



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

“Propuesta de revalorización y posible recuperación de cobre en residuos mineros históricos y sedimentos del arroyo El Barrilito en Cananea, Sonora.”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

PRESENTA

ANGEL LEONARDO ALVIRDE MELÉNDEZ

Ciudad Universitaria, CD. MX

2024





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: LUIS GERARDO MARTINEZ JARDINES Profesor:

VOCAL: BLANCA PAZ DIAZ Profesor:

SECRETARIO: WIENER FERNANDO CRUZ MENDEZ Profesor:

1er. SUPLENTE: ANDRES VELA AVITUA Profesor:

2° SUPLENTE: LIDIA ESCUTIA GUADARRAMA Profesor:

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

LABORATORIO DE GEOQUÍMICA AMBIENTAL, LANGEM, INSTITUTO DE GEOLOGÍA, UNAM.

ASESOR DEL TEMA:

LUIS GERARDO MARTINEZ JARDINES

SUPERVISOR TÉCNICO:

JESSICA ANAID HERNANDEZ CANO

SUSTENTANTE:

ANGEL LEONARDO ALVIRDE MELÉNDEZ

Presentación en congresos

- Presentación oral del tema: “Propuesta de revalorización y posible recuperación de cobre en residuos mineros históricos y sedimentos del arroyo El barrilito, Cananea, Sonora”. En la Convención Nacional Geológica 2023, realizada los días DEL 23 AL 27 DE ABRIL de 2023 en el Palacio de Minería, Facultad de Ingeniería, UNAM. Tacuba 5, Centro Histórico, CDMX.
- Por la presentación del trabajo: “Propuesta de revalorización y recuperación de elementos estratégicos y potencialmente valiosos en residuos mineros y sedimentos del arroyo El Barrilito y el río San Pedro en Cananea, Sonora”, en la Primera Reunión de Estudiantes del Instituto de Geología, realizada los días 16 y 17 de mayo de 2023 en el auditorio Tlayótl, Cd. Universitaria, CDMX.
- Por su participación con el Trabajo Técnico: “Propuesta de revalorización y posible recuperación de cobre en residuos mineros históricos y sedimentos del arroyo El barrilito, Cananea, Sonora”, Presentado en el marco de la XXXV Convención Internacional de Minería, realizada en los días del 23 al 27 de octubre de Acapulco, Guerrero.
- Por la presentación de la conferencia: “Propuesta de revalorización y posible recuperación de cobre en residuos mineros históricos y sedimentos del arroyo El barrilito, Cananea, Sonora”, Presentado en el marco de la XXXV Convención Internacional de Minería, realizada en los días del 23 al 27 de octubre de Acapulco, Guerrero.

Agradecimientos

“Si el camino que he demostrado que conduce aquí, parece sumamente difícil, puede, no obstante, ser hallado. Difícil sin duda tiene que ser lo que tan rara vez se halla» Pues, ¿cómo podría suceder que, si la salvación estuviera al alcance de la mano y pudiera ser encontrada sin gran esfuerzo, fuera por casi todos despreciada? Pero todo lo excelso es tan difícil como raro”

- Spinoza

Quiero agradecer a mi tutor el Dr. Luis Gerardo Martínez Jardines por su guía durante el desarrollo de este trabajo y al Dr. Francisco Martín Romero cuyas ideas enriquecieron este trabajo.

A la Técnica analista la Q. Jessica Anaid Hernández Cano que fungió como Supervisor Técnico de este trabajo, le agradezco por compartir su experiencia y orientación a lo largo de este trabajo.

Este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo económico brindado por el Instituto de Geología, al Laboratorio de Geoquímica Ambiental Aplicada por facilitar el uso de sus instalaciones para llevar a cabo los experimentos, por su ayuda, dedicación y amistad a las técnicas analistas: MCQ. Alicia Santana Silva, Q. Astrid Ameyalli Vázquez Salgado, IQM. Leticia Hernández Isabel, por sus aportaciones a IG. Etzigueri Góngora Úbeda y por los mapas a Erick Sánchez Mena y el MCT. Oscar Valdez Comparan.

Por último, pero no menos importante a mis padres y mi hermano por su apoyo incondicional durante toda mi vida.

ÍNDICE

<i>Portada</i>	1
<i>Índice de Figuras</i>	10
<i>Índice de Tablas</i>	12
<i>Nomenclatura y Abreviaciones</i>	15
1. <i>Resumen</i>	16
2. <i>Antecedentes Generales</i>	19
3. <i>Hipótesis</i>	21
4. <i>Objetivos</i>	21
<i>Objetivo General</i>	21
5. <i>Marco teórico</i>	22
5.1. <i>La Minería en México del siglo XIX a la actualidad</i>	22
5.2. <i>Antecedente histórico de la minería en Cananea y la generación de los pasivos ambientales</i>	23
5.3. <i>Estudios realizados en el arroyo El Barrilito y el Rio San Pedro</i>	25
5.4. <i>Procesos de extracción actual de Cobre en Cananea</i>	27
5.4.1. <i>Mineralización</i>	28
5.4.1.1. <i>Los pórfidos cupríferos de México</i>	28
5.4.2. <i>Flotación</i>	28
5.4.3. <i>Lixiviación</i>	30
5.4.3.1. <i>Factores importantes de la lixiviación</i>	33
5.4.3.2. <i>Permeabilidad</i>	35
5.4.3.3. <i>Reacciones químicas involucradas en la lixiviación de sulfuros de cobre</i>	35
5.4.4. <i>Extracción por Solventes</i>	36
5.4.4.1. <i>Química de la extracción por solventes</i>	36

5.4.4.2. Extracción	36
5.4.4.3. Despojo	37
5.4.5. Electro Obtención	38
5.5. Riesgos ecológicos de la minería.	39
5.5.1. Reutilización y Reciclaje de Residuos Mineros.....	40
5.5.2. Reciclaje de aguas y lodos de mina.....	40
5.6. Caracterización de la zona	41
5.6.1. Muestreo de la zona	43
6. Metodología.....	46
7. Equipos	47
7.1. Material y Reactivos.....	47
7.1.1. Material	47
7.1.2. Reactivos	48
7.2. Caracterización geoquímica	48
7.2.1. Preparación de muestras.....	49
7.2.2. Determinación de pH.	49
7.2.3. Determinación de Conductividad eléctrica.....	50
7.2.4. Determinación de la concentración soluble mediante la prueba de extracción de metales y metaloides con agua en equilibrio con CO ₂ determinada por espectroscopía de emisión óptica por plasma acoplado inductivamente.....	51
7.2.5. Concentración total determinada por espectroscopía de Fluorescencia de rayos X. ...	52
7.2.6. Identificación de minerales mediante difracción de rayos X	52
7.2.7. Determinación de la concentración total por espectroscopía de emisión óptica por plasma masas (ICP-MS) y análisis activación neutrónica NAA.....	53
7.3. Determinación de Área y Volumen	53
7.4. Lixiviación	54

7.4.1. Distribución de tamaño de partícula por tamizado	54
7.4.2. Densidad.....	54
7.4.3. Permeabilidad	55
7.4.4. Preparación de disoluciones.....	56
7.4.5. Lixiviación en Columnas.	56
8. Resultados	58
8.1. Caracterización geoquímica	58
8.2. pH y conductividad eléctrica.	59
8.3. Concentración total por FRX.....	61
8.4. Concentración soluble	64
8.5. Identificación de minerales mediante DRX	65
<i>Pasivo ambiental 1</i>	66
<i>Pasivo ambiental 2</i>	67
8.6. Determinación de la concentración total por ICP-MS y NAA	68
8.7. Determinación del área y volumen revalorizable	70
8.7.1. Determinación del volumen.....	73
8.8. Conclusión preliminar de la caracterización geoquímica	75
8.9. Extracción de cobre mediante lixiviación.	76
8.9.1. Permeabilidad.	76
8.9.2. Granulometría	76
8.9.3. Densidad.....	79
8.9.4. Determinación del Coeficiente de permeabilidad específica del mineral	80
8.9.5. Lixiviación en columnas	82
8.9.5.1. Extracción de elementos por lixiviación en columnas.	83
8.9.5.2. Extracción de cobre por lixiviación en columnas.....	84

8.9.5.3.	<i>Estimación de cobre.....</i>	84
8.9.5.4.	<i>Recuperación experimental.</i>	86
9.	<i>Discusión de resultados</i>	87
9.1.	<i>Caracterización geoquímica.</i>	87
9.1.1.	<i>Elementos de interés y posiblemente recuperables.....</i>	87
9.1.2.	<i>Determinación de área y volumen revalorizable.</i>	89
9.2.	<i>Permeabilidad y lixiviación.....</i>	92
9.3.	<i>Viabilidad de extracción de cobre mediante lixiviación.</i>	94
9.3.1.	<i>Análisis de costos de procesamiento de residuos y valor de la recuperación de cobre.</i> <i>94</i>	
9.3.2.	<i>Confinamiento de residuos.</i>	95
9.3.3.	<i>Balance de costos y ganancia</i>	98
10.	<i>Conclusiones.....</i>	99
	<i>Bibliografía</i>	100
	<i>Anexos.....</i>	108
	<i>Anexo A: Concentración total determinada por espectroscopía de Fluorescencia de rayos X.</i>	108
	<i>Suelo</i>	108
	<i>Sedimentos</i>	110
	<i>Pasivos ambientales.....</i>	118
	<i>Anexo B: Conductividad y pH</i>	124
	<i>Suelo</i>	124
	<i>Sedimentos</i>	124
	<i>Pasivos Ambientales</i>	126
	<i>Anexo C: concentración soluble mediante la prueba de extracción de metales y metaloides con agua en equilibrio con CO₂.</i>	129

<i>Suelos</i>	129
<i>Sedimentos</i>	131
<i>Pasivos Ambientales</i>	135
Anexo D: Difracción de Rayos X.....	140
<i>Pasivos Ambientales</i>	140
<i>Sedimentos</i>	145

Índice de Figuras

Figura 1. Cuenca hidrológica del Rio San Pedro	20
Figura 2. Concentradoras de The Cananea Consolidated Copper Company (Moreno Martínez, 2021)	25
Figura 3. Diagrama de Pourbaix Cu-Fe-S elaborado con el software HCS6.0	32
Figura 4. Circuito de Extracción por solventes adaptado de (Jergensen II., 2009).	38
Figura 5. Aluvión El Barrilito elaborado con Qgis 3.28.2	43
Figura 6. Distribución de muestras en la cuenca del Rio San Pedro elaborado con Qgis 3.28.244	
Figura 7. Pasivos ambientales del sistema fluvial El Barrilito elaborado con Qgis 3.28.2.....	45
Figura 8. Estructura de la columna de lixiviación.	55
Figura 9. Estructura de la columna para permeabilidad y lixiviación.....	55
Figura 10. Diagrama del sistema de riego de columnas para lixiviar	57
Figura 11. Distribución de muestras en el área de estudio el sistema fluvial El Barrilito elaborado con Qgis 3.28.2.....	58
Figura 12. pH en los pasivos ambientales y el sistema fluvial El Barrilito elaborado con Qgis 3.28.2	60
Figura 13. Conductividad eléctrica en los pasivos ambientales y sistema fluvial El Barrilito elaborado con Qgis 3.28.2.....	60
Figura 14. Concentraciones de los elementos más comúnmente explotados en el sistema fluvial El Barrilito (Laboratorio de Geoquímica Ambiental Aplicada, IGL, UNAM, 2020).....	63
Figura 15. Pasivos ambientales que repercuten en el sistema fluvial “El Barrilito”	64
Figura 16. Área revalorizable del sistema fluvial El Barrilito elaborado con Qgis 3.28.2.....	71
Figura 17. Área revalorizable en el pasivo ambiental 1 elaborado con Qgis 3.28.2.....	72
Figura 18. Área posiblemente revalorizables de Pasivo Ambiental 2 elaborado con Qgis 3.28.272	
Figura 19. Gráfica de la concentración de cobre en las zanjas en los sedimentos del sistema fluvial El Barrilito y el Río San Pedro.....	73
Figura 20. Gráfico de concentración vs profundidad de la zanja en los Pasivos ambientales 1.74	
Figura 21. Gráfico de concentración vs profundidad de las muestras del Pasivo ambiental 2... 75	
Figura 22. Distribución granulométrica de la muestra del Pasivo ambiental 2 (PA2-01).....	77
Figura 23. Distribución granulométrica de la muestra del Pasivo ambiental 1 (PA1-01).....	77
Figura 24 Distribución granulométrica de las muestras del Pasivo ambiental 1 (PA1-05)	78

Figura 25. Distribución granulométrica de las muestras del Pasivo ambiental 1 (PA1-02).....	78
Figura 26 Distribución granulométrica de las muestras del Pasivo ambiental 1 (PA1-03).....	78
Figura 27. Distribución granulométrica de las muestras del Pasivo ambiental 1 (PA1-04).....	78
Figura 28. Distribución granulométrica de los sedimentos.....	79
Figura 29. Sistema de lixiviación en columnas con solución preñada de distintas coloraciones respecto a la muestra.....	82
Figura 30. Recuperación mediante lixiviación de Pb, Zn, Cu y Fe.....	83
Figura 31. Gráfico comparativo de concentración de cobre antes y después de la lixiviación en columna.	84
Figura 32. Mapa de la cuenca del Río San Pedro, la zona naranja señala el área afectada por el arrastre de los pasivos ambientales elaborado con Qgis 3.28.2.....	89
Figura 33. Área revalorizable del arroyo El Barrilito elaborado con Qgis 3.28.2.....	90
Figura 34. Área revalorizable en los pasivos ambientales elaborado con Qgis 3.28.2.	91
Figura 35. Concentración de cobre inicial y concentración de cobre después de la lixiviación..	93

Índice de Tablas

Tabla 1. Elementos y especies obtenibles mediante Flotación (SALAGER & FORGIARINI de GUEDEZ, 2003).....	29
Tabla 2. Medios lixiviantes.....	30
Tabla 3. Minerales lixiviables y su cinética (SOTO, 2014).....	33
Tabla 4. pH y Conductividad Eléctrica por matriz.....	59
Tabla 5. Concentración de elementos de interés por matriz en el arroyo El Barrilito (Laboratorio de Geoquímica Ambiental Aplicada, IGL, UNAM, 2020).....	61
Tabla 6. Elementos potencialmente revalorizables por matriz del arroyo El Barrilito.....	61
Tabla 7. Resumen de concentración soluble de Pb, Zn y Fe en el arroyo El Barrilito por matriz de muestra.....	65
Tabla 8. Concentración soluble de Cu y Mo en el arroyo El Barrilito por matriz.....	65
Tabla 9. Minerales identificados en la muestra PA1-01 (0-25).....	66
Tabla 10. Minerales identificados en la muestra PA1-01 (150-200).....	66
Tabla 11. Minerales identificados en la muestra PA2- 02 (0-25).....	67
Tabla 12. Minerales identificados en la muestra ZSED-01 (0-25).....	67
Tabla 13. Promedio de elementos potencialmente revalorizables y su ley de corte.....	68
Tabla 14. Concentración de Óxidos de tierras Raras Ligeras (LREO).....	69
<i>Tabla 15. Concentración de óxidos de Tierras Raras Pesadas más óxido de Itrio.....</i>	<i>69</i>
Tabla 16. Concentración de Óxidos de tierras Raras Ligeras (LREO), Concentración de óxidos de Tierras Raras Pesadas más óxido de Itrio (HREO + Y ₂ O ₃) y Tierras raras totales más óxido de itrio (TREO).....	69
Tabla 17. Densidad calculada de las muestras.....	79
Tabla 18. Coeficiente de permeabilidad específica de mineral para el Pasivo ambiental 2 (PA2-01), (PA2-02), el Pasivo ambiental 1 (PA1-01), (PA1-02), (PA1-03), (PA1-04), (PA1-05), y Sedimentos del arroyo El Barrilito.....	81
Tabla 19. Valores típicos de permeabilidad para diferentes texturas de suelo.....	81
Tabla 20. Estimación de contenido de cobre y Valor estimado en las zonas estudiadas.....	85
<i>Tabla 21. Cálculo del valor de cobre basado en el rendimiento obtenido mediante la experimentación.....</i>	<i>86</i>
Tabla 22. Resumen de elementos valiosos en la zona.....	88

Tabla 23. Balance de costos vs valor del cobre extraíble	94
Tabla 24. Costo de confinamiento de residuos peligrosos.....	97
Tabla 25. Comparación de costos de procesamiento contra los costos de confinamiento.	98
Tabla 28. Concentración Total FRX Suelo.....	108
Tabla 29. Concentración Total FRX Sedimentos.....	110
Tabla 30. Concentración Total FRX de los Pasivos ambientales.....	118
Tabla 31. pH y Conductividad eléctrica en suelos	124
Tabla 32. pH y Conductividad eléctrica en sedimentos	124
Tabla 33. pH y Conductividad eléctrica en los Pasivos ambientales	126
Tabla 34. Concentración soluble de elementos en suelos	129
Tabla 35. Concentración de elementos solubles en los sedimentos del arroyo El Barrilito.....	131
Tabla 36. Concentración de elementos solubles en los pasivos ambientales.....	135
Tabla 37. Minerales identificados en la muestra PAS-06.....	140
Tabla 38. Minerales identificados en la muestra PAS-07.....	140
Tabla 39. Minerales identificados en la muestra PA1-01(0-25).....	141
Tabla 40. Minerales identificados en la muestra PA1-01(100-150).....	141
Tabla 41. Minerales identificados en la muestra PA1-01(50-200).....	142
Tabla 42. Minerales identificados en la muestra PA1-05(0-25).....	142
Tabla 43. Minerales identificados en la muestra PA1-05(50-100).....	143
Tabla 44. Minerales identificados en la muestra PA2-02(0-25).....	143
Tabla 45. Minerales identificados en la muestra PA2-02(50-100).....	144
Tabla 46. Minerales identificados en la muestra PA2-02(150-200).....	144
Tabla 47. Minerales identificados en la muestra ZSED-01(0-25).....	145
Tabla 48. Minerales identificados en la muestra ZSED-01(100-150).....	145
Tabla 49. Minerales identificados en la muestra ZSED-02(0-25).....	146
Tabla 50. Minerales identificados en la muestra ZSED-02(100-150).....	146
Tabla 51. Minerales identificados en la muestra ZSED-05(0-25).....	147
Tabla 52. Minerales identificados en la muestra ZSED-05(75-100).....	147
Tabla 53. Minerales identificados en la muestra ZSED-07(0-25).....	148
Tabla 54. Minerales identificados en la muestra ZSED-07(150-200).....	148
Tabla 55. Minerales identificados en la muestra ZSED-09(0-25).....	149

Tabla 56. Minerales identificados en la muestra ZSED-09(100-130)..... 149

Tabla 57. Minerales identificados en la muestra SEDTB-01D 150

Tabla 58. Minerales identificados en la muestra SEDTB-2.5B..... 150

Tabla 59. Minerales identificados en la muestra SEDTB-04B..... 151

Tabla 60. Minerales identificados en la muestra SEDTB-07D 151

Tabla 61. Minerales identificados en la muestra SEDTB-10C 152

Tabla 62. Minerales identificados en la muestra SEDTB-12A..... 152

Tabla 63. Minerales identificados en la muestra SEDTB-14D 153

Tabla 64. Minerales identificados en la muestra SEDTRSP-01C 153

Tabla 65. Minerales identificados en la muestra SEDTRSP-02E..... 154

Tabla 66. Minerales identificados en la muestra SEDTRSP-03B..... 154

Tabla 67. Minerales identificados en la muestra SEDTRSP-05D 155

Nomenclatura y Abreviaciones

Cu^{2+} : Ion cúprico

Fe^{3+} : Ion férrico

Fe^{2+} : Ion ferroso

Cl^- : Ion cloruro

g: Gramos

g/L: Gramos por litro

RPM: Revoluciones por minuto

T: Temperatura($^{\circ}C$)

t: Tiempo (s)

ac: Fase acuosa

org: Fase orgánica

h: altura de la fase acuosa

Extr(t): Extracción del metal a un tiempo (s)

Cet (%): Coeficiente de extracción a un tiempo (s)

mL: Mililitro

ppm: Partes por millón

%v/v: porcentaje en volumen

1. Resumen

El arroyo Barrilito es un cuerpo de agua intermitente, de unos 15 km de longitud, que nace en la sierra Mariquita, al norte de la Ciudad de Cananea y drena al río San Pedro. Este río se extiende hacia el norte hasta la frontera con Estados Unidos de América en el estado de Arizona.

