero-metalúrgico o uno que ya existe, consisten en un análisis geológico y de caracterización mineralógica, determinación de la petrología de las muestras, ensayos estáticos y cinéticos, simulación de métodos de tratamiento y estudio de afectaciones. Adicionalmente, se consideran los factores influyentes en la velocidad de formación del DAM, como la clasificación de los sulfuros y fases alcalinas disponibles, análisis granulométrico, presencia de oxígeno y agua, microorganismos, y demás (Imperial-Pérez, 2010; Ibáñez-Zamorano, 2015).

Las pruebas analíticas utilizadas para pronosticar la capacidad de formación del DAM son descritas brevemente a continuación.

2.7.1. Pruebas estáticas

Las pruebas estáticas predicen o sirven para pronosticar la capacidad de formación del DAM a futuro. Los ensayos estáticos básicamente permiten realizar una relación entre las especies productoras de acidez y aquellas que la consumen (EPA, 1994; Magdaleno-Rico, 2014). Estas pruebas tienen una gran utilidad en la predicción de carácter cualitativo de la formación del DAM, se desarrollan con rapidez, y el coste por espécimen es accesible. Las muestras serán clasificadas como formadoras de DAM cuando el

potencial de acidez sobrepase el de neutralización (EPA, 1994; Imperial-Pérez, 2010; EPA, 2011).

Debido a que el potencial de generación de DAM de los residuos mineros se determina mediante la cuantificación de los sulfuros (potenciales generadores de acidez) y del carbonato de calcio (mineral neutralizante), han sido desarrolladas varias técnicas para llevar a cabo estas cuantificaciones y poder establecer si los desechos de mina sulfurosos presentan la capacidad para generar el DAM (NOM-141-SEMARNAT-2003). El método más utilizado en la estimación de la relación entre los sulfuros productores de acidez y los minerales que la neutralizan es el propuesto por Lawrence y Wang (1997), denominado “prueba modificada balance ácido-base (PM-BAB)”.

Uno de los inconvenientes de esta prueba es que considera que todas las reacciones químicas de disolución se desarrollan a la misma velocidad. Otra desventaja es que este ensayo asume que la totalidad de los minerales productores y neutralizadores de acidez se consumen totalmente en la reacción química, sin considerar ciertos factores como la granulometría y cristalografía del material mineralógico (EPA, 2011).

2.7.2. Pruebas cinéticas

Las pruebas estáticas o dinámicas sirven para predecir y conocer si existe generación de DAM o no, sin embargo, su utilidad es limitada para aquellos depósitos de material en donde la producción de acidez y alcalinidad son semejantes, cayendo en una zona de incertidumbre que es difícil de predecir. Las pruebas cinéticas sirven para reducir esa incertidumbre, se llevan a cabo en laboratorio y sirven para predecir la calidad del agua y sus características (pH, conductividad eléctrica, metales, sulfatos, etc.) de sitios mineros como depósitos de jales o terreros. Consisten en observar y analizar el comportamiento de una muestra bajo condiciones de intemperismo simuladas y controladas (Hornberguer et al., 2005; EPA, 2011).

Los ensayos cinéticos sirven para poder conocer cómo se comporta de manera prolongada la formación del DAM y la disolución de los MPT, además, mediante estas pruebas se puede estimar la velocidad de la producción de acidez, de su consumo y de la solubilización de los MPT. Estas pruebas pueden desarrollarse de diferentes maneras,

entre las principales se encuentran las celdas húmedas y las columnas de lixiviación. Las más prácticas y utilizadas son las segundas, estas se basan en la colocación de los jales mineros en columnas de forma cilíndrica. A lo largo de este ensayo se llevan a cabo periodos de humidificación y deshumidificación, agregando agua destilada y después posibilitando el secado del material dentro del cilindro. Los periodos son normalmente de una semana. El líquido añadido es colectado y se analiza con el propósito de conocer el ritmo en que el material se oxida, la generación de SO_4^{-2} y MPT, entre otros datos (Lapakko, 2002; Imperial-Pérez, 2010). Las pruebas cinéticas también son útiles para evaluar los efectos de diversos factores en la formación del DAM. Ejemplificando lo anterior, al residuo minero se le puede adicionar microorganismos, y al mismo tiempo, someterlo a una temperatura controlada. En los ensayos cinéticos es necesario que los minerales se encuentren a una distribución granulométrica específica (Lapakko, 2002).

2.8. Efectos del DAM en los Recursos Acuáticos

El impacto primario hacia el medio ambiente relacionado a los residuos mineros es el esparcimiento de estos a las zonas circundantes. Principalmente en lugares lluviosos se presenta el problema de la formación del DAM, así como su distribución mediante las escorrentías de agua naturales (Magdaleno-Rico, 2014). La contaminación del medio ambiente acuático es hoy en día la mayor preocupación que ha surgido en torno al DAM, debido a que este puede alcanzar masas acuáticas naturales, tanto en la superficie terrestre como en el subsuelo, alterando la calidad de sus aguas, y por lo tanto, contaminándolas y rompiendo el equilibrio ambiental. El nivel de polución por los MPT es diferente en cada zona, según la caracterización geoquímica del lugar (López et al., 2002).

El DAM puede causar daños graves en la biota de cualquier cuerpo de agua natural como un río. Afecta las características fisicoquímicas del agua, causando afectaciones en las comunidades, lo cual podría limitar o impedir la utilización del vital líquido para ciertas actividades domésticas. La fauna acuática es más susceptible a los impactos por concentraciones altas de MPT que el ser humano. Por ejemplo, el hidróxido de hierro (III) es un precipitado no deseable, lodoso, anaranjado, que cubre el agua de cursos de

agua naturales y la decolora haciéndola más turbia, por lo tanto, este sólido puede tapar las branquias de los peces que habitan el ecosistema acuático, impidiendo su respiración y provocando su muerte. Por estas razones el DAM se considera un problema que impacta negativamente a la biota acuática (U.S Fish and Wildlife Service, 2008; Condor-Laguna et al., 2015).

U.S Fish and Wildlife Service (2008), reporta que una vez que se ha creado el DAM, los MPT se liberan al medio ambiente y se vuelven biodisponibles, estos afectan a los peces que son expuestos directamente impidiendo su respiración y causando la muerte. También menciona que los organismos acuáticos son expuestos a los MPT indirectamente mediante la ingestión de alimentos y sedimento contaminado. En términos generales, el DAM es caracterizado por acidez y alto contenido de metales, y es responsable de la degradación física, química y biológica del hábitat acuático. Un estudio realizado por Cooper y Wagner (1973) referente a la distribución de peces en corrientes de agua de Pennsylvania afectadas por DAM, encontró a los peces severamente impactados a pH entre 4.5 y 5.5; 38 especies se encontraron habitando las aguas a condiciones de pH entre 5.6 y 6.4, mientras que 68 especies a pH mayor a 6.4, reportándose una pérdida de peces del 90 % en cuerpos de agua de pH 4.5.

Muchos países han tenido impactos ambientales negativos debidos al DAM. Principalmente en Norte América se ha presentado este fenómeno, aunque también han existido casos en diversos países de América del Sur, Europa, África y Oceanía. En términos generales, el DAM se genera en sitios donde existen operaciones mineras que extraen minerales de cuerpos sulfurosos (Cervantes-Macedo, 2014). La Tabla 1 presenta los principales impactos del DAM en el agua según sus propiedades fisicoquímicas (Lottermoser, 2010).

Tabla 1. Principales características del impacto del DAM en el agua (Lottermoser, 2010).

Propiedad	Especies químicas	Concentración	Impacto ambiental
Acidez	H ⁺	pH menor de 4.5	Disminución de bicarbonatos para la biota fotosintética; deterioro y fallecimiento de fauna y flora; disminución de la calidad del agua; mayor movilidad de los metales disueltos; desgaste de los elementos realizados por el ser humano.
Precipitación del Fe	Fe ⁺² , Fe ⁺³ , Fe(OH) _{3(s)}	100 a 1000 µg/mL	Cuando el pH se incrementa, precipitan los compuestos de Fe cambiando la coloración del agua y volviéndola turbia; Falta de oxígeno en ciertos organismos acuáticos y bloqueo de las branquias en algunos peces; disminución de la iluminación penetrante en los cuerpos acuáticos; introducción del Fe en los elementos realizados por el ser humano.
MPT y metaloides solubles	As, Cd, Cu, Co, Hg, Ni, Sb, Pb, Zn	0.01 a 1000 µg/mL	Afectación y fallecimiento de fauna y flora; bioconcentración de MPT y metaloides; disminución de la calidad de agua y de los sedimentos acuáticos.
Sólidos disueltos totales (SDT)	Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, Si, SO ₄ ⁻²	100 a más de 10000 mg/L	Disminución de la calidad del agua; introducción de sólidos salinos en los elementos realizados por el ser humano; afectación en la calidad de los sedimentos acuáticos.

2.9. Estudios Realizados de Generación de DAM

En México y el mundo se han realizado varios estudios de generación de DAM. En la Tabla 2, se describen algunos estudios realizados a nivel nacional e internacional:

Tabla 2. Estudios realizados de generación de DAM a nivel nacional e internacional.

Estudio	Autor	Resultados
Caracterización del drenaje ácido y de las rocas asociadas a una mina (Mina Tizapa) para evaluar su posible aplicación en un sistema de tratamiento pasivo.	Cervantes-Macedo, 2014.	El yacimiento es generador de DAM y existen niveles altos de acidez, además, hay elevados contenidos de MPT y sulfatos disueltos.
Evaluación del potencial de generación de drenaje ácido de mina del material estéril del yacimiento de la mina Álamo Dorado.	Imperial-Pérez, 2010.	Las pruebas estáticas indicaron que el material sulfuroso es un potencial de generación ácida, atribuido a la pirita, calcopirita, esfalerita, galena y covelita.
Determinación de posible drenaje ácido de mina y caracterización de jales mineros provenientes de la mina Cerro de Mercado, Durango, México.	Salas-Urviola et al., 2020.	De acuerdo con las pruebas estáticas y los contenidos de MPT y metaloides en las muestras, hay poca probabilidad de que exista formación de drenaje ácido.
Peligrosidad de los residuos mineros históricos del distrito minero San Antonio-el triunfo en la Paz Baja California Sur y evaluación de generación de drenaje ácido a través de pruebas estáticas.	Magdaleno-Rico, 2014.	Los residuos dominados terreros y jales no son tan peligrosos ya que presentan altas concentraciones totales de algunos MPT, pero en la prueba del lixiviado no se presentan altas concentraciones geodisponibles de los MPT.

2.10. Tratamientos Aplicados al DAM

Una vez que el DAM se ha formado es necesario un método de tratamiento para poder controlarlo y/o eliminarlo. Los tratamientos para el DAM se clasifican como activos y pasivos. Lo que hace diferentes a estos dos tipos de tratamientos es el costo y el suministro de energía (Lottermoser, 2007; Cervantes-Macedo, 2014).

En la Figura 2, se observa el sistema de tratamiento activo que de forma general consiste en un proceso donde se añaden diversas sustancias con el fin de normalizar el pH, dichas sustancias deben ser alcalinas como por ejemplo, CaO, NaOH, cal, caliza, calcita, entre otras. Estos procedimientos para tratar el DAM necesitan que el material sea añadido de forma constante, además, son necesarios mecanismos sofisticados para que se mezclen las sustancias adicionadas con la solución acuosa a tratar. Este tipo de tratamientos necesitan mantenimientos constantes, así como un monitoreo establecido (EPA, 1983).



Figura 2. Proceso de neutralización con cal convencional (sistema de tratamiento activo) (EPA, 1983).

Los tratamientos pasivos, por ejemplo un humedal, son caracterizados por requerir de componentes naturales que hacen posible poseer un pH cercano al neutro. En estos tratamientos suceden reacciones químicas, así como procesos de carácter biológico que hacen posible la precipitación de metales disueltos. Adicionalmente, este tipo de tratamientos utilizan energías naturales como la solar (Cervantes-Macedo, 2014).

Ambos tipos de tratamiento mencionados previamente producen material lodoso residual que se forma al precipitar los MPT contenidos en el DAM. Este residuo se debe aislar constantemente del área donde se está llevando a cabo el tratamiento de las soluciones ácidas, y tiene que ser depositado sobre lugares adecuados para su confinamiento. Otra opción es optar por extraer los metales mediante un proceso metalúrgico, el cual algunas veces, retribuye la inversión realizada en del sistema de tratamiento del DAM (Lottermoser, 2007; Cervantes-Macedo, 2014).

2.10.1. Tratamientos pasivos

Humedales aerobios: estos sistemas artificiales buscan imitar las condiciones de un humedal natural, por ejemplo las de un pantano. Crean condiciones ambientales que favorecen el crecimiento de cierta vegetación, comunidades de organismos, y musgos, los cuales son capaces de depurar las aguas. Este tipo de tratamiento ocupa una gran área y contiene cierta cantidad de agua cubriendo el sustrato en el que crecen las plantas. El flujo pausado de agua sobre el sistema hace posible que se realice su purificación de manera adecuada (Cervantes-Macedo, 2014).

En la Figura 3, se muestra un humedal aerobio, en estos sistemas la utilización de flora acuática hace posible que el aire de la atmósfera se ponga en contacto con la solución acuosa contaminada, ya que las plantas expulsan oxígeno a través de sus raíces. Un requisito para que la flora trabaje de manera adecuada es que la capa de agua no debe exceder los 300 mm (Skousen et al., 1998; Aduvire, 2006). El sustrato con oxigenación favorece la creación de un entorno en el cual se pueden desarrollar poblaciones bacterianas que catalizan las reacciones oxidativas de los metales contenidos en las soluciones, oxidando el Fe^{+2} a Fe^{+3} , que precipitará como mineral secundario del grupo de los hidróxidos (López et al., 2002; Aduvire, 2006).

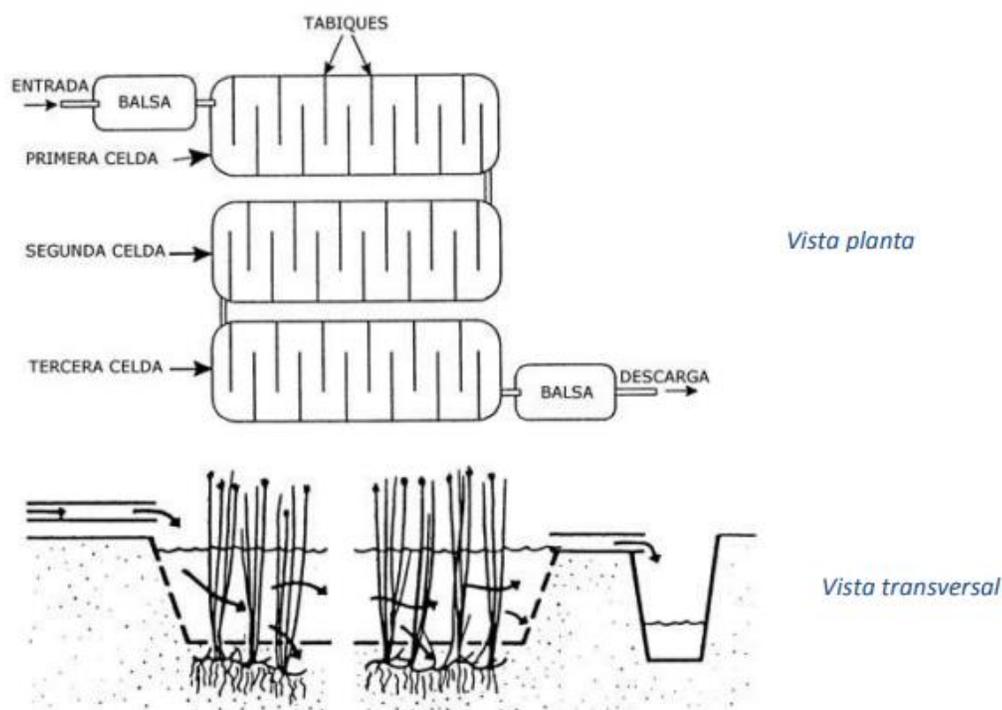


Figura 3. Disposición de las celdas en un humedal aerobio con circulación de agua en su interior (EPA, 2000).

Balsas orgánicas (humedales anaerobios): este sistema no permite que la solución acuosa contaminada quede expuesta al aire de la atmósfera, formando un ambiente anóxico requerido en la reducción química de hierro férrico a ferroso. De esta forma se elevará el pH de la solución mediante diversas reacciones químicas acompañadas de la acción microbiana (Cervantes-Macedo, 2014).

En estos sistemas, las soluciones de DAM fluyen debido a la fuerza gravitatoria. El pH suele aumentar hasta valores de alrededor de 7 debido a que se genera alcalinidad proveniente de bicarbonatos formados en el humedal anaerobio a través de las reducciones químicas anaerobias del SO_4^{2-} y de la solubilización de la calcita (CaCO_3) contenida en la caliza. Con el propósito de evadir la ocurrencia de fenómenos químicos aerobios capaces de producir acidez mediante reacciones de hidrólisis por parte de algunos elementos metálicos, debe existir un tratamiento previo de la solución acuosa acidificada utilizando caliza (Aduvire, 2006; Cervantes-Macedo, 2014).

En la Figura 4, se muestra la disposición de las capas en un humedal anaerobio. La capa acuosa tiene que ser mayor de 300 mm para propiciar el ambiente anóxico necesario a fin de tener un adecuado desempeño. Este recubrimiento inunda una capa porosa que permite el paso del agua, y cuyo grosor es de 300 - 600 mm, formada principalmente por materia orgánica, colocada encima de una lámina constituida por caliza. El fin de disponer de la capa orgánica radica en expulsar el oxígeno disuelto, llevar a cabo la reducción de hierro férrico a ferroso, y neutralizar las soluciones a través de procesos químicos o mediante la acción microbiana. Encima de la capa orgánica crece la flora sobresaliente a la superficie como la de cualquier humedal, ayudando en la estabilización de esta lámina, y aportando material orgánico complementario (Aduvire, 2006; Cervantes-Macedo, 2014).

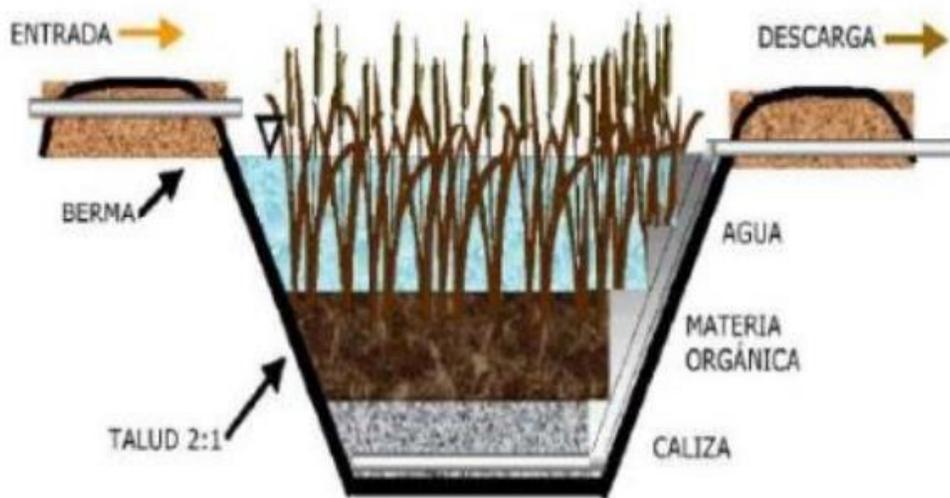


Figura 4. Disposición de las capas en humedal anaerobio (Aduvire, 2006).

Drenaje anóxico calizo (ALD): este método para tratar el DAM está dentro del grupo de los sistemas pasivos y se basa en realizar excavaciones de 100 o 200 cm para conservar un ambiente anóxico. Las excavaciones son rellenas con material gravoso de rocas que contengan minerales carbonatados, y son tapadas con una cubierta de material arcilloso o una membrana impermeable. El DAM se pone en tránsito por dentro de la excavación para la solubilización de la roca calcárea, propiciando la neutralización y por ende el aumento del pH de las soluciones ácidas (López et al., 2002; Lottermoser, 2007).

Dado que prevalece un ambiente anóxico, no precipitan productos secundarios, evitándose una posible cobertura en la capa de roca calcárea, de esta manera se puede seguir generando alcalinidad de manera eficiente (Lottermoser, 2007).

Barreras reactivas permeables: Este método de tratamiento consiste en una barrera cuya permeabilidad es suficiente para permitir el tránsito del agua del subsuelo, obstruyendo el flujo de MPT, metaloides y otros polutantes, debido a que la barrera contiene un material cuya reactividad retiene los contaminantes peligrosos o los convierte en constituyentes no perjudiciales. Lo anterior se puede conseguir estableciendo un ambiente químico en el que se descompongan o retengan las sustancias más persistentes, descontaminando el agua del subsuelo. La mayoría de los MPT o contaminantes orgánicos presentan estabilidad en ambientes químicos naturales de zonas acuíferas subterráneas donde normalmente prevalece un pH neutro, condiciones oxidantes, baja concentración de sales, y temperaturas normales. En el caso de las sustancias orgánicas, se pueden degradar o suelen formar complejos, mientras que los metales tienden a precipitar según las condiciones de potencial redox y pH (Aduvire, 2006).

2.11. Depósito de Jales “El Lavadero”

2.11.1. Localización geográfica

El Depósito de Jales “El Lavadero” se localiza en las coordenadas geográficas 29° 50’ 59” N y 110° 14’ 50” W, se ubica aproximadamente a 800 m al SW del municipio de San Felipe de Jesús, Sonora, México. Este último se encuentra en el centro del Estado de Sonora, a 142 km al NE de Hermosillo, al extremo oeste del río Sonora (Figura 5). Su localidad es el poblado de San Felipe de Jesús localizado en el paralelo 29° 51’ de latitud norte y a los 110° 14’ de longitud al oeste del meridiano de Greenwich, la elevación del lugar es de 853 m sobre el nivel del mar. Colinda al norte con Banámichi y Huepac, al sur con Aconchi y al oeste con Opodepe (INEGI., 2009). La entrada se encuentra en la carretera estatal número 89 Hermosillo-Arízpe, a partir de esta se recorren 2 km al oeste hasta llegar al poblado de San Felipe de Jesús cruzando el Río Sonora, donde la zona de estudio se encuentra a 800 m al sur de dicho poblado (Espinoza-Madero, 2012). El depósito de jales colinda con suelos agrícolas, encontrándose a escasos m de estos.

2.11.2. Aspectos generales e historia

Se trata de un depósito de residuos mineros abandonados que en distintos periodos del siglo XX se dedicó al procesamiento de minerales metálicos, no registra operación desde principios de 1980 (Campa-Robles, 2015). La acumulación de los jales empezó aproximadamente en el año de 1920, y aunque no se tiene registro histórico exacto del volumen diario de material procesado, se estima que fueron 100 toneladas de mineral por día (Americas Silver Corporation, 2018). El lugar es caracterizado por ausencia de vegetación y coloración anaranjada-amarillenta. En el área se trabajó principalmente con la extracción y procesamiento de minerales de Pb, Zn, Cu y Ag, estos dos últimos en menor grado (Del Río-Salas et al., 2019).

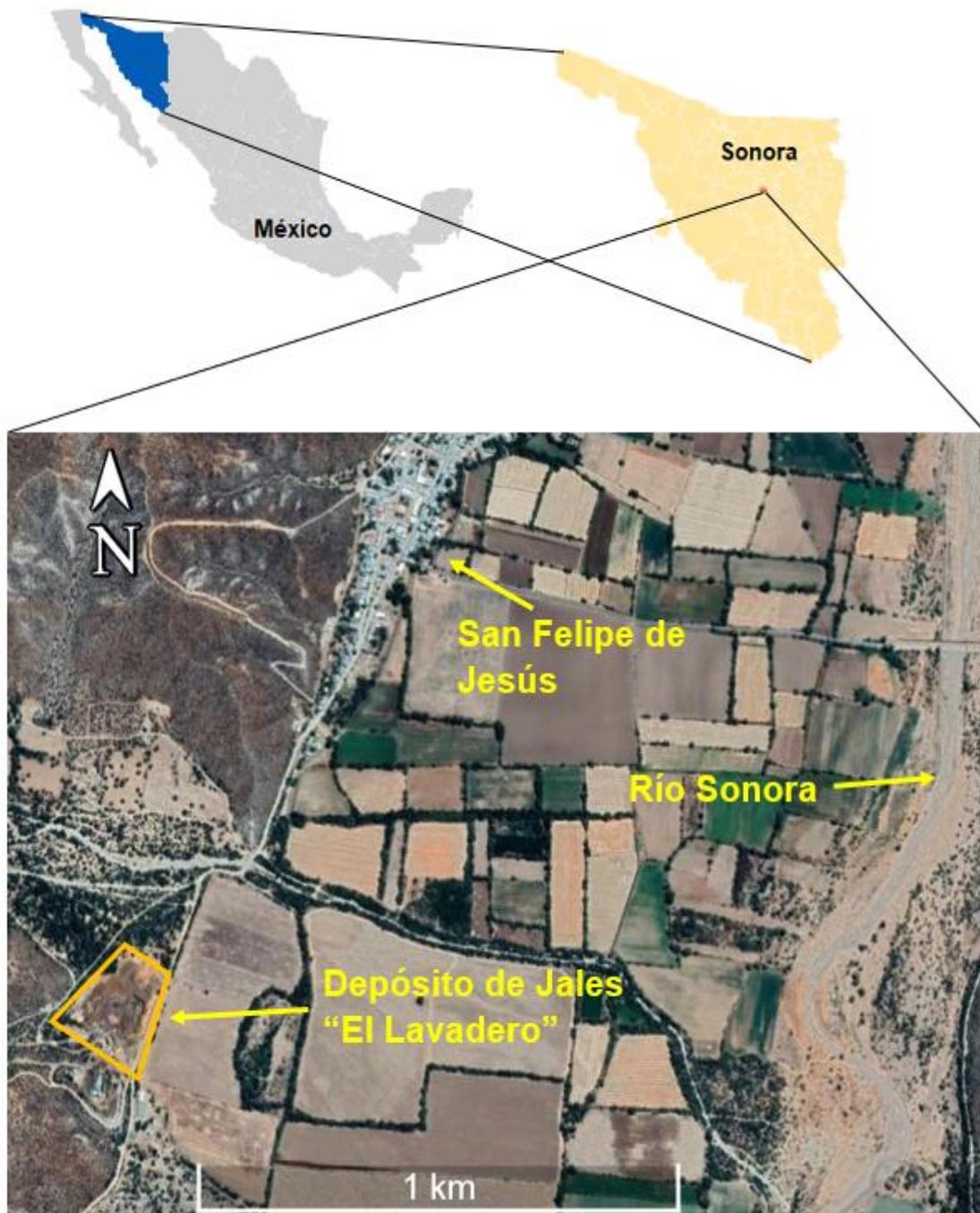


Figura 5. Localización del área de estudio, denominado Depósito de Jales "El Lavadero" en San Felipe de Jesús, Sonora, México.