Entre 1997 y 2011, varios autores han reportado que los sedimentos del arroyo Barrilito están contaminados con metales pesados; y que la principal fuente de contaminación son tres pequeños depósitos de residuos históricos que se generaron en el periodo comprendido entre 1909 y 1945; y que fueron abandonados sin controles ambientales. Estos residuos constituyen un pasivo ambiental y fueron generados durante la explotación de uno de los yacimientos de cobre más importantes de México y del mundo; que se localiza en el distrito de minero de Cananea, en Sonora, México.

Se puede asumir que durante la época en que se generaron estos residuos mineros (1909 – 1945), la eficiencia, en la recuperación de cobre, era limitada. Sin embargo, considerando los precios de los metales, en el mercado actual y los avances tecnológicos en la recuperación de este metal (flotación y lixiviación), es plausible plantear la hipótesis de que estos residuos mineros podrían contener concentraciones económicamente atractivas de cobre. En consecuencia, es posible que los sedimentos contaminados del sistema fluvial “El Barrilito” también contengan concentraciones económicas de cobre.

Por lo antes expuesto, se realizó una investigación con el fin de cuantificar la concentración total de cobre, y otros metales con posible valor económico, en los residuos mineros históricos del sitio y en los sedimentos del sistema fluvial “El Barrilito”; con el objetivo de valorar su potencial para la revalorización y alternativas para la recuperación del cobre y otros metales tales como el molibdeno y galio.

La primera etapa del estudio consistió en caracterización de muestras tanto de pasivos ambientales como de sedimentos del arroyo Barrilito. Esta se llevó a cabo mediante los análisis de concentración total por Fluorescencia de Rayos X (FRX), determinación de la concentración soluble mediante la prueba de extracción de metales y metaloides con agua en equilibrio con CO₂ y determinada por el método de espectroscopía de emisión óptica por plasma acoplado inductivamente (ICP-OES). Complementariamente se midió el pH y la Conductividad Eléctrica (C.E.). Producto de estos análisis se generaron mapas que se complementaron con imágenes satelitales, curvas de nivel, líneas de

flujo de agua de cuencas hidrológicas del INEGI y la memoria fotográfica del muestreo. Los resultados de esta investigación indican concentraciones totales relativamente altas de Cu (52.34 – 11,462.58 mg/kg), Zn (31.77 – 1,463.26), Pb(40.24 – 4,700.10 mg/kg) y Mo(7.50 – 1,105.95 mg/kg), tanto en los pasivos ambientales como en los sedimentos del sistema fluvial “El Barrilito”, en una superficie de 217 hectáreas y entre 1.0 y 2.0 m de profundidad en un volumen aproximado de 803,746 m³. Además de los pasivos ambientales diseminados en el arroyo se tomó en cuenta las 2 antiguas presas de colas, sumadas estas dos zonas con el área del arroyo el área corresponde a 243 hectáreas, en un volumen aproximado de 930,211.15 m³.

Con esta determinación del área y volumen se evaluó la posibilidad de revalorizar los residuos por lo que se realizaron estudios adicionales de determinación de la concentración total por el método de espectroscopía de emisión óptica por plasma masas y concentración total por el método de INAA con el que se determinó que las concentraciones totales de cobre varían entre 52.34 y mayor a 10,000 mg/kg; que están dentro del intervalo de la ley corte, que actualmente se utiliza en la zona de estudio.

Se realizó una propuesta experimental de extracción la cual consiste en lixiviación en columnas. Se utilizaron columnas acrílico de 5 cm de diámetro por 15 cm de altura, filtros de papel, una capa de arena sílica y material grueso (50% volumen de arena sílica mayor a 2 mm)

Para estimar la recuperación del total de Cu se realizó una extracción en columnas con una solución de H₂SO₄ al 5% V/V, 1 g/L Fe²⁺ y Fe³⁺ durante 6 días. Se obtuvo una recuperación, de este metal, entre el 49% y 64% del cobre total.

Como parte del estudio se elaboró una proyección del valor económico recuperable basado en la eficiencia de proyectos mineros de la zona, el cobre contenido en las zonas de interés y los costos de reprocesamiento en lixiviación en terreros, extracción por solventes y electrorefinación. Como resultado de este balance se obtendría una ganancia bruta de \$ 1,066,534.54 dólares para la revalorización de los pasivos ambientales y en los sedimentos se tiene una pérdida de \$7,005,231.3 dólares principalmente por el bajo rendimiento de lixiviación en los sedimentos.

Finalmente, se realizó una comparación de costos de integrar al proceso para revalorizar contra enviar estos pasivos ambientales a un confinamiento localizado en Chihuahua, dando como resultado que el reprocesamiento representa menos del 7.34% de los costos de confinamiento.

Los resultados de este estudio indican que la recuperación de cobre, de los pasivos ambientales y sedimentos contaminados del sistema fluvial “El Barrilito”, podría ser una opción viable para obtener los recursos económicos con el fin de realizar la remediación ambiental de este sitio contaminado por actividades mineras realizadas en el pasado, entre 1909 y 1945.

2. Antecedentes Generales.

En la porción norte del estado de Sonora, se encuentra el municipio de Cananea, este municipio es conocido ampliamente por sus actividades mineras. Se caracteriza por ser un depósito de gran volumen, pero baja ley, el cual cubre una superficie de aproximadamente 30 kilómetros cuadrados, conteniendo minerales de bornita (Cu_5FeS_4), calcopirita (CuFeS_2) y molibdenita (MoS_2), entre otros. Los registros históricos señalan que en los primeros años del siglo XX la zona era explotada por diversos proyectos siendo el más notable The Cananea Consolidated Copper Company, cuya producción de 1900 a 1905 fue de 39,269 toneladas métricas de Cobre, representando el 70% del total de la producción de cobre en México durante esos años (Moreno Martínez, 2021). El proceso de beneficio de mineral consistía en la trituración, molienda y concentración gravimétrica usando dispositivos como la mesa Wilfley y Frue Vanners, los minerales ganga eran desalojados y acumulados en dos presas, después el concentrado era enviado a fundición para la producción de cobre blíster. Las presas de mineral ganga siguieron en operación hasta 1945 sin control ambiental lo que los convirtió en los pasivos ambientales que impactan el arroyo de Cananea vieja y el arroyo El Barrilito.

Al Noreste de la Heroica Ciudad de Cananea se encuentra sistema fluvial El Barrilito, este arroyo tiene la característica de que es alimentado por riachuelos que pasan a través de los pasivos ambientales, arrastrando estos residuos mineros los que contienen diferentes elementos.

Este sistema fluvial es un afluente del sistema lacustre fronterizo denominado Río San Pedro, el cual abarca los municipios de Cananea, Santa Cruz y Naco, alimenta zonas con agricultura y atraviesa la frontera hacia Estados Unidos para ser específicos con Arizona (Figura 1).

La calidad del agua de este sistema representa un problema binacional, que a pesar de su importancia se ha dejado por varios años pendiente. Se han reportado niveles y efectos potenciales de metales en peces y vida silvestre en el Río Gila (Kirke A. King, 1997).

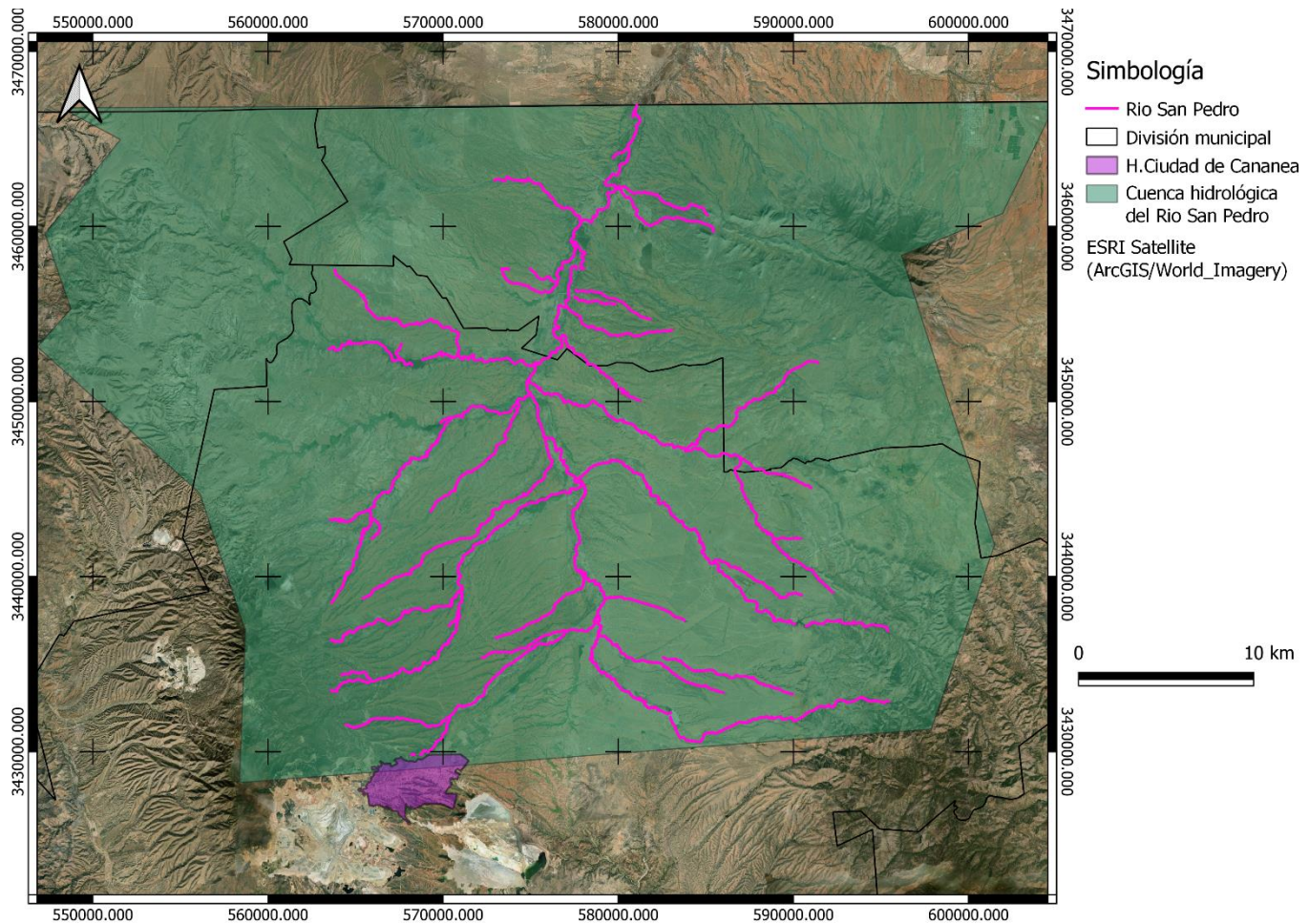


Figura 1. Cuenca hidrológica del Rio San Pedro

Basado en la investigación de (Moreno, s.f.) que menciona la operación de la concentradora para la molienda durante los primeros años del siglo XX bajo la minera Anaconda Copper Company, cuyos residuos se almacenaron en tres presas cuyas aguas fluían hacia el Rio San Pedro, estas presas estuvieron activas hasta el cierre de la concentradora en 1945. Con base en el periodo histórico se puede inferir que los residuos presentes en estos pasivos ambientales puedan tener contenidos económicamente rentables ya que la tecnología actual permite una extracción de material con menor ley.

Desde 1945 las presas han estado latentes como un pasivo ambiental drenando continuamente material hacia el sistema fluvial El Barrilito y el Rio San Pedro. No fue hasta la década de 1990 se comenzaron a realizar estudios de la zona, los cuales han continuado por diferentes autores e instituciones de gobierno, evaluando la contaminación de la zona, en todos los estudios realizados

se ha destacado el bajo pH, alta conductividad eléctrica, presencia de sulfatos, metales pesados y otros elementos que podrían ser de interés para este trabajo.

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LEEGEPA, 2022), establece lo referente a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección al ambiente, en el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción. Establece como una de sus prioridades la revaloración de residuos como opción de tratamiento (Cap. III, Art 108 y Cap. IV, Art. 134).

Es con este antecedente que se propone para este trabajo realizar una caracterización geoquímica de la zona que incluya: la fuente de contaminación, es decir, los pasivos ambientales; sedimentos del arroyo barrilito y transectos de suelo a lo largo del arroyo. Dicha caracterización permitirá determinar la posible existencia de elementos valiosos, que puedan ser revalorizados como opción de rehabilitación de la zona de estudio, además de experimentación integración al proceso de lixiviación.

3. Hipótesis.

Se tiene registro que existen elementos valiosos como el Cobre en los pasivos ambientales y en sistema fluvial El Barrilito. Mediante la caracterización de dichos residuos, así como las matrices ambientes impactadas, se podrán establecer procesos químico-metalúrgicos para recuperar elementos de interés potencialmente valiosos y con ello se establecerán propuestas de remediación de estos pasivos ambientales.

4. Objetivos.

4.1. Objetivo General.

Evaluar la factibilidad técnica y con una aproximación, económica de la recuperación de cobre en los pasivos ambientales como opción de tratamiento para remediar la zona de estudio.

4.2. Objetivos Particulares.

- Determinar la existencia de cobre en la zona de estudio.

- Determinar el área y volumen cuya concentración de cobre es revalorizable en el sistema fluvial El Barrilito.
- Desarrollar una propuesta de extracción del cobre presente los minerales en la zona de estudio.
- Estimar la capacidad de extracción/recuperación del cobre en la zona de estudio.
- Evaluar los costos de procesamiento de la extracción del cobre mediante el método propuesto.

5. Marco teórico.

5.1. *La Minería en México del siglo XIX a la actualidad.*

La minería es una actividad económica muy importante que ha estado presente en el desarrollo de México desde anterior al periodo prehispánico hasta nuestros días. La minería representa el 4.9% del PIB del país (INEGI, 2021). La minería industrializada se generó a partir de la última década del siglo XIX y principios del siglo XX. La demanda mundial de cobre, hierro, carbón y plomo diversificó la producción nacional e impulsó la creación de grandes refinadoras. La producción de metales preciosos se elevó favorecida por las nuevas técnicas de extracción y beneficio aplicadas a los minerales industriales. En el norte de Sonora la extracción de algunos metales tales como el cobre y plomo. se remonta a principios del siglo XX, la explotación de los yacimientos de cobre por empresas como el Boleo y la Cananea Company durante el porfiriato, que desarrolló el comercio y distribución del comercio regional del noroeste mexicano. Durante la Revolución mexicana, la producción minera sólo se vio afectada durante los primeros años: Esta situación se recuperó después de 1916, como respuesta al aumento de los precios durante la Primera Guerra Mundial (1914-1918). Por otra parte, durante la Segunda Guerra Mundial, Estados Unidos fue el principal destino exportador de México. (Tello, 2008)

Después de la posguerra, la actividad industrial se incrementó entre 1958 y 1970, sin embargo, la minería en su totalidad no representó más del 20% de las exportaciones. Para 1959, sólo aportó 5% del PIB, aunque México era el primer productor de plata del mundo (Tello, 2008).

El gobierno mexicano estableció en 1961 un nuevo compromiso con las firmas transnacionales que en ese entonces operaban en el país. Ese compromiso se resume en una nueva fórmula de participación contenida en la llamada Ley de la Mexicanización de la Minería. Con la ley y su política

de mexicanización el gobierno pretendía activar la producción de insumos mineros para la economía del país. En cierta manera se invitaba a las transnacionales a compartir los beneficios de una expansión que no les significaba costos adicionales. Los años posteriores a la promulgación de la ley de mexicanización constituyen una fase de sostenido crecimiento. Intenso en las dos primeras décadas y lento y hasta accidentado durante los años ochenta. La década de los ochenta no fue una década perdida para la minería. Es cierto que los despidos se elevaron a cifras sólo vistas en la depresión de los años treinta y que se multiplicó el cierre de empresas, especialmente pequeñas y medianas, pero también es cierto que fue una década que cambió y fortaleció a la industria minera en un sentido y magnitud sin precedentes en su historia contemporánea (Sánchez, 1998)

Es hasta los primeros años del siglo XXI que la minería mexicana registró un notable resurgimiento, en particular la de metales preciosos, así como otros minerales: cobre, plomo y zinc, ya que son los principales productos mineros que México exporta al mundo. La extracción de oro fue el caso más emblemático al participar con 27.7% del valor de la producción minero-metalúrgica en 2019, cuando en la década de 1980 apenas representaba 3.8% del total nacional (Sánchez-Salazar y Casado, 2018).

5.2. Antecedente histórico de la minería en Cananea y la generación de los pasivos ambientales

A finales del siglo XIX existían diversas minas en Cananea como: “La Unión Mexicana”, “Juárez”, “Qué Esperanzas”, “La Elenita”, “La Alfredeña.”, “La Quintera.”, “San Ignacio”, “La Chivatera”, “El Ronquillo”, y “Cobre Grande”. Todas estas eran propiedad del general Pesqueira el cual fue el impulsor de uno de los últimos intentos exitosos de exploración en el mineral de Cananea. La producción era modesta por el empleo de maquinaria que era limitado. A su muerte las minas fueron divididas se dio un proceso de compra, arrendamiento, renta y traspasos de los derechos de explotación sobre este conjunto de minas entre los accionistas de la recién creada compañía The Cananea Copper Company en 1896.

Los archivos históricos que ha estudiado (Gonzalez, 2020) señala que durante los primeros años del 1900 la compañía The Cananea Consolidated Copper Company extraían mineral con una

concentración cercana al 10%. La mina Elisa extraía mineral con valores promedio de concentración cuprífera entre el 4% al 10%.

Los registros que documentó (Gonzalez, 2020) indican que el mineral era triturado y molido para pasar a un proceso de concentración gravimétrica de mineral sulfurado de cobre. La separación y concentración del mineral el cual era separado en distintos tamaños correspondería al tratamiento que recibirían en las máquinas. El mineral concentrado extraído de las rocas volvería a ser triturado para dirigirse a otro conjunto de máquinas con las adaptaciones necesarias para el procesamiento de mineral más fino. Estos minerales pasarían a las tostadoras denominadas como “Molinos Bryan”. La planta que contaba con la capacidad de tratar una cantidad no menor de 500 toneladas por día.