2.11.3. Características físicas de los jales

Los jales en la zona presentan forma de abanico irregular que se abre hacia la parte norte, teniendo un diámetro aproximado de 206 m, con un área total aproximada 16,300 m². Presenta alturas máximas de 5 m y mínimas de 2 m; se ha calculado un peso estimado de 209455 toneladas (Espinoza-Madero, 2012).

2.11.4. Método de beneficio

La planta fue diseñada para la concentración de sulfuros de Pb y Zn, con valores de cobre y plata que provenían principalmente de las minas denominadas Santa Rosa y las Lamas, ubicadas en Distrito Minero de San Felipe. El proceso fue mediante flotación selectiva y se produjeron dos concentrados, uno de Zn y el otro de Cu, Pb y Ag (Roldan-Quintana, 1979).

2.11.5. Geología

En lo referente a la geología, existen rocas ígneas intrusivas: granito (49.13 %); Ígneas extrusivas: riolita-toba ácida (22.27 %); sedimentaria: conglomerado (19.55 %), caliza (1.84 %); suelo: aluvial (7.21 %), y suelos en orden de abundancia: Leptosol (49.70 %), Regosol (43.44 %), Fluvisol (6.49 %) y Feozem (0.04 %) (INEGI, 2009).

El tipo de yacimiento que se tiene en el Distrito Minero de San Felipe consiste en estructuras vetiformes y zonas de skarn o de contacto. Dentro de los minerales principales se encuentra: la pirita, calcopirita, galena, esfalerita y argentita (Roldan-Quintana, 1979).

2.11.6. Climatología

El clima que se presenta en San Felipe de Jesús corresponde a semiseco templado (40.33 %), seco semicálido (30.27 %) y semiseco semicálido (29.41 %), con temperaturas que varían de 16 a 22°C y precipitaciones de 300 a 600 mm (INEGI, 2009). La temperatura media máxima por mes es de 25.3°C presentada en julio y agosto, y la

media mínima mensual es de 8.3°C. El periodo de precipitaciones se presenta en verano en junio y julio con un promedio de precipitaciones de 468.8 mm por año (INAFED, 2004).

2.11.7. Población y actividades económicas

La población total de San Felipe de Jesús es de 407 habitantes, ocupando el penúltimo puesto de los municipios más poblados del estado de Sonora (INEGI, 2015). Desde su fundación la población se dedicó originalmente a la minería, actualmente las actividades económicas que prevalecen son la agricultura y ganadería (INAFED, 2004).

2.11.8. Fauna y vegetación

Las plantas de la región son: bosque de encino, matorral subtropical, mezquital y pino encino. La fauna corresponde a cachoras, coyotes, gavilanes ratoneros, güilotas, liebres, ranas, sapos, tecolotes enanos, tortugas de río, venados cola blanca, víboras de cascabel, y demás (INAFED, 2004).

2.11.9. Estudios de impacto ambiental

Se han realizado estudios sobre la concentración de MPT en los jales, suelos agrícolas aledaños y caminos no pavimentados del área, en los cuales se han encontrado concentraciones altas de As, Pb, Sb y Zn representando riesgos ecológicos y a la salud. Las concentraciones de dichos elementos en los jales exceden los valores máximos permitidos que establece la NOM-157-SEMARNAT-2009, y en el caso de los suelos agrícolas y caminos, los valores superan a los valores límites permisibles la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (Del Río-Salas et al., 2019).

En un estudio realizado por Espinoza-Madero (2012), reporta que los índices de geoacumulación de varios metales potencialmente tóxicos para dicho depósito lo clasifican de contaminación moderada a muy fuerte. También señala que existe una contaminación de metales como As, Pb y Hg ya que exceden los límites permisibles por la NOM-157-SEMARNAT-2009. Además, se concluye que los mecanismos de transporte principalmente son hídricos, ya que los procesos de erosión son muy altos.

CAPÍTULO 3

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materiales y Equipos

3.1.1. Materiales

En la realización de los análisis químicos de los parámetros contemplados en la presente investigación se utilizaron reactivos de grado analítico (Merck, Baker) y materiales de laboratorio, además de material básico de muestreo. El material empleado (muestreo y laboratorio), fue sometido a controles rigurosos de limpieza con el fin de prevenir cualquier tipo de contaminación. Para cumplir con lo anterior, se basó en el procedimiento metodológico que recomienda la Norma Oficial Mexicana NMX-AA-115-SCFI-2001.

3.1.2. Equipos

En la determinación de los parámetros físicos y químicos de las muestras de jales y suelos, se utilizó el siguiente equipamiento: difractómetro de rayos X Empyrean, microscopio electrónico de barrido Jeol, espectrofotómetro de absorción atómica Perkin-Elmer AAnalyst 400, potenciómetro Thermo Electron Corporation modelo Orion 3 star, y potenciómetro Hanna.

3.2. Muestreo de Campo

Se colectaron muestras en 17 estaciones de muestreo, de las cuales 12 corresponden al Depósito de Jales “El Lavadero”, 4 al suelo agrícola aledaño y una muestra en una estación blanco de campo (BC) ubicada en un cerro adyacente a 0.5 km del área de estudio (Figura 6 y Tabla 3). En el suelo agrícola, la estación de muestreo 5D corresponde a la sección donde probablemente se ubica la descarga principal de agua proveniente desde los jales cuando llueve, siendo la estación de muestreo del suelo agrícola que se observa con mayor impacto.

La metodología empleada en el muestreo, conservación y traslado de las muestras se realizó siguiendo el procedimiento propuesto por el Manual of Aquatic Sediment Sampling (Mudroch y Azcue, 1995), siguiendo un método de muestreo sistemático y a juicio de experto basado en un patrón geométrico regular, el cual se estableció una vez estando en el sitio. Las muestras se recolectaron siguiendo dicho patrón asegurando la cobertura total del área del depósito de jales en forma uniforme y logrando así la representatividad de las muestras. Las muestras de jales y suelos se recolectaron mediante la introducción manual de nucleadores de plástico (lavados y descontaminados) a una profundidad de 20 cm. Se realizó la colecta del 10 % de las muestras como duplicado para determinar la precisión en el muestreo de campo. Por último, las muestras se conservaron en hielo e inmediatamente se transportaron al laboratorio, para realizar las determinaciones analíticas correspondientes.

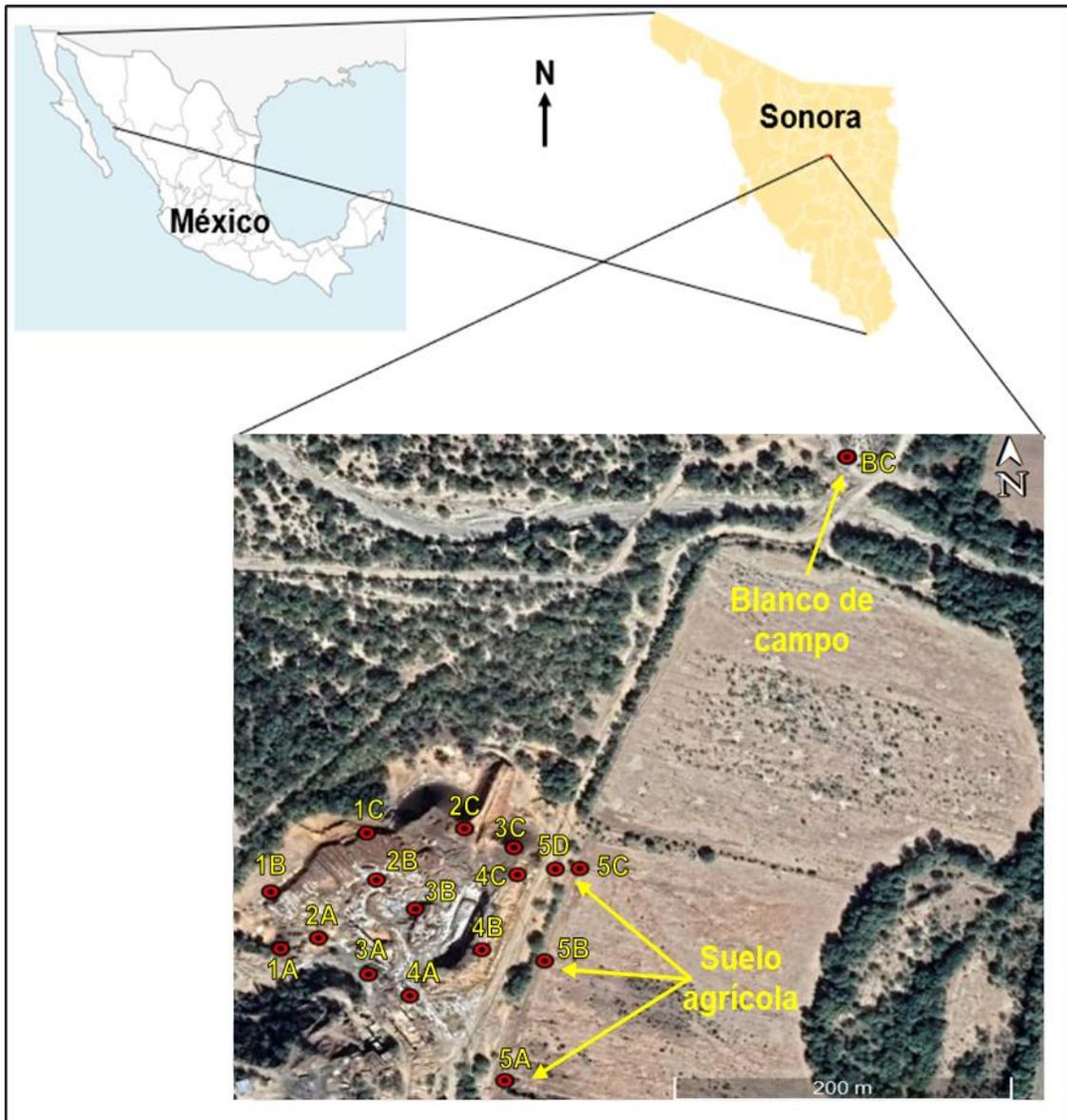


Figura 6. Localización de las estaciones de muestreo en el Depósito de Jales “El Lavadero” y suelo agrícola.

Tabla 3. Localización geográfica, color y tipo de material de las estaciones de muestreo del Depósito de Jales “El Lavadero” y suelo agrícola aledaño.

Estación de muestreo	Localización	Color	Tipo de material
1A	29°50.97' N, 110°14.884' W	Café medio	Jal
1B	29°50.993' N, 110°14.877' W	Café medio	Jal
1C	29°51.016' N, 110°14.851' W	Café medio	Jal
2A	29°50.974' N, 110°14.87' W	Café amarilloso	Jal
2B	29°50.997' N, 110°14.848' W	Café oscuro	Jal
2C	29°51.017' N, 110°14.815' W	Oscuro	Jal
3A	29°50.959' N, 110°14.852' W	Oscuro	Jal
3B	29°50.985' N, 110°14.834' W	Café medio	Jal
3C	29°51.009' N, 110°14.797' W	Oscuro	Jal
4A	29°50.95' N, 110°14.837' W	Oscuro	Jal
4B	29°50.968' N, 110°14.81' W	Oscuro	Jal
4C	29°50.998' N, 110°14.796' W	Café amarillo	Jal
5A (*)	29°50.915' N, 110°14.803' W	Café claro	Suelo
5B (*)	29°50.963' N, 110°14.787' W	Café claro	Suelo
5C (*)	29°51.0' N, 110°14.773' W	Café claro	Suelo
5D (*)	29°51.0' N, 110°14.773' W	Amarillo	Suelo
BC	29°51.164' N, 110°14.67' W	Blanco	Suelo

BC = Estación blanco de campo.

(*) = Estación de suelo agrícola.

3.3. Tratamiento de la Muestra

Una vez en el laboratorio, las muestras de jales y suelos agrícolas fueron secadas por 48 h a temperatura ambiental, siguiendo el procedimiento metodológico que recomienda el Manual of Aquatic Sediment Sampling (Mudroch y Azcue, 1995). A través del método de coneo y cuarteo, el material se redujo en volumen hasta 100 g para obtener muestras representativas. Una porción de 12 g de cada muestra representativa fue molida en un mortero de porcelana (descontaminado), hasta una dimensión < 80 mallas para realizar las determinaciones analíticas.

3.4. Pruebas Físicas

3.4.1. Análisis granulométrico

En el análisis granulométrico se determinó la textura de las muestras mediante el conocimiento porcentual de las fracciones grava, arena, limo y arcilla. Se separaron las fracciones por el método de mallas y pipetas, además se llevó a cabo la clasificación correspondiente. Dicho análisis granulométrico se realizó siguiendo el procedimiento establecido por Folk (1980).

3.4.2. Difracción de rayos X (DRX)

Se realizó la caracterización mineralógica mediante el análisis por DRX, en el laboratorio de difracción de rayos X del Instituto de Química de la Universidad Autónoma de México (UNAM). Las muestras se homogeneizaron y pulverizaron en un mortero de ágata, se tamizaron (<75 micras) y fueron medidas mediante la utilización de un portamuestras de Al (fracciones no orientadas) de doble carga. Para las determinaciones se trabajó en el rango angular 2θ de 4° a 80° escaneando por pasos con un “step scan” de 0.003° (2θ) y un periodo de integración de 40 s por paso. Los difractogramas fueron obtenidos utilizando un difractómetro Empyrean equipado con filtro de níquel, tubo de Cu de foco fino y detector PIXcel3D. Para la identificación fue utilizado el software HighScore

(MALVERN) y las bases de datos ICSD (Inorganic Crystal Structure database) y ICDD (International Center for Diffraction Data).

3.4.3. Microscopía electrónica de barrido (MEB)

Para este estudio se utilizó un espectrómetro de rayos X por dispersión de energía (MEB-EDS) (Goldstein et al., 2018). Dicho análisis se realizó en el laboratorio de microscopía electrónica de barrido del Instituto Tecnológico de Saltillo (Saltillo, Coahuila).

3.5. Pruebas Químicas

En la Tabla 4, se muestra de manera resumida la metodología contemplada en la presente investigación. Los parámetros analíticos considerados son descritos a continuación.

3.5.1. Potencial hidrógeno (pH), potencial redox (Eh) y conductividad eléctrica

Estos parámetros químicos fueron determinados siguiendo la metodología establecida por el Manual of Aquatic Sediment Sampling (Mudroch y Azcue, 1995).

Potencial hidrogeno (pH)

Se utilizó un potenciómetro marca Thermo Electron Corporation, modelo Orion 3 Star. El análisis consistió en colocar 20 gramos de muestra representativa en un recipiente de vidrio de 100 mL. Posteriormente deben añadirse 20 mL de agua desionizada y ser agitados por una hora, después se registra la lectura. Para este análisis se utilizaron 3 soluciones de diferente pH (4, 7, 10), con los cuales se verificó constantemente la calibración.

Tabla 4. Parámetros y métodos analíticos utilizados en el análisis de las muestras de jales del Depósito “El Lavadero” y suelo agrícola.

Parámetros y/o Prueba	Método
Pruebas físicas:	
Difracción de rayos X	Goldstein et al., 2018.
Microscopia electrónica de barrido	Goldstein et al., 2018.
Análisis granulométrico	Folk, 1980; Mudroch y Azcue, 1995.
Pruebas químicas:	
Potencial hidrógeno (pH)	Mudroch y Azcue, 1995.
Potencial redox (Eh)	Mudroch y Azcue, 1995.
Conductividad eléctrica (C.E.)	Mudroch y Azcue, 1995.
Prueba de extracción de constituyentes tóxicos	NOM-141-SEMARNAT-2003.
Azufre total (S_{total})	Furman, 1985; Gómez-Álvarez, 2004.
Sulfatos (SO_4^{2-})	Furman, 1985; Gómez-Álvarez, 2004.
Potencial de acidez (PA)	NOM-141-SEMARNAT-2003.
Potencial de neutralización ($CaCO_3$)	NOM-141-SEMARNAT-2003.
Metales totales	Van Loon y Barefoot, 1989; Gómez-Álvarez, 2004.
Diagramas Eh-pH (diagramas de Pourbaix)	Pourbaix, 1974.
Prueba para evaluar el DAM:	
Pruebas estática (PM-BAB)	NOM-141-SEMARNAT-2003.

Potencial redox (Eh)

La medición se realizó en el muestreo de campo en cada estación utilizándose un potenciómetro marca Thermo Electron Corporation, modelo Orion 3 Star. Se utilizó una solución estándar redox de 240 mV para una calibración continua. El procedimiento consistió en insertar el electrodo examinando que esté dentro de la muestra. Posteriormente se espera hasta llegar al equilibrio térmico y después se registran los valores en mV, así como la temperatura inicial una vez estabilizada la lectura.

Conductividad eléctrica (C.E.)

En la determinación de este parámetro fue utilizado un conductímetro Hanna modelo HI98130. La determinación consistió en colocar 20 gramos de muestra de jales y suelos en un recipiente de 100 mL, posteriormente fueron añadidos 20 mL de agua desionizada, dicha solución debe ser agitada por una hora. La muestra se filtra a través de papel Whatman 42. A esta solución se le determina la C.E. introduciendo el electrodo en la solución y tomando lectura directa en $\mu\text{S}/\text{cm}$ (microsiemens/centímetro). Se utilizó una solución estándar para la calibración del equipo.

3.5.2. Azufre total (S_{total})

Se determinó el azufre total en las muestras siguiendo la metodología recomendada (Furman, 1985; Gómez-Álvarez, 2004). La técnica consiste en la determinación gravimétrica de contenido de azufre total en minerales sulfurosos. Se realiza inicialmente una oxidación por vía húmeda sobre la muestra de jales y suelos (tamaño menor a 80 mallas) con HNO_3 concentrado y KCl para oxidar el azufre a SO_4^{-2} . Después, el SO_4^{-2} soluble se precipita con BaCl_2 en solución previamente calentada y con cierta acidez adicionada con HCl.

3.5.3. Sulfatos (SO_4^{-2})

Los sulfatos se analizaron por la técnica por gravimetría. Se realiza inicialmente la solubilización de los sulfatos presentes utilizando HCl concentrado. Después, los SO_4^{-2} solubles se hacen precipitar con BaCl_2 en una solución previamente calentada y con cierta acidez adicionada con HCl (Furman, 1985; Gómez-Álvarez, 2004).

3.5.4. Carbonato de calcio (CaCO₃)

El potencial de neutralización fue calculado siguiendo la metodología recomendada por la NOM-141-SEMARNAT-2003, la cual la recomienda cuantificar los carbonatos de calcio presente en las muestras de jales mediante una valoración en retroceso, con una disolución estandarizada de NaOH sobre la muestra digerida con ácido clorhídrico previamente agitada por 24 h. Por estequiometria se calculan los kg de CaCO₃ contenidos en cada tonelada de residuo minero, esto corresponde al potencial de neutralización (PN).

3.5.5. Metales totales (Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn)

El contenido total de metales (Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, Zn) fue determinado empleando la metodología establecida por Van Loon y Barefoot (1989) y Gómez-Álvarez (2004), previa digestión con ácidos minerales concentrados (HNO₃, HF, HClO₄). Los extractos ácidos se recuperaron en HNO₃ al 2 % y H₃BO₃ al 2 %, y se analizaron por espectroscopía de absorción atómica por llama, haciendo uso de un espectrofotómetro Perkin-Elmer AAnalyst 400. Las concentraciones de los metales fueron calculadas a través de la siguiente ecuación:

$$\text{Ppm de X} = \frac{(V_i)(L)(F.D.)}{W} \times 100 \quad (11)$$

Donde:

X = Elemento a determinar.

W = Peso de la muestra en g.

V_i = Volumen de afore inicial en mL.

L = Lectura directa en µg/mL.

F.D. = Factor de dilución.

3.5.6. Prueba de extracción de constituyentes tóxicos

Este ensayo se realiza con el fin de determinar si existen elementos tóxicos en los jales. El procedimiento es el que corresponde a la “prueba para realizar la extracción de metales y metaloides en jales, con agua en equilibrio con CO₂”, en esta técnica se realiza una extracción con agua destilada en equilibrio con dióxido de carbono (pH = 5.5) que se prepara al momento de su utilización (NOM-141-SEMARNAT-2003). En la solución acuosa producto de la extracción deben cuantificarse los MPT en estudio mediante espectroscopía de absorción atómica, como se indica en el apartado 3.5.5.

Los metales que no están regulados en la NOM-157-SEMARNAT-2009 se compararon con los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (SEDUE, 1989).

3.5.7. Diagramas Eh-pH (diagramas de Pourbaix)

En su construcción se hizo uso del software HSC Chemistry para Windows 6.0. Con el fin de que el programa determinara los diagramas de Eh-pH fue necesario alimentar datos como el coeficiente de actividad, que se asumió con un valor unitario, debido a que las muestras de jales son sólidas (Roberge, 2012). Adicionalmente, se alimentó para cada estación las temperaturas, las concentraciones de los distintos metales, así como la del azufre, y se graficó cada uno de ellos en un sistema azufre-agua. Posteriormente se identificaron las especies químicas situando en la gráfica el Eh y pH.

3.6. Prueba para Evaluar DAM

3.6.1. Prueba estática (PM-BAB)

Esta prueba está basada en la NOM-141-SEMARNAT-2003 y Lawrence y Wang (1997), y tiene la finalidad de calcular una relación entre las especies minerales capaces de generar drenaje ácido (sulfuros) y aquellas que pueden neutralizarlo (principalmente la calcita). Este ensayo consiste en determinar el potencial de acidez (PA) y el potencial de neutralización (PN). Mediante la relación entre estos dos valores denotados en kg de CaCO₃ por tonelada de residuo minero (jales), se puede conocer si los desechos de mina

presentan o no cantidad suficiente de CaCO_3 para poder consumir a la acidez generada por los sulfuros.

Cuando la relación PN/PA es menor o igual a 1.2; los jales poseen el potencial suficiente para generar DAM, en cambio, cuando dicha relación es mayor a 1.2; los jales no poseen la capacidad para generar DAM.

Potencial de acidez (PA)

El PA se determina calculando la diferencia entre la cantidad total de azufre (S_{total}) y la cantidad de azufre en forma de SO_4^{2-} (S_{sulfatos}), ambos en porcentaje, y se multiplica por 31.25 (Ecuación 12), debido a que una tonelada de residuo minero con una concentración del 1 % de azufre (10 kilogramos), necesita 31.25 kilogramos de calcita para no generar acidez (NOM-141-SEMARNAT-2003). El PA se denota en kilogramos de calcita por tonelada de jales ($\text{kg CaCO}_3/\text{ton}$).

$$\text{PA} = (\% S_{\text{total}} - \% S_{\text{sulfatos}}) \times 31.25 \quad (12)$$

Potencial de neutralización (PN)

Se determinó el PN en base a la NOM-141-SEMARNAT-2003, la cual recomienda cuantificar los carbonatos de calcio presente en las muestras de jales mediante una valoración en retroceso, con una disolución estandarizada de NaOH sobre la muestra digerida con HCl previamente agitada por 24 h. Por estequiometría se calculan los kilogramos de CaCO_3 por tonelada de jales, esto corresponde al potencial de neutralización (PN).

3.7. Normatividad Ambiental

Las normas y/o criterios utilizados en la presente investigación para evaluar la posible contaminación de los jales del Depósito de Jales “El Lavadero” son las siguientes:

NOM-021-RECNAT-2000: Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreos y análisis.

NOM-141-SEMARNAT-2003: Peligrosidad de los jales debido a su reactividad y toxicidad.

NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004: Establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente.

NOM-157-SEMARNAT-2009: Valores límites permisibles de MPT en los extractos acuosos de jales y base seca (concentración total).

Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (SEDUE, 1989).