Una parte del mineral se enviaba a una serie de máquinas concentradoras descritas como “Mesas Wilfly”, las cuales estaban empleadas en el tratamiento de la parte más gruesa del material resultante del proceso de triturado. En el caso del tratamiento de minerales que alcanzaban un mayor grado de finesa, estos eran enviados a procesar en otro tipo de máquinas concentradoras, conocidas como “Frue Vanners”. Si bien los procesos de molienda eran necesarios para el tratamiento óptimo de los minerales, el empleo de éstos generaba una cantidad no descrita de polvos finos que no podrían ser aprovechados por ninguna maquinaria en de la época. Éstos polvos que no podían ser aprovechables y eran reconocidos por el proyecto industrial, el cual había sido propiamente ideado para que estos pudieran liberarse hacia los relaves sin contaminar la zona de trabajo o los procesos de refinamiento (Navarro, 2020).

Cuando entró en operación la primera planta concentradora para la molienda del mineral en 1902 establecida por The Cananea Consolidated Copper Company contaba con tres pequeñas presas de mineral ganga que operaron a partir de 1909, que tenían como propósito almacenar los residuos de la planta concentradora, recuperar una parte del cobre contenido en ellos y una parte del agua utilizada. Estas presas se situaban al norte de la planta, en donde las corrientes naturales de agua fluyen hacia el río San Pedro y cuya cuenca se comparte con Estados Unidos. En ese entonces, la planta molía 3,500 toneladas diarias (Moreno, s.f.).

Con el incremento de la producción de cobre y la generación de residuos, estas tres presas se unieron para formar una sola presa de mayores dimensiones y la denominaron Represo Sur, cuya cortina tuvo una altura inicial de 20 metros. Años después, la cortina se elevó a 45 metros y llegó a

tener una longitud de 450 metros. El área de este represo abarcó 32 hectáreas. Una segunda presa, denominada Represo Norte, se construyó en 1940 para captar las excedencias del Represo Sur. La altura fue de 15 metros y su longitud de 700 metros. Ambas obras fueron conocidas como los repesos de la Concentradora Vieja, que cerró definitivamente en 1945.

El cronista (Villa, 2023) describe los minerales ganga de la concentradora (Figura 2) propiedad de William Cornell Greene, instalada frente a los Campos Mineros. Ante la falta de mejores técnicas para rescatar todo el mineral de cobre, la arena que despedía el proceso se desechaba por las canoas para desalojar los minerales ganga y depositarlo en los repesos. Estos desechos iban a dar a la barranca entre el Cerro de la Cruz y la loma del cementerio de Buenavista, mismo que al dejar de usarse y secarse, sirvió para hacer el primer campo de béisbol en los Campos Mineros. Esta factoría desechaba el resto de los minerales ganga e iban a depositarse al terreno de Cananea Vieja para no contaminar el arroyo del Barrilito, puesto que estas aguas iban a dar igual que hoy en día, al Río San Pedro y de ahí a los Estados Unidos.



Figura 2. Concentradoras de The Cananea Consolidated Copper Company (Moreno Martínez, 2021)

5.3. Estudios realizados en el sistema fluvial El Barrilito y el Río San Pedro.

Los minerales ganga de la concentradora sin control ambiental se convirtieron en un pasivo ambiental cuyo impacto no fue evaluado hasta la década de 1990 que se comenzaron los estudios de la zona; uno de ellos (Gómez Álvarez, Villalba Atondo, Acosta Ruíz, & Castañeda Olivares, 2002)

realizó muestreos en 8 zonas las cuales son: Terreros, Cananea Vieja, Arroyo Cananea Vieja, El Barrilito, El Riecito, Ejido José Ma. Morelos (Río), San Pedro Palominas y Los Corrales. Los resultados obtenidos en la investigación indican la presencia de valores elevados de metales pesados (Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn), conductividad eléctrica y sulfatos; así como valores bajos de pH en ambas etapas del estudio en las estaciones de muestreo del río San Pedro más cercanas a la actividad minera de la región de Cananea, (específicamente al Depósito Concentradora Vieja). Por lo tanto, se describe en primer orden de importancia la explotación minera de la región como la principal fuente de contaminación del agua superficial del río San Pedro, aun cuando el Depósito Concentradora Vieja dejó de operar a partir de 1945. En segundo orden de importancia como fuente de contaminación de este río se consideran las descargas de aguas residuales (aguas negras sin tratamiento) provenientes de la ciudad de Cananea, Sonora.

En el estudio de GOMEZ-ALVARES (2009) se comparan las concentraciones de diversos elementos del muestreo en sedimentos y agua de 1993 contra el muestreo realizado en 2005, se ha demostrado que los valores de pH aumentaron de 2.9 (en 1993) hasta 3.9 (en 2005). La conductividad eléctrica disminuyó de 11000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (en 1993) hasta 1016 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (en 2005). Las concentraciones totales de los metales pesados también disminuyeron principalmente el cobre (Cu) disminuyó de 136 mg/L (1993) a 6.6 mg/L (2005) y el hierro (Fe) disminuyó de 3680 mg/L (1993) a 9.51 mg/L (2005) además el zinc (Zn) disminuyó de 84 mg/L (1993) a 2.42 mg/L (2005). La disminución de concentración en los diferentes elementos se ha teorizado que es producto de mecanismos como precipitación, sorción, dilución aunado a que algunos metales como el hierro son fuertemente afectados por el pH y el potencial redox. La oxidación de hierro ferroso a hierro férrico provoca la precipitación de óxidos e hidróxidos de Fe junto con la precipitación de otros metales. Esto podría explicar la disminución en el contenido de Fe en el agua y también la disminución del Cd, Cu, Pb y Zn después de la precipitación de Fe en las aguas superficiales del río San Pedro.

De la misma forma (Romero Acosta, 1996) evaluó la contaminación por metales pesados en agua y sedimento del río San Pedro y determinó valores altos de conductividad eléctrica, sulfatos y metales pesados. Como cadmio, cobre, hierro, manganeso, níquel y zinc, y valores bajos de pH y oxígeno disuelto. Además, un hecho importante en el Río San Pedro, fue que la corriente denominada Cananea Vieja se pierde en su totalidad sobre su cauce a escasos 10 km. Esto hace suponer que es posible que exista una contaminación en las zonas aledañas al río. Este antecedente

ha registrado concentraciones relevantes de cobre en los sedimentos del arroyo El Barrilito las cuales oscilan entre 2146.33 ppm en la zona más cercana a la concentradora vieja y 751 ppm en la zona más alejada del arroyo.

Se ha realizado también un esfuerzo internacional para monitorear este río transfronterizo tal como se publicó en el informe de la CILA (2011) del que podemos destacar que el único aprovechamiento que presenta concentraciones por arriba del LMP con respecto a la dureza total (CaCO_3) y a los sulfatos (SO_4) con respecto a la NOM -127-SSA1-1994, es un pozo ubicado en la zona El Barrilito en la porción sur del acuífero. Fuera de estos, el resto de los aprovechamientos que se muestrearon en el acuífero se encuentran en los límites permisibles de la Norma.

Con respecto a las aguas subterráneas en el estudio de PÉREZ-VILLABA (2013) se declara que el agua subterránea del Río San Pedro es de buena calidad y los pozos no exceden los límites máximos permisibles por la norma oficial NOM-127-SSA-1994 y nuevamente se señala que la mayor concentración de metales pesados como Cu, Zn, Fe y Mn se encuentra en el arroyo de cananea vieja y en el arroyo “El Barrilito”.

5.4. *Procesos de extracción actual de Cobre en Cananea.*

Los procesos de beneficio de minerales dependen de la concentración de cobre en el mineral, el promedio de ley de corte en el distrito minero de Cananea para lixiviación se encuentra entre 0.1% a 0.29%, en cuanto a la concentración si es mayor a 0.30 % se extrae mediante un proceso de flotación. El informe anual de la transnacional Southern Copper Corporation (2022) indica que el mineral cuya concentración de cobre es mayor de 0.15% se apila en terreros para lixiviar, el mineral flotado concentrado es enviado a la planta de fundición mientras que la solución preñada de la lixiviación es enviada a la planta extracción por solventes, posteriormente la solución orgánica cargada se despoja del cobre usando ácido sulfúrico el cual se envía a una plantas de electro obtención para obtener cátodos de cobre de alta pureza.

A continuación, se detallan los procesos existentes para comprender mejor las características del mineral, el proceso minero metalúrgico, así como los residuos generados ya que el cuerpo de esta tesis está basado en el aprovechamiento de estos residuos.

5.4.1. Mineralización

“La abundante actividad magmática ocurrida durante el fin del Mesozoico y el inicio del Cenozoico a lo largo de la cordillera oeste de Norte América, produjo el emplazamiento de numerosos centros de mineralización de tipo pórfido de cobre. Esta actividad se extendió también junto a las regiones aledañas de Arizona y Nuevo México, en el suroeste de los Estados Unidos, constituye uno de los centros con mineralización de cobre más importante en el mundo, que puede competir en tamaño con los famosos de la cordillera oeste de sur de América. La mineralización de sulfuros de cobre está comúnmente acompañada por concentraciones localmente importantes de molibdeno, tungsteno y oro. La distribución de estos metales está aparentemente asociada a cambios regionales en el tipo de basamento en el cual emplazó la mineralización” (Martín Valencia-Moreno, 2006)

5.4.1.1. Los pórfidos cupríferos de México

“Los sistemas de pórfido de cobre en México, incluyendo algunos depósitos asociados particularmente de tipo skarn y brechas hidrotermales, aparecen en un cinturón orientado NE-SO expuesto a lo largo de toda la porción occidental del país. En general, se reconocen unos 60 depósitos de los cuales cerca del 70% se localizan en la porción noroeste de México, particularmente en los estados de Sonora y Sinaloa, que forma la parte más importante del cinturón. Entre las localidades más destacadas están Cananea y La Caridad en el noreste de Sonora, considerados depósitos de gran relevancia a escala mundial. Junto con los grandes depósitos del sur de Arizona y el oeste de Nuevo México, en el suroeste de los Estados Unidos, los pórfidos de cobre del noroeste de México constituyen una de las provincias cupríferas más relevantes de la Tierra” (Titley, 1993).

5.4.2. Flotación.

La técnica de flotación se emplea extensamente en el procesamiento de minerales y en otros procedimientos de separación. Este método implica una serie de fenómenos, entre los cuales

destaca uno de crucial relevancia para los resultados obtenidos: la modificación hidrofóbica de una superficie mediante la adsorción de agentes surfactantes.

“La flotación por aire disuelto, que consiste en producir burbujas muy pequeñas por expansión de una solución acuosa saturada de aire bajo presión, durante la expansión se forman burbujas de tamaño del orden de la micra, las cuales son capaces de colectar partículas coloidales. Los minerales que pueden ser separados por el proceso de flotación” (Salager & Forgiani de Guedez, 2003) se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Elementos y especies obtenibles mediante Flotación (Salager & Forgiani de Guedez, 2003).

Elementos:	Oro, Azufre, Carbono (grafito, diamante)
Sulfuros:	Galena PbS , esfalerita ZnS , pirita FeS , molibdenita MoS_2 , cinabrio HgS , Estibina Sb_2S_3 , Calcopirita $CuFeS_2$, Arsenopirita (As, Fe, Au) Pitchblenda (U)
Óxidos:	Hematita Fe_2O_3 , magnetita Fe_3O_4 , cositerita SnO_2 , rutilo TiO_2 , corindón Al_2O_3 , sílica, cuartzita SiO_2 , Ilmenita $FeTiO_3$, cromita $FeCr_2O_4$, espinela $MgAl_2O_4$.
Silicatos:	Zircón $ZnSiO_4$, zeolitas, Berilo $Be_3Al_2(Si_6O_{18})$, micas, talco $Mg_6(Si_8O_{20})(OH)_4$, Caolín, arcillas $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$
Sales:	Silvinita KCl , calcita $CaCO_3$, fluorita CaF_2 , apatita $Ca_5F(PO_4)_3$, iodirita AgI

5.4.3. Lixiviación.

En la hidrometalurgia el proceso más importante es la lixiviación, en la cual el compuesto que contiene el metal deseado se disuelve de modo selectivo. Si el compuesto es soluble en agua, el agua misma es un agente de lixiviación idóneo. Es más común que el agente sea una disolución acuosa, de un ácido, base o sal (Brown, 2011).

Los procesos de lixiviación se pueden clasificar de acuerdo al medio lixivante utilizado. Los más utilizados son: sulfato, cloro, nitrato y amonio. El ácido sulfúrico en conjunto con otros agentes oxidantes, tales como, el oxígeno y el ion férrico han recibido gran atención debido principalmente a su bajo costo, mínimos problemas de corrosión y a la posibilidad de regenerar el ácido sulfúrico en la etapa de electro-obtención. A continuación, se describen los medios lixiviantes más utilizados y sus principales características (Tabla 2.) (Soto, 2014)

Tabla 2. Medios lixiviantes. (Soto, 2014)

Medio lixivante	Características
Sulfato	<p><i>Altos rendimientos de azufre</i></p> <p><i>Recuperación de metales preciosos desde residuos</i></p> <p><i>Se puede aplicar electro-obtención</i></p> <p><i>Fácil recuperación de metales asociados.</i></p>
Cloro	<p><i>Altos rendimientos de azufre</i></p> <p><i>Posibilidad de recuperar metales preciosos</i></p> <p><i>Electro-obtención muy compleja</i></p> <p><i>Alta corrosión</i></p>
Nitrato	<p><i>Bajos rendimientos de azufre</i></p> <p><i>Baja recuperación de metales preciosos</i></p> <p><i>Materiales convencionales de construcción</i></p>
Amonio	<p><i>Azufre se convierte en sulfato</i></p> <p><i>Dificultad para recuperar metales preciosos</i></p> <p><i>Materiales convencionales de construcción</i></p> <p><i>Posible reducción de H₂</i></p>

El problema de lixiviar sulfuros de cobre es su refractariedad, el medio sulfato no es suficientemente agresivo para poder disolver estos minerales, por lo que se suele utilizar agentes oxidantes adicionales, tales como oxígeno o el ion férrico, primordialmente una mezcla de estos (Mellardo, 2018).

La lixiviación de minerales de cobre, que consiste en una disolución de los compuestos de cobre en soluciones ácidas, es un proceso hidrometalúrgico bastante antiguo que se aplicaba originalmente a minerales oxidados. El incentivo para desarrollar los procesos hidrometalúrgicos provenía del hecho que los minerales oxidados de cobre de baja ley no eran susceptibles de ser concentrados por la operación convencional de flotación. Actualmente existe el incentivo adicional de evitar por esta vía la contaminación ambiental causada por los procesos metalúrgicos convencionales basados en fundiciones (Beckel, 2000).

El proceso más comúnmente utilizado es la lixiviación en pilas o terreros, la tecnología de lixiviación en pilas se caracteriza por la mayor trituración a que se someten los minerales, seguida de un pretratamiento con ácido sulfúrico concentrado para su aglomeración y la posterior formación de pilas rectangulares del mineral pretratado. La solución ácida que se aporta mediante aspersion se enriquece de cobre durante la percolación de las pilas siendo recogida en el fondo para pasar a la próxima etapa del proceso (Beckel, 2000).

La solución PLS (pregnant leaching solution) debe ser concentrada y purificada en procesos de extracción por solventes, dando como producto una solución rica en cobre llamada electrolito de avance, la cual es finalmente llevada a naves electrolíticas de electroobtención. En este proceso se aplica una corriente eléctrica, permitiendo el movimiento de los iones de la solución y su posterior reducción en el cátodo, generando cátodos de cobre 99,99% de pureza. (Mellardo, 2018).

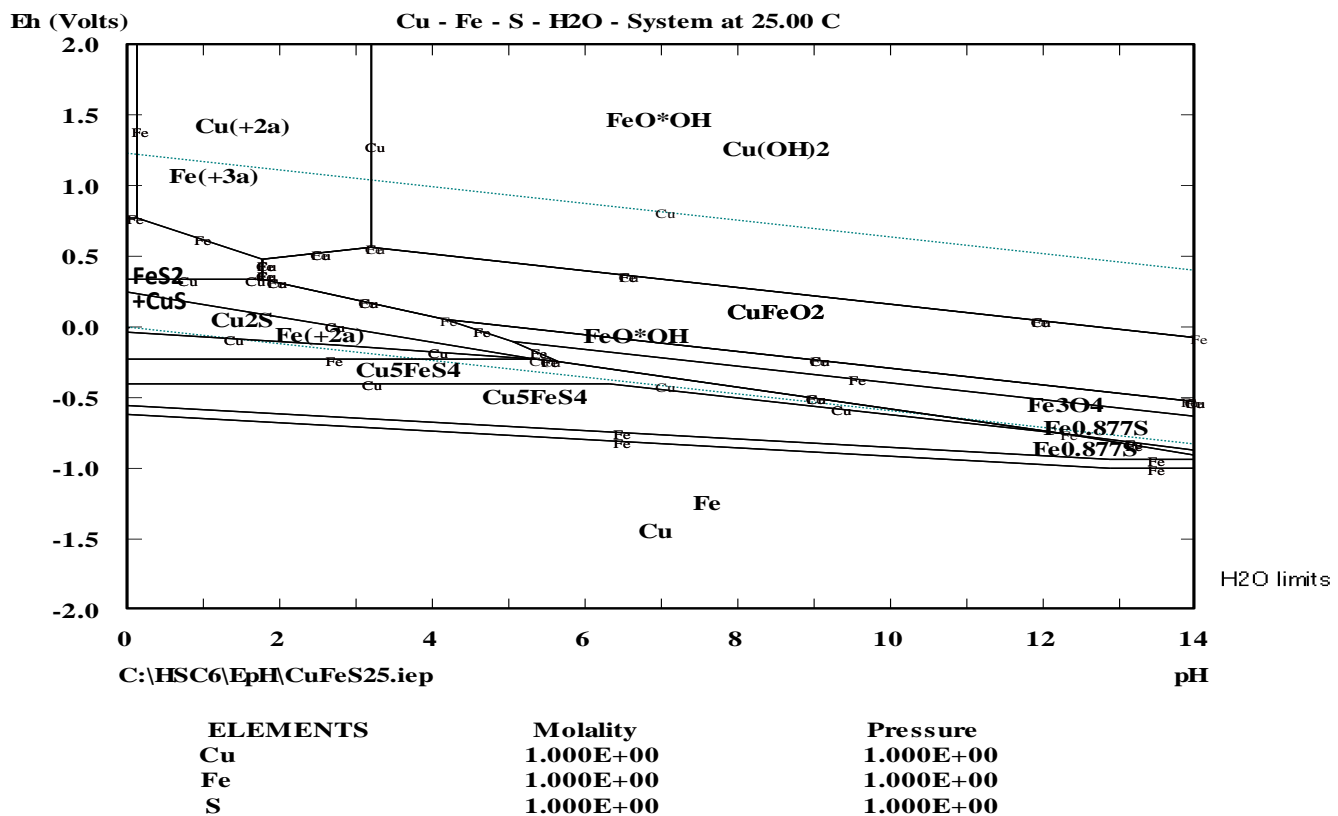


Figura 3. Diagrama de Pourbaix Cu-Fe-S elaborado con el software HCS6.0

En la figura 3 se muestra que la disolución de la calcopirita en medio ácido se produce mediante una transformación sólida en diferentes sulfuros intermedios (Cu_5FeS_4 , CuS , Cu_2S), cada vez más ricos en cobre. De acuerdo con este diagrama, se requiere de un pH inferior a 4 y un potencial redox oxidante superior a +0,5 V para disolver el cobre de la calcopirita. Estas condiciones se logran utilizando agentes oxidantes, siendo el más común el ion férrico como un sulfato o cloruro (E.M. Córdoba, 2008).