3.8. Control de Calidad

Para que los resultados tengan alto grado de confiabilidad, precisión, exactitud y que representen las características actuales del depósito de jales estudiado, se siguió un procedimiento de control de calidad en el muestreo y análisis en laboratorio. Para lograr esto, fue empleado el procedimiento metodológico de control de calidad que establecen las Normas Oficiales Mexicanas: NMX-AA-051-SCFI-2016 y NMX-AA-115-SCFI-2001, y el Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods (SW-846) (EPA, 1992). Adicionalmente, se incluye un control estricto en la descontaminación del material y equipamiento de muestreo, cuidados en la preservación y traslado de las muestras, procedimientos de calibración y frecuencia de los equipos utilizados, obtención de muestras duplicadas para calidad interna, indicadores de calidad de los datos (precisión, exactitud) utilizando estándares certificados (NIST), límite de detección para las técnicas

analíticas utilizadas, entre otros. A continuación, se desglosan cada uno de los parámetros antes mencionados:

1. Descontaminación del material y equipamiento de muestreo. (Este apartado se presenta en la sección 3.1.1).

2. Procedimiento de calibración y frecuencia.

El espectrofotómetro de absorción atómica se calibró siguiendo las instrucciones del fabricante. Se emplearon reactivos analíticos de gran pureza y se construyeron curvas de calibración utilizándose al menos 3 estándares como mínimo para la determinación de metales. Con el fin de cerciorarse que los puntos experimentales de la curva se asemejaban a una línea recta, se determinó el coeficiente de correlación (r) para medir el nivel de agrupación entre 2 variables (Miller y Miller, 1993). Los valores del coeficiente de correlación en el presente estudio fueron ≥ 0.9990 (Anexo A; Tablas A1 y A2).

3. Colecta de muestras para el control de calidad interna.

Se colectaron muestras complementarias denominadas muestras duplicadas. La ubicación de estas estaciones de muestreo se seleccionó de manera aleatoria, y fueron colectadas en un 10 % respecto a la totalidad de especímenes (jales y suelos) (AWRRC y ADEQ, 1995). Estas muestras se colectan con el propósito de asegurarse que se cumpla con la precisión recomendada por el control de calidad en la recolección de muestras o en los ensayos analíticos, y deben colectarse de forma simultánea a las demás muestras de jales y suelos (AWRRC y ADEQ, 1995).

4. Indicadores de calidad de los datos

a) Precisión: mide el nivel de correspondencia entre los resultados de varios ensayos de una misma muestra. Se evaluó analizando los ensayos replicados de un estándar o muestra (CNA, 1993). Este parámetro se determinó mediante la diferencia porcentual relativa (DPR), en virtud de que se tienen solamente dos estaciones de muestreo de jales por duplicado (EPA, 2000; Skoog et al., 2015):

$$\text{Precisión} = \frac{(a - b)}{(a + b) / 2} \times 100 \quad (13)$$

Donde:

a = Valor más alto del análisis de las réplicas.

b = Valor más bajo del análisis de las réplicas.

Para las muestras duplicadas de campo se estableció una precisión $\leq 50\%$ en cada parámetro determinado en los jales y suelos (EPA, 2000). Con el fin de calcular la precisión de cada método analítico, se hizo uso de muestras fortificadas ($n = 5$) cuyas concentraciones del analito fueron preparadas con reactivos altamente puros. De manera general, se aprecia que los valores de precisión obtenidos en todos los parámetros fueron aceptables, debido a que fueron bajos, los cuales fluctuaron en el rango de 0.06 a 0.82 (Anexo A; Tabla A3).

En lo correspondiente a los duplicados de campo, las precisiones de los parámetros analizados (expresado como desviación porcentual relativa (DPR)) en las estaciones 1B y 3C (Anexo A; Tabla A4), estuvieron dentro del 50 % recomendado por la EPA (2000). Las muestras duplicadas se colectaron y transportaron al laboratorio individualmente sin mezclarlas, posteriormente se analizaron de manera separada.

Adicionalmente, se muestran en el Anexo A (Tabla A5), los valores de precisión que se obtuvieron en el análisis químico realizado por duplicado en las estaciones 2C y 3B. Al igual que los duplicados de campo, se realizaron en un 10 % con relación al total de muestras, excepto en la cuantificación de metales totales vía absorción atómica, donde todas las muestras se corrieron por duplicado analítico. Los valores de DPR para muestras analizadas por duplicado (estaciones 2C y 3B) fueron menores al 36 %, el cual se encuentra dentro del 50 % recomendado por la EPA (2000).

b) Exactitud: indica la cercanía o proximidad que existe entre un valor obtenido y un valor establecido o correspondiente a la realidad. La exactitud es más grande cuando ambos valores son más parecidos. Para evaluar este parámetro en la determinación de metales en los jales y suelos por absorción atómica, fue utilizado el estándar certificado Inorganics in Marine Sediment (NIST 2702), cuyos niveles de concentración de los MPT contemplados en esta investigación son conocidos. Este último se analizó empleando la misma técnica

de descomposición química utilizada en las muestras de jales y suelos. La exactitud se expresó como porcentaje de recuperación (Skoog et al., 2015):

$$\text{Recuperación (\%)} = \frac{b}{a} \times 100 \quad (14)$$

Donde:

a = Concentración real de la muestra.

b = Concentración medida en la muestra.

Los resultados encontrados deben indicar una recuperación que se encuentre en el rango de 85 a 115 % (NMX-AA-115-SCFI-2001) (Anexo A; Tabla A6).

c) Límite de detección (L.D.) del instrumento: hace referencia a la concentración específica que produce una señal en el equipo considerablemente distinta de la producida por una muestra en “blanco” o “señal de fondo”. El L.D. de una técnica se determina apoyándose en la región próxima al origen, se hace uso de la pendiente y la ordenada al origen (Miller y Miller, 1993). En la actual investigación se consideró el L.D. como el valor de concentración del elemento de interés que produce una señal idéntica a la producida por el blanco (Y_B), más el triple de la desviación estándar del blanco (S_B) (Miller y Miller, 1993; Skoog et al., 2015).

En el Anexo A; Tablas A1 y A2 son presentados los L.D. obtenidos en el presente estudio para cada metal en la cuantificación de metales totales y la prueba de extracción de constituyentes tóxicos.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Pruebas Físicas

4.1.1. Análisis granulométrico

La granulometría de los minerales impacta considerablemente en la cinética de las reacciones químicas de oxidación, es decir, estas se desempeñan a mayor velocidad cuando se trata de minerales cuyo tamaño de partícula es menor, esto se debe a que el área específica expuesta a la oxidación es más grande (Lundgren y Silver, 1980; Fernández-Rubio, 1986). En el presente trabajo se realizó el análisis granulométrico en las diversas estaciones de muestreo en los jales del Depósito “El Lavadero” y suelo agrícola aledaño, cuyos resultados son presentados en la Tabla 5.

Los resultados obtenidos del estudio granulométrico, mediante la aplicación de los diagramas ternarios de Folk, (1980) con su respectiva clasificación, indican que los jales de las estaciones 1A, 1B, 1C, 2B, 3A, 4B y 4C, poseen características texturales muy similares clasificados como arena lodosa y arena limosa. Contienen más del 51 % de arena, más del 20 % de limo y menos del 16 % de arcilla. En el caso de los jales de las estaciones restantes que corresponden a 2A, 2C, 3B, 3C y 4A, también tienen características muy similares entre ellos, cuyas clasificaciones corresponden a lodo arenoso y limo arenoso. Asimismo, presentaron contenidos de menos del 50 % de arena, más del 29 % de limo y más del 12 % de arcilla (Tabla 5).

Tabla 5. Resultados del análisis granulométrico en los jales del Depósito “El Lavadero” y suelo agrícola aledaño.

Parámetro	Jales												Suelo agrícola				
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	4A	4B	4C	5A	5B	5C	5D	BC
Grava (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15.62	8.92	11.48	-	23.32
Arena (%)	59.36	53.98	66.71	41.46	61.54	29.94	64.47	19.74	33.03	49.07	67.08	51.78	44.66	47.19	61.04	88.63	68.07
Limo (%)	25.02	25.96	23.26	29.12	28.89	51.74	20.41	38.88	52.37	38.25	23.51	37.77	-	-	-	9.50	-
Arcilla (%)	15.62	20.06	10.04	29.42	9.58	18.32	15.12	41.38	14.6	12.67	9.42	10.45	-	-	-	1.87	-
Limo + arcilla (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	39.72	43.89	27.48	-	8.61
Granulometría	Arena lodosa	Arena lodosa	Arena limosa	Lodo arenoso	Arena limosa	Limo arenoso	Arena lodosa	Lodo arenoso	Limo arenoso	Limo arenoso	Arena limosa	Arena limosa	Arena lodo gravosa	Arena lodo gravosa	Arena lodo gravosa	Arena limosa	Arena lodo gravosa

BC = Estación blanco de campo.

Respecto a las estaciones 5A, 5B, y 5C ubicadas en el suelo agrícola aleñado a los jales, presentaron la misma clasificación textural al ubicarse en el triángulo de grava, arena y lodos (Folk, 1980), catalogándose como arena lodo gravosa, presentando menos del 16 % de grava, más del 44 % de arena y más del 27 % de limo + arcilla. La estación denominada blanco de campo (BC) ubicada en un cerro adyacente a 0.5 km del área de estudio (Figura 6, Tabla 3), también se clasificó como arena lodo gravosa con la diferencia que presentó mayor contenido de gruesos con 23.32 % de grava, 68.07 % de arena y solo 8.61 % de limo + arcilla. En el caso de la estación 5D del suelo agrícola se clasificó texturalmente como arena limosa, presentando más del 88 % de arena, menos del 10 % de limo y menos del 2 % de arcilla (Tabla 5).

En términos generales, el material más fino corresponde al área de los jales y el más grueso se concentra en el suelo agrícola aledaño. El hecho de que los jales presenten material más fino se debe a los diferentes procesos metalúrgicos. Las diferencias de clasificación textural entre las diversas estaciones de muestreo correspondientes a jales pueden deberse a las variaciones de las condiciones de molienda, así como a las características geológicas del yacimiento de donde provenían, debido a que según Roldan-Quintana (1979), en el Depósito “El Lavadero” se concentraban minerales provenientes de diversas minas del sector.

Espinoza-Madero (2012), realizó un estudio de distribución granulométrica en el Depósito de Jales “El Lavadero” y suelo agrícola, encontrando resultados similares a los del presente estudio. Adicionalmente, se han reportado resultados de análisis granulométricos en depósitos de jales mineros del sur de México y el mundo que son semejantes a los expuestos en la presente investigación (García-Balboa, 1998; Corona-Chávez, et al., 2017; Salas-Urviola, 2020).

4.1.2. Caracterización mineralógica (DRX)

La Tabla 6 muestra los resultados de la caracterización mineralógica analizada por la técnica de DRX en los jales de las estaciones de muestreo (1B, 2A, 3A y 4B), en el suelo de la estación 5D, así como en la estación denominada blanco de campo (BC). En el caso de los jales, los resultados muestran que se caracterizan por el predominio de cuarzo y sulfatos de hierro (yeso, jarosita, beudantita, copiapita y coquimbita). Además de estos minerales, en la estación 4B se identificó pirita, así como cantidades muy bajas de mica y caolinita (Anexo B; Figura B4), y en la estación 3A se detectó clinomimetita (Anexo B, Figura B3). Puede observarse que en los jales, los minerales primarios corresponden al cuarzo, mica y pirita, y los secundarios incluyen al yeso, jarosita, beudanita, copiapita coquimbita y clinomimetita. Romero et al. (2007) y Yucel y Baba (2016), reportan que los minerales secundarios tales como la jarosita y el yeso son propios de ambientes de mina donde se genera el DAM. Es importante mencionar que de las estaciones de muestreo que corresponden a los jales, solamente la estación 4B presentó en su composición minerales sulfurosos, siendo esta la pirita, la cual está reportada por Roldan-Quintana (1979) dentro de la mineralogía del yacimiento. El hecho de que no se identificó pirita en las demás estaciones de muestreo, puede ser debido a que dichos minerales primarios fueron oxidados dando origen a la liberación de ciertos elementos, con la posterior precipitación o coprecipitación de nuevos minerales (minerales secundarios) (Magdaleno-Rico, 2014).

Es relevante destacar que en los jales no se identificó calcita, la cual es el principal mineral capaz de neutralizar acidez, debido a que presenta la mayor reactividad dentro de las especies consumidoras de acidez según Lottermoser (2007). Existe la posibilidad de que anteriormente pudiese haber existido cierta cantidad de calcita, sin embargo, pudo ser consumida por la formación de ácido derivada de la oxidación de los sulfuros.

Respecto al suelo de la estación 5D, se compone principalmente por cuarzo, plagioclasa intermedia y minerales secundarios como yeso, jarosita y clinomimetita. Estos tres últimos están presentes en el suelo como resultado del transporte hídrico desde el depósito de jales, debido a que son especies que se forman en los procesos de formación de DAM. Es importante mencionar que en el suelo tampoco se detectó calcita,

Tabla 6. Caracterización mineralógica por DRX de las estaciones de muestreo del Depósito de Jales “El Lavadero” y suelo agrícola aledaño (*).

Mineral	Formula	Estaciones de muestreo y porcentajes (%)					
		1B	2A	3A	4B	5D (**)	BC
Calcita	CaCO ₃						7
Cuarzo	SiO ₂	30	17	47	40	56	38
Caolinita	Al ₂ (OH) ₄ Si ₂ O				Trazas	1	
Diopsido	CaMgSi ₂ O ₆						2
Feldespato potásico	KAlSi ₃ O ₈						4
Esmectita tipo montmorillonita						Trazas	7
Plagioclasa intermedia	(Na,Ca)(Si,Al) ₄ O ₈					35	40
Mica	X ₂ Y ₄₋₆ Z ₈ O ₂₀ (OH,F) ₄				1		
Clinomimetita	Pb ₅ (AsO ₄) ₃ Cl			4		2	1
Magnetita	Fe ₃ O ₄						1
Pirita	FeS ₂				14		
Yeso	CaSO ₄ ·2H ₂ O	37	30	49	28	4	
Jarosita	KFe ³⁺ ₃ (OH) ₆ (SO ₄) ₂	33	14		15	2	
Beudantita	KFe ³⁺ ₃ (OH) ₆ (SO ₄) ₂		5				
Copiapita	Fe ²⁺ Fe ³⁺ ₄ (SO ₄) ₆ (OH) ₂ ·20(H ₂ O)		32				
Coquimbita	Fe ³⁺ ₂ (SO ₄) ₃ ·9(H ₂ O)				2		

BC = Estación blanco de campo.

(*) = El porcentaje de abundancia de cada mineral (%) es semicuantitativo.

(**) = Estación de suelo agrícola.

por lo que puede prevalecer un pH ácido, debido a la solubilización de los minerales arrastrados.

En el caso del material de la estación denominada blanco de campo (BC), predomina principalmente cuarzo, plagioclasa intermedia, calcita, esmectita tipo montmorillonita. En menor cantidad se encuentra feldespato potásico, dióxido, magnetita y clinomimetita (Anexo B; Figura B6). Comparando estos resultados con los jales y suelo impactado, se tiene presencia de minerales alcalinos y no hay presencia de especies que participan en el DAM. En el Anexo B (Figuras B1, B2, B3, B4, B5 y B6), se pueden apreciar los difractogramas obtenidos por DRX de las estaciones de muestreo analizadas (1B, 2A, 3A, 4B, 5D y BC).

4.1.3. Análisis por microscopía electrónica de barrido

El análisis por MEB acoplada con espectrometría de rayos X por energía dispersa se realizaron en las siguientes estaciones de muestreo: 1B, 2A, 3A, 4B, 5D y BC (Figura 7). El análisis permitió identificar que en los jales de la estación 1B, el As y Zn se encuentran retenidos en partículas donde los componentes predominantes son el Fe, K, O y S. Probablemente estas partículas se traten de una fase mineral secundaria como la jarosita (Figura 7a), la cual fue identificada por el análisis de DRX, por lo tanto, es posible que la movilización de As, Zn y Fe podría regularse por la presencia de estas partículas. Algo similar se encontró en los jales de la estación 2A (Figura 7b), en donde varios MPT tales como Fe, Pb y Zn además del metaloide As se encuentran en partículas donde predominan Fe, O y S, estas partículas probablemente corresponden a sulfatos secundarios que se generan como resultado de las oxidaciones de los sulfuros primarios como la piritita, y que podrían regular la movilidad de los MPT mencionados anteriormente (Aduvire, 2006).

Respecto a los jales de la estación 3A, se encontraron partículas que contienen Fe, S y Zn, y dada su proporción probablemente se trate de esfalerita (Figura 7c). La esfalerita es un sulfuro primario que está reportado en los cuerpos mineralizados del área minera de San Felipe de Jesús (Roldan-Quintana, 1979; Calmus et al., 1996), cuya movilidad del Zn en estos jales va a depender de la oxidación de la esfalerita. Dold

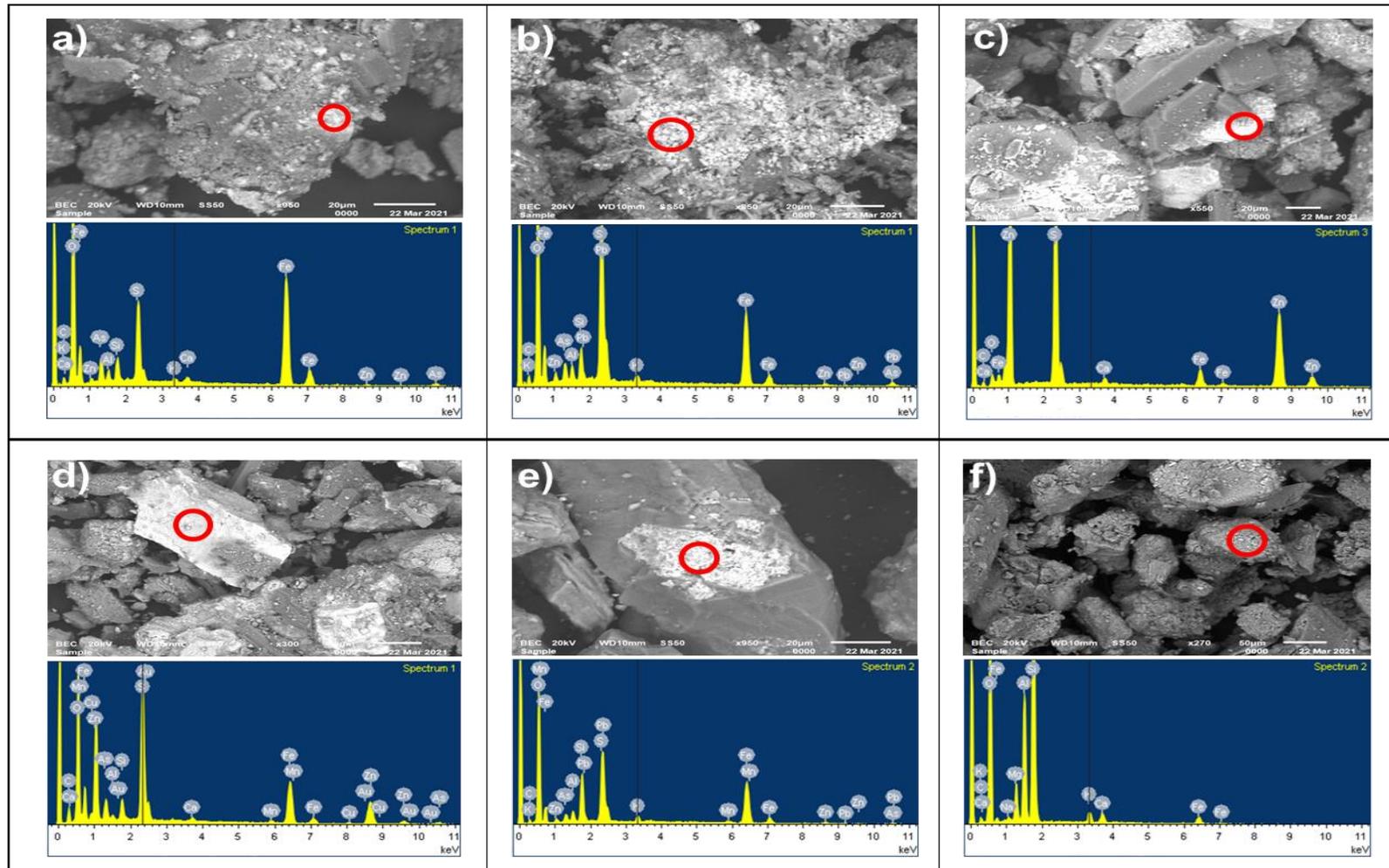


Figura 7. Microfotografías y análisis químico puntual mediante MEB acoplada con espectrometría de rayos X por energía dispersa en los jales del Depósito “El Lavadero”, en las estaciones 1B (a), 2A (b), 3A (c), 4B (d), suelo agrícola de la estación 5D (e) y estación BC (f).

(2010), reporta que lo que resulta de la oxidación de la esfalerita es una solución con contenidos elevados en Zn soluble y SO_4^{2-} , sin generación de acidez, pero con la posibilidad de generarla si el Fe sustituye al Zn en el mineral. En los jales de estación 4B (Figura 7d) se detectó Al, As, Cu, Fe, Mn y Zn, asociados con O y S, probablemente sean partículas de sulfuros metálicos con algunos minerales secundarios en su superficie, la movilización de estos MPT dependerá de que tan reactivos sean estos minerales.

Para el suelo agrícola de la estación 5D (Figura 7e) se observaron partículas que contienen MPT como Al, As, Fe, Mn, Pb y Zn y otros elementos como K, O, S y Si. El hecho de que se encontraron MPT en este suelo y azufre, deja en claro que hay un impacto producido por los jales del Depósito “El Lavadero”. Dichas partículas pueden ser sulfuros o sulfatos de los metales mencionados anteriormente.

Con el fin de realizar una comparativa con los jales y el suelo agrícola, también se realizó el análisis de MEB en la estación denominada blanco de campo (BC), ubicada en un cerro no impactado (Figura 7f). Se observaron partículas donde predomina el Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, O y Si, que pueden tratarse de cuarzo y plagioclasa. Debido a que no se detectó azufre, es muy difícil que se lleve a cabo la movilidad de estos metales.

En términos generales, se puede apreciar en los jales y suelo agrícola analizados mediante MEB, la presencia de As, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn, asociados a partículas donde predomina la presencia de azufre. La movilidad de estos metales será regulada por estas partículas. Resultados similares se han encontrado en otros depósitos de jales (Romero y Gutiérrez-Ruíz, 2010; Magdaleno-Rico, 2014).

4.2. Parámetros y/o Pruebas Químicas

Los parámetros químicos como pH, Eh y C.E., S_{total} , SO_4^{-2} , y CaCO_3 que se obtuvieron al analizar las muestras recolectadas, en los jales y en el suelo agrícola, son presentados en la Tabla 7. En lo que respecta al pH y Eh, es importante su determinación, debido a que intervienen de forma directa en las etapas de generación de drenado ácido. Las condiciones de Eh y pH repercuten directamente en la C.E. al establecer si las especies se encuentran en fase soluble o insoluble. Estos tres parámetros en conjunto ayudan a conocer el nivel de oxidación presente en los minerales sulfurosos, debido a esto, brindan una referencia de la formación o no de DAM (Aduvire, 2006).

Los contenidos de azufre total, sulfatos y CaCO_3 se utilizaron para poder conocer el PA y el PN de los jales, y con esto poder predecir su capacidad de formación del DAM a través de la prueba estática (PM-BAB).

4.2.1. Potencial hidrogeno (pH)

Los valores de pH en los jales y suelo agrícola fluctuaron de 1.7 a 6.6 (Tabla 7). Todos los valores de pH obtenidos son ácidos incluyendo las estaciones de muestreo que se ubican en el suelo agrícola. En los jales, el valor promedio de pH es de 4.32, mientras que, en los suelos agrícolas, el valor promedio fue de 5.67. Respecto a los suelos, este valor promedio de pH ya se considera ácido y puede deberse al transporte de residuos mineros provenientes del Depósito de Jales “El Lavadero”, lo cual influye en sus condiciones de acidez. La estación de muestreo 5D, que corresponde al flujo principal de contaminantes provenientes del depósito de jales dentro de los suelos agrícolas, presenta un valor de pH de 4, siendo el valor más bajo de todas las estaciones de muestreo correspondientes a los suelos (Tabla 7).

En el caso de la estación blanco de campo (BC) que corresponde al cerro no impactado, el valor de pH fue de 7.30; es decir, presentó un pH neutro, que ratifica que no hay impacto ambiental en esa zona. Con lo anterior se puede asumir de manera general, que probablemente existe cierta generación de acidez por parte de los jales en el presente, y que los minerales neutralizantes son prácticamente nulos, dado que en todas las

Tabla 7. Parámetros químicos analizados en las estaciones de muestreo del Depósito de Jales “El Lavadero” y suelo agrícola aledaño.

Parámetro	Jales												Suelo agrícola				
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	4A	4B	4C	5A	5B	5C	5D	BC
Eh (mV)	551.80	583.20	410.20	447.30	300.40	279.20	410.50	307.20	285.30	257.40	307.80	558.70	315.10	364.50	328.60	328.60	270.20
pH	2.50	2.10	3.00	1.70	5.10	6.30	5.20	5.50	6.10	6.40	5.60	2.50	6.10	6.60	6.30	4.00	7.30
C.E. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	16775	33750	7475	51065	13800	4775	13950	9675	4425	6050	7700	18050	415	540	382.5	4620	397.5
% S_{total}	6.45	8.85	6.21	8.30	12.97	6.22	8.60	13.23	6.42	12.28	8.00	2.75	0.05	0.04	0.02	1.31	0.03
% SO_4^{-2}	15.76	20.37	9.69	20.77	14.86	5.71	11.68	9.71	4.72	5.07	7.21	7.81	0.18	0.14	0.15	3.19	0.05
% CaCO_3	ND	ND	ND	ND	2.84	12.61	1.08	6.59	12.19	12.71	7.69	ND	0.92	0.75	0.96	0.21	4.51

Eh = Potencial redox (milivolts).

C.E. = Conductividad eléctrica (microsiemens/cm).

BC = Estación blanco de campo.