Dependiendo de las características y la ocurrencia del material valioso dentro del mineral (concentrado, mineral de alta ley o mineral de baja ley), y de sus características químicas y mineralógicas, (sulfuros, óxidos o mixtos) el proceso de lixiviación tiene una cinética determinada que definirá la forma en que el proceso se implementará a escala industrial. No todos los minerales poseen idéntica reactividad ante un proceso de lixiviación, es decir, no tienen la misma velocidad de disolución. La Tabla 3 muestra la cinética de disolución de las distintas especies minerales. El tiempo de lixiviación puede variar desde algunas semanas, en el caso de los minerales oxidados, hasta más de un año, para el caso de los sulfurados (Soto, 2014).

Tabla 3. Minerales lixiviables y su cinética (SOTO, 2014)

Especies Minerales de Cu	Cinética Relativa	Tiempo de referencia
Carbonatos (malaquita, azurita), sulfatos y cloruros	Muy rápida (a temperatura ambiente)	Segundos – minutos (disolución completa)
Óxidos Cúpricos (tenorita), Silicatos	Rápida (requiere medio ácido)	Horas (disolución completa)
Cobre nativo, óxidos complejos y óxidos cuprosos (cuprita)	Moderada (requiere oxidante)	Días - Semanas (disolución puede no ser completa)
Sulfuros simples (covelita, calcosita)	Lenta (requiere oxidante)	Semanas – Meses (disolución puede no ser completa)
Sulfuros complejos (Calcopirita)	Muy lenta (requiere oxidante)	Años (disolución incompleta)

5.4.3.1. Factores importantes de la lixiviación

Entre las variables más importantes que afectan directamente el proceso de lixiviación se encuentran los siguientes (Miller G., 1999):

5.4.3.1.1. Granulometría:

La cinética de lixiviación es mejor mientras más fino es el mineral; sin embargo, otras condiciones como la permeabilidad y la aireación se ven favorecidas cuando el mineral es más grueso. El tamaño óptimo debe obedecer una relación entre estos factores y el costo de la etapa de molienda. Para la lixiviación en pilas, la granulometría es normalmente de media a gruesa, con un tamaño máximo de 3/2" a 3/4".

5.4.3.1.2. **Tasa de riego:**

Esta tasa debe ser óptima y debe cumplir con el aporte de ácido necesario para obtener altas concentraciones de cobre y un bajo contenido de impurezas en el PLS, considerando también una recuperación que debe ser económicamente rentable. Los valores de tasas de riego más comunes son entre 10 y 20 [l/h/m²].

5.4.3.1.3. **Concentración de ácido:**

Se debe cuidar que no exceda un límite, ya que no solo su consumo es un alto costo, sino que también puede disolver especies no deseadas (ganga, impurezas), pero si debe ser suficiente para poder extraer el cobre desde el sólido y transferirlo de manera soluble estable a la solución acuosa.

5.4.3.1.4. **Tiempo de lixiviación:**

Este factor es clave, ya que un tiempo de residencia óptimo del mineral en la pila puede ahorrar una parte importante en los costos. A menor tiempo de lixiviación, menor será el consumo de ácido. Aunque el tiempo deber ser tal que se alcance la recuperación deseada o de diseño. Este tiempo por lo general es de varias semanas, entre 45 y 60 días

5.4.3.1.5. **Altura de la pila:**

A menor altura, menor tiempo de lixiviación; sin embargo, los costos de apilamiento y de irrigación aumentan cuando la pila es de menor altura. Se debe buscar una altura óptima que satisfaga ambos criterios. Normalmente la está entre 6 y 8 m.

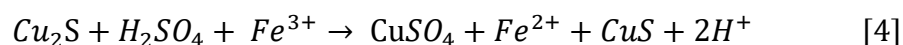
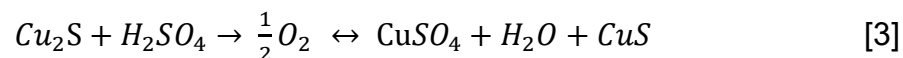
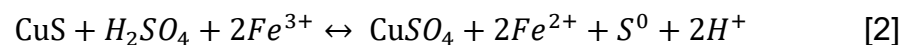
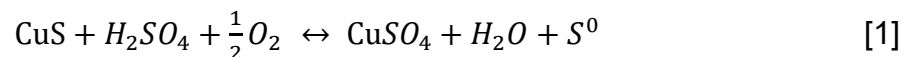
5.4.3.2. Permeabilidad

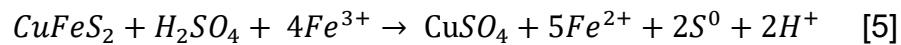
Se define como la capacidad que posee un material a la hora de que un fluido lo atraviese sin producir cambios en su estructura interna. Podemos observar un amplio rango de permeabilidades en los distintos materiales, pero podremos catalogarlos de una manera genérica en permeables, si lo atraviesa una cantidad de fluido apreciable en un tiempo dado o impermeable si esta es despreciable. La permeabilidad como tal, dependerá de los siguientes factores, tanto del propio terreno como del fluido:

- ❖ La granulometría, que es la distribución de los tamaños de los granos del suelo. A mayor tamaño de grano mayor permeabilidad.
- ❖ La densidad, de la misma forma que la granulometría, cuanto más denso sea un terreno, menos huecos y, por lo tanto, más difícil lo tendrá el fluido para atravesarlo y por consiguiente menos permeabilidad.
- ❖ La forma y la orientación de las partículas, ya que esta característica puede variar también con la dirección del flujo.
- ❖ El grado de saturación, que es la relación entre el volumen de agua y el de huecos en el propio terreno. A mayor saturación, mayor será la permeabilidad.
- ❖ También las características del propio fluido influirán en la permeabilidad. Estas son la viscosidad, influida por la temperatura o la presión a la que se encuentre sometido el mismo (Díaz, 2017).

5.4.3.3. Reacciones químicas involucradas en la lixiviación de sulfuros de cobre.

Las reacciones de lixiviación para la calcosita, covelita, calcopirita, oxidación de sulfatos ferrosos y sulfuro elemental (Soto, 2014)





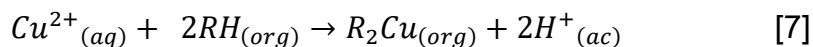
5.4.4. Extracción por Solventes.

La tecnología de extracción por solventes fue desarrollada en EE. UU. durante la Segunda Guerra Mundial para la obtención del uranio como parte del proyecto Manhattan. En los años posteriores la desclasificación de esta tecnología permitió estudiar su aplicación civil y, en particular, su uso en la hidrometalurgia del cobre (Buitelaar, 2001). La tecnología permite extraer en forma selectiva el ion cobre de las soluciones enriquecidas de lixiviación que también contienen numerosas impurezas, y transferirlo a continuación a un electrolito puro que es tratado en la etapa de electro obtención. De esta manera se evita la contaminación del electrolito con metales diferentes al cobre, impurezas que son disueltas simultáneamente en la fase de lixiviación y así se logra obtener cátodos de alta calidad (Beckel, 2000).

5.4.4.1. Química de la extracción por solventes.

Afortunadamente, la química básica para la extracción por solventes de cobre es resumido por una ecuación simple que necesita ser invertida dependiendo de si se describe la etapa de extracción o despojo (John R. Spence, 1999) .

5.4.4.2. Extracción



dónde:

$Cu^{2+}_{(aq)}$ es el cobre en la solución PLS.

$2RH_{(org)}$ es el extractante y orgánico descargado.

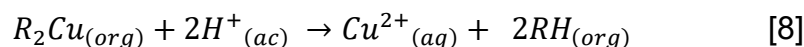
$R_2Cu_{(org)}$ es el complejo de cobre/extractante, es decir, orgánico cargado

$2H^+_{(ac)}$ es ácido en solución de refinado

La extracción de cobre ocurre cuando la solución de lixiviación preñada (PLS) que contiene cobre se mezcla con una solución orgánica depurada que contiene el extractante. El extractante libera sus protones y coordina con el cobre de la solución, aumenta el nivel de ácido y el cobre se transfiere a la orgánica fase como el complejo cobre/extractante (John R. Spence, 1999).

5.4.4.3. Despojo

La etapa de despojo para la extracción por solventes de cobre puede ser representada por:



Dónde:

$Cu^{2+}_{(aq)}$ es el cobre en la solución cargada.

$2RH_{(org)}$ es el extractante y orgánico descargado.

$R_2Cu_{(org)}$ es el complejo de cobre/extractante, es decir, orgánico cargado

$2H^+_{(ac)}$ es ácido en solución de refinado.

El despojo de cobre ocurre cuando una solución fuertemente ácida (por ejemplo, electrolito gastado a 180 g de ácido) se mezcla con el complejo de cobre orgánico cargado. El complejo libera su cobre y toma ácido de modo que el nivel de cobre en la solución acuosa (electrolito) aumenta y el nivel de ácido disminuye a medida que el cobre se transfiere fuera de la fase orgánica y es reemplazado por ácido (Jergensen II., 2009).

Basado en la combinación de extracción y despojo, un diagrama de flujo SX de cobre moderno típico constará de dos etapas de extracción y una sola etapa de despojo (Figura 4).

Después de pasar por dos procesos de extracción solución, aún contiene una cantidad residual de cobre y acidez por lo que es recirculada a la planta de lixiviación para riego de los montones. Esta solución es llamada refinada. (Jergensen II., 2009)

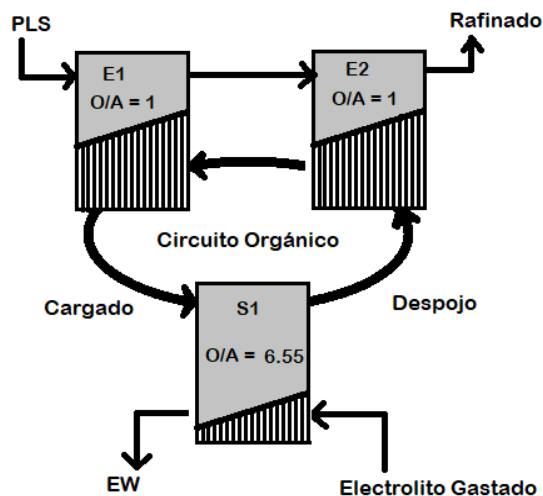


Figura 4. Circuito de Extracción por solventes adaptado de (Jergensen II., 2009).

5.4.5. Electro Obtención

La electro obtención, un proceso convencional, es similar a la electro-refinación. A diferencia de lo que sucede en esta última, en la electro obtención el ánodo es inerte, normalmente de una aleación de plomo, y el cobre se introduce mediante el electrolito. Este proceso se caracteriza por tener un consumo de energía eléctrica bastante más elevado que la electrorefinación. Antes del advenimiento de la extracción por solventes, la electro obtención era directa, es decir la misma solución enriquecida de lixiviación constituía el electrolito, lo que obligaba a someter los cátodos a una refinación para obtener un producto de calidad aceptable (Jergensen II., 2009).

La electro obtención de cobre (EW) utilizando ánodos de plomo inertes se instituyó desde el principio como un método de purificación de electrolitos de electrorefinación (ER). Estas llamadas células liberadoras siguen siendo la forma principal de purificación de electrolitos en muchas plantas hoy en día.

5.5. Riesgos ecológicos de la minería.

Para el trabajo presente la fuente que impacta el sistema fluvial El Barrilito es el pasivo ambiental producto de los antiguos minerales ganga residuo de las operaciones mineras de principios de siglo cuya disposición final fue colectada en 2 presas para evitar su diseminación en el arroyo. Cabe destacar que la regulación sobre la disposición de desechos bajo la NOM-052-SEMARNAT-93 en la que se señala que los residuos de los procesos mineros de extracción de cobre son considerados peligrosos fue implementada varias décadas después del cierre de las minas que generaron estos residuos.

La minería de metales genera cantidades considerables de residuos materiales generalmente tienen muy poco valor económico, por lo que su explotación no es rentable, aunque a menudo tienen el potencial representar una amenaza a largo plazo y causar daños al medio ambiente. Los desechos mineros varían dependiendo de sus características físicas y composición química, el tipo de minería y la forma en que el mineral es procesado. Millones de toneladas de mineral son procesadas cada año por la industria minera, >95% del cual se dispone en forma de rocas estériles y las colas. Estos últimos son roca finamente molida, las partículas generadas durante el procesamiento de materiales minerales y la separación de los minerales metálicos objetivo, y son altamente reactivos debido a su pequeño tamaño de partícula y contenido de minerales reactivos, tales como pirita (FeS_2). Las colas pueden contener metales básicos de transición, tales como hierro, cobre, níquel y zinc, en concentraciones relativamente altas, y también ocasionalmente metales preciosos como el oro y la plata, en minerales (y metales nativos) que no han sido separados por flotación de espuma (J. Alcalde, 2018).

A nivel mundial, las colas son producidas a un ritmo de entre cinco y catorce mil millones de toneladas por año; su almacenamiento en las cuencas de presas de colas representa un problema ambiental importante (Adiansyah. J. S., 2015). La generación y la dispersión de polvo de las colas puede contaminar el aire y los suelos circundantes. Además, los metales y las sales solubles presentes en estos desechos podrían contaminar las aguas subterráneas y superficiales. Finalmente, algunas colas incluyen minerales de sulfuro que pueden inducir la formación de drenaje ácido de mina (AMD) y drenaje ácido de roca (ARD) (Álvarez. M.L., 2021).

5.5.1. Reutilización y Reciclaje de Residuos Mineros.

Idealmente, la reutilización y el reciclaje de los desechos mineros, como todos los demás esfuerzos de reciclaje, crean activos financieros, reducen el consumo de recursos naturales, limitan la producción de desechos, fomenta la innovación y las industrias locales, crea puestos de trabajo y enseña la responsabilidad por el ambiente compartida por todos. Además, la reutilización y reciclaje de residuos sólidos mineros y las aguas de mina también pueden disminuir la exposición de los seres humanos y los receptores ecológicos a los materiales contaminados. Numerosos investigadores han propuesto varias opciones de reutilización y reciclaje para los desechos mineros (J.M. Terrones, 2021) . Hoy solo algunas de estas opciones, como reprocesamiento y el uso de las colas como relleno, se aplican comúnmente en los sitios mineros en operación.

Comúnmente se hace uso de rocas estériles benignas para el paisajismo y revegetación de los depósitos de residuos. Las rocas estériles también se explotan como relleno, lo que reduce las pilas de residuos y deja menos labores en la mina.

Las reutilizaciones más prometedoras de los desechos mineros de grano grueso y, en especial, de las rocas estériles de la minería del carbón y los metales son como materiales de construcción. Estos residuos se utilizan como relleno de terrenos subvencionados, puertas en terraplenes, presas, carreteras, pavimentos, cimientos y construcción de edificios. También encuentran aplicaciones como materia prima para la producción de cemento y hormigón. (Lottermoser, 2011)

Que estos usos alternativos puedan llevarse a cabo depende de las características geotécnicas, mineralógicas y geoquímicas de los residuos. Por ejemplo, los residuos piríticos han sido evaluados como remedio de suelo para neutralizar las tierras infértiles y alcalinas como suelos agrícolas (Shamim Abul H. M., 2010).

5.5.2. Reciclaje de aguas y lodos de mina

La escasez de agua, regulación local e impactos ambientales están obligando a la industria minera a reutilizar gran parte de los residuos de agua que produce. Como resultado, la reutilización y el reciclaje del agua de proceso. La recuperación de metales y sales de aguas de mina también es

alcanzable. Por ejemplo, es posible de la extracción selectiva y secuencial de metales de las aguas del drenaje ácido empleando algas que acumulan metales o estableciendo bacterias reductoras de sulfato en un biorreactor. El sulfuro de hidrógeno producido en un biorreactor se utiliza para precipitar metales como sulfuros insolubles.

Han avanzado las tecnologías de tratamiento, como filtración y la ósmosis inversa; por otra parte, el uso de resinas de intercambio iónico, permiten que las aguas de la mina se procesen en agua potable. Además, las aguas de mina benignas o tratadas pueden encontrar aplicaciones como agua para empresas acuícolas y el riego de cultivos agrícolas. Ya sea tales aplicaciones alternativas son posibles en gran medida por las características químicas del agua tratada. Las aguas del drenaje ácido de mina pueden incluso ser tratadas utilizando tecnologías de celdas de combustible, generando productos benéficos como electricidad y recuperación metales (Lottermoser, 2011).

5.6. Caracterización de la zona

Esta actividad tiene como objetivo conocer las características físicas, climáticas, biológicas y socioeconómicas del sitio en estudio presuntamente contaminado que puedan ser importantes o determinantes en la definición de rutas y vías de exposición.

La caracterización del sitio requiere de información documental y de campo sobre diversos parámetros, los cuales pueden variar dependiendo de la complejidad del sitio. (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004)

La zona de interés se localiza en el distrito minero Cananea situada en el sistema fluvial El Barrilito ubicado en las coordenadas Latitud $31^{\circ} 02'30''$, longitud $110^{\circ}13'33''$ en el Municipio de Cananea al norte de la Heroica Ciudad de Cananea fluyendo hacia el Noreste hasta el ejido Emiliano Zapata donde cambia de dirección hacia el Norte (Figura 5.) La corriente nace al norte de Cananea como el sistema fluvial El Barrilito proveniente de la Sierra Mariquita, y como Las Minutas en la Sierra los Ajos y fluye hacia el Río San Pedro Hacia el norte se une con el río Gila en Winkelman, Arizona.

La vegetación de la zona está conformada por: agricultura de riego, bosque de encino, bosque de encino-pino y pino-encino, bosque de táscate, mezquital, matorral desértico micrófilo, pastizal cultivado y pastizal natural. (CILA, 2011).

De acuerdo con la clasificación climática de INEGI la mayor parte de la cuenca pertenece al clima Semiseco, BS1kw (x'). El régimen de lluvias en la zona coincide con los meses de verano, presentando a su vez un porcentaje de lluvias invernales mayor al 10.2%. La temperatura media anual en la zona se encuentra en un rango que va de los 12 a los 18°C y la precipitación media total calculada en función de los datos de las estaciones, sin considerar el factor de Thiessen, es de 550 mm (CILA, 2011)

En 2020, la población en Cananea fue de 39,451 habitantes (49.7% hombres y 50.3% mujeres). Las principales ventas internacionales de Cananea en 2022 fueron máquinas y aparatos de clasificar, cribar, separar, lavar, quebrantar, triturar, pulverizar, mezclar, amasar o sobar, tierra, piedra u otra materia mineral sólida, partes de escaleras mecánicas, transportadores, cabrestantes y similares además de animales vivos de la especie bovina (Data México, 2022).