ND = No detectable.

estaciones de muestreo existen valores bajos de pH. Lo anterior concuerda con el análisis mineralógico de DRX, en el cual no se identificó calcita en ninguna estación de muestreo de los jales ni del suelo agrícola aledaño. Aduvire (2006), reporta que los valores bajos de pH en los depósitos de residuos mineros pueden deberse a la oxidación de sulfuros metálicos generando iones H^+ y a la oxidación de hierro ferroso a férrico generando iones H^+ adicionales.

La NOM-157-SEMARNAT-2009 considera peligroso a los desechos de mina cuando su pH es ≤ 4 o > 10 . Las estaciones de muestreo que presentaron un pH < 4 fueron 1A, 1B, 1C, 2A y 4C con valores de pH de 2.50, 2.10, 3, 1.7 y 2.50, respectivamente. Por lo tanto, según la norma anterior mencionada, los residuos de estas estaciones se clasifican como peligrosos en base a sus valores de pH.

4.2.2. Potencial redox (Eh)

Respecto al potencial redox, los valores en los jales fluctuaron en un rango de 257.4 a 583.2 mV; con un valor promedio de 391.58 mV (Tabla 7).

En lo referente a los suelos, los resultados de Eh fluctuaron de 315.10 a 364.50 mV, y el valor promedio fue de 334.20 mV. El comportamiento entre los valores de Eh y pH, se presentó de manera inversamente proporcional, es decir, a mayor valor de Eh, menor es el de pH. En todas las estaciones de muestreo incluyendo los jales y suelos, se presentaron valores de Eh superiores a la estación blanco de campo (estación BC) donde el potencial redox fue de 270.20 mV, lo que indica que existen condiciones oxidantes en el medio, que pueden favorecer la generación de acidez. Corrales-Pérez y Romero (2013), realizaron un estudio en el cual determinaron Eh en jales de las presas el Fraile norte y Fraile sur ubicadas en Taxco, Guerrero, México. En dicho estudio se reportaron medianas de 420 y 421 mV, respectivamente, encontrando así condiciones oxidantes avanzadas en el medio aunadas con un bajo pH. Estos valores de potencial redox son parecidos a los obtenidos en la presente investigación, lo cual da una idea de que son valores típicos de ambientes mineros oxidantes con capacidad de generar DAM.

4.2.3. Conductividad eléctrica (C.E.)

Los valores de C.E. en los jales fluctuaron en un rango de 4425 a 51065 $\mu\text{S}/\text{cm}$, siendo el valor más alto el correspondiente a la estación de muestreo 2A, con un valor de 51065 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tabla 7). En el caso del suelo agrícola, los valores obtenidos de C.E. fluctuaron en el rango de 382.50 a 4620 $\mu\text{S}/\text{cm}$, la estación de muestreo 5D presentó el valor más alto el cual fue de 4620 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tabla 7). El hecho de que la estación 5D haya tenido el valor más alto de C.E. en lo que respecta a los suelos era esperado debido a que esta estación es la que se observó más impactada por el depósito de jales y además presentó el valor más bajo de pH. Las estaciones de muestreo 5A y 5B presentaron valores de C.E. menores que la estación 5D (415 y 540 $\mu\text{S}/\text{cm}$), pero ligeramente mayores a la estación BC, en donde el valor de C.E. fue de 397.50 $\mu\text{S}/\text{cm}$, confirmando el impacto por parte de los jales aledaños.

Con el fin de conocer el grado de salinidad de los jales y suelo agrícola aledaño (mediante sus valores de C.E.), se realizó una comparación con la Norma Oficial Mexicana (NOM-021-RECNAT-2000), la cual dictamina el grado de salinidad en los suelos a partir de los valores de C.E. en sus pastas de saturación (Tabla 8). Es de importancia indicar que, aunque la norma mencionada no establece criterios para evaluar a los jales, también se consideró debido a que no existen criterios ambientales que definan el grado de salinidad de los desechos mineros.

Tabla 8. Interpretación de la C.E para suelos ($\mu\text{S}/\text{cm}$) según la NOM-021-RECNAT-2000.

C.E.	Efectos
< 1000	Impactos despreciables de la salinidad
1100 – 2000	Muy ligeramente salino
2100 – 4000	Moderadamente salino
4100 – 8000	Suelo salino
8100 – 16000	Fuertemente salino
> 16000	Muy fuertemente salino

Según la NOM-021-RECNAT-2000, los jales de las estaciones 1A, 1B, 2A y 4C, se clasifican como muy fuertemente salinos, los correspondientes a las estaciones 2B, 3A y 3B, se catalogan como fuertemente salinos, y los de las estaciones 1C, 2C, 3C, 4A y 4B, corresponden a jales salinos (Tabla 7).

En lo que respecta al suelo agrícola, la estación 5D se clasificó como suelo salino, por lo tanto, presenta bastantes sales capaces de solubilizarse, de manera que pueden afectar el desarrollo de vegetación (NOM-021-RECNAT-2000). Las demás estaciones de muestreo en el suelo agrícola, así como la estación blanco de campo se catalogaron como suelos con efectos despreciables de salinidad (Tabla 7).

En términos generales, los valores altos de C.E. en jales y suelos, se deben probablemente a la presencia de iones H^+ en los extractos acuosos y altas condiciones de salinidad en los jales, lo anterior tiene concordancia con las altas condiciones oxidantes en el medio (valores de Eh altos) y con los valores bajos de pH (Tabla 7). Con esta información obtenida de C.E. se puede suponer que los jales pueden liberar contenidos elevados de especies metálicas solubles, además, es bien conocido que el agua ácida proveniente de minas normalmente posee altos niveles de MPT disueltos (Lottermoser, 2010).

4.2.4. Azufre total (S_{total})

El contenido de azufre total en todas las estaciones de muestreo fue determinado con el propósito de calcular el potencial de acidez (PA) disponible y llevar a cabo la prueba estática PM-BAB para predecir la posible generación de DAM. En los jales, los contenidos de azufre oscilaron entre 2.75 y 13.23 % con un contenido promedio de 8.36 % (Tabla 7). Estos resultados incluyen al azufre que se encuentra en forma de sulfuros y sulfatos, y concuerdan con los resultados de mineralogía por DRX, en donde todas las muestras de jales se detectaron especies mineralógicas que contienen azufre. En el caso de los suelos, el contenido total de azufre fue menor que en los jales, el promedio encontrado fue de 0.29 %. En la estación 5D se presentó el contenido de azufre más alto (1.31 %), siendo mayor que la estación BC en donde se encontró 0.03 % de contenido de azufre.

Se han encontrado cantidades menores de azufre a las reportadas anteriormente en residuos mineros que se han catalogado como generadores de DAM; por ejemplo, Imperial-Pérez (2010), reporta 0.36 % de azufre en un depósito de terreros de material sulfuroso de una mina ubicada en Álamos, Sonora, México.

De manera general, se puede decir que los jales contienen cantidades elevadas de azufre, lo cual puede generar un PA alto, que dependerá de cómo se presente el azufre (sulfatos o sulfuros), ya que las especies sulfurosas son los minerales capaces de oxidarse y formar el DAM.

4.2.5. Sulfatos (SO_4^{2-})

Respecto a este parámetro, en el caso de las estaciones de muestreo de los jales, los resultados indican un valor promedio de 11.11 %. Se puede apreciar que los sulfatos se encuentran presentes en todas las estaciones de muestreo, siendo la 2A la que presentó el contenido más alto con 20.77 %. Respecto a los suelos, la única estación que resultó con contenido significativo de sulfatos fue la 5D con 3.19 % (Tabla 7).

De manera general, lo anterior coincide con el análisis mineralógico por DRX, ya que se detectaron sulfatos secundarios en todas las estaciones de muestreo. Jennings y Dollhopf, (1995), realizaron un estudio donde corroboraron que los minerales clasificados como sulfatos solo pueden generar acidez al disolverse, debido a que son compuestos de azufre oxidados que ya no pueden ser oxidados nuevamente. El hecho de que los sulfatos estén presentes en las estaciones de muestreo y que puedan generar acidez al disolverse, puede contribuir a los valores bajos de pH registrados.

4.2.6. Carbonato de calcio (CaCO_3)

La importancia de determinar carbonato de calcio (calcita) en los jales se debe a que es el mineral que tiene el rol más imprescindible en la aportación de alcalinidad a las soluciones producidas. El CaCO_3 presente influirá directamente en el nivel de acidez o basicidad de las soluciones acuosas generadas a partir de los desechos de mina, y por lo tanto, en sus valores de pH. Además, para llevar a cabo la prueba estática PM-BAB

se requiere determinar el PN a partir del contenido de calcita (NOM-141-SEMARNAT-2004; Aduvire, 2006; Lotermoser, 2007).

En el presente estudio, los valores de CaCO_3 encontrados en los jales fluctuaron en un rango de ND a 12.71 %, observándose que en 5 estaciones de muestreo (jales) no se detectó calcita (Tabla 7). Esto se debe principalmente a las condiciones ácidas que prevalecen, lo que ocasiona la nula presencia de calcita. Por otra parte, los suelos presentaron un valor promedio de 0.71 %.

En términos generales, se aprecian valores bajos de CaCO_3 en las estaciones de jales (1A, 1B, 1C, 2A, 2B, 3A, 4C) comparados con otros estudios donde se determinaron carbonatos presentes en depósitos de residuos mineros en México; por ejemplo, Moreno-Morales (2016), reporta un estudio realizado en la región minera de Santa Eulalia, Chihuahua, en donde se encontraron valores superiores de calcita a los mencionados anteriormente, en muestras de residuos que posteriormente se clasificaron como generadoras de DAM.

4.2.7. Metales totales

En la tabla 9, se reportan los valores de concentración total de los metales analizados en los jales del Depósito “El Lavadero” y suelo agrícola. Se aprecia que en los jales los valores de concentración total promedio (mg/kg) fluctuaron en los siguientes rangos: Cd (11 - 407), Cr (16 - 30), Cu (149 - 685), Fe (95759 - 186763), Mn (2432 - 23760), Pb (11258 - 27146) y Zn (2212 - 69418). En las estaciones del suelo agrícola las concentraciones totales promedio (mg/kg) fueron: Cd (6 - 26), Cr (13 - 18), Cu (41 - 289), Fe (16930 - 41495), Mn (430 - 3188), Pb (515 - 4708) y Zn (485 - 2694). Se puede apreciar que los niveles detectados en los jales son mayores a los del suelo agrícola. Asimismo, las concentraciones detectadas en jales y suelo agrícola son mayores a la estación denominada blanco de campo (BC), que se considera una estación de referencia (Tabla 9).

Los altos contenidos de metales totales en los residuos mineros estudiados se deben a que, en décadas pasadas, diversas minas del sector de San Felipe de Jesús depositaban su mineral en lo que hoy es el Depósito de Jales “El Lavadero”. Está reportado que los

Tabla 9. Concentración (promedio \pm desviación estándar) de metales totales (mg/kg) en los jales del Depósito “El Lavadero” y suelo agrícola aledaño (*).

Estación de muestreo	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn
1A	67.13 \pm 1.94	23.36 \pm 0.46	406.15 \pm 4.40	132615.36 \pm 135.73	4056.33 \pm 153.99	27145.67 \pm 269.93	6753.50 \pm 273.10
1B	42.42 \pm 5.58	18.65 \pm 0.80	149.19 \pm 23.36	151914.37 \pm 3797.65	2432.50 \pm 154.83	21314.28 \pm 2584.97	4344.77 \pm 474.74
1C	60.10 \pm 0.73	21.24 \pm 1.35	205.55 \pm 2.94	137780.91 \pm 1744.18	5062.19 \pm 25.80	14823.20 \pm 400.86	4497.54 \pm 112.25
2A	94.23 \pm 0.05	23.71 \pm 0.66	194.77 \pm 1.01	134368.42 \pm 409.84	2563.42 \pm 34.86	22017.17 \pm 16.39	6262.46 \pm 10.02
2B	335.48 \pm 1.30	20.02 \pm 0.73	157.36 \pm 1.92	145093.76 \pm 281.24	5043.59 \pm 59.98	16529.18 \pm 238.68	69417.13 \pm 815.02
2C	235.03 \pm 1.83	27.20 \pm 0.92	456.50 \pm 1.71	121134.47 \pm 1795.21	21077.30 \pm 211.76	12375.37 \pm 300.41	33433.77 \pm 609.20
3A	191.88 \pm 3.25	21.84 \pm 0.72	526.46 \pm 1.58	132795.02 \pm 34.55	7387.81 \pm 22.97	12878.87 \pm 296.93	41286.04 \pm 353.77
3B	398.36 \pm 0.45	29.28 \pm 1.75	313.68 \pm 2.54	186762.19 \pm 2225.91	2835.81 \pm 29.15	26800.66 \pm 368.37	39191.88 \pm 224.04
3C	194.79 \pm 0.48	24.06 \pm 1.28	450.73 \pm 16.94	138122.43 \pm 19512.71	23759.11 \pm 1916.56	11775.91 \pm 2311.93	30492.24 \pm 3055.06
4A	406.52 \pm 1.55	26.97 \pm 0.21	273.81 \pm 0.43	152836.37 \pm 2516.62	3985.44 \pm 79.31	23248.52 \pm 32.85	39708.29 \pm 419.72
4B	261.66 \pm 2.42	23.96 \pm 0.69	684.48 \pm 1.22	122228.02 \pm 11771.98	17491.57 \pm 1324.76	12742.11 \pm 1094.62	33824.96 \pm 69.86
4C	11.52 \pm 0.73	16.04 \pm 1.93	273.49 \pm 2.54	95759.64 \pm 1382.05	2809.95 \pm 12.02	11258.19 \pm 90.36	2212.45 \pm 7.47
5A**	20.87 \pm 0.09	15.71 \pm 0.12	269.96 \pm 2.98	22589.72 \pm 1011.40	919.65 \pm 6.78	2354.92 \pm 9.99	2693.83 \pm 1.98
5B**	9.07 \pm 0.78	13.01 \pm 0.41	58.95 \pm 0.27	21372.20 \pm 33.87	575.51 \pm 6.22	765.40 \pm 16.68	928.12 \pm 95.91
5C**	6.48 \pm 0.19	14.53 \pm 0.77	41.25 \pm 0.34	16930.93 \pm 664.21	430.59 \pm 21.81	515.60 \pm 13.24	485.96 \pm 2.24
5D**	26.06 \pm 0.63	17.35 \pm 0.76	288.24 \pm 4.23	41494.24 \pm 3421.02	3187.53 \pm 9.39	4707.33 \pm 5.98	2560.74 \pm 0.34
BC	6.00 \pm 0.41	14.60 \pm 0.98	20.41 \pm 0.83	13266.20 \pm 561.45	362.56 \pm 8.58	157.87 \pm 6.86	112.66 \pm 9.18
LMP Jales (***)	20	100	-	-	-	100	-
LMP Suelo (****)	37	-	-	-	-	400	-

BC = Estación blanco de campo.

(*) = Numero de réplicas: n = 2.

(**) = Estación de suelo agrícola.

(***) = Límite máximo permisible (mg/kg) para residuos mineros establecido por la NOM-157SEMARNAT-2009.

(****) = Límite máximo permisible (mg/kg) para suelos agrícolas establecido por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.

principales yacimientos minerales del sector se componían principalmente de pirita, calcopirita, galena, esfalerita y argentita (Roldan-Quintana, 1979). Los minerales antes mencionados probablemente son los que aportaron las grandes cantidades de metales al depósito, y en el caso de algunos, se lograron identificar a través de las técnicas de MEB y DRX.

El comportamiento de las concentraciones de metales totales en las estaciones de muestreo que corresponden a los jales fue de acuerdo con el siguiente orden decreciente: Fe>Zn>Pb>Mn>Cu>Cd>Cr; y en el caso del suelo agrícola fue el siguiente: Fe>Pb>Zn>Mn>Cu>Cd>Cr. Estos comportamientos de los metales estudiados también se han obtenido en otra investigación realizada en el área de estudio (Del Río-Salas et al., 2019), siendo para los jales oxidados: Fe>Zn>Mn>Pb>Cu>Cd; y en aquellos con menor grado de oxidación: Fe>Mn>Pb>Zn>Cu>Cd; para el suelo agrícola, el comportamiento fue el siguiente: Fe>Mn>Zn>Pb>Cu. En la investigación antes mencionada, también se obtuvieron valores similares de concentración a los encontrados en el presente estudio, tanto en jales como en el suelo agrícola.

En los jales, las concentraciones totales de Cr, Cd y Pb fueron comparadas con los valores límites máximos permitidos para elementos metálicos en residuos mineros establecidos por la NOM-157-SEMARNAT-2009. Los elementos restantes no se compararon debido a que no están regulados por esta norma. Es importante señalar que esta norma establece los límites antes mencionados para residuos de minas activas; sin embargo, debido a que no existen límites permisibles de comparación para pasivos ambientales mineros abandonados se decidió utilizar dicha norma. Para el caso del Cd y Pb, en todas las estaciones de muestreo de los jales (excepto la estación 4C para Cd), se excedió la concentración límite máxima permisible establecida por la NOM-157-SEMARNAT-2009. Caso contrario para el Cr, en todas las estaciones de muestreo de los jales se presentó una concentración menor al límite máximo permisible.

Respecto al suelo agrícola, se realizó la comparación de los valores de concentración total de Cd y Pb con la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, la cual dictamina los valores de concentración de remediación para suelos de uso agrícola, mediante los valores límites permisibles para los metales tóxicos. Todas las estaciones de muestreo en suelo

agrícola presentaron concentraciones de Pb mayores al límite permisible, caso contrario para el Cd, ya que las concentraciones fueron menores en todas las estaciones de muestreo.

En términos generales, los jales del Depósito “El Lavadero” presentan concentraciones promedio altas de Cd, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn, comparadas con otros estudios desarrollados en pasivos ambientales mineros de México y otros países (Romero y Gutiérrez-Ruíz, 2010; Cervantes-Macedo, 2014; Magdaleno-Rico, 2014; Salas-Urviola et al., 2020). Por otra parte, se puede afirmar que existe un impacto de los jales sobre el suelo agrícola, debido a que este último presentó concentraciones altas de Pb superiores al límite permisible de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.

4.2.8. Prueba de extracción de constituyentes tóxicos

La determinación analítica se realizó de acuerdo con la NOM-141-SEMARNAT-2003; sin embargo, la NOM-157-SEMARNAT-2009 dictamina los valores máximos permitidos. En esta última norma se establece que si los valores de concentración total de elementos metálicos en base seca (mg/kg) sobrepasan los valores límites permisibles para Cd (20 mg/kg), Cr (100 mg/kg) y Pb (100 mg/kg) se debe realizar la prueba de extracción de constituyentes tóxicos. En lo que respecta al Cd y Pb, los valores de concentración detectados excedieron el valor máximo permisible, por consiguiente, se procedió a realizar dicha prueba. La prueba de extracción de metales se realiza en las muestras de residuos mineros y/o suelos para estimar la disponibilidad y así detectar elementos que representen algún peligro al medio ambiente, ya que estos podrían ocasionar daños a los organismos vivos. En la tabla 10, se reportan los resultados de la prueba de extracción de constituyentes tóxicos.

Se observa que el Cr y Pb, tanto en jales como en suelo agrícola, no se encuentran asociados a fases solubles, o se encuentran en cantidades muy bajas, de tal manera que se encuentran por abajo de la concentración máxima permisible que establece la NOM-157-SEMARNAT-2009 (Tabla 10). En lo que respecta al Cd, se excedió el valor máximo permisible en los extractos de cuatro estaciones de muestreo de jales (2A, 2B, 3A y 3B), por consiguiente, los jales mineros de estas estaciones se consideran

Tabla 10. Resultados de la prueba de extracción de constituyentes tóxicos (mg/L) en los jales del Depósito “El Lavadero” y suelo agrícola aledaño, en base a la NOM-141-SEMARNAT-2003.

Estación de muestreo	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn
1A	0.816	0.021	1.517	10.82	9.098	ND (<0.06)	79.25
1B	0.434	0.029	0.59	70.3	3.609	ND (<0.06)	58
1C	0.371	0.016	0.695	8.441	1.258	ND (<0.06)	26.4
2A	1.884	0.046	2.471	232	17	ND (<0.06)	213.5
2B	1.431	0.024	0.002	0.095	39.8	ND (<0.06)	167.8
2C	0.067	0.016	ND (<0.02)	0.046	0.258	ND (<0.06)	1.318
3A	1.036	0.017	0.039	0.064	12.23	ND (<0.06)	174.8
3B	2.43	0.02	ND (<0.02)	0.069	6.013	0.298	57.9
3C	0.068	0.014	ND (<0.02)	0.126	0.308	ND (<0.06)	1.431
4A	0.221	0.017	ND (<0.02)	0.437	0.137	0.174	3.933
4B	0.277	0.017	ND (<0.02)	0.117	2.344	ND (<0.06)	15.25
4C	0.138	0.019	0.516	7.25	3.89	ND (<0.06)	14.2
5A (+)	0.008	0.004	0.025	0.198	0.032	ND (<0.06)	0.2
5B (+)	ND (<0.01)	0.009	ND (<0.02)	0.084	0.01	ND (<0.06)	0.29
5C (+)	ND (<0.01)	0.005	ND (<0.02)	0.06	0.026	ND (<0.06)	0.076
5D (+)	0.204	0.013	0.137	0.104	2.275	0.112	17.25
BC	ND (<0.01)	0.011	ND (<0.02)	0.071	0.018	ND (<0.06)	0.044
NOM-157 (*)	1.00	5.00	-	-	-	5.00	-
C.E.C.A. (**)	-	-	0.2	5.00	0.1 (***)	-	2.00

(*) = NOM-157-SEMARNAT-2009. Límites máximos permisibles (mg/L) en el extracto acuoso de la prueba de extracción de constituyentes tóxicos.

(**) = C.E.C.A. (SEDUE, 1989). Límites máximos permisibles (mg/L) para agua de uso en riego agrícola.

(***) = Límite máximo (mg/L) para agua potable.

(+) = Estación de suelo agrícola.

BC = Estación blanco de campo.

ND = No detectable.

peligrosos debido a su toxicidad por Cd según la NOM-157-SEMARNAT-2009 y NOM-141-SEMARNAT-2003.

Debido a que en la NOM-157-SEMARNAT-2009 solo se incluyen las concentraciones máximas permitidas para Cd, Cr y Pb en los extractos, por ser los metales más tóxicos, se consideraron los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (SEDUE, 1989) con el propósito de tener valores límites de referencia para los metales restantes. En cuanto al Cu y Fe en los extractos de los jales, se detectaron concentraciones superiores a los límites establecidos en los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (SEDUE, 1989) para agua utilizada en riego agrícola (0.2 y 5 mg/L, respectivamente), en cinco estaciones de muestreo (1A, 1B, 1C, 2A, y 4C) (Tabla 10).

En lo referente a Mn y Zn, en casi todos los extractos de las estaciones de muestreo de jales los valores máximos permisibles de concentración establecidos en los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (SEDUE, 1989) fueron excedidos. Adicionalmente, el extracto de la estación 5D del suelo agrícola, también presentó concentraciones de Mn y Zn superiores a los límites mencionados previamente.

De forma general, los elementos metálicos Cd, Cu, Fe, Mn y Zn presentes en los jales del Depósito “El Lavadero” se encuentran asociados a fases solubles y pueden representar un peligro al medio ambiente ya que pueden estar disponibles para los seres vivos. Asimismo, las concentraciones detectadas excedieron las concentraciones máximas permisibles de las Normas Mexicanas citadas anteriormente. Caso contrario, los metales Cr y Pb es posible que se encuentran asociados a fracciones no solubles. Por otra parte, en el suelo agrícola se encuentra el Mn y Zn asociados a fases solubles, y por lo tanto disponible para los cultivos para consumo humano y/o animal. En términos generales, los jales del Depósito “El Lavadero” son peligrosos debido a la presencia de constituyentes tóxicos.

4.2.9. Modificación a la prueba de extracción de constituyentes tóxicos

La prueba de extracción de constituyentes tóxicos se realiza para evaluar la peligrosidad de los jales debida a la presencia de elementos tóxicos. La técnica recomendada es la que respecta a la “Prueba para realizar la extracción de metales y metaloides en jales, con agua en equilibrio con CO₂”, misma que hace uso de agua destilada en equilibrio con CO₂ (pH = 5.5) para extraer los elementos tóxicos. Básicamente esta prueba consta de 18 h de agitación y una relación de 20 mL de agua destilada por cada gramo de muestra sólida (relación sólido - extractante = 1:20) (NOM-141-SEMARNAT-2003). Se ha señalado que en la República Mexicana, las concentraciones de elementos potencialmente tóxicos en extractos acuosos de jales preparados en laboratorio mediante la prueba de extracción de constituyentes tóxicos (NOM-141-SEMARNAT-2003), presenta algunas diferencias significativas con las obtenidas en efluentes recolectados in situ, formados mediante el contacto del agua meteórica con los residuos de mina (Romero et al., 2011). Debido a lo anterior, Corrales-Pérez y Romero (2018), realizaron algunas adecuaciones a la prueba antes mencionada, mediante la modificación de la relación sólido - extractante, así como el tiempo de agitación, con el fin de lograr la obtención de resultados más certeros.

Con el propósito de comparar los resultados encontrados a través de la prueba original de extracción de constituyentes tóxicos, y la prueba modificada contemplando algunas de las adecuaciones mencionadas anteriormente, se consideró una relación sólido - extractante de 1:3 y un tiempo de agitación de 48 h, debido a que con estos cambios en las variables, se han logrado concentraciones que son más semejantes a los resultados que se obtienen en efluentes colectados en campo (Corrales-Pérez y Romero, 2018). Dicha comparación se reporta en la Tabla 11.