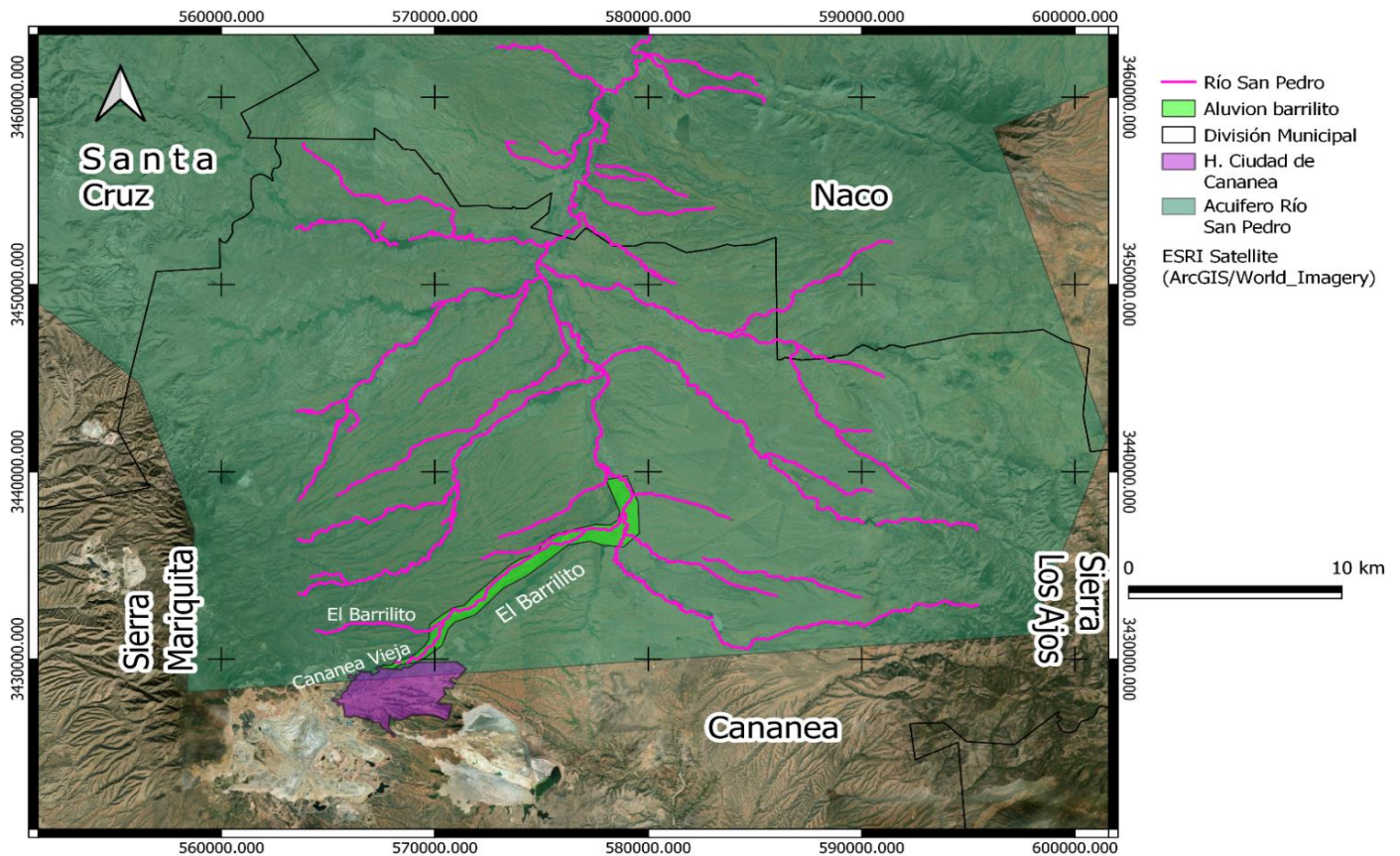


Figura 5. Aluvión El Barrilito elaborado con Qgis 3.28.2

5.6.1. Muestreo de la zona

Como antecedente de este trabajo se toma en cuenta el muestreo (Laboratorio de Geoquímica Ambiental Aplicada, IGL, UNAM, 2020), en la cuenca hidrológica Río San Pedro (Figura 6.) en dicho estudio se realizó un muestreo dirigido cuya característica es la selección de la localización de los puntos de muestreo, la cual se basa en el conocimiento de la causa de la contaminación y su posible evolución, sin ninguna aleatoriedad. (NMX-AA-132-SCFI-, 2016) Apéndice informativo A.

El muestreo incluyó pasivos ambientales localizados en la zona de interés, el cauce principal del sistema fluvial El Barrilito que es un afluente del Río San Pedro; por lo que también se muestreó el cauce y márgenes de este hasta la frontera con Estados Unidos

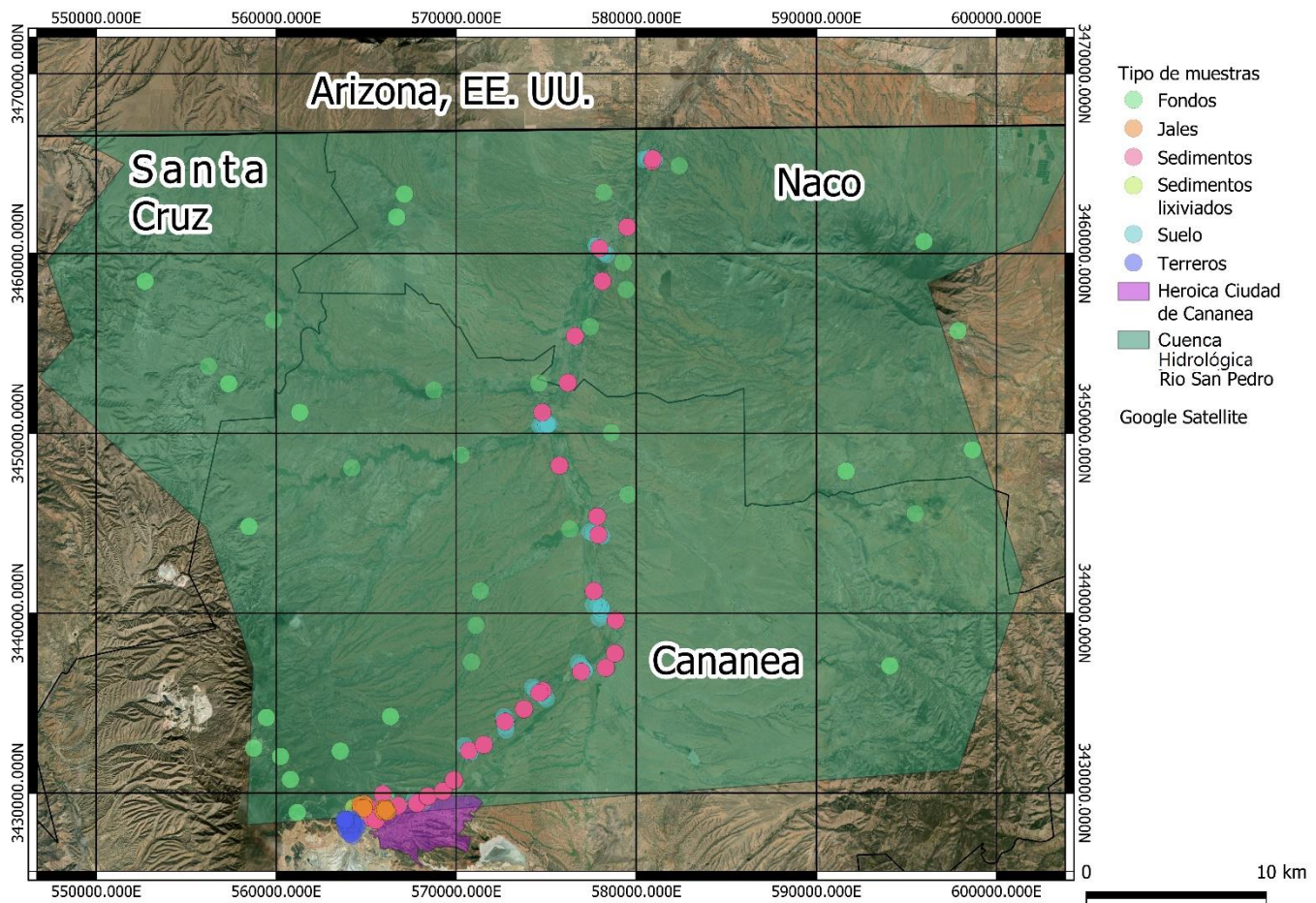


Figura 6. Distribución de muestras en la cuenca del Rio San Pedro elaborado con Qgis 3.28.2

Para el muestreo se tomaron 445 muestras de la zona, que incluyen: 103 pasivos ambientales (79 muestras de colas, 24 muestras de terreros inactivos), 201 de sedimentos, 78 de suelo y 63 de Fondos, la localización y distribución de las muestras se puede observar en la Figura 6.

Para las colas se tomaron muestras superficiales y muestras verticales en zanjas en algunos puntos hasta los tres metros. Para los pasivos terreros solo se tienen muestras superficiales debido al volumen de las rocas que dificultarían cavar una zanja y al tratarse de un talud con una determinada inclinación podría presentar un riesgo a la estabilidad del mismo.

En los suelos aledaños al cauce del arroyo o rio se realizaron los muestreos en transectos para evaluar el arrastre de las colas durante las inundaciones. El mayor número de muestras corresponde a los sedimentos, tratándose de un muestreo para evaluar el impacto en la cuenca hidrológica por lo que se realizaron 10 zanjas a lo largo del sistema fluvial El Barrilito y el Rio San Pedro con una

profundidad aproximada de 1.5 a 2 metros para determinar que tanto se ha diseminado las colas a lo largo del arroyo y el rio. Como conclusiones de este muestreo se determinó que existen concentraciones de elementos potencialmente tóxicos (EPTs) en el acuífero Rio San Pedro y las posibles fuentes de estos EPTs; son los pasivos ambientales que corresponden a las antiguas presas de colas bajo la cancha de beisbol y la presa de colas bajo los talleres con una posible contribución de los terreros inactivos que lixivian continuamente solución hacia la zona (Figura 7). La concentración presente en los suelos rebasa los límites permisibles por la (NOM-147-SEMARNAT/SSA1, 2004) se extiende desde las antiguas presas de colas las que se diseminan a través del sistema fluvial El Barrilito; sin embargo, estos EPTs no representan un riesgo a la salud humana. (Laboratorio de Geoquímica Ambiental Aplicada, IGL, UNAM, 2020)

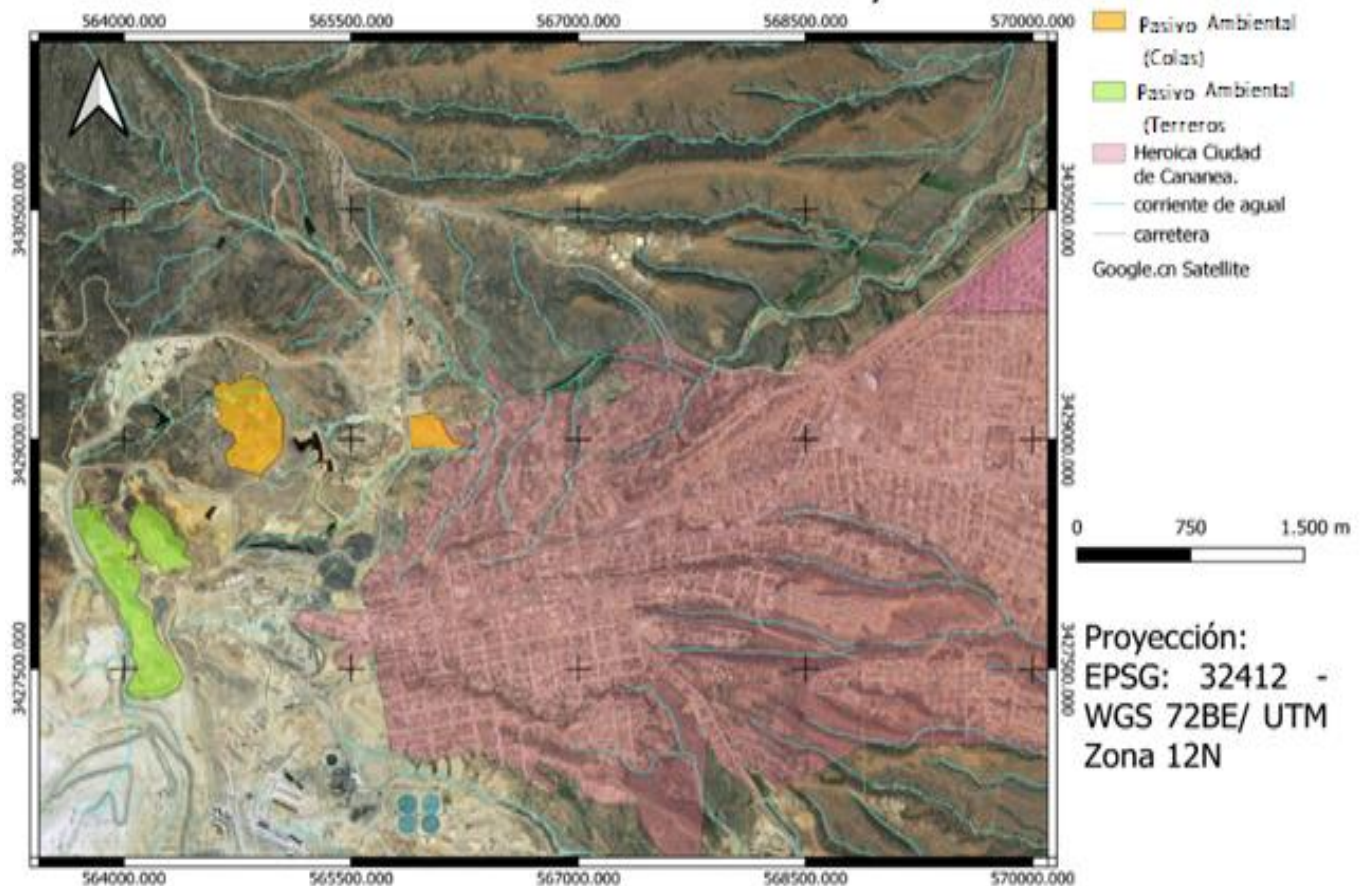


Figura 7. Pasivos ambientales del sistema fluvial El Barrilito elaborado con Qgis 3.28.2

6. Metodología

Para facilitar los diversos pasos seguidos en la metodología a lo largo de este trabajo se realizó el diagrama de flujo mostrado en la figura 8.

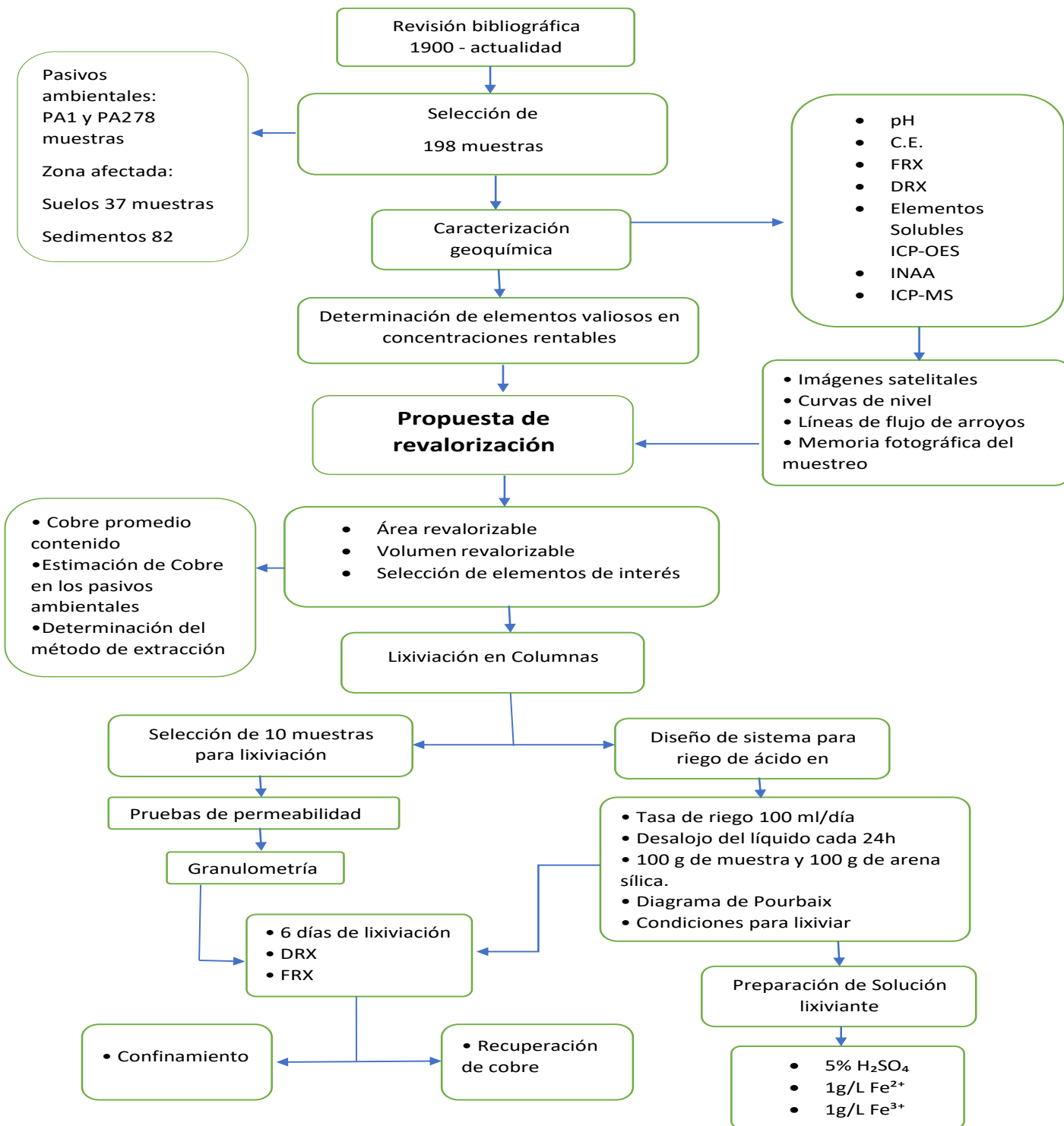


Figura 8. Diagrama de flujo de la metodología seguida

6.1. **Equipos**

- Para determinar el pH se utilizó un potenciómetro Denver Instrument Ultrabasic, UB-10 Calibrado a tres puntos pH= 4.0, 7.0 y 10.0 a 25°C.
- Para medir la Conductividad eléctrica se utilizó un conductímetro OAKTON, CON 700. Calibrado con el material de referencia de 84 y 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$.
- Para la determinación cualitativa de elementos se utilizó un equipo de espectroscopía de Fluorescencia de Rayos portátil Niton XL3t Ultra.
- La identificación de especies minerales se realizó mediante un equipo de difracción de rayos equis portátil Olympus TERRA-476, para interpretar los difractogramas se utilizó el software Xpowder usando la base de datos PDF2.
- Balanza analítica OHAUS Adventurer Pro.
- Rotap
- Molino pulverizador de discos y anillos Pulverisette 9, los discos y anillos están compuestos de óxido de circonio
- Software de interpretación de difractogramas Xpowder versión 2010.01.35 PRO
- Software de información geográfica Qgis versión 3.28.2

6.2. **Material y Reactivos**

6.2.1. **Material**

- Tamiz malla 4
- Tamiz malla 10
- Tamiz malla 35
- Tamiz malla 40
- Tamiz malla 60
- Tamiz malla 100
- Tamiz malla 200
- Fondo receptor de tamices.
- Envases plásticos de 100 mL
- Probeta de vidrio de 100 mL

- Filtros Swinnex de 25 mm
- Filtros de membrana de nitrocelulosa con tamaño de poro de 0.45 micrómetros marca Sartorius.
- Matraz volumétrico de vidrio de 2 L
- Columnas de acrílico de dimensiones 15 x 5 cm
- Filtro de celulosa tamaño de poro de 100 μm
- Filtro Whatman 40 tamaño de poro 8 μm
- Arena sílica mayor a 2 mm
- Envase de 20 litros con llave de dispensado
- Soporte para 10 columnas de 5 cm de diámetro
- Tubería de PVC de 1 pulgada
- Manguera de plástico transparente
- Llave de paso de teflón

6.2.2. Reactivos

- Ácido nítrico 70%, grado reactivo, Sigma-Aldrich.
- Sulfato de hierro (II) heptahidratado 99.99%, grado analítico Sigma Aldrich.
- Cloruro de hierro (III) hexahidratado 97%, grado reactivo J.T. Baker
- Ácido sulfúrico 98%, grado analítico, High Purity.