Se observa que con la modificación a la prueba extracción de constituyentes tóxicos, los extractos de todas las estaciones de muestreo correspondiente a los jales presentaron mayores valores de concentración de Cd, Cu, Mn, Pb y Zn, respecto a la prueba original. En lo referente al Cr y Fe, hay estaciones de muestreo de jales en las cuales la concentración de sus extractos fue mayor en la prueba original. De manera general, en gran parte de las estaciones de muestreo de jales para todos los metales estudiados, se

Tabla 11. Comparación de los resultados (mg/L) de la prueba de extracción de constituyentes tóxicos en los jales del Depósito “El Lavadero” y suelo agrícola, considerando las adecuaciones sugeridas por Corrales-Pérez y Romero (2018).

Metal	Prueba	Jales											Suelo agrícola					
		1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	4A	4B	4C	5A	5B	5C	5D	BC
Cd	NOM (*)	0.816	0.434	0.371	1.884	1.431	0.067	1.036	2.43	0.068	0.221	0.277	0.138	0.008	ND	ND	0.204	ND
	Mod (**)	4.18	1.882	1.827	10.59	7.17	0.177	4.96	10.12	0.16	0.636	0.797	0.657	0.01	ND	ND	0.954	ND
Cr	NOM (*)	0.021	0.029	0.016	0.046	0.024	0.016	0.017	0.02	0.014	0.017	0.017	0.019	0.004	0.009	0.005	0.013	0.011
	Mod (**)	0.038	0.079	0.03	0.142	0.022	0.015	0.014	0.019	0.014	0.008	0.014	0.019	0.009	0.014	0.011	0.029	0.013
Cu	NOM (*)	1.517	0.59	0.695	2.471	0.002	ND	0.039	ND	ND	ND	ND	0.516	0.025	ND	ND	0.137	ND
	Mod (**)	7.694	3.213	3.75	12.91	0.026	0.011	0.244	0.075	0.004	0.013	0.018	2.733	0.038	0.003	0.003	0.573	ND
Fe	NOM (*)	10.82	70.3	8.441	232	0.095	0.046	0.064	0.069	0.126	0.437	0.117	7.25	0.198	0.084	0.06	0.104	0.071
	Mod (**)	80.87	666	80.7	1610	0.172	0.09	0.116	0.167	0.083	0.188	0.113	93.3	0.088	0.09	0.064	0.433	0.202
Mn	NOM (*)	9.098	3.609	1.258	17	39.8	0.258	12.23	6.013	0.308	0.137	2.344	3.89	0.032	0.01	0.026	2.275	0.018
	Mod (**)	53.4	17.2	5.609	118.5	231.1	0.537	113.7	38.8	0.472	0.343	9.297	18.64	0.016	0.009	0.01	12.93	0.054
Pb	NOM (*)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.298	ND	0.174	ND	ND	ND	ND	ND	0.112	ND
	Mod (**)	0.36	0.174	0.05	0.36	0.422	0.112	0.609	2.907	0.112	0.484	0.174	0.174	ND	ND	ND	0.795	ND
Zn	NOM (*)	79.25	58	26.4	213.5	167.8	1.318	174.8	57.9	1.431	3.933	15.25	14.2	0.2	0.29	0.076	17.25	0.044
	Mod (**)	404.8	190.9	115.9	1041.75	934.5	4.085	986.75	350.7	3.929	15.6	40.8	75.3	0.228	0.183	0.143	88.6	0.142

ND = No detectable.

(*) = Prueba de extracción de constituyentes tóxicos (NOM-141-SEMARNAT-2003).

(**) = Modificación a la prueba de extracción de constituyentes tóxicos (NOM-141-SEMARNAT-2003), (Corrales-Pérez y Romero, 2018).

obtuvo una concentración mayor en los extractos obtenidos mediante la modificación de la prueba de extracción de constituyentes tóxicos.

Haciendo referencia al suelo agrícola, las concentraciones de los extractos se comportaron de manera muy parecida respecto a los jales. En términos generales, mediante la modificación de la prueba de extracción de constituyentes tóxicos se obtuvo una mayor concentración de metales con respecto a la prueba original. Estos resultados mayores en concentración pueden ser resultados más apegados a la realidad (Corrales-Pérez y Romero, 2018).

De acuerdo con los resultados obtenidos de la prueba de extracción constituyentes tóxicos modificada, cuyas concentraciones de metales en los extractos acuosos son mayores a los obtenidos mediante la prueba original (Tabla 11), se afirma que los jales contienen metales potencialmente tóxicos que están en fases solubles, y por lo tanto, podrían estar disponibles para los seres vivos.

4.2.10. Diagramas Eh-pH

Los diagramas Eh-pH se realizaron para todos los metales contemplados en el presente estudio, en las estaciones de muestreo 1B, 2A, 3A, 4B, 5D y BC correspondientes a los jales del Depósito “El Lavadero” y suelo agrícola. En la Tabla 12, se muestran los valores de potencial redox, pH, temperatura y concentración de los metales y del azufre utilizados en la construcción de los diagramas de Pourbaix. Es importante destacar que se utilizaron las concentraciones molares y a la actividad se le asignó un valor de 1. Para la construcción de dichos diagramas se hizo uso del software HSC Chemistry para Windows 6.0.

Cada metal se graficó por separado en un sistema metal-azufre-agua. Los diagramas Eh-pH correspondientes se muestran en el Anexo C; Figuras de la C1 a la C7. Se puede observar que en todas las estaciones de muestreo se presentan condiciones oxidantes ($Eh > 0$), las cuales fluctuaron de 0.270 a 0.583 Volts, además, en todas las estaciones excepto la estación BC, se presentaron condiciones ácidas ($pH < 5.6$).

Tabla 12. Valores de potencial redox (Eh), pH, temperatura y concentración de metales (moles/L) utilizados para realizar los diagramas Eh-pH.

parámetro	1B	2A	3A	4B	5D	BC
T (°C)	10	10	16	15	15	14
Eh (Volts)	0.583	0.447	0.410	0.307	0.328	0.270
pH	2.1	1.7	5.2	5.6	4	7.3
Cd	0.00038	0.00084	0.00171	0.00233	0.00023	0.00005
Cr	0.00036	0.00046	0.00042	0.00046	0.00033	0.00028
Cu	0.00235	0.00307	0.00828	0.01077	0.00454	0.00032
Fe	2.72029	2.40610	2.37792	2.18870	0.74303	0.23755
Mn	0.04428	0.04666	0.13448	0.31839	0.05802	0.00660
Pb	0.10287	0.10626	0.06216	0.06150	0.02272	0.00076
Zn	0.06645	0.09579	0.63148	0.51736	0.03917	0.00172
S	2.76002	2.58849	2.68205	2.49493	0.40855	0.00936

En lo referente al Cd, en todas las estaciones (jales y suelo agrícola) puede estar presente en forma de Cd^{+2} , debido a que las condiciones oxidantes y ácidas de los jales y suelo agrícola, favorecerán dicha especie cuya área de estabilidad se extiende desde un pH de 0 hasta 8.5 (Anexo C; Figura C1). Dependiendo de las variaciones de pH que pudieran suceder el Cd^{+2} sería capaz de formar el complejo $Cd(OH)_2$ y precipitar. La única área de estabilidad observada para una especie que contenga azufre es CdS, la cual puede darse cuando prevalezcan condiciones reductoras.

En el caso del Cr, se encuentra prácticamente en la misma zona de Eh y pH para todas estaciones de muestreo de los jales y suelo agrícola; es decir, se encuentra como una especie estable en un ambiente oxidante ácido (Anexo C; Figura C2). La especie química en la que se encuentra el cromo es $Cr_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$, es decir, un mineral secundario que es soluble en condiciones oxidantes ácidas. Romero et al. (2007), menciona que las especies mineralógicas secundarias como los sulfatos son comunes en ambientes mineros donde se genera DAM.

En lo que respecta al Cu, las especies termodinámicamente más estables encontradas mediante los diagramas en las estaciones 1B, 2A y 5D (jales y suelo agrícola), fue el Cu^{+2} , el cual prevalece en condiciones oxidantes muy ácidas y se encuentra de forma soluble (Anexo C; Figura C3). En las estaciones 3A, 4B y BC la especie de Cu termodinámicamente estable que predomina es $\text{Cu}(\text{OH})_2$, la cual prevalece en condiciones oxidantes (no muy ácidas) y se encuentra en forma precipitada.

Con relación al Fe, para las estaciones 1B, 3A, 4B, 5D y BC (jales y suelo agrícola), la forma que prevalece es la fase $\text{FeO} \cdot \text{OH}$, mineral secundario formado por la precipitación de Fe al aumentar el pH (Anexo C; Figura C4). En la estación 2A de los jales que es la que presenta condiciones más ácidas la fase predominante de Fe es como Fe^{+2} en forma soluble (FeSO_4 o $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$). De acuerdo con Nordstrom y Alpers (1999), el Fe^{+2} puede oxidarse a Fe^{+3} y acelerar la generación de DAM.

La especie de Mn que prevalece en las estaciones de muestreo estudiadas es en su forma oxidada Mn^{+2} debido a las condiciones redox que prevalecen en las estaciones de muestreo. Si las condiciones de acidez cambiaran, este precipitará como $\text{MnO} \cdot \text{OH}$ (Anexo C; Figura C5). Lo anterior sucede de igual forma con el Zn ya que se presenta similar especiación, es decir, se encuentra como Zn^{+2} . Si las condiciones de pH cambian a valores neutros ($\text{pH} = 7$), la especie química que prevalecerá será el ZnO o $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en forma de precipitados (Anexo C; Figura C6).

Por último, el Pb prevalece como sulfato (PbSO_4) en los jales y suelo agrícola con excepción de la estación 1B (jales), que presentó las condiciones más oxidantes, por lo que el Pb se encuentra en la forma oxidada Pb^{+2} (Anexo C; Figura C7).

En términos generales, los metales estudiados en el Depósito de Jales “El Lavadero” y suelo agrícola predominan en forma de sulfatos metálicos solubles ($\text{MSO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$), debido a las condiciones ácidas y oxidantes que prevalecen en el medio. En menor grado prevalecen especies químicas secundarias insolubles (oxihidróxidos) que son formadas a partir de minerales primarios como los minerales sulfurosos. Estudios reportados en la literatura científica presentan diagramas Eh-pH y zonas de estabilidad similares en lixiviados ácidos de otras zonas de jales (Corrales-Pérez y Romero, 2013).

Debido a que la técnica de DRX no es sensible a concentraciones bajas del metal (< 2%), la mayoría de los metales estudiados en los diagramas de Pourbaix no se manifestaron en los resultados de DRX (excepto el Fe y Pb), que son los metales que se encontraron en concentraciones altas. Sin embargo, en el análisis por MEB sí fueron detectados los demás metales. Situaciones como esta han ocurrido en otra investigación realizada (León-García, 2019).

4.3. Prueba Estática (PM-BAB)

Como se mostró anteriormente, se realizaron mediciones del pH en las estaciones de muestreo de jales y suelo agrícola previas a la prueba estática (PM-BAB), para detectar si han ocurrido procesos geoquímicos anteriores que puedan generar acidez. En el caso de algunas estaciones de muestreo de jales se identificaron valores de pH < 4, que según la NOM-157-SEMARNAT-2009, ya se consideran peligrosos, además se da un indicio de que son generadores de DAM en el presente y existe la posibilidad de que sigan generándolo en el futuro. Para el caso de las estaciones de muestreo de jales cuyos valores de pH fueron > 4, tal vez en el futuro pueden llegar a generar acidez y bajar sus valores de pH, cuando sean oxidados por el efecto de los factores de intemperismo (aire y agua).

Con el fin de predecir la posible generación de DAM de los jales del Depósito “El Lavadero” en el futuro, se llevó a cabo la prueba modificada balance ácido-base (PM-BAB) en la cual se evalúa la reactividad de los residuos de la zona, en todas las estaciones de muestreo de jales. Asimismo, se incluyó el suelo agrícola de la estación 5D, debido a que presentó el valor de pH más ácido entre los suelos, y probablemente es la más impactada con los residuos mineros de la zona.

En la determinación del potencial de neutralización (PN) se utilizaron los contenidos de CaCO_3 de cada estación de muestreo determinados en la sección 4.2.6., expresados como kg CaCO_3 /ton de jales. En el caso del potencial de acidez (PA) se determinó aplicando la ecuación 12 mediante los resultados de azufre total (S_{total}) de la sección 4.3.4 y el azufre en sulfatos (S_{sulfatos}) calculado a partir de los valores de sulfatos (SO_4^{-2})

obtenidos. En la Tabla 13, se muestran los resultados de la PM-BAB. Por conveniencia para los cálculos del PN, en aquellas estaciones de muestreo donde el contenido de CaCO_3 fue ND (No detectable), se consideró un valor de cero.

Los resultados indican que en todas las estaciones de muestreo incluyendo al suelo agrícola, se presenta un $\text{PA} > \text{PN}$, y un valor de $\text{PN}/\text{PA} < 1.2$, valor límite establecido en la NOM-141-SEMARNAT-2003. De acuerdo con la norma anterior, los jales de todas las estaciones de muestreo se clasifican “peligrosos” debido a su capacidad potencial de formación de DAM. Por otra parte, la NOM-157-SEMARNAT-2009 dictamina que si la relación PN/PA es ≤ 3 los jales serán generadores de DAM, por lo que se clasifican de igual manera como peligrosos con la capacidad de producir DAM (Figura 8).

De acuerdo con la Normatividad Ambiental de México, se puede establecer que los jales del Depósito “El Lavadero” constituyen un peligro para el medio ambiente debido a que son clasificados como generadores de DAM y en conjunto con esto, puede existir una lixiviación de metales.

La posible acidez que se genera se puede deber a la oxidación de los sulfuros primarios como la pirita, que fue detectada en una estación de muestreo 4B por DRX (Tabla 6). La posible causa que ha originado que en algunas estaciones se detectaron valores bajos en el PN, puede deberse al consumo de la calcita a través de los años por la misma acidez generada, ya que según Campa-Robles (2015), el centro minero “El Lavadero” operó desde principios del siglo XX, por lo que los jales empezaron a almacenarse en el depósito desde hace muchos años.

Diversas investigaciones en pasivos ambientales mineros han obtenido resultados similares, es decir han encontrado que los residuos estudiados son generadores de DAM (Zamora y Mostafa, 2003; Cervantes-Macedo, 2014; Moreno-Morales, 2016).

Tabla 13. Resultados obtenidos de la prueba estática (PM-BAB) en los jales del Depósito “El Lavadero” y suelo agrícola, según la NOM-141-SEMARNAT-2003.

Estación de muestreo	S _{total} %	S _{sulfatos} %	PA Kg CaCO ₃ /ton	PN Kg CaCO ₃ /ton	PN/PA	Potencial generador de DAM
1A	6.45	5.26	37.06	ND	0.00	Si
1B	8.85	6.80	64.13	ND	0.00	Si
1C	6.21	3.23	93.09	ND	0.00	Si
2A	8.30	6.93	42.81	ND	0.00	Si
2B	12.97	4.96	250.47	28.40	0.11	Si
2C	6.22	1.91	134.93	126.11	0.93	Si
3A	8.60	3.90	146.97	10.84	0.07	Si
3B	13.23	3.24	312.04	65.91	0.21	Si
3C	6.42	1.58	151.27	121.93	0.81	Si
4A	12.28	1.69	331.02	127.13	0.38	Si
4B	8.00	2.41	174.78	76.86	0.44	Si
4C	2.75	2.61	4.57	ND	0.00	Si
5D (*)	1.31	1.07	7.67	2.07	0.27	Si
BC	0.03	0.02	0.43	45.14	104.90	No

ND = No detectable.

PA = Potencial de acidez (Kg CaCO₃/ton).

PN = Potencial de neutralización (Kg CaCO₃/ton).

PN/PA = Relación del potencial de neutralización y el potencial de acidez.

BC = Estación blanco de campo.

(*) = Estación de suelo agrícola.

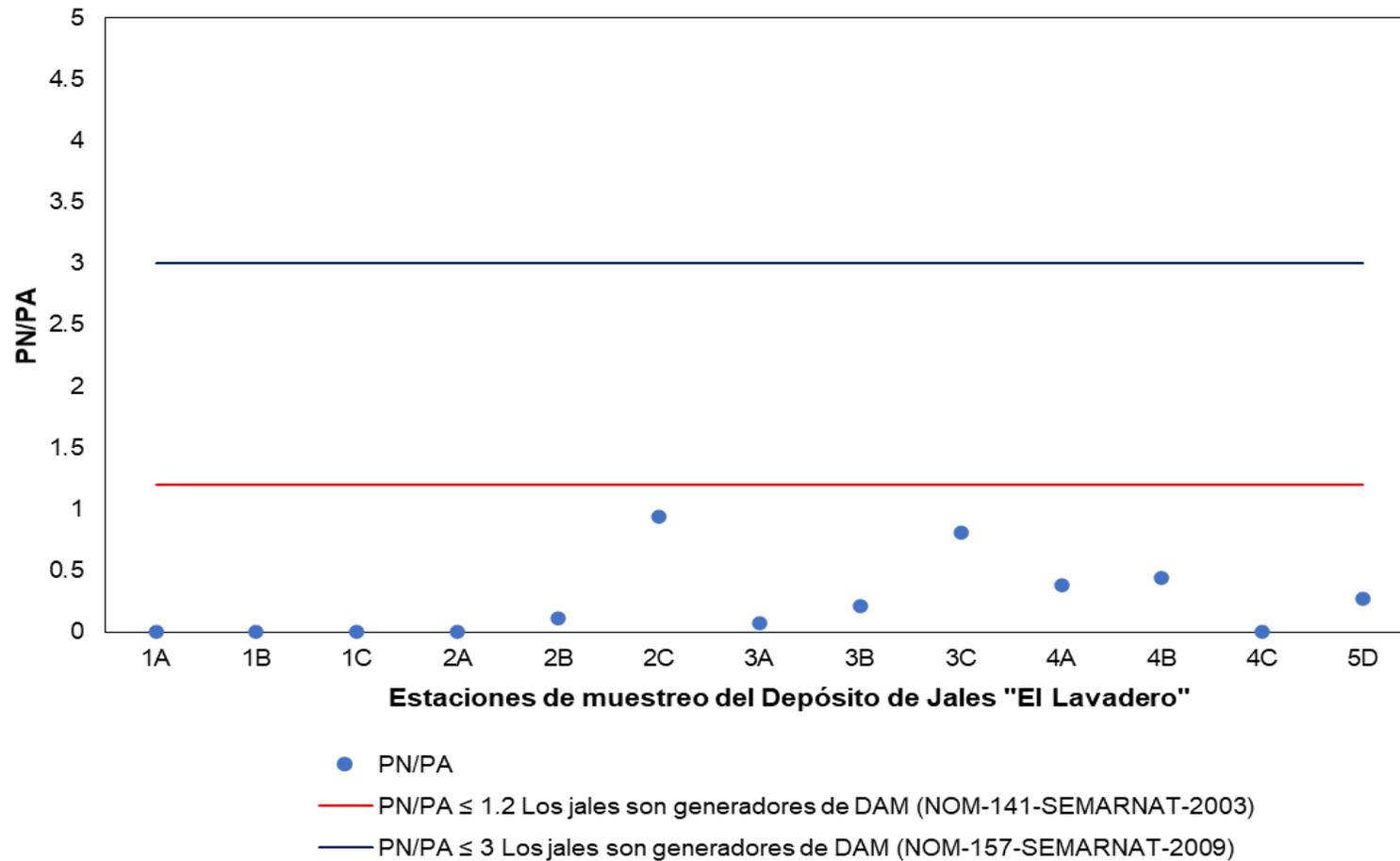


Figura 8. Relación entre el potencial de neutralización y el potencial de acidez de los jales del Depósito "El Lavadero" y suelo agrícola aledaño, comparada con los criterios establecidos por la Normatividad Ambiental de México.

4.4. Acciones Correctivas y/o Preventivas Para El Tratamiento de las Soluciones Ácidas Producidas por la Generación de DAM en el Depósito de Jales “El Lavadero”

Como se detalló anteriormente, el Depósito de Jales “El Lavadero” presenta un cierto grado de generación de DAM según la NOM-141-SEMARNAT-2003. Se proponen las siguientes medidas correctivas y/o preventivas, para minimizar los efectos de las soluciones ácidas provenientes de dicho depósito sobre el medio ambiente.

Debido a que es difícil poder realizar algún tipo de tratamiento activo o pasivo para tratar los efluentes ácidos como se menciona en el apartado 2.10., ya que implica una gran inversión, y porque se trata de un depósito de jales abandonado que no está produciendo beneficio económico a ninguna empresa, se propone realizar dentro del Depósito “El Lavadero”, excavaciones o cavidades para la colocación de material neutralizante como la calcita. El objetivo principal es retener las soluciones ácidas, evitando en lo posible su infiltración al subsuelo, elevar el pH de las mismas, y al mismo tiempo, minimizar el transporte de los contaminantes (metales) hacia el subsuelo mediante la precipitación de los metales.

Adicionalmente, como acción preventiva para minimizar la generación futura de efluentes ácidos, sería útil esparcir material neutralizante sobre la superficie de los jales (preferentemente CaCO_3) con el propósito de que exista alcalinidad disponible que pueda reaccionar de inmediato con aquellos minerales generadores de acidez. Como se mostró en el presente estudio, hay muy poco material alcalino disponible en el depósito respecto a la cantidad de minerales productores de acidez disponibles.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- De acuerdo con los resultados de la prueba modificada balance ácido-base, los jales del Depósito “El Lavadero” son potenciales generadores de DAM, en base a las Normas Mexicanas: NOM-141-SEMARNAT-2003 y NOM-157-SEMARNAT-2009.
- Se detectaron altos niveles de MPT totales en los jales del Depósito “El Lavadero,” cuyo comportamiento es: Fe>Zn>Pb>Mn>Cu>Cd>Cr. Las altas concentraciones superan los valores máximos permisibles (NOM-157-SEMARNAT-2009).
- El suelo agrícola aledaño presentó valores elevados de MPT totales, cuyo orden es: Fe>Pb>Zn>Mn>Cu>Cd>Cr. El Pb superó la concentración límite establecida (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004).
- La granulometría de los jales puede favorecer la oxidación química de minerales y la generación de DAM, debido a que están constituidos principalmente de partículas finas.
- Las condiciones (Eh, sulfuros, temperatura, humedad) que prevalecen en el Depósito de Jales “El Lavadero”, pueden seguir favoreciendo la generación de DAM.

- Los MPT (Cd, Cu, Fe, Mn, Zn) presentes en los jales del Depósito “El Lavadero” se encuentran asociados a fases solubles, y pueden representar un peligro al medio ambiente ya que pueden estar disponibles para la biota.
- En el suelo agrícola, los MPT (Mn y Zn) se encuentran asociados a fases solubles, y superan los límites establecidos en los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (SEDUE, 1989).
- En los jales del Depósito “El Lavadero”, así como en la estación 5D del suelo agrícola aledaño, prevalece un ambiente oxidante y ácido, lo cual favorece que las especies químicas que predominan son en forma de sulfatos metálicos solubles ($MSO_4 \cdot xH_2O$).
- En los estudios de DRX y MEB, se detectaron sulfuros primarios como la pirita y esfalerita, que son propios de ambientes mineros que al oxidarse pueden generar el DAM. Adicionalmente, se detectaron minerales secundarios (jarosita, beudantita, etc.) que al disolverse pueden también generar acidez adicional.
- Los jales del Depósito “El Lavadero” se consideran peligrosos según la NOM-157-SEMARNAT-2009 por su valor bajo de pH, ya que en la mayor parte de las estaciones de muestreo el pH fue menor de 4, aunado a valores de C.E. muy elevados.
- El Depósito de Jales “El Lavadero” representa un peligro para el medio ambiente, debido a su potencial de generación de DAM, niveles altos de MPT (totales y solubles) y acidez tóxica. Por consiguiente, se aprueba la hipótesis de trabajo propuesta en la presente investigación.

5.2. Recomendaciones

1. Realizar pruebas cinéticas en columnas de lixiviación en los jales para estudiar el comportamiento de los parámetros químicos (MPT, pH, C.E, SO_4^{-2}) con respecto al tiempo.
2. Realizar estudios de bioacumulación de MPT en los cultivos de suelos agrícolas aledaños, para establecer posibles peligros a la salud humana, plantas y animales.
3. Realizar estudios de la distribución y movilidad de MPT que presentaron altas concentraciones en el presente estudio (Cd, Cu, Mn, Pb, Zn).
4. Estudiar el elemento potencialmente tóxico como el As, presente en niveles altos en el Depósito de Jales “El Lavadero”, en base a su concentración total y biodisponible, así como su movilidad hacia los suelos agrícolas, y su posible efecto en la biota.
5. No realizar cultivos de alimentos en el suelo agrícola aledaño al Depósito de Jales “El Lavadero”, debido a que se detectaron altos niveles de MPT, por lo que es posible una afectación en los seres vivos.
6. Realizar estudios en los habitantes de San Felipe de Jesús, con el fin de detectar posibles problemas de salud derivados de la acumulación de MPT.
7. Llevar a cabo el esparcimiento de calcita sobre la superficie de los jales, para la neutralización de la acidez.
8. Realizar estudios en los efluentes que van en dirección al río Sonora, con el fin de detectar posibles afectaciones en la calidad de sus aguas y sedimentos.
9. Contemplar estudios de calidad del aire en áreas aledañas a los jales del Depósito “El Lavadero”, debido a que su clasificación granulométrica corresponde a partículas finas con cantidades elevadas de MPT.

CAPÍTULO 6

BIBLIOGRAFÍA

Aduvire, O. 2006. Drenaje Ácido de Mina, Generación y Tratamiento. Instituto Geológico Minero de España, Dirección de Recursos Minerales y Geoambiente. Madrid, España. 135 p.

Americas Silver Corporation. 2018. Technical report and estimated for the San Felipe project Sonora, Mexico. Mine development associates. Toronto, Canadá.

Armendáriz-Villegas, E.J. 2016. Áreas Naturales Protegidas y Minería en México: Perspectivas y Recomendaciones. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. La Paz, Baja California Sur, México.

Ata, A., y Soner, K., 2006. Acid Mine Drainage (AMD): Causes, treatment and case studies. Journal of cleaner production, 14(12-13), pp. 1139-1145.

AWRRC y ADEQ (Arizona Water Resources Research Center y Arizona Department of Environmental Quality). 1995. Manual de Campo para el Muestreo de la Calidad de Agua. Documento Técnico Tm 94-3. The University of Arizona. Tucson Az., 57 p.

Buzatu, A., Dill, H.G., Buzgar, N., Damian, G., Maftei, A.E., Apopei, A.I. 2016. Efflorescent sulfates from Baia Sprie mining area (Romania) – Acid mine drainage and climatological approach, Science of the Total Environment. Rumania. 13 p.

Cadillo-Nieto, E. M. 2018. Propuesta de mejoramiento de la calidad de las aguas ácidas que drenan del pasivo ambiental de la mina Nuncia mediante el uso de bacterias sulfato reductoras. Tesis de Licenciatura. Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental. Lima, Perú.

Calmus, T., Perez-Segura, E., y Roldan-Quintana, J. 1996. The Pb-Zn ore deposits of San Felipe, Sonora, Mexico: "Detached" mineralization in the basin and Range Province: *Geofísica Internacional*, v. 35, p. 115-124.

Campa-Robles, V.E. 2015. *Guía Histórica y Turística de San Felipe de Jesús, Sonora*. Gobierno Municipal de San Felipe de Jesús, Hermosillo, Sonora, México.

Cervantes-Macedo, A. 2014. *Caracterización del drenaje ácido y de las rocas asociadas a una mina para evaluar su posible aplicación en un sistema de tratamiento pasivo*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.

CNA (Comisión Nacional del Agua). 1993. *Manual de Aseguramiento de Calidad*. Subdirección General de Administración. Programa de Aseguramiento de la Calidad. México, D.F. 146 p.

Condor-Laguna, M., Miranda-Ramos, B., y Ríos-Jáuregui, M. 2015. *Metodología para caracterizar el drenaje ácido de roca y para evaluar el potencial de generación del drenaje ácido en una determinada muestra de roca*. Proyecto de Ingeniería Ambiental y Química Analítica Ambiental. Instituto de Educación Superior en Peru. 33 p.

Cooper, E.L., y Wagner C.C. 1973. The effects of acid mine drainage on fish populations. In: *Fish and Food Organisms in Acid Waters of Pennsylvania*, US Environmental Protection. EPA-R#-73-032: 114.

Corona-Chávez, P., Maldonado, R., Ramos-Arrollo, Y.R., Robles-Camacho, J., Lozano-SantaCruz, R. y Martínez-Medina, M. 2017. *Geoquímica y mineralogía de los jales del distrito minero Tlalpujahuá-El Oro, México, y sus implicaciones de impacto ambiental*. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. v. 34, núm. 3, p. 250-273.

Corrales-Pérez, D., y Romero, F. 2013. *Evaluación de la peligrosidad de jales de zonas mineras de Nicaragua y México y alternativas de solución*. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. México, D.F. Vol. 65, No. 3. 427-446.

Corrales-Pérez, D., y Romero, F. 2018. Adecuaciones para mejorar la aplicación del método D3987-85 en la extracción de EPT de los antiguos residuos mineros El Fraile, Guerrero, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. v. 35, núm. 1, 2018, p. 1-17.

Del Río-Salas, R., Ayala-Ramírez, Y., Loredó-Portales, R., Romero, F., Molina-Freaner, F., Minjarez-Osorio, C., Pi-Puig, T., Ochoa-Landín, L., y Moreno-Rodríguez, V. 2019. Mineralogy and Geochemistry of Rural Road Dust and Nearby Mine Tailings: A Case of Ignored Pollution Hazard from an Abandoned Mining Site in Semi-arid Zone. *Natural Resources Research*, México, D.F. Vol. 28, No. 4. 1485-1503.

Dold, B. 2010. Basic concepts in environmental geochemistry of sulfidic mine-waste management, *Waste Management InTech open access book*, Croacia, 73-198.

Dold, B. 2014 Evolution of Acid Mine Drainage Formation in Sulphidic Mine Tailings. *Minerals*, 4, 621-641.

EarthWorks. 2002. Drenaje Ácido Generado por la Minería. EarthWorks-Hard Rock. Washington, D.C. 2 p. <http://www.earthworksaction.org/>.

EPA (Environmental Protection Agency). 1983. Design Manual Neutralization of Acid Mine Drainage. Chicago Illinois. U.S.A.

EPA (Environmental Protection Agency). 1992. Test methods for evaluating solid waste, physical/chemical methods (SW-846). Springfield, Virginia, U.S.A. 1049 p.

EPA (Environmental Protection Agency). 1994. Acid Mine Drainage Prediction, Technical Document, U.S.A, 52 p.

EPA (Environmental protection Agency). 2000. Coal re-mining best management practices guidance manual. Office of Science and Technology Engineering and Analysis Division. Washington DC. EPA 821-R-00-007.

EPA (Environmental protection agency). 2011. Method 1627 Kinetic Test Procedure for the Prediction of Mine Drainage Quality. U.S.A. 37 p.

Espinoza-Madero, Z. 2012. Impacto ambiental producido por los jales de San Felipe de Jesús, Tesis de Licenciatura, División de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Sonora, México. 52 p.

Ferguson, K., y Erickson, M. 1987. Will it generate AMD? Proceedings of 11th Annual British Columbia Mine Reclamation Symposium. Campbell River, Canadá.

Fernández-Reyes, S.F. 2019. Evaluación del efecto de la presencia de bacterias acidófilas en la generación de drenaje ácido de mina en Taxco, Guerrero. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.

Fernández-Rubio, R. 1986. Abandono de minas e impacto hidrológico. Ed. Instituto Geológico y Minero de España y la E.T.S de Ingenieros de Minas de Madrid. España.

Folk, R. L. 1980. Petrology of sedimentary rocks. Hemphill Pub. C., Austin, Texas, USA. 82 p.

Furman, N.H. 1985. Standard Methods of Chemical Analysis. Volume 1, The Element. Robert E. Kieger Publishing Company, U.S.A., 1401 p.

García-Balboa, C. 1998. Estudio del Mecanismo de Generación de Drenajes Ácidos en una Presa de Estériles Piriticos, Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica. Universidad Complutense de Madrid. Madrid, España. 257 p.

Goldstein, J.I., Newbury, D.E., Michael, J.R., Ritchie, N.W.M., Scott, J.H.J., Joy, D.C. 2018. Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis. Cuarta edición. Springer-Verlag New York.

Gómez-Álvarez, A. 2004. Manual de métodos analíticos para rocas y minerales, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora. 203 p.

Hernández, J. 2012. Diagrama de Pourbaix herramienta termodinámica aplicada a los problemas de corrosión. Revista Digital de Investigación y Postgrado. Vol. 2, Nº. 4, 2012, págs. 297-306.

Hornberger, R.J., K.B.C. Brady, B.E. Scheetz, W.B. White and S.C. Parson. 2005. ADTTM-WP2 Leaching Column Method for Overburden Analysis and Prediction of Weathering Rates. In: Proceedings of 26th West Virginia Surface Mine Drainage Task Force Symposium, Morgantown, West Virginia, pp. 93-110.

Ibáñez-Zamorano, P.B. 2015. Modelación del efecto del drenaje ácido en un depósito epitelmal Au-Cu sobre los recursos hídricos superficiales y subterráneos cercanos, Secretaria de Investigación y Posgrado, Universidad Nacional de la Pampa. Santa Rosa, La Pampa.

Imperial-Pérez, L. 2010. Evaluación del potencial de generación de drenaje ácido de mina del material estéril del yacimiento de la mina Álamo Dorado, Tesis de Licenciatura, División de Ingeniería, Universidad de Sonora, México. 57 p.

INAFED (Instituto Nacional para el Federalismo y Desarrollo Municipal). 2004. Sistema Nacional de Información Municipal. Secretaria de Gobernación, México.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática). 2009. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos San Felipe de Jesús, Sonora. Clave geoestadística 26053. México. D.F. 9 p.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática). 2015. Encuesta Intercensal 2015. México.

Jennings, S.R., y Dollhopf, D.J. 1995. Acid-base account effectiveness for determination of mine waste potential acidity. Journal of Hazardous Materials. 41, 161-175.

Jensen, A.B., y Webb, C. 1995. Ferrous Sulphate Oxidation Using Thiobacillus ferrooxidans: a Review. EL SIEVER, 30(3). Pp. 225-236.

Johnston, D., Potter, H., Jones, C., Rolley, S., Watson, I., y Pritchard, J. 2008. Abandoned mines and the water environment, Environment Agency. Bristol, U.S.A. 2-7.

Lapakko K. 2002. Metal Mine Rock and Waste Characterization Tools: An Overview. Minesota Department of Natural Resources, US. No 67.

Lawrence, R.W., y Wang, Y., 1997. Determination of neutralization potential in the prediction of acid rock drainage: Fourth international conference on acid rock drainage. Vancouver, BC. Canadá.

León-García, G.J. 2019. Estudio de caracterización, movilidad y biodisponibilidad de metales en sedimentos del río sonora y su afluente el Río Bacanuchi, Sonora. Tesis de Doctorado. Universidad de Sonora.

López P., Aduvire, O., y Baretino, D. 2002. Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro. Boletín Geológico y Minero, 21.

Lottermoser, B.G. 2007. Mine Wastes: Characterization, treatment and environmental impacts. Springer 3th ed. Berlin Heidelberg, New York, 33-89, 179-204

Lottermoser, B.G. 2010. Mine Wastes, Characterization, Treatment and Environmental Impact. Third Edition. Springer. Australia. 408 pp.

Lundgren, D.C., y Silver, M. 1980. Ore leaching by bacteria. Annual Review of Microbiology. 34: 263-283.

Magdaleno-Rico, C.A. 2014. Peligrosidad de los residuos mineros históricos del distrito minero San Antonio-El Triunfo en La Paz Baja California sur y evaluación de generación de drenaje ácido a través de pruebas estáticas, Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.

Miller, J.C., y Miller, J.N. 1993. Estadística para Química Analítica. Editorial Addison-Wiley Iberoamericana, Wilmington, Delaware, U.S.A.

Moreno-Morales, L.N. 2016. Comportamiento ambiental de residuos mineros. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 274 p.

Mudroch, A., y Azcue, J.M. 1995. Manual of aquatic sediment sampling. Lewis Publishers. USA.

Navarro-Aviñó, J.P., Aguilar-Alonso, I., y López-Moya, J.R. 2007. Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. Departamento de biología vegetal. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.

Nordstrom, D.K., y Alpers, C.N. 1999. Geochemistry of acid mine waste. En: Plumlee, G. S. y Logsdon, M.J. (Eds.), *Reviews in Economic Geology. The Environmental Geochemistry of Ore Deposits. Part A: Processes, Techniques, and Health Issues*, V. 6A, pp. 133-160.

Norma Mexicana (NMX. AA-115-SCFI-2001). Análisis de agua-criterios para el control de la calidad de resultados analíticos. Secretaría de Economía, México, D.F. 31 p.

Norma Oficial Mexicana (NOM-021-RECNAT-2000). Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Secretaria de medio ambiente y recursos naturales. México, D.F. 73 p.

Norma Oficial Mexicana (NOM-141-SEMARNAT-2003). Procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y posoperación de presas de jales, SEMARNAT, México, D.F. 55 p.

Norma Oficial Mexicana (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004). Establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente. SEMARNAT. México, D.F. 69 p.

Norma Oficial Mexicana (NOM-157-SEMARNAT-2009). Establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros. SEMARNAT. Mexico D.F. 29 p.

Norma Oficial Mexicana (PROY-NOM-127-SSA1-2017). Guía para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. Secretaria de Salud. México, D.F. 71 p.

Norma Mexicana (NMX-AA-051-SCFI-2016). Análisis de agua. -medición de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas. - método de prueba. Secretaria de Economía, México, D.F. 44 p.

Ömer, A., Melek, S., y Ayten E. 2009. Water quality and heavy metal monitoring in water and sediment samples of the Küçükçekmece Lagoon, Turkey (2002–2003). Environ Monit Assess. Estambul, Turquía. 18 p.

Pentreath, R.J. 1994. The discharge of waters from active and abandoned mines. In mining and its environmental impact, eds ER Hester & RM Harrison, Royal Society of Chemistry, Herts UK, 121-132.

Pourbaix, M. 1974. Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions. National association of corrosion engineers. Texas, USA.

Pozo-Antonio, J.S., Puente, I., Lagüela, S., y Veiga, M. 2017. Tratamiento microbiano de aguas ácidas resultantes de la actividad minera: una revisión, Tecnología y Ciencias del agua, Vol 8, pp 75-91.

Ravindra, K., Sanjay, K., Suresh, M., y Mahesh, C. 2015. Contamination of Heavy Metals in Aquatic Media: Transport, Toxicity and Technologies for Remediation. The Royal Society of Chemistry. Jaipur, India. 25 p.

Rivera-Uria, M.Y., Romero, F., Sedov, S., y Solleiro-Reobolledo, E. 2020. Carbonatos pedogénicos para el tratamiento del drenaje ácido de mina (DAM). Experimentos de laboratorio: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 72 (1).

Roldan-Quintana, J. 1979. Geología y Yacimientos Minerales del Distrito de San Felipe; Sonora. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Vol. 3, Núm. 2: 97- 115.

Romero, F., Armienta, M., y González G. 2007. Solidphase control on the mobility of PTEs in an abandoned lead/zinc mine tailings impoundment, Taxco, Mexico. Applied Geochemistry. 22 (1), 109-127

Romero, F., y Gutiérrez-Ruíz, M. 2010. Estudio comparativo de la peligrosidad de jales en dos zonas mineras localizadas en el sur y centro de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Volumen 62, núm. 1, 2010, p. 43-53.

Romero, F., Nuñez, L., Gutierrez, M.E., Armienta, M.A., Cenicerros-Gomez, A.E., 2011, Evaluation of the Potential of Indigenous Calcareous Shale for Neutralization and Removal of Arsenic and Heavy Metals From Acid Mine Drainage in the Taxco Mining Area, Mexico: Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 60, 191-203.

Salas-Urviola, F.B., Guadarrama-Guzmán, P., Gutiérrez-Bazán, J.J., García-Luna, N., Fernández-Villagómez, G., y Alarcón-Herrera, M.T. 2020. Determinación de posible drenaje ácido de mina y caracterización de jales mineros provenientes de la mina cerro de mercado, Revista internacional de contaminación ambiental. Durango, México. 36 (3) 729-744.

Sánchez-Rondán, M.E. 2015. Influencia de la concentración de oxígeno en la estabilidad geoquímica de las rocas del botadero este en la Compañía Minera Antamina. Tesis de ingeniería. Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Huaraz, Ancash, Peru.

Secretaría de Economía. 2019. Minería. Acciones y Programas. México, D.F. 1 p. <https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/mineria>.

SEDUE (Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología). 1989. Acuerdo por el que se establecen los Criterios Ecológicos de Calidad de Agua CE-CCA-001/89. Publicado en el Diario Oficial de la Federación del 2 de diciembre de 1989. Tomo CDXXX, No. 9. México, D.F.

Skoog, D.A., West, D.M., Holler, F.J., y Crouch, S.R. 2015. Fundamentos de Química Analítica Novena Edición. Cengage Learning. Mexico, D.F.

Skousen, J., Rose, A., Geidel, G., Foreman, J., Evans, E., Hellier, W. y miembros de Avoidance and Remediation Working Group. 1998. Handbook of technologies for avoidance and remediation of acid mine drainage. Published by The National Mine Land Reclamation Center located at West Virginia University in Morgantown, West Virginia. 140pp.

Roberge, P.R. 2012. Handbook of Corrosion Engineering. McGraw-Hill Education; Edición: 2da ed., 1078 pp.

U.S Fish and Wildlife Service. 2008. Acid Mine Drainage and Effects on Fish Health and Ecology: A Review. Reclamation Research Group. Anchorage, Alaska.

Van Loon, J., y Barefoot, R. 1989. Analytical Methods for Geochemical Exploration, Academic Press. Toronto, Canadá. 344 p.

Yucel, D.S., y Baba, A. 2016. Prediction of acid mine drainage generation potential of various lithologies using static tests: Etili coal mine (NW Turkey) as a case study. Environ Monit Assess.188: 473

Zamora, G., Mostafa, B. 2003. Predicciones de drenaje ácido de roca mediante tests geoquímicos estáticos y dinámicos. Revista Metalúrgica N° 24. 13 p.

ANEXOS

Anexo A: Resultados del control de calidad durante el análisis de los parámetros analíticos utilizados en el estudio del Depósito de Jales “El Lavadero” y suelo agrícola.

Tabla A1. Parámetros de calidad utilizados en la calibración del equipo de absorción atómica AAnalyst 400, en el análisis de metales totales.

Metal	Curvas de calibración (Rango analítico)	Límite de Detección (LD) ($\mu\text{g/g}$)	Coefficiente de Correlación (r)
Cd	0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 10.0	0.04	0.999964
Cr	0.5, 1.0, 2.0, 5.0	-	0.999909
Cu	1.0, 2.0, 5.0, 10.0, 20.0	0.04	0.999998
Fe	1.0, 2.0, 5.0, 10.0, 20.0	0.07	0.999992
Mn	2.0, 5.0, 10.0, 15.0, 20.0	0.08	0.999940
Pb	1.0, 2.0, 5.0, 10.0, 20.0	0.08	0.999637
Zn	0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0	0.08	0.999892

Tabla A2. Parámetros de calidad utilizados en la calibración del equipo de absorción atómica AAnalyst 400, en el análisis de metales en la prueba de extracción de constituyentes tóxicos.

Metal	Curvas de calibración (Rango analítico)	Límite de Detección (LD) ($\mu\text{g/mL}$)	Coefficiente de Correlación (r)
Cd	0.5, 1.0, 2.0	0.01	0.9990
Cr	0.5, 1.0, 2.0, 4.0	-	0.999984
Cu	0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 15.0	0.02	0.999936
Fe	1.0, 2.0, 5.0, 10.0, 20.0	0.04	0.999836
Mn	2.0, 5.0, 10.0, 15.0, 20.0	0.02	0.999609
Pb	0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0	0.06	0.9998
Zn	0.5, 1.0, 3.0, 6.0	0.01	0.999995

Tabla A3. Indicadores de calidad de los datos. Parámetros analíticos realizados en el Depósito de Jales “El Lavadero”.

Parámetro	Método	Concentración añadida %	$\bar{x} \pm DE$ (*)	Recuperación %
Sulfatos	Gómez-Álvarez, 2004	67.63	62.12 \pm 0.82	97.71
Azufre total	Gómez-Álvarez, 2004	22.57	22.66 \pm 0.06	100.39
Carbonato de calcio	NOM-141-SEMARNAT-2003	100.00	96.55 \pm 0.53	96.55

(*) = Media y desviación estándar obtenida a partir de 5 réplicas de concentración conocida de cada uno de los parámetros preparados a partir de reactivos de alta pureza analítica.

Tabla A4. Valores de DPR obtenidos en los duplicados de campo en las estaciones de muestreo 1B y 3C.

Parámetro	Estación		Precisión DPR (%)	Estación		Precisión DPR (%)
	1B	1B (*)		3C	3C (*)	
Potencial redox (Eh) (mV)	583.20	583.20	(***)	285.30	285.30	(***)
Potencial hidrogeno (pH)	2.10	2.20	4.65	6.10	6.30	3.23
Conductividad eléctrica (C.E.) (μ S/cm)	33750.00	31750.00	6.11	4425.00	4550.00	2.79
Cd total (mg/kg)	36.84	47.99	26.29	195.27	194.30	0.50
Cr total (mg/kg)	19.45	17.85	8.58	25.34	22.78	10.64
Cu total (mg/kg)	125.83	172.55	31.32	433.78	467.67	7.52
Fe total (mg/kg)	148116.72	155712.02	5.00	157635.14	118609.72	28.25
Mn total (mg/kg)	2587.33	2277.67	12.73	25675.68	21842.55	16.13
Pb total (mg/kg)	18729.30	23899.25	24.26	14087.84	9463.99	39.27
Zn total (mg/kg)	3870.03	4819.52	21.85	33547.30	27437.19	20.04
Cd PECT (**) (mg/L)	0.434	0.463	6.47	0.068	0.073	7.09
Cr PECT (**) (mg/L)	0.029	0.027	7.14	0.014	0.015	6.90
Cu PECT (**) (mg/L)	0.59	0.58	1.71	ND	ND	(***)
Fe PECT (**) (mg/L)	70.30	70.10	0.28	0.126	0.10	23.01
Mn PECT (**) (mg/L)	3.61	3.97	9.50	0.31	0.36	14.93
Pb PECT (**) (mg/L)	ND	ND	(***)	ND	ND	(***)
Zn PECT (**) (mg/L)	58.00	67.10	14.55	1.43	1.46	2.08
Sulfatos (%)	20.37	20.26	0.54	4.72	4.71	0.21
Azufre total (%)	8.85	8.33	6.05	6.42	5.68	12.23
Carbonato de calcio (%)	ND	ND	(***)	12.19	12.62	3.47

(*) = Duplicado analítico.

(**) = Prueba de extracción de constituyentes tóxicos (PECT).

(***) = Los valores de DPR obtenidos en las muestras duplicadas fueron idénticos.

ND = No detectable.

Tabla A5. Valores de DPR obtenidos en los duplicados analíticos de laboratorio en las estaciones de muestreo 2C y 3B.

Parámetro	Estación		Precisión DPR (%)	Estación		Precisión DPR (%)
	2C	2C (*)		3B	3B (*)	
Sulfatos (%)	5.71	5.62	1.59	9.71	10.2	4.92
Azufre total (%)	6.22	6.11	1.78	13.23	13.27	0.30
Carbonato de calcio (%)	12.61	12.55	0.48	6.59	6.63	0.61
Cd total (mg/kg)	233.20	236.86	1.56	398.81	397.91	0.23
Cr total (mg/kg)	28.13	26.28	6.78	27.53	31.04	11.99
Cu total (mg/kg)	458.20	454.79	0.75	316.22	311.14	1.62
Fe total (mg/kg)	122929.69	119339.26	2.96	188988.10	184536.28	2.38
Mn total (mg/kg)	21289.06	20865.53	2.01	2864.96	2806.66	2.06
Pb total (mg/kg)	12675.78	12074.96	4.85	26432.29	27169.04	2.75
Zn total (mg/kg)	34042.97	32824.57	3.64	39415.92	38967.84	1.14
Cd PECT(**) (mg/L)	0.067	0.075	11.27	2.43	2.45	0.82
Cr PECT (**) (mg/L)	0.016	0.019	17.14	0.02	0.021	4.88
Cu PECT (**) (mg/L)	ND	ND	(***)	ND	ND	(***)
Fe PECT (**) (mg/L)	0.046	0.05	8.33	0.07	0.1	35.29
Mn PECT (**) (mg/L)	0.258	0.242	6.40	6.01	5.37	11.25
Pb PECT (**) (mg/L)	ND	ND	(***)	0.30	0.36	18.80
Zn PECT (**) (mg/L)	1.318	1.455	9.88	57.90	56.06	3.23

(*) = Duplicado analítico.

(**) = Prueba de extracción de constituyentes tóxicos (PECT).

(***) = Los valores de DPR obtenidos en las muestras duplicadas fueron idénticos.

ND = No detectable.

Tabla A6. Indicadores de calidad de los datos. Recuperación de metales totales (mg/kg) excepto Fe (%) analizados en el estándar certificado de Inorganics in Marine Sediment (NIST 2702), utilizando la técnica de espectroscopia de absorción atómica.

Estándar	Cd	Cr	Cu	Fe (%)	Mn	Pb	Zn
Estándar 1	ND	376.59	109.65	7.04	1629.87	161.05	451.05
Estándar 2	ND	323.37	111.82	7.10	1505.62	123.07	501.21
Estándar 3	ND	327.27	110.28	7.05	2121.21	140.73	482.66
Promedio ± DE	ND ± 0.00	342.41 ± 24.22	110.58 ± 0.91	7.06 ± 0.02	1752.23 ± 265.79	141.62 ± 15.51	478.31 ± 20.70
NIST (*)	0.817 ± 0.011	352 ± 22	117.7 ± 5.6	7.91 ± 0.24	1757 ± 58	132.8 ± 1.1	485.3 ± 4.2
Recuperación (%)	ND	97.28	93.95	89.30	99.73	106.64	98.56

(*) = Estándar certificado: Inorganics in Marine Sediment (NIST 2702).

DE = Desviación Estándar.

ND = No Detectable.

Anexo B: Difractogramas obtenidos por DRX en las estaciones de muestreo 1B, 2A, 3A, 4B, 5D y BC del Depósito de Jales “El Lavadero” y suelo agrícola.