6.3. Caracterización geoquímica

Para la caracterización geoquímica se realizaron los siguientes análisis:

- Determinación del pH en laboratorio.
- Determinación de la conductividad eléctrica (CE) en laboratorio.
- Determinación de la concentración soluble mediante la prueba de extracción de metales y metaloides con agua en equilibrio con CO_2 determinada por espectroscopía de emisión óptica por plasma acoplado inductivamente.

- Concentración total determinada por espectroscopía de Fluorescencia de Rayos X.
- Identificación de minerales mediante difracción de rayos X.

6.3.1. Preparación de muestras.

Para la caracterización de la muestra es necesaria la preparación de las muestras que se lleva a cabo conforme a la norma (NMX-AA-132-SCFI-, 2016) en el que se especifica el tratamiento que consiste en:

1. Retirar la fracción gruesa.

Se retiran materiales como piedras, hierbas secas, basura, etc. (elementos que no se consideren suelo) en caso de que no se haya realizado previamente.

2. Secado.

El secado se realiza a 50°C un mínimo de 24 horas hasta que la muestra no presenta humedad, con el propósito de facilitar el manejo de las muestras, mejorar la homogeneización y disminuir los cambios químicos no deseados.

3. Cribado (o tamizado)

Una vez secadas las muestras, se deben disgregar. Una vez disgregadas las muestras, se deben pasar por un tamiz con abertura de 2 mm de diámetro (malla 10) de acero inoxidable. La porción fina que pasa por el tamiz se colecta en la charola. El material fino contenido en la charola se homogeniza y pasa al envase seleccionado.

4. Homogeneizado y partición

Este proceso es necesario para asegurar que la muestra que se analizará posteriormente representa la composición y la granulometría del suelo y para garantizar que las cuantificaciones se realizarán en muestras homogéneas y representativas de la muestra de suelo recolectada en el campo.

6.3.2. Determinación de pH.

Se optó por medir el pH bajo la norma: ISO 10390:2005

La norma (ISO 10390:, 2005) especifica un método instrumental para la determinación del pH usando un electrodo de vidrio en una suspensión de suelo en agua (pH en H₂O) 1:5 (fracción de volumen), en una solución de cloruro de potasio de 1 mol/l (pH en KCl) o en solución de cloruro de calcio 0,01 mol/l (pH en CaCl₂).

- Se pesaron 10g de muestra tratada bajo la norma (NMX-AA-132-SCFI-, 2016).
- Se agregaron 50 ml de agua desionizada.
- Se agitó en el agitador orbital por 30 minutos a 180 RPM.
- Se calibró el potenciómetro con soluciones estándar pH, 4, 7 y 10
- Se midió el pH con el potenciómetro Denver Instrument Ultrabasic.
- Se midió un blanco (agua desionizada) y se realizó un duplicado del 20% de las muestras.

6.3.3. Determinación de Conductividad eléctrica.

se realizó la medición siguiendo la norma (ISO11265:, 1994)

El suelo secado al aire se extrae con agua a 20 °C en una relación de extracción de 1:5 (m/V), para disolver los electrolitos. Se mide la conductividad eléctrica específica del extracto filtrado y se corrige el resultado a una temperatura de 25 °C

- Se pesaron 10.00 g de muestra (tamaño menor a 2 mm) tratada bajo la norma (NMX-AA-132-SCFI-, 2016).
- Se agregaron 50 mL de agua desionizada.
- Se agitó en el agitador orbital por 30 minutos a 180 RPM.
- Se calibró el conductímetro utilizando soluciones estándar de 84µS/cm² y 1413 µS/cm²
- Se midió la conductividad eléctrica con el conductímetro OAKTON.
- Se midió un blanco de agua desionizada y se duplicaron el 20% de las muestras

6.3.4. Determinación de la concentración soluble mediante la prueba de extracción de metales y metaloides con agua en equilibrio con CO₂ determinada por espectroscopía de emisión óptica por plasma acoplado inductivamente.

Para esta determinación se realizó una modificación de (NOM-147-SEMARNAT/SSA1, 2004) Apéndice Normativo B.2.3 (NOM-157-SEMARNAT, 2009) Apartado 5.4.2.4.2, la que consiste en usar 5 g de suelo en lugar de los 70 por la cantidad de solución requerida ya que requeriría 1.4 l por muestra.

Este método se elaboró con base en la prueba (ASTM D3987-85), modificando las características del agua de extracción. Este es un procedimiento para lixiviar suelos con agua en equilibrio con CO₂ atmosférico (H₂O-CO₂) a pH a 5.5 y obtener una solución acuosa para analizar los compuestos lixiviados, bajo las condiciones de prueba especificadas en la norma (NOM-147-SEMARNAT/SSA1, 2004).

El procedimiento por el cual se llevaron a cabo los experimentos es el siguiente:

- Se pesó y taró el recipiente donde se colocó la muestra utilizando la balanza analítica.
- Se pesaron 5.00 g de jal o suelo seco malla 10 ($x < 2$ mm).
- Se preparó la solución extractante (H₂O-CO₂ a $\text{pH} \approx 5.5 \pm 0.2$) burbujeando aire.
- Se añadió la solución extractante a la muestra de jal o suelo hasta una relación 1:20 en mL de solución 20 veces el peso en gramos del contenido de sólidos. Para 5.00 g se requieren 100 mL de solución.
- Se prepararon los controles de calidad: blanco, blanco adicionado y muestras duplicadas.
- Se colocaron las muestras en el equipo de agitación orbital e inició la agitación continua por 18 ± 0.25 horas a 80 ± 2 rpm a temperatura ambiente.
- La muestra se dejó reposar durante 5 minutos. Después de este periodo se filtraron las muestras a presión utilizando una membrana de 0.45 μm .
- El pH del extracto colectado se midió con un electrodo de vidrio en un potenciómetro.
- El extracto filtrado colectado se acidificó con ácido nítrico concentrado hasta llegar a un valor de $\text{pH} < 2$.
- Se cuantificaron los metales y metaloides en el extracto por espectrometría de emisión atómica por plasma inductivamente acoplado (ICP-OES).

6.3.5. Concentración total determinada por espectroscopía de Fluorescencia de rayos X.

Para determinar la concentración total por espectroscopía de fluorescencia de rayos X se sigue la norma (EPA Method 6200, 2007). Con este método, se identifican y cuantifican los analitos inorgánicos de interés. Se utilizó un espectrómetro de fluorescencia de rayos X portátil.

- Se tomó parte de la muestra tratada bajo la norma (NMX-AA-132-SCFI-, 2016) y se pulverizó en molino pulverizador de discos y anillos Pulverisette 9, los discos y anillos están compuestos de óxido de circonio, se molió por 1 minuto hasta que la totalidad de la muestra pasara la malla 100 (0.149 mm).
- Una vez molido se traspasó a una bolsa de polietileno lo más delgada posible para evitar interferencias con el equipo de FRX.
- Para la medición se realizó utilizando un equipo de fluorescencia de rayos X portátil Niton XL3t ultra en modo suelos, la muestra se coloca frente a la ventana del equipo por 90 segundos y se realizaron 3 mediciones en diferentes puntos de la muestra para caracterizar representativamente la muestra, para evaluar la precisión y se evaluó la exactitud con MRC NIST Montana2710a.

6.3.6. Identificación de minerales mediante difracción de rayos X

Para determinar los minerales en las muestras se identificaron mediante la técnica de difracción de rayos X por lo que se siguió el siguiente procedimiento:

- Se tomó parte de la muestra tratada bajo la norma (NMX-AA-132-SCFI-, 2016) y se pulverizó en molino pulverizador de discos y anillos Pulverisette 9, los discos y anillos están compuestos de óxido de circonio, se molió por 1 minuto hasta que la totalidad de la muestra pasara la malla 100 (0.149 mm).
- Se colocó la muestra dentro de la celda hasta llenar la ventana con una cantidad menor a 1 gramo y se analizó en el equipo de difracción de rayos X portátil TERRA-476 Olympus.
- Se sometió a 50 ciclos y el difractograma obtenido fue analizado con el programa Xpowder para identificar los minerales.

6.3.7. Determinación de la concentración total por espectroscopía de emisión óptica por plasma masas (ICP-MS) y análisis activación neutrónica NAA

Estos análisis fueron realizados por Actlabs, por lo que solo se prepararon las muestras para su análisis por lo que se tomó 1.00 g de muestra pulverizada menor a malla 100. para ello se seleccionaron 33 muestra de las 198 de las cuales corresponden a 10 muestras de los pasivos ambientales y 23 de sedimentos.

6.4. Determinación de Área y Volumen

Para determinar el área se utilizó el software de Qgis 3.28.2, se colocaron las coordenadas de las muestras recolectadas, se complementó este mapa con datos de curvas de nivel, líneas de flujo de arroyos y ríos, el polígono representativo de la Heroica Ciudad de Cananea todos se obtuvieron de base de datos abierta del (INEGI, 2000), todo esto se colocó en un mapa de imágenes satelitales de ARGIS, se delimitó el área que comprende la cuenca del Rio San Pedro y se señaló el aluvión del sistema fluvial El Barrilito ambos haciendo uso de los datos del informe de la (CILA, 2011), después se realizó una clasificación de las muestras con respecto a la concentración de cobre, pH, conductividad eléctrica, cobre soluble y se les asignó color a los intervalos correspondientes.

Tomando en cuenta las zonas en las que la concentración de cobre y la C.E. era mayor, además de un pH más bajo que el resto de las zonas, se utilizó como referencia las curvas de nivel para delimitar el área en la que los pasivos ambientales probablemente se diseminaron, para corroborar se comparó con memoria fotográfica del muestreo (una coloración amarilla denota residuos minerales oxidados), de esta forma se acotó un polígono con el área aproximada revalorizable.

El cálculo de volumen se realizó con el área estimada y los datos obtenidos de la concentración de cobre presente en las zanjas a partir de los gráficos de concentración de profundidad vs concentración de Cu, y para corroborar se comparó con la memoria fotográfica.

6.5. Lixiviación

Para las pruebas de lixiviación se realizó una serie de pasos de preparación tales como la selección de muestras para la lixiviación, cuyo criterio de selección se basó en las muestras cuya concentración promedio se encontraba cercana o mayor a la ley de corte, para que fuera más representativa la experimentación se realizaron muestras compuestas de las zanjas seleccionadas, a dichas muestras se les realizó una determinación total de elementos mediante FRX, determinación de la distribución granulométrica, determinación de la permeabilidad, ensayos de variación de material grueso para mejorar la permeabilidad de las muestras a lixiviar, la determinación de los parámetros de lixiviación basados en experimentación de diversos autores que realizaron pruebas similares en columnas.

6.5.1. Distribución de tamaño de partícula por tamizado.

Se realizó la determinación de la distribución de tamaño de partícula mediante tamizado, se utilizaron las mallas número 4, 10, 35, 40, 60, 100 y 200 en un Rotap durante 15 minutos y se pesó la fracción retenida en cada malla. Esta determinación se realizó haciendo una modificación de la norma (ASTM D6913-04, 2009) cuya modificación está fundamentada en un análisis más exhaustivo de las partículas entre la malla 10 (2 mm) y la malla 200 (75 μm).

6.5.2. Densidad

Se determinó la densidad aparente de las muestras compuestas. La densidad aparente del suelo es la relación entre la masa o peso del suelo seco (peso de la fase sólida) y el volumen total, incluyendo al espacio poroso (sólido + poros). Se secó por completo la muestra en el horno a 50°C durante 48 horas y se llenó un cilindro de acrílico de volumen conocido, se pesó en vacío y después se llenó con la muestra y se pesó y se determinó la densidad aparente.

6.5.3. Permeabilidad

Para el ensayo de permeabilidad se seleccionaron 10 muestras, 8 pasivos ambientales, 1 muestra de sedimentos y sedimentos lixiviados, se realizó granulometría de las muestras seleccionadas, se realizaron modificaciones a la experimentación de la (NOM-155-SEMARNAT-2007) empezando por

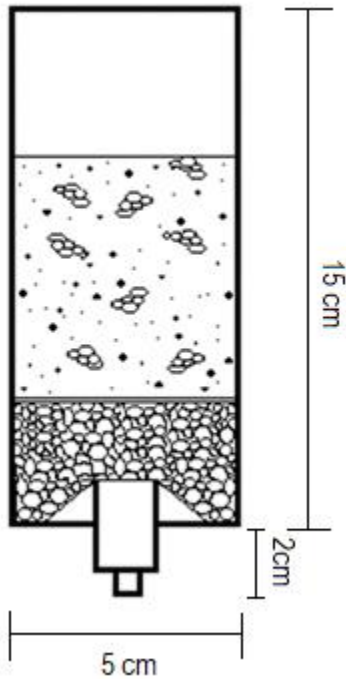


Figura 9. Estructura de la columna para permeabilidad y lixiviación

las columnas de acrílico en lugar de PVC, además se modificaron las dimensiones guardando la relación 3:1 altura vs diámetro con ello también se modificó la masa usada para el experimento, en la norma se utiliza 5 kg de muestra por cada columna, esta modificación se realizó principalmente por la cantidad muestra disponible. Para estas pruebas se utilizó agua corriente.

La columna (figura 9) está conformada por filtros de 100 micras, arena tamizada con un tamaño mayor a 2 mm, filtros de 45 μm y una base circular perforada de plástico de 1 mm.

Se colocó un filtro de 45 micras en el fondo para atrapar partículas finas, sobre esto se distribuyó arena sílica 2 cm de altura, sobre esta capa de arena sílica se acomodó una lámina de plástico perforada para darle rigidez al papel filtro, y se situó el filtro de 100 micras. Sobre esta configuración se acomodó la muestra y se

vertió agua hasta saturar la muestra. Como se muestra en la figura 9.

Teniendo en cuenta la granulometría fina se realizó una variación de material grueso (arena sílica tamizada mayor a 2 mm) se realizó variación de grueso en la muestra PA1-01, 0%, 5%, 10%, 20%, 40% y 50% en volumen para variar la velocidad en la que se puede desalojar el líquido. Siendo el 50% la cantidad que obtuvo mejores resultados desalojando líquido y la proporción para realizar los experimentos de lixiviación.

Para obtener el coeficiente de permeabilidad se llenó de agua la columna y se dejó permear hasta que el mineral se saturó con agua, después se tapó la salida y se llenó dos centímetros por encima del mineral. Se liberó la salida, se permitió el paso del agua y se tomó el tiempo. Para las columnas con permeabilidad más baja se realizó la prueba en un intervalo de 3 horas en el que se revisó la

diferencia de altura del agua en la columna. Se utilizó el tiempo y la diferencia de altura para realizar los cálculos de permeabilidad específica.

6.5.4. Preparación de disoluciones

Se prepararon 10 litros de disolución de H_2SO_4 al 5% en volumen, se utilizaron 500 mililitros de H_2SO_4 concentrado y una concentración de iones Fe^{2+} de 1 g por litro y Fe^{3+} 1 g por litro por lo que se pesó 49.79g de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y 49.43g de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

6.5.5. Lixiviación en Columnas.

Se realizaron 10 pruebas a muestras compuestas 8 de los pasivos ambientales y 2 de sedimentos, las muestras compuestas estaban conformadas por 100 g de cada muestra tomada en vertical de la misma zanja resultando con una masa aproximada de 500 g, esto se realizó con el propósito de simular el traslado total de los pasivos ambientales y sedimentos a un terrero donde se lixiviarán con condiciones similares a las realizadas en la experimentación de Ruiz (2021). Se determinó la concentración de elementos por FRX de cada una de las muestras compuestas antes y después de la lixiviación.

Se realizó la lixiviación en columnas usando una base para 10 columnas con soporte para un envase de 20 litros con 10 litros de disolución de ácido sulfúrico 5% V/V y 1 g por litro de Fe^{2+} y Fe^{3+} , se instaló un sistema de riego para el ácido capaz de dispensar 100 ml de la disolución por día a un flujo equivalente de 2.74L/h/m². En las columnas se colocaron 95 g de muestra y 95 gramos de arena sílice. Se realizó riego de ácido sulfúrico durante 6 días.

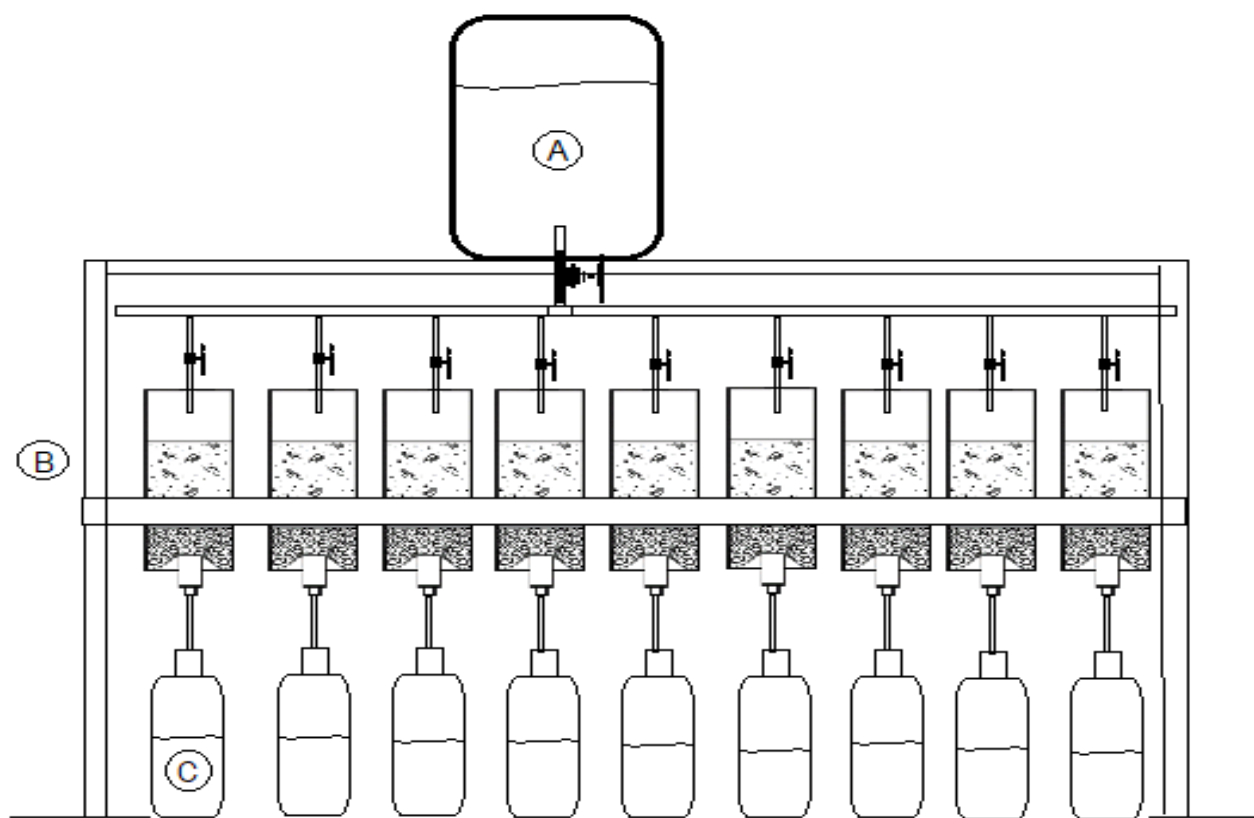


Figura 10. Diagrama del sistema de riego de columnas para lixiviar

El arreglo del sistema de riego para las columnas se puede observar en la Figura 10. Está conformado por A) Recipiente y sistema de dispensado de la disolución lixivante compuesta por ácido sulfúrico 5% V/V, 1 g de Fe^{2+} y 1 g de Fe^{3+} B) Columnas de acrílico con mineral 50% y 50% de arena sílica m/m. C) Envases para recuperar la disolución lixiviada.