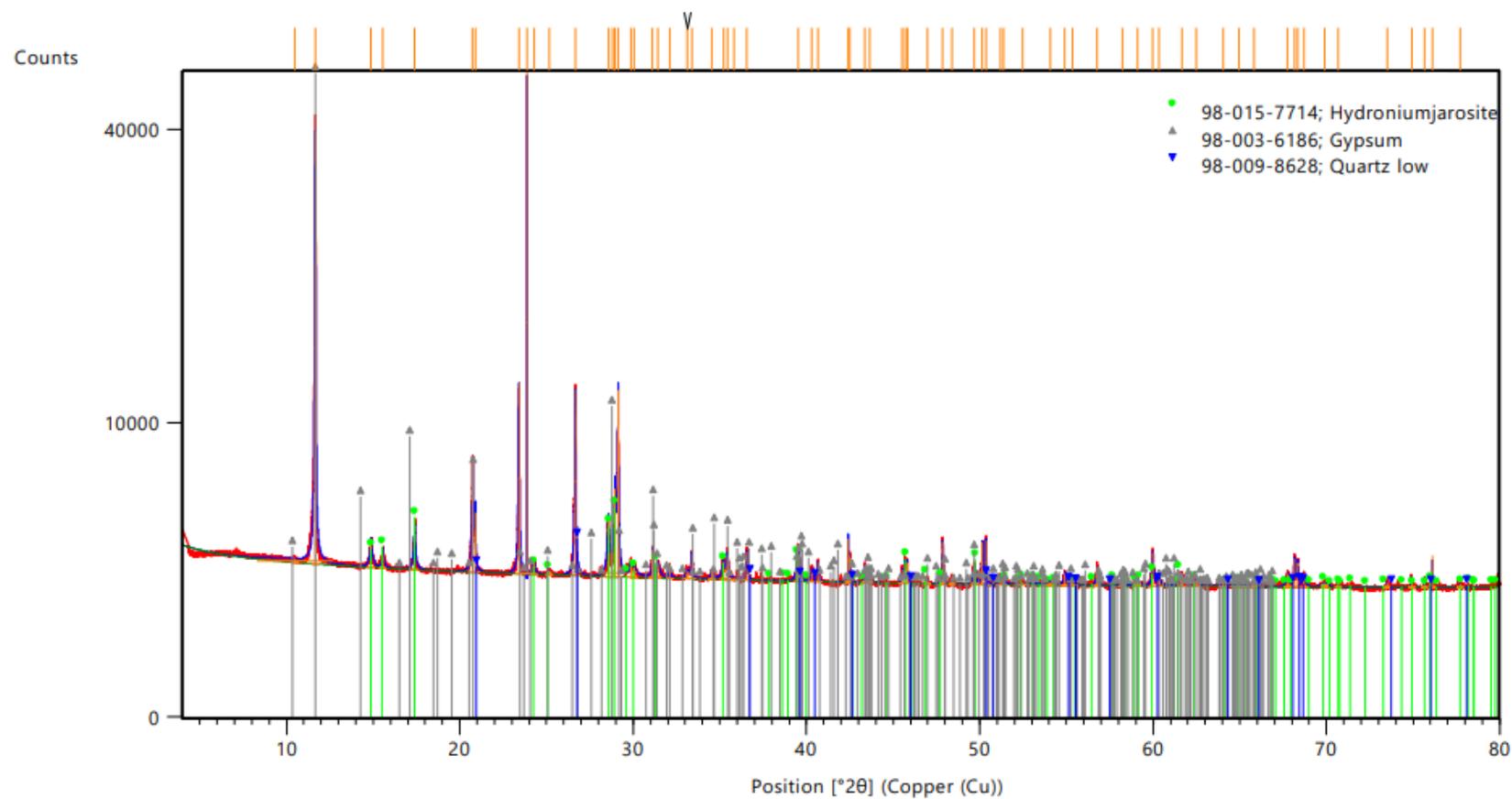


Figura B1. Difractograma obtenido por DRX en los Jales de la estación 1B.

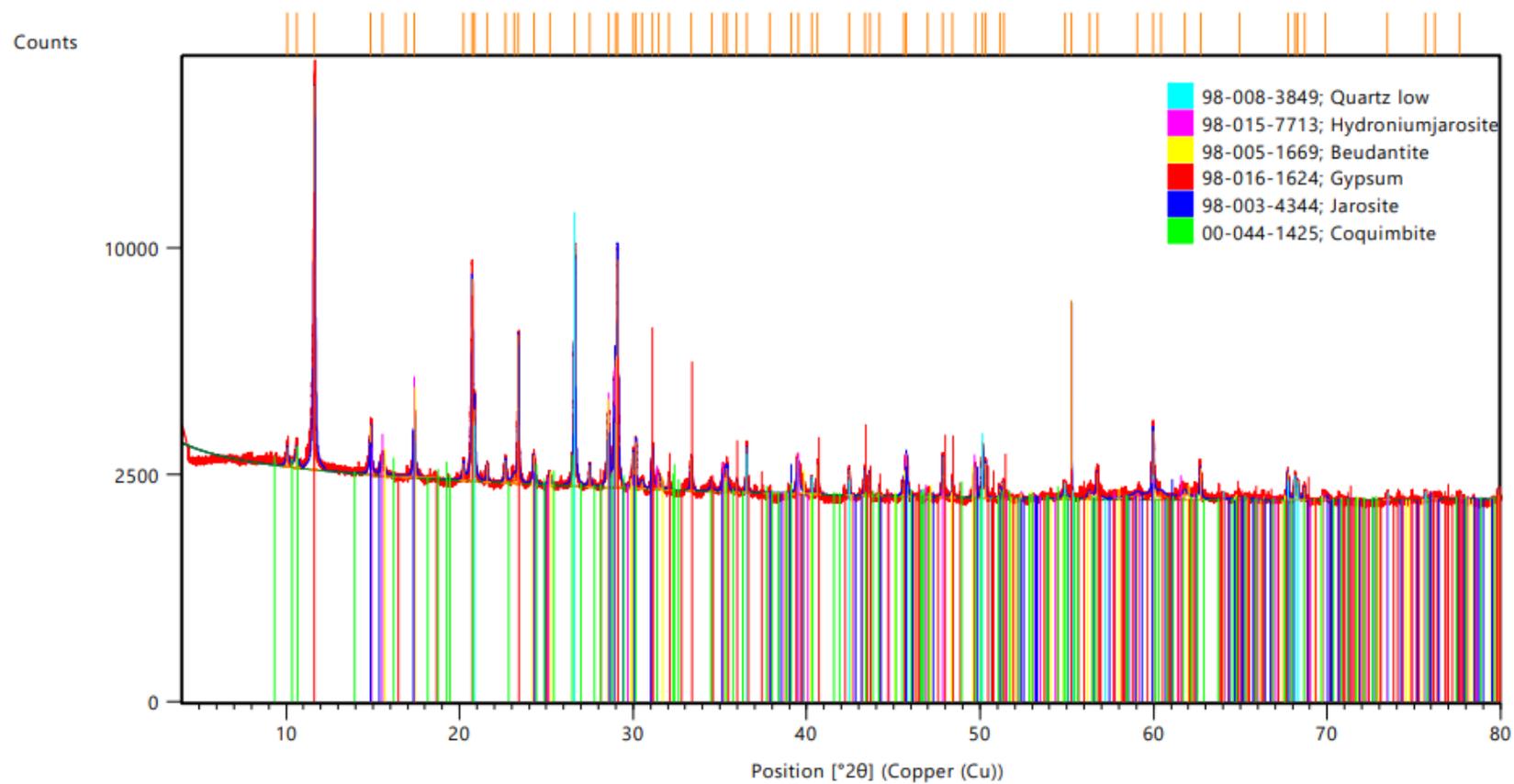


Figura B2. Difractograma obtenido por DRX en los Jales de la estación 2A.

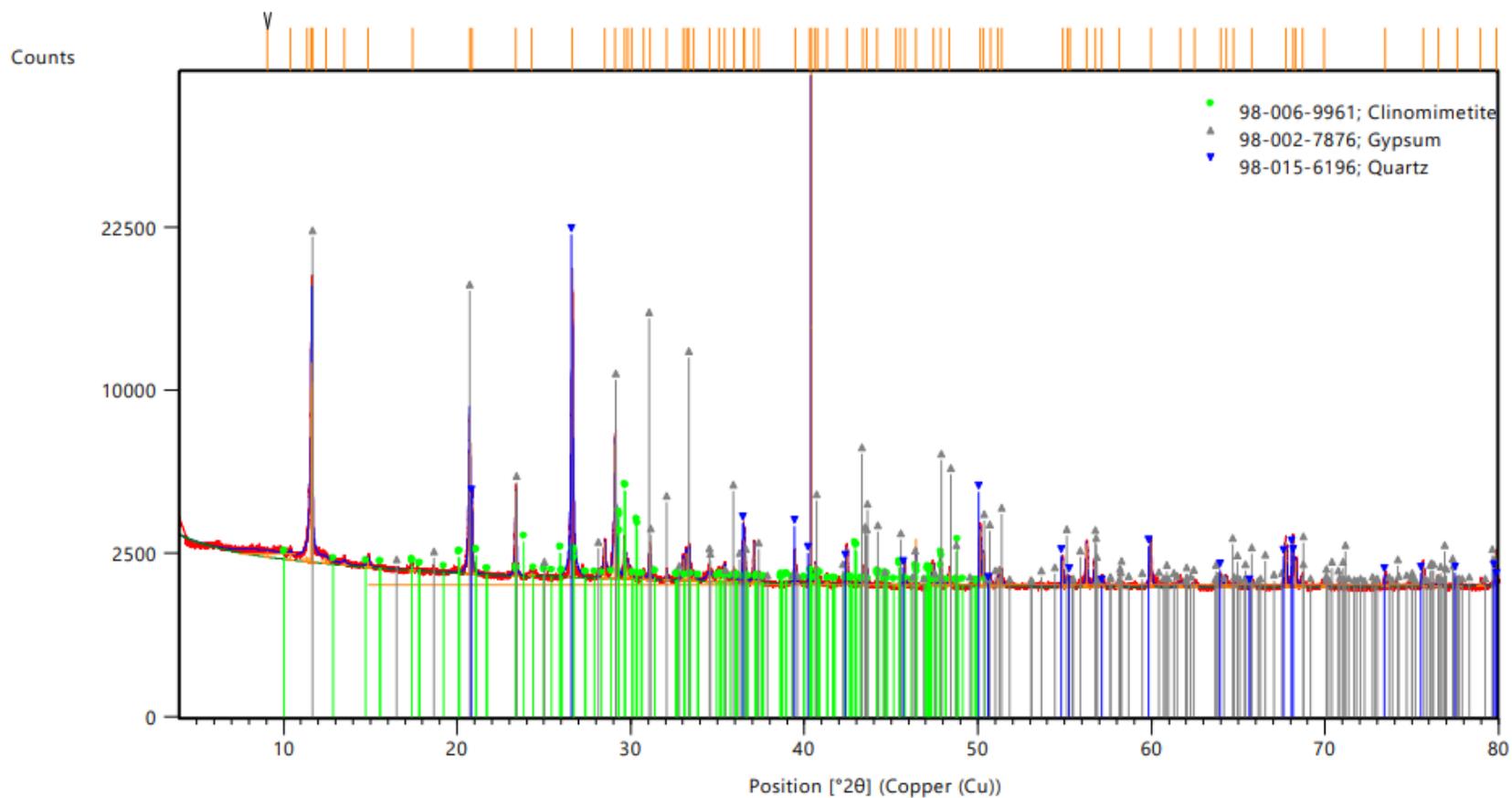


Figura B3. Difractograma obtenido por DRX en los Jales de la estación 3A.

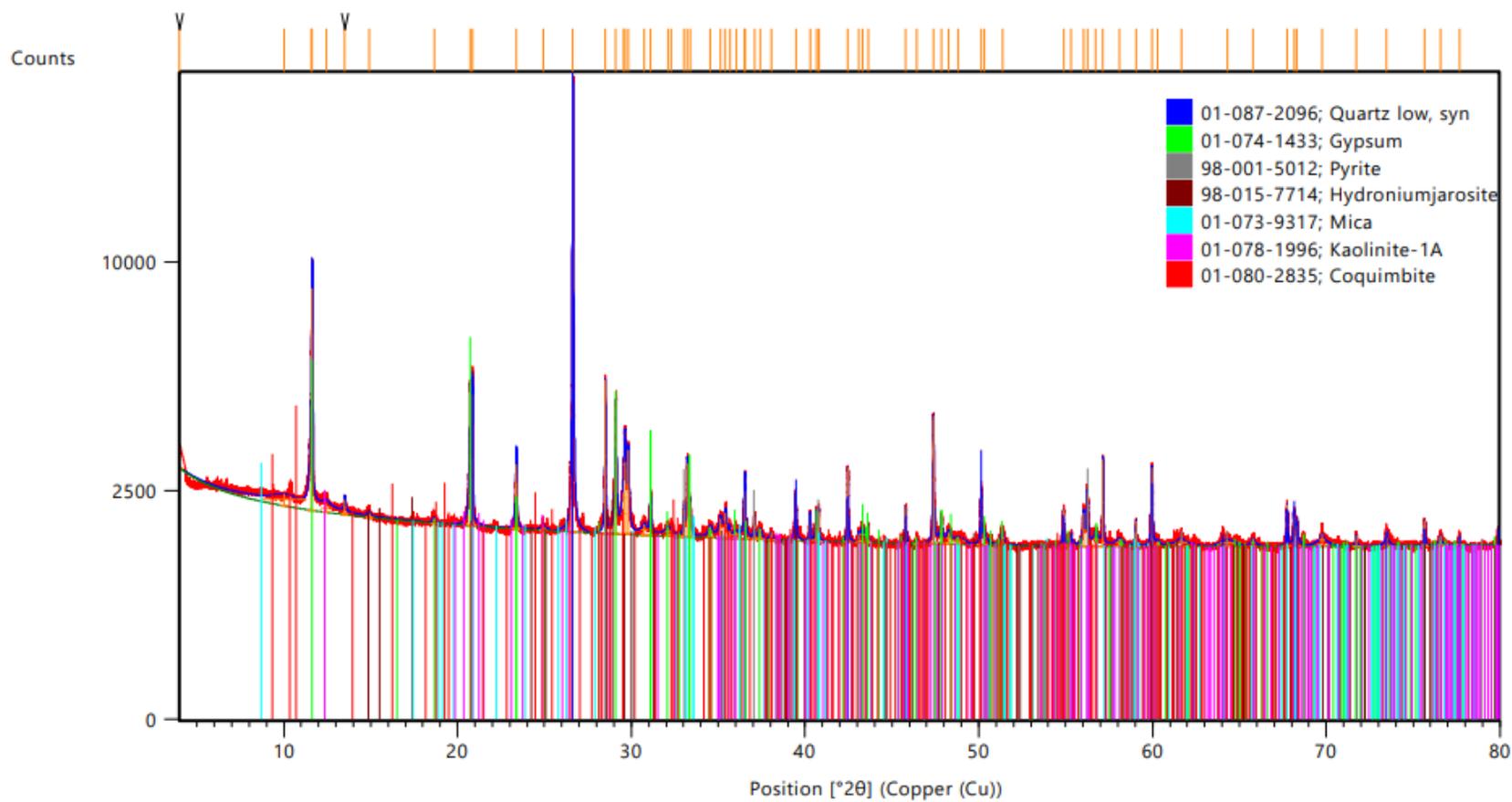


Figura B4. Difractograma obtenido por DRX en los Jales de la estación 4B.

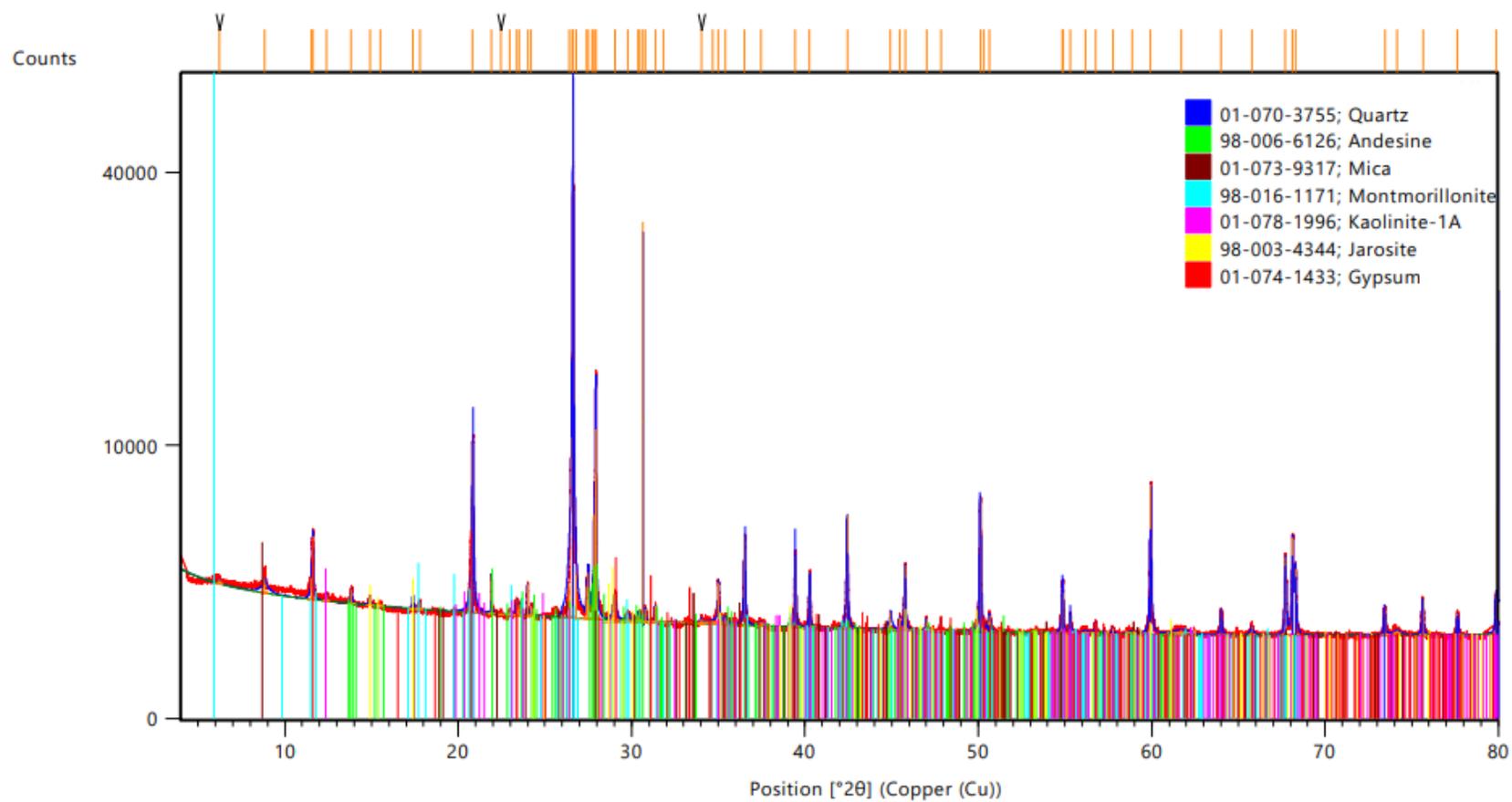


Figura B5. Difractograma obtenido por DRX en el suelo agrícola de la estación 5D.

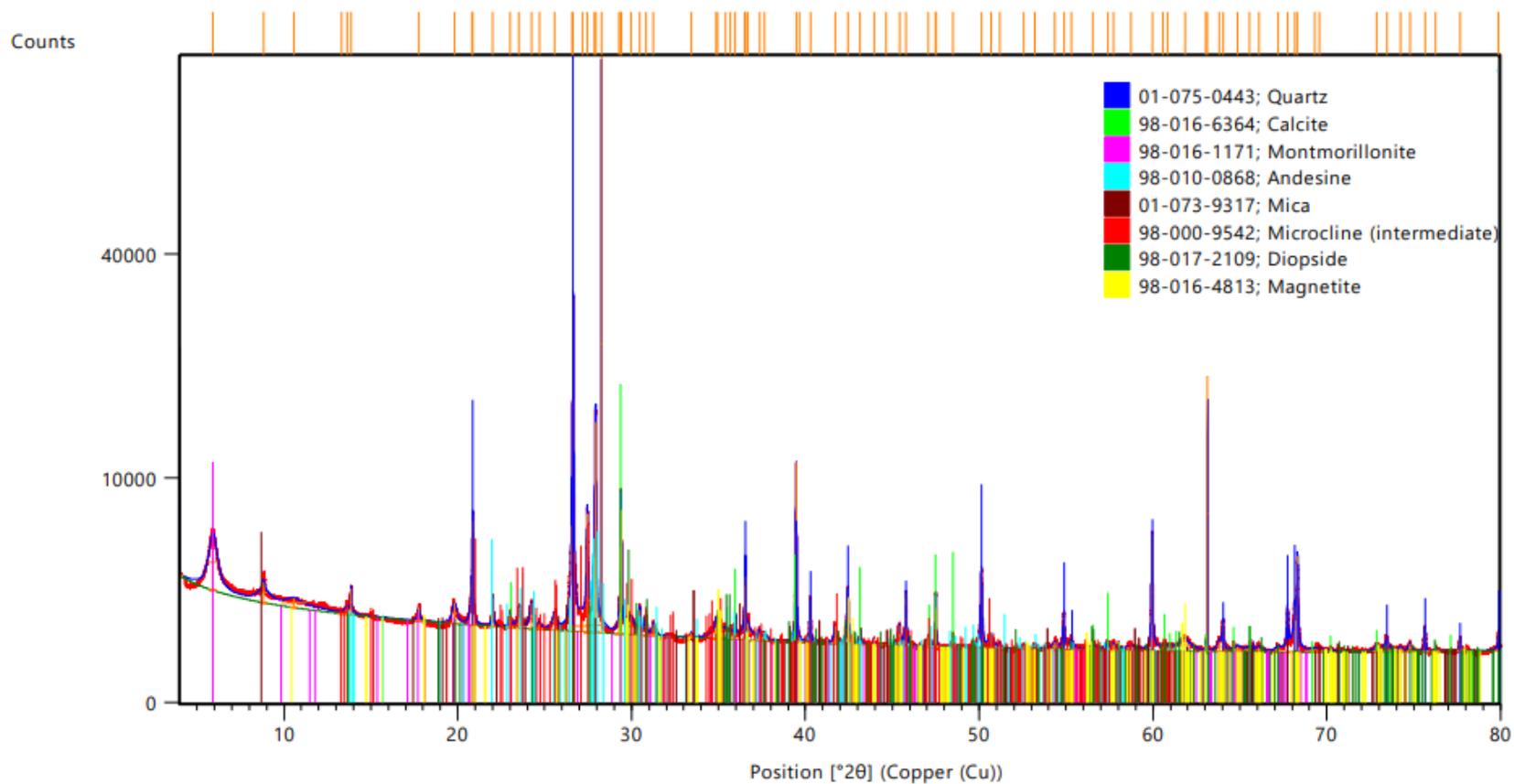


Figura B6. Difractograma obtenido por DRX en el material del cerro no impactado de la estación BC (blanco de campo).

Anexo C: Diagramas Eh-pH para Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn en los jales del Depósito “El Lavadero” y suelo agrícola (estaciones de muestreo 1B, 2A, 3A, 4B, 5D y BC).

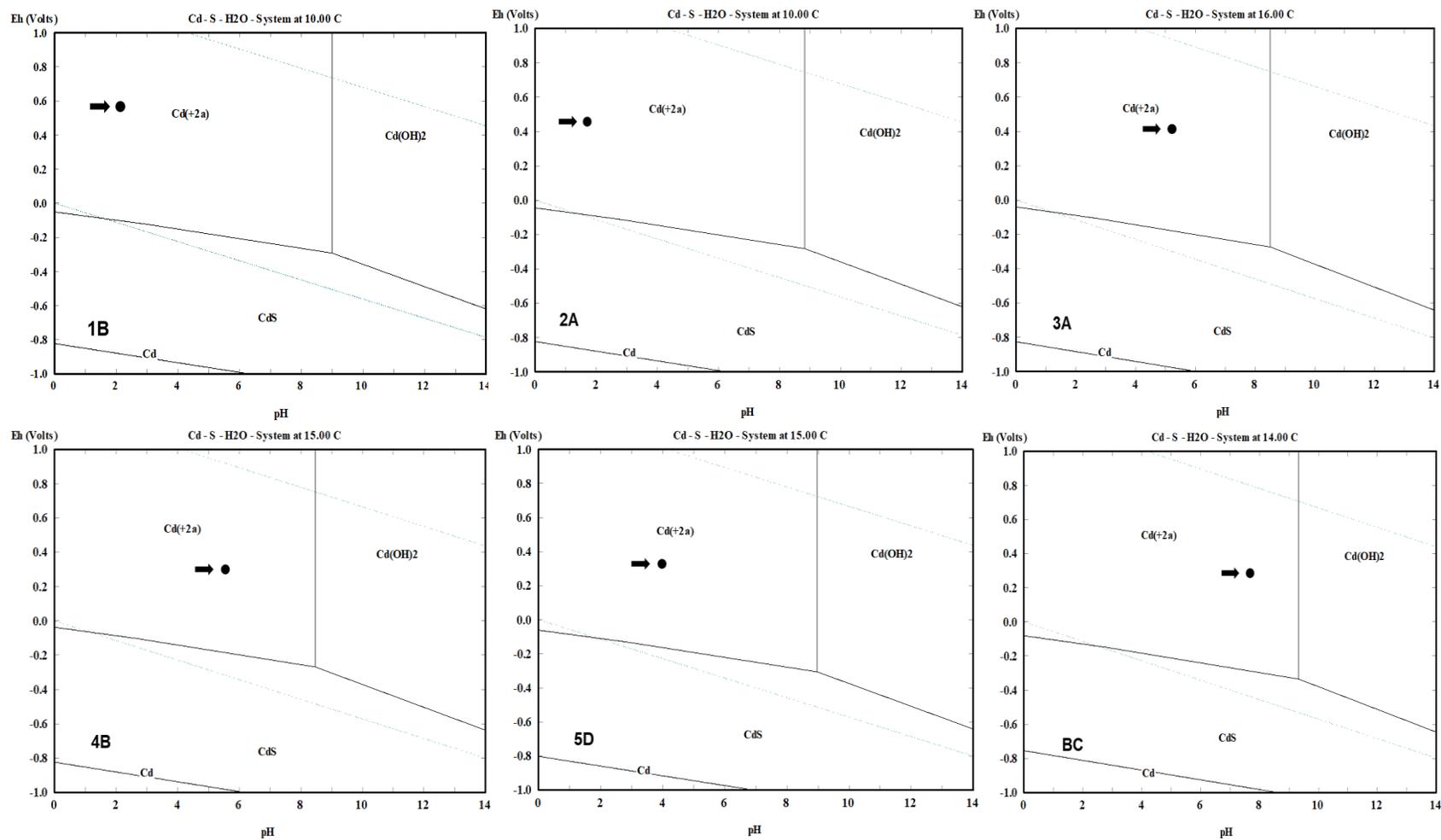


Figura C1. Diagrama Eh-pH del sistema Cd-S-H₂O en los jales del Depósito “El Lavadero” y suelo agrícola de las estaciones 1B, 2A, 3A, 4B, 5D y BC.