La experimentación en columnas se realizó conforme al diagrama de la figura 10. El experimento se puede apreciar en la Figura 29. Se inundaron las columnas con una proporción 1:1 volumen de mineral por volumen de solución lixivante, se desalojaba el líquido en su totalidad y se reemplazaba con nueva disolución lixivante cada 24 horas. El experimento continuo con esta dinámica durante 6 días. Posteriormente se secó la muestra que se lixivió, se tamizó por una malla 10 para retirar la arena sílica y se pulverizó en el molino pulverizador de discos y anillos Pulverisette 9, y se realizó una determinación total por espectroscopía de fluorescencia de rayos X de cada una de las muestras.

7. Resultados

Las muestras utilizadas para este trabajo se presentan en la figura 11, las muestras se encuentran en la totalidad del arroyo Cananea Vieja hasta la confluencia con el arroyo El Barrilito

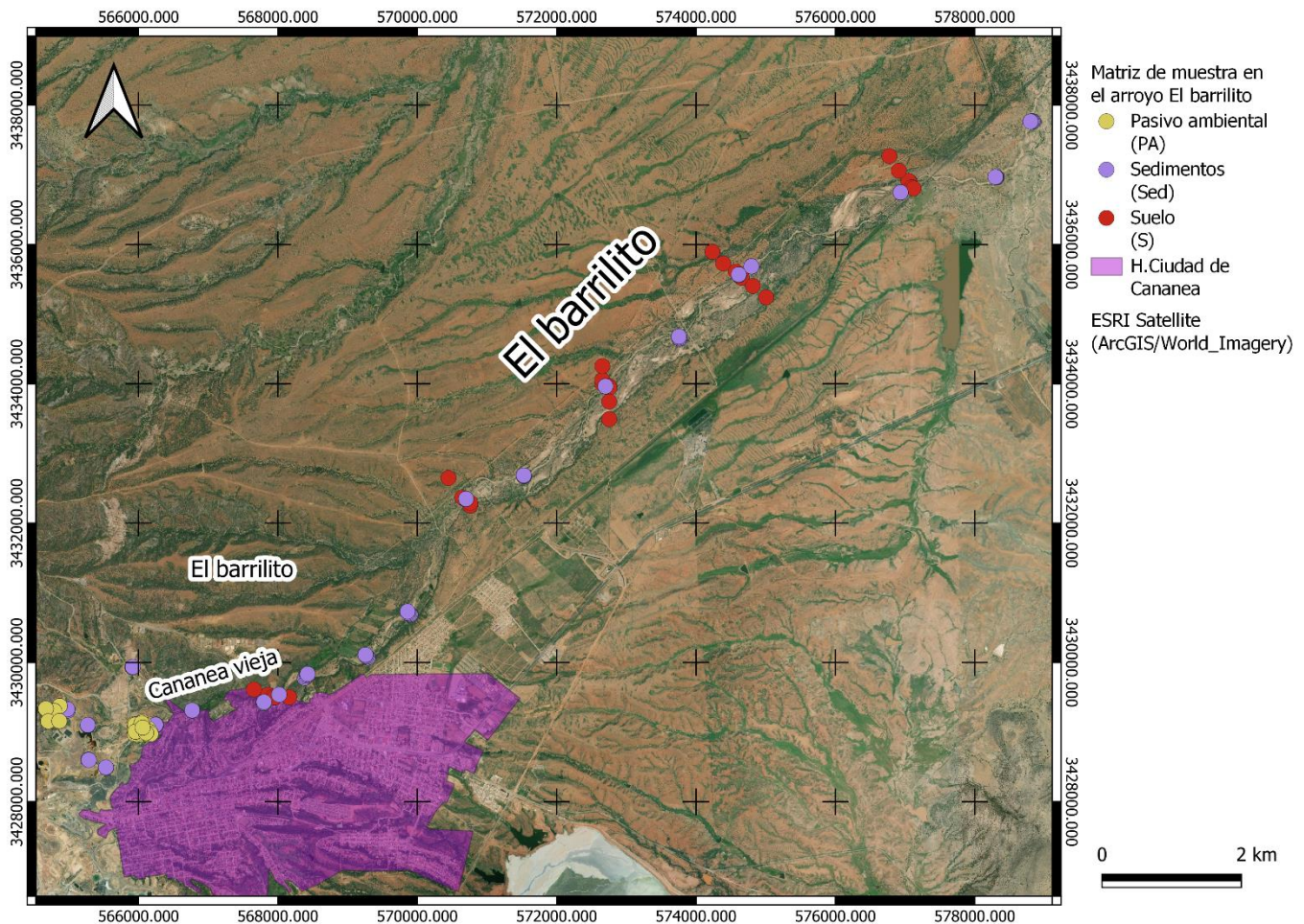


Figura 11. Distribución de muestras en el área de estudio el sistema fluvial El Barrilito elaborado con Qgis 3.28.2

7.1. Caracterización geoquímica

Para caracterizar la zona se realizaron diversos análisis, las bases de datos son muy extensas por lo que se incluyen en la sección de ANEXOS. Entre los análisis realizados para la caracterización geoquímica se realizaron: Concentración total determinada por espectroscopía de Fluorescencia de

rayos X (Anexo A), medición del pH y conductividad eléctrica (Anexo B), concentración soluble mediante la prueba de extracción de metales y metaloides con agua en equilibrio con CO₂ (Anexo C), Identificación de minerales mediante difracción de rayos X (Anexo D).

7.2. pH y conductividad eléctrica.

Se realizó un promedio por matriz de las muestras los cuales son: suelos aledaños al arroyo El Barrilito, sedimentos del sistema fluvial El Barrilito y muestras de los pasivos ambientales: Pasivo ambiental 1 y Pasivo ambiental 2. En la tabla 4 se observa el intervalo de valores de pH y conductividad eléctrica además del promedio de las zonas de estudio. Se observa en la tabla 4 que el rango de pH de la zona de estudio se encuentra entre 2.34 y 9.7 siendo la zona con menor pH para visualizar mejor en la figura 12. En la que se puede observar la distribución de pH siendo los pasivos ambientales la zona con menor pH. Si se toma en cuenta los valores de fondo es decir concentraciones no antropogénicas cuyo intervalo es 5.5 a 8.1 todos los valores que no correspondan a este intervalo se pueden considerar anomalías geoquímicas antropogénicas.

Tabla 4. pH y Conductividad Eléctrica por matriz

Matriz	pH		CE	
	Min – Max	Promedio	Min – Max	Promedio
Suelo	4.70 – 9.30	5.90	7.80 – 1626.00	171.80
Sedimentos	3.80 – 9.70	5.80	45.70 – 737.00	172.20
Pasivo ambiental	2.34 – 5.57	3.59	88.20 – 5050.00	1115.85

Los intervalos de conductividad eléctrica de la tabla 4 muestran que la máxima conductividad se presenta en los pasivos ambientales, lo cual concuerda con los resultados mostrados en la tabla 7 y 8 que presentan la mayor cantidad de elementos metálicos en disolución, esto mismo se puede observar a detalle en la figura 13. El intervalo de valores de fondo es de 15.6 a 550 $\mu\text{s/cm}$ lo que indica que toda concentración fuera de ese intervalo representa una anomalía geoquímica antropogénica. Cabe destacar que el sistema fluvial El Barrilito no presenta conductividad eléctrica anormal en el cauce solo en los suelos aledaños y los valores más elevados se encuentran en los pasivos ambientales.

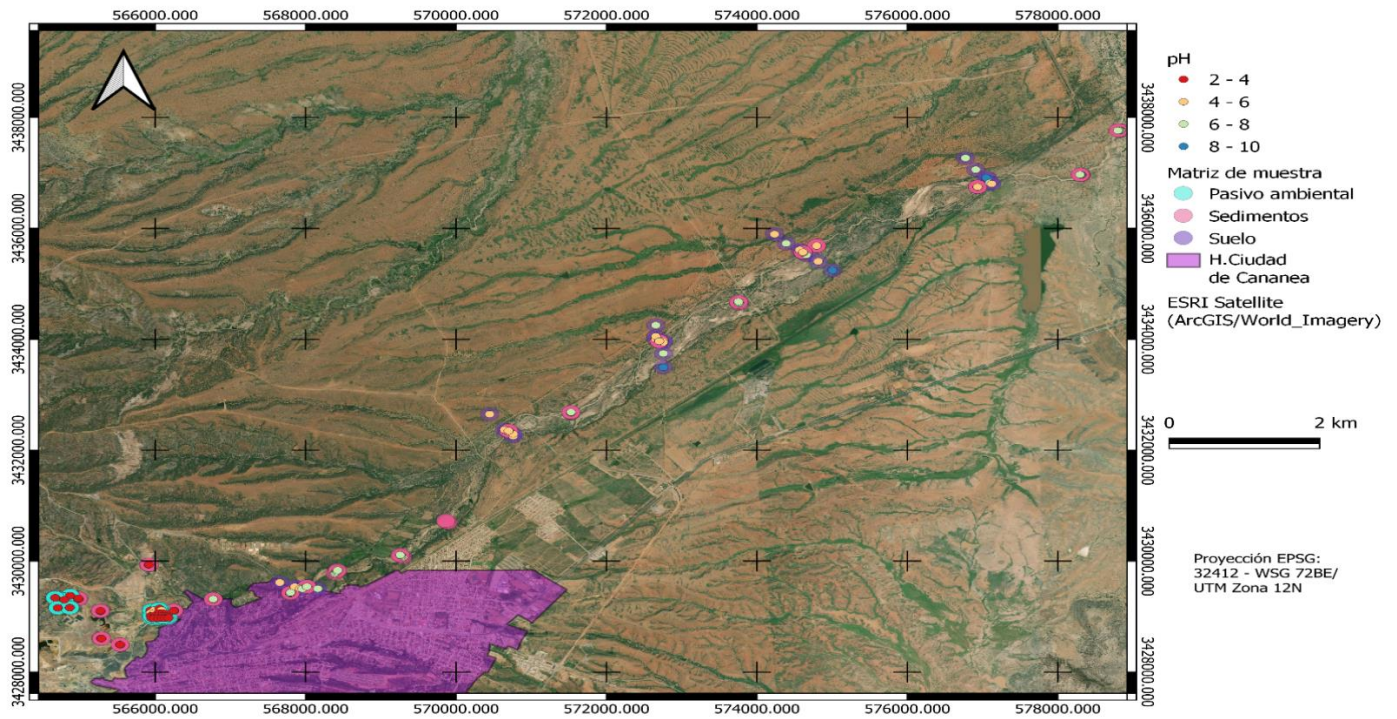


Figura 12. pH en los pasivos ambientales y el sistema fluvial El Barrilito elaborado con Qgis 3.28.2

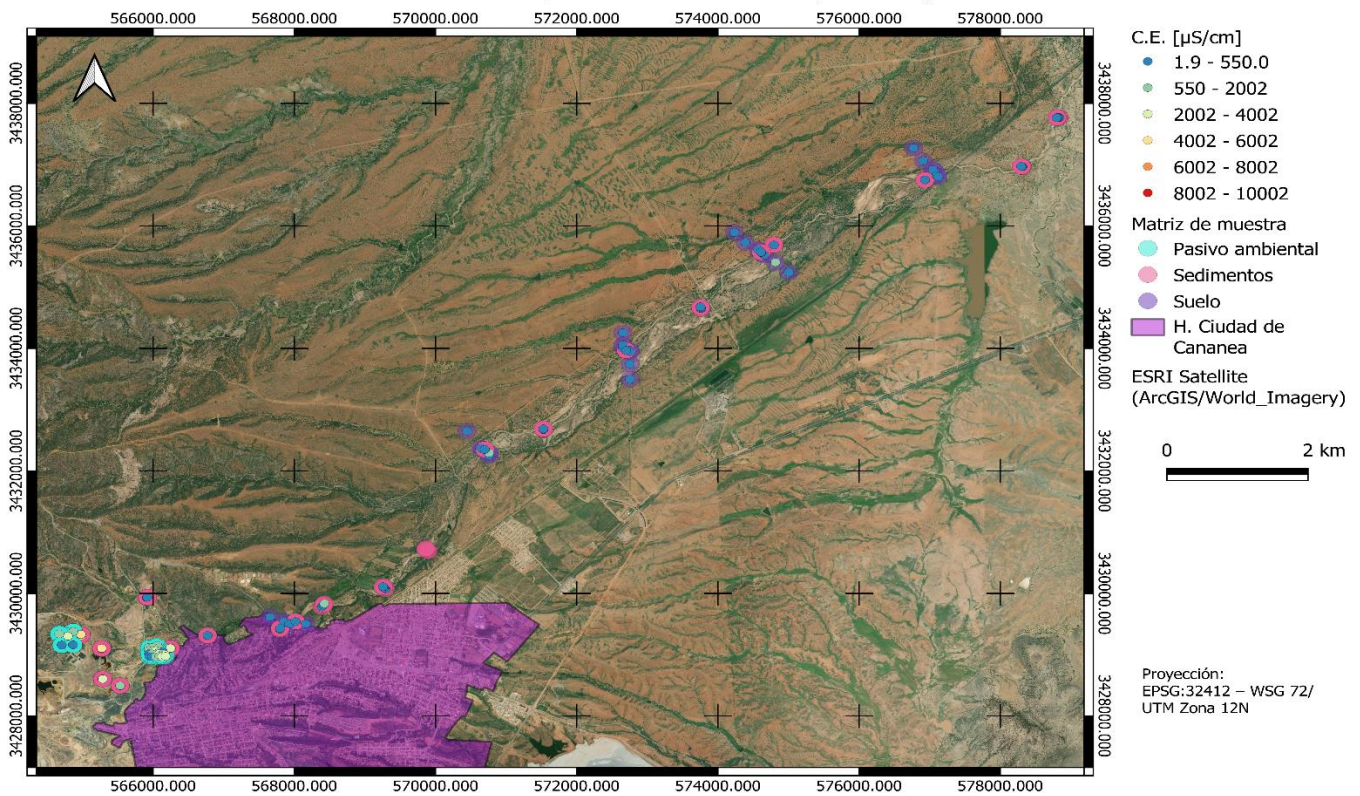


Figura 13. Conductividad eléctrica en los pasivos ambientales y sistema fluvial El Barrilito elaborado con Qgis 3.28.2

7.3. Concentración total por FRX

Para la tabla 5 se presenta un resumen con los elementos más estudiados de la zona durante los trabajos anteriores (Pb, Zn y Fe) y en la tabla 6 se presentan el cobre y molibdeno los cuales son elementos extraídos en la zona cuya concentración se encuentra en una concentración atractiva.

Tabla 5. Concentración de elementos de interés por matriz en el sistema fluvial El Barrilito (Laboratorio de Geoquímica Ambiental Aplicada, IGL, UNAM, 2020)

Matriz	Pb		Zn		Fe	
	mg/kg		mg/kg		%	
	Min – Max	Promedio	Min – Max	Promedio	Min – Max	Promedio
Suelo	69.90 – 635.00	197.20	102.70 – 783.00	382.30	1.94 – 4.78	3.37
Sedimentos	73.60 – 4700.10	540.83	133.62 – 1463.26	364.83	3.97 – 22.56	8.24
Pasivos ambientales	40.24 – 2073.47	712.31	31.77 – 1323.52	432.55	6.63 – 64.99	8.51

Tabla 6. Elementos potencialmente revalorizables por matriz del sistema fluvial El Barrilito

Matriz	Cu		Mo	
	mg/kg		mg/kg	
	Min – Max	Promedio	Min – Max	Promedio
Suelo	210.40 – 4906.60	1179.20	7.50 – 46.20	15.46
Sedimentos	108.65 – 1609.03	380.68	7.50 – 140.22	18.81
Pasivos ambientales	52.34 – 11462.58	1610.86	7.50 – 1105.95	85.17

La concentración total de elementos se observa en la Figura 14, se observan los diferentes elementos explotados comercialmente. En la Figura 14 se utilizó una simbología para cada tipo de elemento con un círculo semitransparente de colores para observar la matriz que contiene las concentraciones más atractivas, durante la elaboración de los mapas se observó que las concentraciones entre el límite de detección del equipo y 500 ppm causaba una mayor dificultad para la visualización de los elementos más concentrados por lo que se decidió omitir en los mapas, se eligió en 500 ppm debido a que la gran mayoría de los elementos tienen ley de corte por encima

de este valor, excepto por los metales tales como el oro, plata y platino cuya concentración en la zona se encuentra por debajo del límite de detección de los equipos usados para el análisis

En la figura 14 se puede observar una parte del control hidrológico norte que incluye una gran parte de la Heroica Ciudad de Cananea y el sistema fluvial El Barrilito uno de los principales afluentes del Río San Pedro se puede apreciar que las concentraciones más elevadas se encuentran al norte de Cananea sobre el arroyo Cananea vieja. Las concentraciones se diluyen a lo largo del sistema fluvial El Barrilito y se observan disminuidas de forma significativa en el Río San Pedro. El elemento en mayor concentración y diseminación por el sistema lacustre es el cobre. Más allá del arroyo El Barrilito las concentraciones son menores a 500 ppm por lo que no son relevantes para la recuperación. Se observa que los elementos tales como el Pb, Zn y Mo no se extienden de forma significativa en el arroyo, solo el cobre se extiende en una mayor parte del cauce.

La concentración de elementos a lo largo del cauce del río es por efecto del arrastre de los pasivos ambientales situados aguas arriba del río. La coloración amarilla presente en el lecho del arroyo se debe a la presencia de mineral oxidado de los pasivos ambientales; por otra parte, en los suelos aledaños al lecho de río (zona de aluvión) se presentan concentraciones altas de diferentes elementos. La zona que presenta las más altas concentraciones de los diferentes elementos estudiados se encuentra en los pasivos ambientales.

Concentración de Elementos Explotados Comercialmente en la Zona del Arroyo "El barrilito".