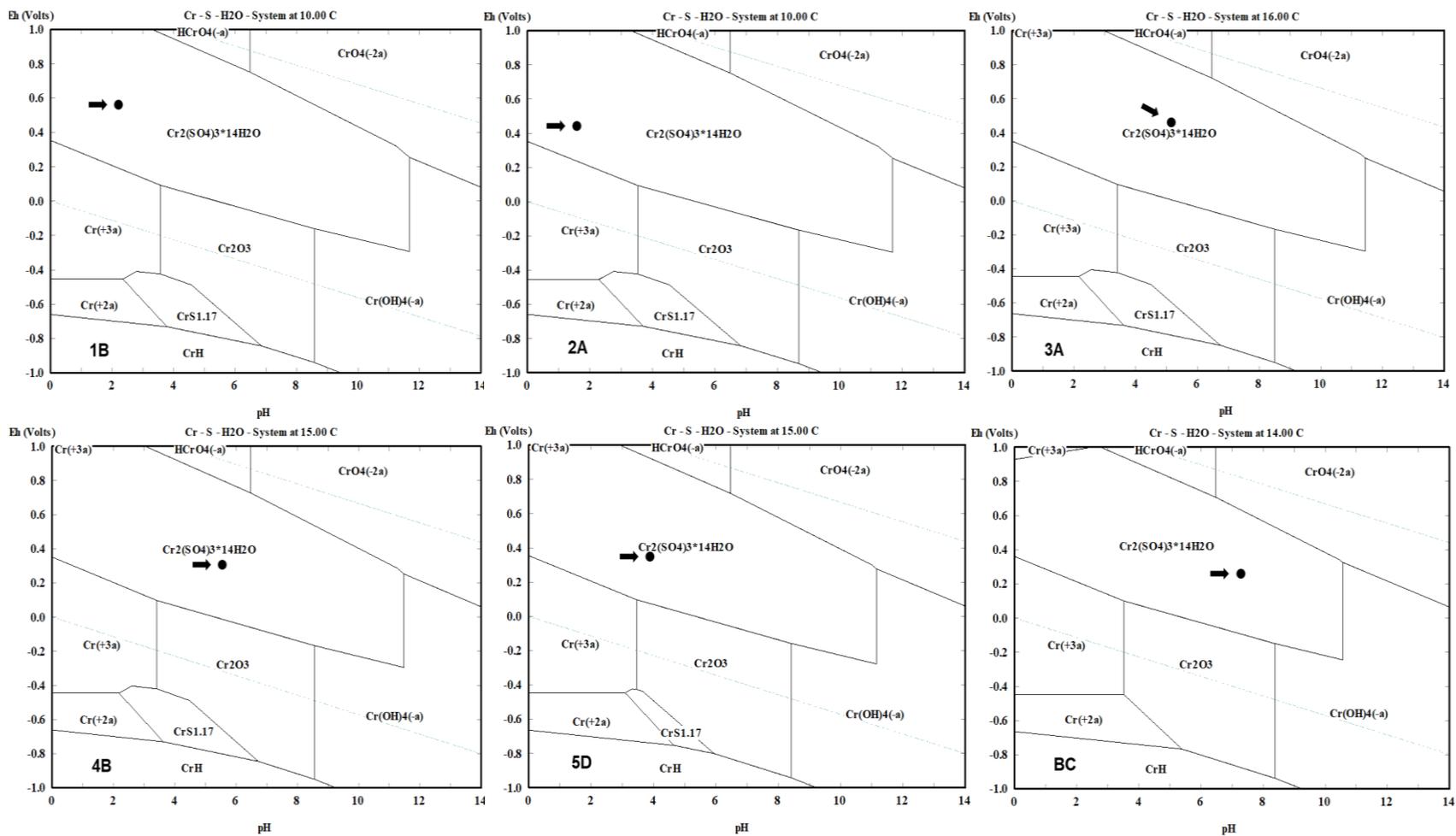


Figura C2. Diagrama Eh-pH del sistema Cr-S-H₂O en los jales del Depósito “El Lavadero” y suelo agrícola de las estaciones 1B, 2A, 3A, 4B, 5D y BC.

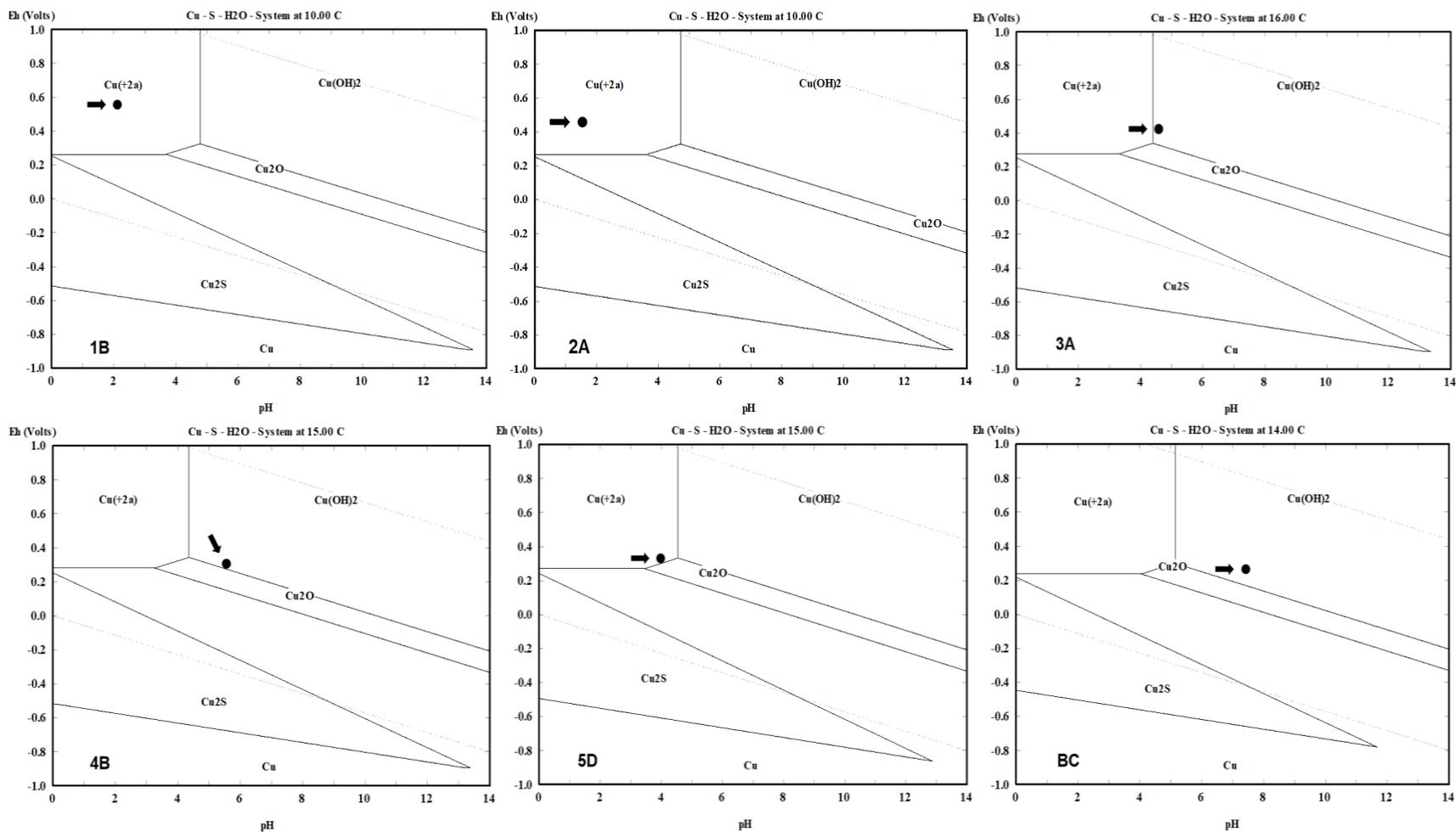


Figura C3. Diagrama Eh-pH del sistema Cu-S-H₂O en los jales del Depósito “El Lavadero” y suelo agrícola de las estaciones 1B, 2A, 3A, 4B, 5D y BC.

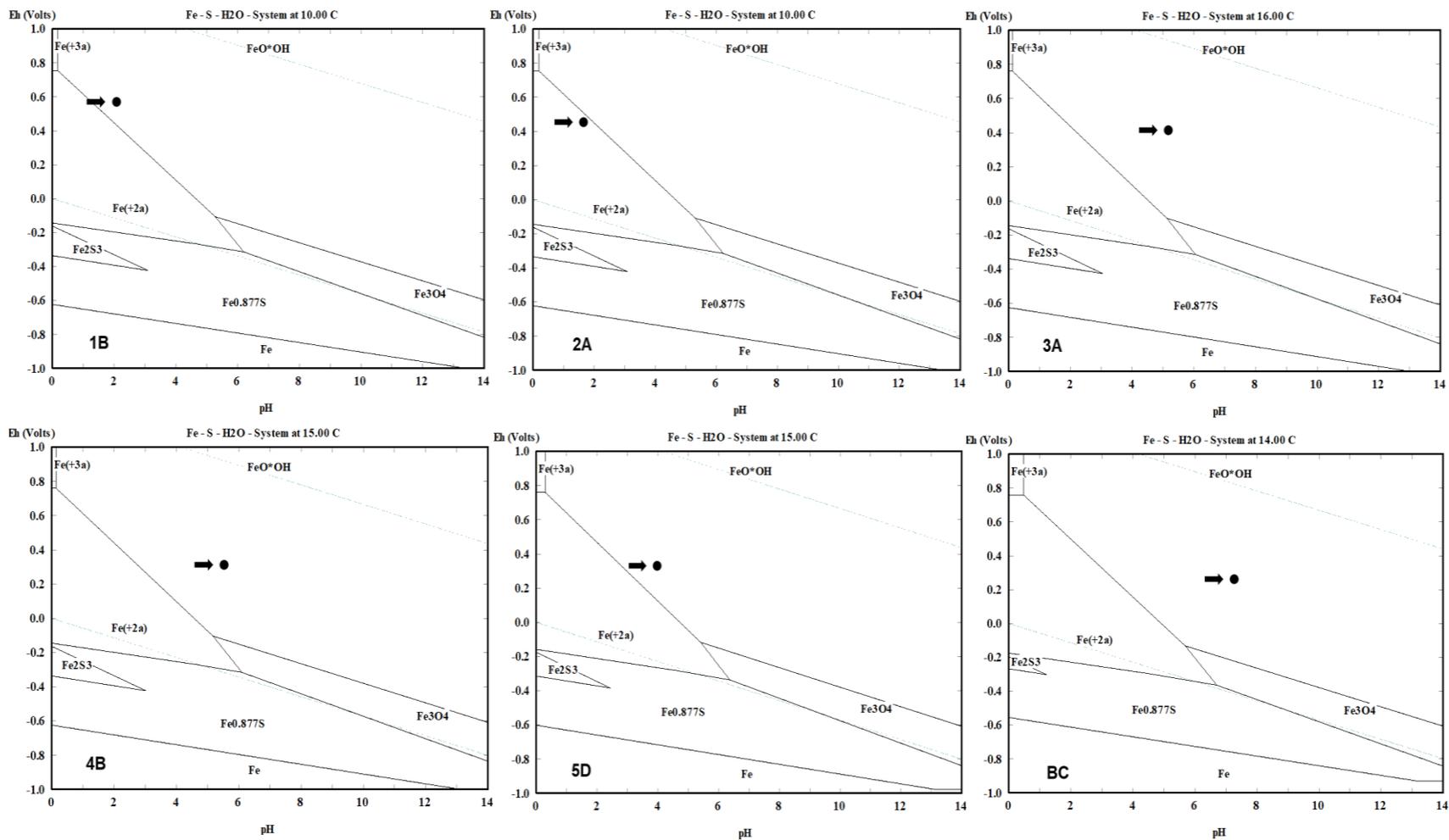


Figura C4. Diagrama Eh-pH del sistema Fe-S-H₂O en los jales del Depósito “El Lavadero” y suelo agrícola de las estaciones 1B, 2A, 3A, 4B, 5D y BC.

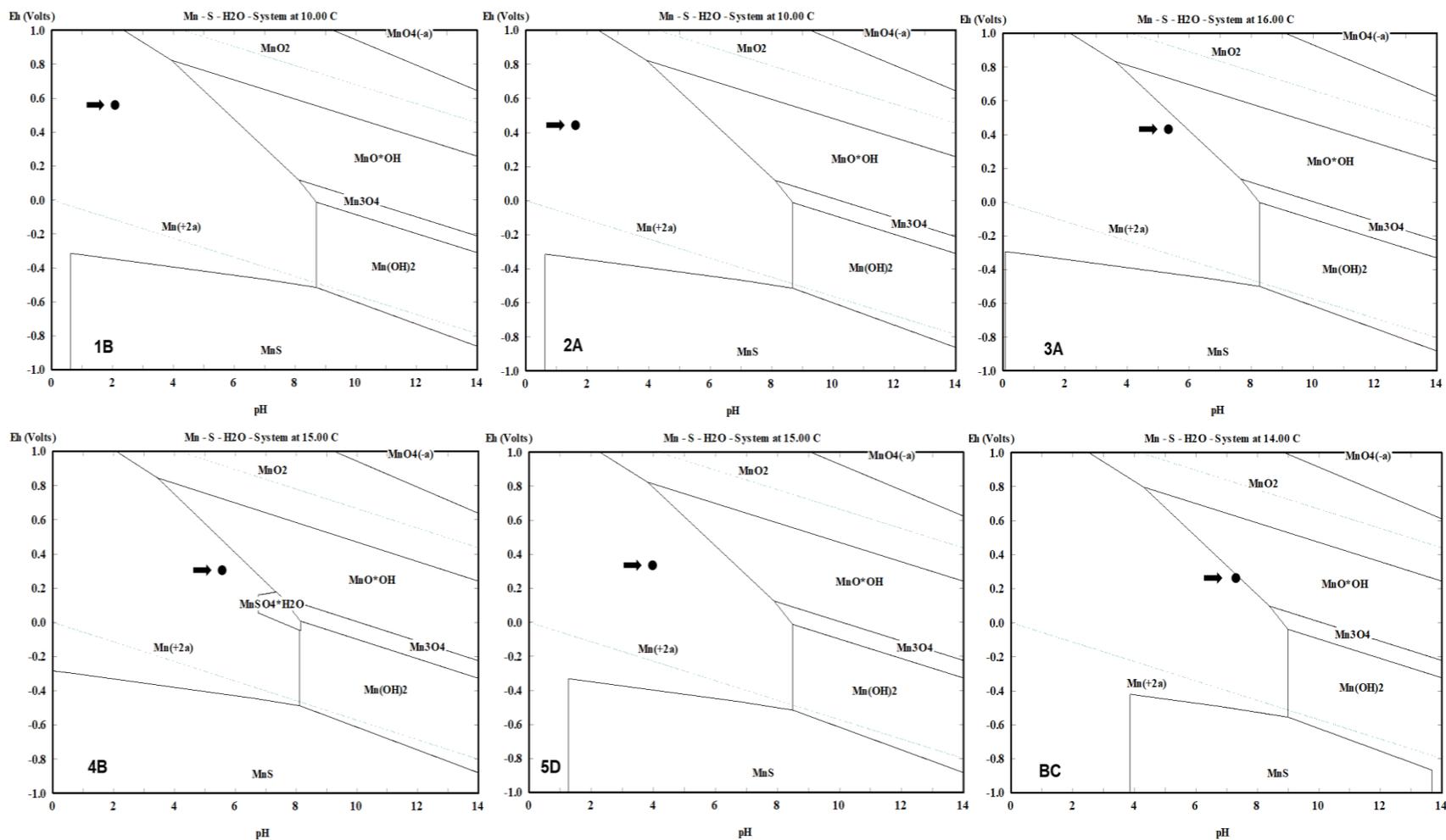


Figura C5. Diagrama Eh-pH del sistema Mn-S-H₂O en los jales del Depósito “El Lavadero” y suelo agrícola de las estaciones 1B, 2A, 3A, 4B, 5D y BC.

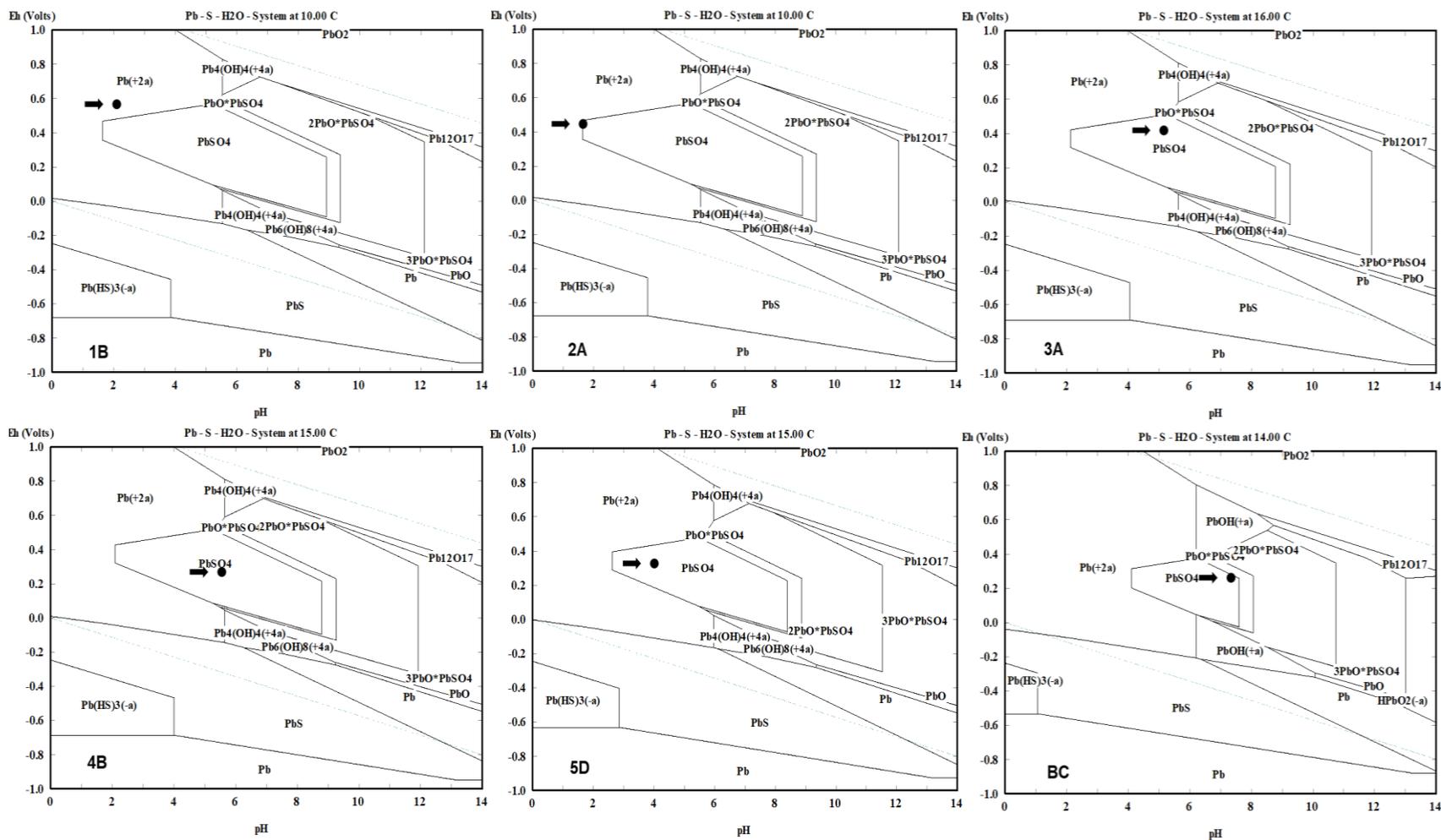


Figura C6. Diagrama Eh-pH del sistema Pb-S-H₂O en los jales del Depósito “El Lavadero” y suelo agrícola de las estaciones 1B, 2A, 3A, 4B, 5D y BC.

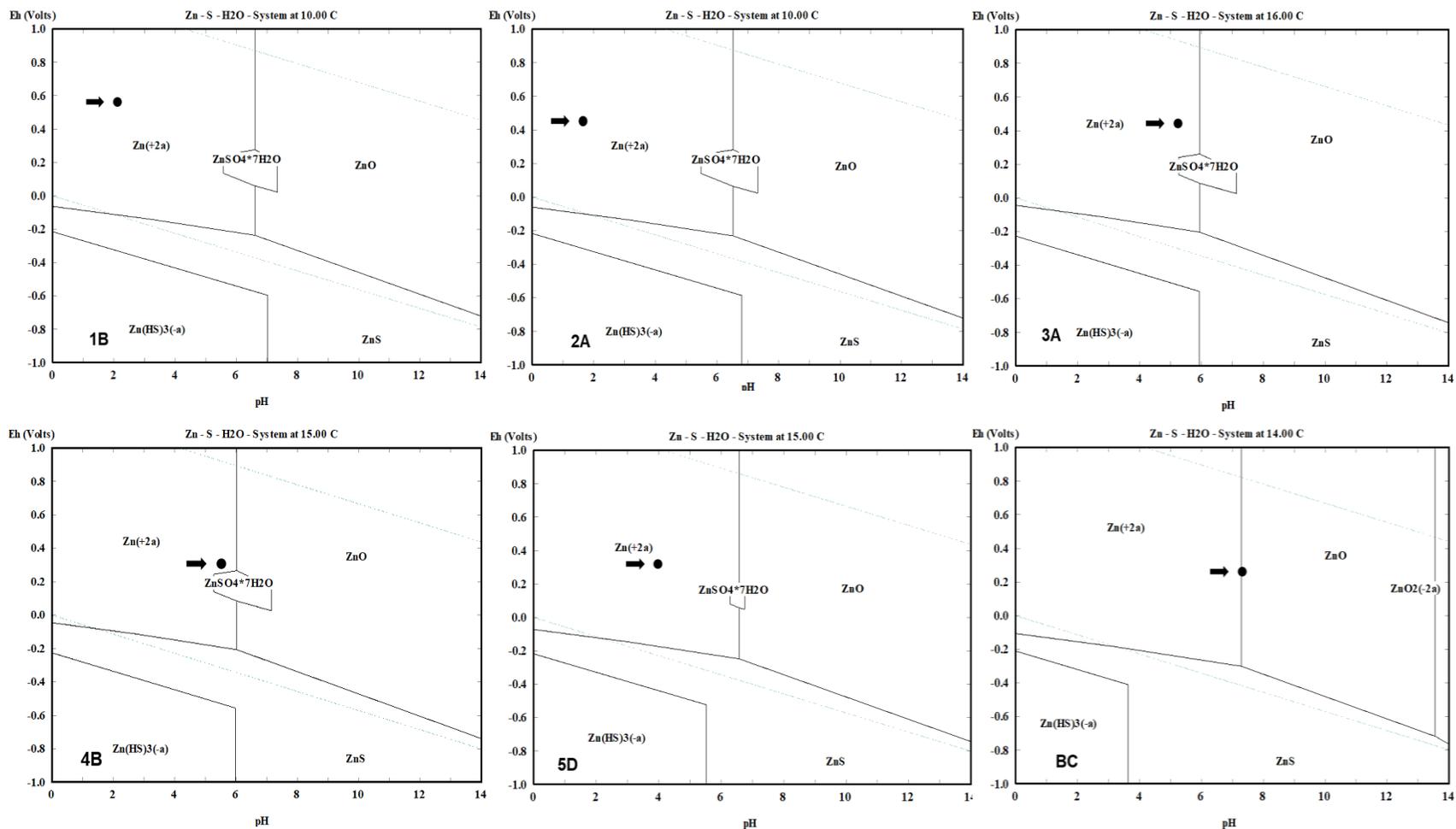


Figura C7. Diagrama Eh-pH del sistema Zn-S-H₂O en los jales del Depósito “El Lavadero” y suelo agrícola de las estaciones 1B, 2A, 3A, 4B, 5D y BC.

**Anexo D: Fotografías de campo del Depósito de Jales “El Lavadero”
y suelo agrícola, San Felipe de Jesús, Sonora, México.**



Figura D1. Diferentes perspectivas de los jales del Depósito "El Lavadero".



Figura D2. DAM producido por la interacción del agua de lluvia con los jales.



Figura D3. Suelo agrícola aledaño al Depósito de Jales “El Lavadero”.



Figura D4. Sitio de descarga de contaminantes en el suelo agrícola provenientes del Depósito de Jales “El Lavadero” (Estación de muestreo 5D).