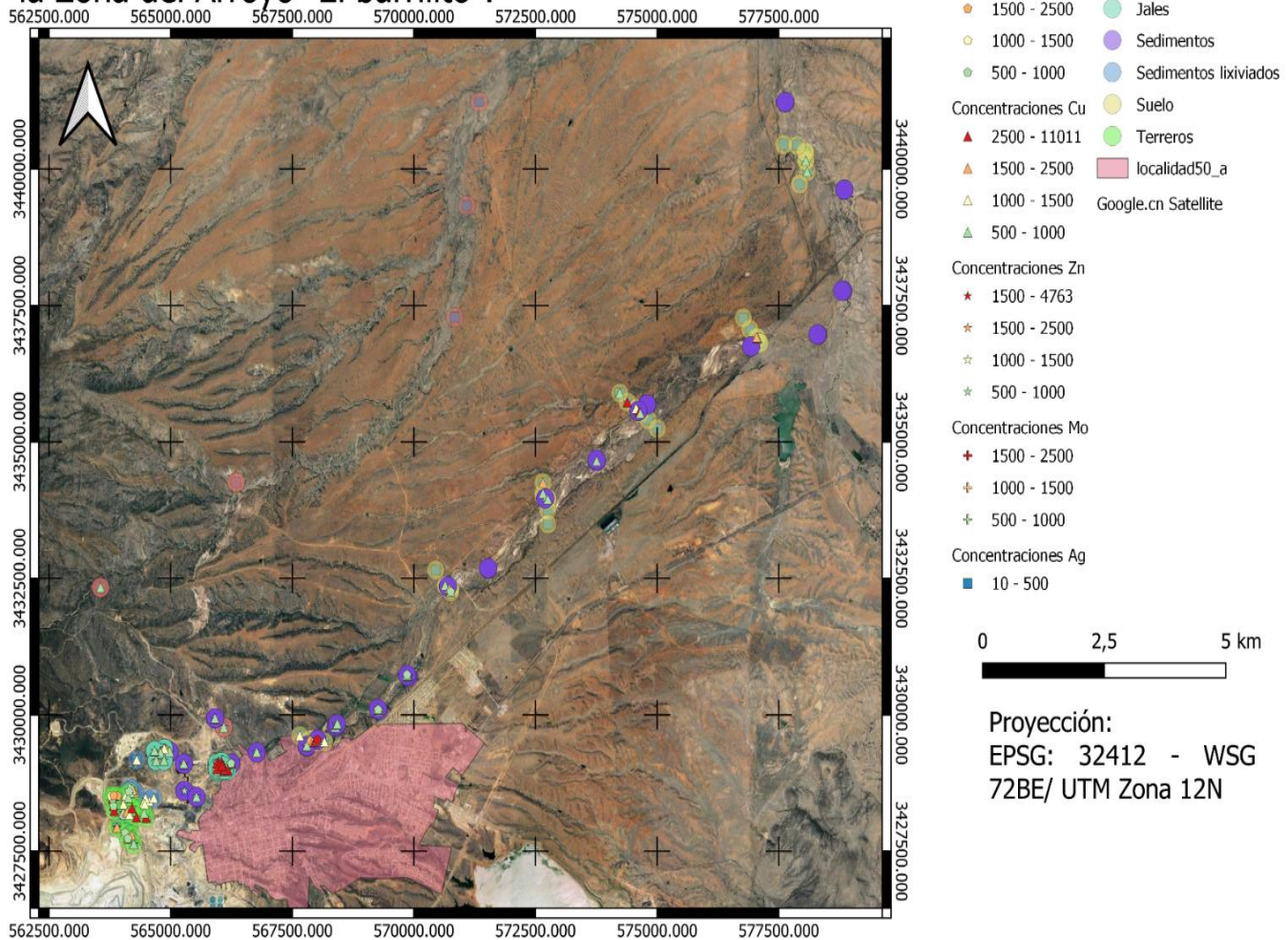


Figura 14. Concentraciones de los elementos más comúnmente explotados en el sistema fluvial El Barrilito (Laboratorio de Geoquímica Ambiental Aplicada, IGL, UNAM, 2020)

En la Figura 15. Se observan los pasivos ambientales: En esta zona se ubican las concentraciones más altas, en el Pasivo ambiental 1 las concentraciones son mayores a las 10,000 mg/kg de cobre y el Molibdeno presenta concentración de más de 1000 mg/kg, estos valores son mayores a la concentración promedio del mineral usado para flotación los proyectos mineros de la zona, en cuanto a el Zinc y Plomo también se encuentran las concentraciones más altas; sin embargo, la ley de corte se encuentra por encima de las concentraciones más altas.

Concentración de Elementos Explotados Comercialmente en la Fuente de contaminación.

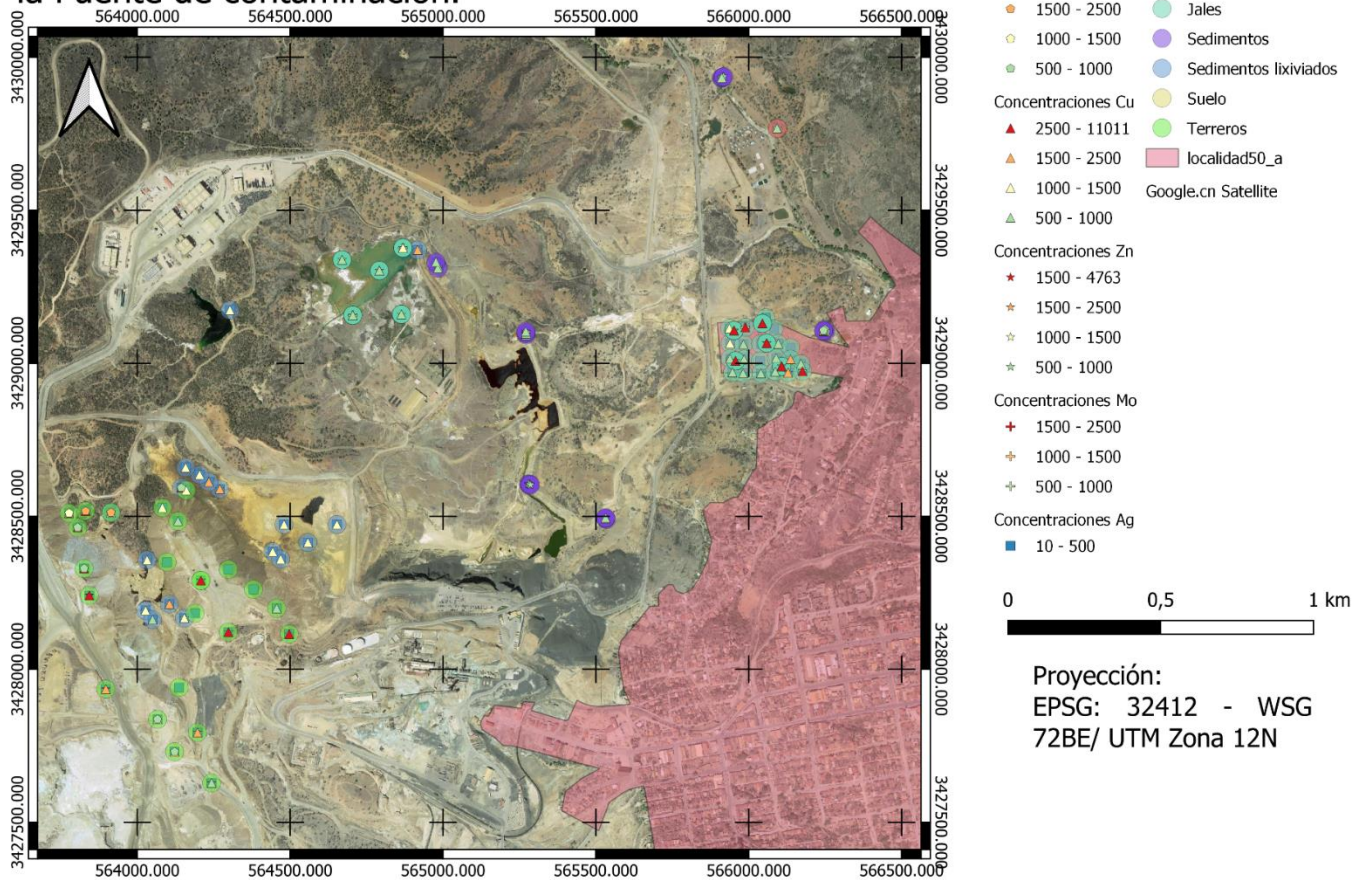


Figura 15. Pasivos ambientales que repercuten en el sistema fluvial "El Barrilito"

7.4. Concentración soluble

A continuación, se presentan las tablas 7 y 8 que resumen los elementos solubles en el sistema fluvial El Barrilito, se puede observar que la concentración del plomo se encuentra por debajo de los límites de detección del equipo ICP-IOES, el Zn, Pb y Cu son elementos cuya concentración en ríos, arroyos y canales deben estar por debajo de los límites establecidos por la (NOM-001-SEMARNAT, 2021), el Zn debe estar en un valor instantáneo menor de 20 mg/L y el cobre menor a 6 mg/L

Tabla 7. Resumen de concentración soluble de Pb, Zn y Fe en el sistema fluvial El Barrilito por matriz de muestra

Elemento	Pb		Zn		Fe	
λ (nm)	220.353		213.857		238.204	
LD (mg/L)	0.050		0.003		0.003	
	mg/L		mg/L		mg/L	
Matriz	Min – Max	promedio	Min – Max	promedio	Min – Max	promedio
Suelo	<LD	<LD	0.010 – 5.200	0.429	0.020 – 2.650	1.004
Sedimento	<LD	<LD	0.002 – 2.160	0.162	0.002 – 5.210	0.286
Pasivos ambientales	<LD	<LD	0.010 – 57.700	6.516	0.002 – 527.000	20.343

λ longitud de onda, LD límite de detección

Tabla 8. Concentración soluble de Cu y Mo en el sistema fluvial El Barrilito por matriz

Elemento	Cu		Mo	
λ (nm)	327.395		204.598	
LD (mg/L)	0.003		0.003	
	mg/L		mg/L	
Matriz	Min – Max	promedio	Min – Max	promedio
Suelo	0.040 – 7.890	0.789	0.01 – 0.03	0.017
Sedimento	0.0015 – 0.730	0.074	0.0015 – 0.02	0.007
Pasivos ambientales	0.0015 – 287.100	25.357	0.0015 – 0.02	0.004

λ longitud de onda, LD límite de detección

Se observa en la tabla 8 que el cobre se encuentra en mayor solubilidad en los pasivos ambientales que en el resto de la zona de estudio

7.5. Identificación de minerales mediante DRX

La identificación de minerales mediante DRX es un proceso sumamente laborioso por lo que se seleccionaron 14 muestras para realizar la identificación de 10 pasivos ambientales y 4 sedimentos, el detalle completo sobre los difractogramas y mineralogía de las muestras se encuentran en el anexo D. A continuación, se muestra algunos de los minerales identificados en las diferentes muestras, se seleccionaron estas por la relevancia de los minerales presentes.

7.5.1. Pasivos ambientales

Pasivo ambiental 1

Tabla 9. Minerales identificados en la muestra PA1-01 (0-25)

Clave de muestra	Ficha PDF2	Fases minerales identificadas	Fórmula química
PA1-01 (0-25)	79-1906	Cuarzo	SiO_2
	82-0576	Moscovita	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(F,OH)_2$
	24-0495	Illita	$(K,H_3O)(Al,Mg,Fe)_2(Si,Al)_4O_{10}[(OH)_2,(H_2O)]$
	71-0367	Haycockita	$Cu_4Fe_5S_8$

Se observa en la tabla 9 los minerales presentes en la muestra de pasivos ambientales superficiales son: Cuarzo 50%, Moscovita, Illita, Haycockita un mineral sulfurado de cobre ($CuFe_5S_8$) el cual representa 6% de la muestra y los minerales amorfos no identificados.

Tabla 10. Minerales identificados en la muestra PA1-01 (150-200)

Clave de muestra	Ficha PDF2	Fases minerales identificadas	Fórmula química
PA1-01 (150-200)	79-1906	Cuarzo	SiO_2
	82-0576	Moscovita	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(F,OH)_2$
	45-1353	Greenalita	$(Fe^{2+},Fe^{3+})_23Si_2O_5(OH)_4$

En la tabla 10 se observan los minerales identificados de una mayor profundidad de la zanja que fue tomada la muestra de la tabla 9, está conformada por 53% cuarzo, 33% moscovita, 12% de Greenalita y amorfos a diferencia del difractograma anterior que presenta minerales de Cu-Fe-S si observamos las concentraciones de elementos de la Tabla 30. La concentración de cobre en esta muestra es 16 veces mayor, no se observan minerales de Cu-Fe-S, esto puede ser debido a que los minerales de cobre presentan una estructura amorfa la cual no es posible identificar utilizando la difracción de Rayos X.

Pasivo ambiental 2

Tabla 11. *Minerales identificados en la muestra PA2- 02 (0-25)*

Clave de muestra	Ficha PDF2	Fases minerales identificadas	Fórmula química
ZJH1-02 (0-25)	79-1906	Cuarzo	SiO ₂
	82-0576	Moscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(F,OH) ₂
	70-0983	Yeso	CaSO ₄ 2H ₂ O
	36-0427	Jarosita	KFe ³⁺ ₃ (OH) ₆ (SO ₄) ₂
	87-0615	Pargasita	NaCa ₂ (Mg ₄ Al)(Si ₆ Al ₂)O ₂₂ (OH) ₂

En la tabla 11 se muestran los diferentes minerales identificados para la muestra Pasivo Ambiental 2. El cuarzo se encuentra en 6.61%, la Moscovita 17.9%, el yeso en 13.1%, también contiene un 11.4% de Pargasita, 19% de minerales amorfos y la **Jarosita en 39.5%**. La presencia de este mineral es muy importante ya que puede estar como nanomineral metaestable con una gran área superficial, el cual tiene un gran potencial de sorción de otros elementos en solución por lo que una parte de los elementos contenidos pueden estar contenidos en este nanomineral (Escobar-Quiroz, Villalobos-Peñalosa, Pi-Puig, & Martín Romero, 2019) .

7.5.2. Sedimentos

Tabla 12. *Minerales identificados en la muestra ZSED-01 (0-25)*

Clave de muestra	Ficha PDF2	Fases minerales identificadas	Fórmula química
ZIZED-01 (0-25)	79-1906	Cuarzo	SiO ₂
	82-0576	Moscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(F,OH) ₂
	09-0466	Albita	NaAlSi ₃ O ₈
	87-2070	Diópsido	MgCaSi ₂ O ₆

Los resultados del difractograma se muestran en la tabla 12. Los sedimentos están formados principalmente por cuarzo 45% y moscovita 35%, el resto está conformado por albita 10%, diópsido 7% y amorfos 5%.

7.6. Determinación de la concentración total por ICP-MS y NAA

La técnica de FRX está limitada por los elementos que se pueden detectar y los límites de detección de equipo, existe la posibilidad de que existan en la zona otros elementos con potencial para revalorizar tales como elementos estratégicos y tierras raras. Para ello se enviaron 33 muestras de varias matrices al laboratorio Actlabs, donde se realizaron los siguientes análisis: Análisis por activación neutrónica (INAA), La espectrometría masas por plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) y espectroscopía de emisión óptica por plasma acoplado inductivamente (ICP-OS). En la Tabla 13 se presentan los elementos determinados por Actlabs. Sobresale el cobre, molibdeno y galio como posible fuente de revalorización.

Tabla 13. Promedio de elementos potencialmente revalorizables y su ley de corte.

Elemento	Au	Ag	Cu	Mo	Co	Ga	In	Re
Matriz	ppb	ppm	mg/kg	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Pasivos ambientales	91.70	7.52	2817.00	118.30	20.82	24.62	9.04	0.199
Sedimentos	35.83	1.46	613.92	16.41	14.21	20.10	0.44	0.021
Ley de corte	1.5 mg/kg ^A	20,26 mg/kg ^B	1500 ppm ^C	100 ppm ^D	1500 ppm ^E	30 ppm ^F	100 ppm ^G	150 ppm ^H

A (Orla Mining, 2021)

B (Endeavour Silver, 2021)

C (SOUTHERN COPPER CORPORATION, 2021)

D (SOUTHERN COPPER CORPORATION, 2021)

E (British Geological Survey, 2009)

F (Nora K. Foley, 2017)

G (Martin Lokanc, 2015)

H (Gunn, 2013)

Para contrastar los resultados obtenidos en la tabla 13 se compararon con las leyes de corte de diversas fuentes, ya que en el informe anual (SOUTHERN COPPER CORPORATION, 2020) solo considera el cobre y molibdeno, para el zinc 2% (20,000 ppm) (Aguirre, 2017), para la plata 20 ppm (Nevada Silver Corporation, 2021) y para el cobre la ley de corte para flotación es 0.45% (4500 ppm) y para lixiviación es 0.30% (3000 ppm); sin embargo, todo el material por encima de 0.15% (1500 ppm) es llevado a las pilas de lixiviación, para el Molibdeno la concentración explotable es a partir de las 100 ppm (SOUTHERN COPPER CORPORATION, 2021). Dado estos límites, los elementos con posible revalorización son el cobre y molibdeno. El galio en la concentración máxima se

encuentra por encima de la ley de corte y como concentración promedio es muy cercano al valor de la ley de corte por lo que se sugiere tener en cuenta para su posible revalorización en el futuro. Con respecto a las tierras raras (Tabla 14, Tabla 15) la literatura consultada indica que para una posible revalorización es requerido que la concentración TREO (Total Rare Earth Oxides) tabla 15. sea mayor al 0.1% (Namibia Critical Metals Inc., 2022); sin embargo, la concentración promedio en la zona de mayor concentración no es suficiente en este momento para establecer un desarrollo para su extracción.

Tabla 14. Concentración de Óxidos de tierras Raras Ligeras (LREO)

Concentración Promedio	La ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	Pr ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	Sm ₂ O ₃
Matriz	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Pasivos ambientales	45.528	92.506	11.421	45.389	10.626
Sedimentos	32.282	65.081	6.871	25.624	5.203

Tabla 15. Concentración de óxidos de Tierras Raras Pesadas más óxido de Itrio.

Concentración promedio	Gd ₂ O ₃	Tb ₂ O ₃	Dy ₂ O ₃	Ho ₂ O ₃	Er ₂ O ₃	Yb ₂ O ₃	Lu ₂ O ₃	Y ₂ O ₃
Matriz	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	Ppm	ppm
Pasivos ambientales	8.364	6.606	1.080	1.197	3.414	3.290	0.358	32.113
Sedimentos	4.675	4.232	0.618	0.857	2.472	2.886	0.355	22.111

Tabla 16. Concentración de Óxidos de tierras Raras Ligeras (LREO), Concentración de óxidos de Tierras Raras Pesadas más óxido de Itrio (HREO + Y₂O₃) y Tierras raras totales más óxido de itrio (TREO).

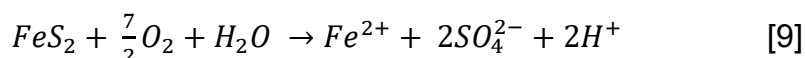
CONCENTRACIÓN PROMEDIO	LREO	HREO + Y ₂ O ₃	TREO + Y ₂ O ₃
MATRIZ	ppm	ppm	ppm
PASIVO AMBIENTAL	207.54	263.97	471.510
SEDIMENTOS	135.24	174.45	309.690

Debido a los alcances de este trabajo el elemento al que se dedicará mayor atención es el cobre debido a su alta concentración, abundancia en la zona de estudio y la optimización del proceso para recuperar este elemento. Se hace la recomendación de ampliar la revalorización para el galio y molibdeno.

7.7. Determinación del área y volumen revalorizable

Para determinar el área revalorizable del sistema fluvial El Barrilito se usaron imágenes satelitales donde se rastrearon las zonas amarillas que indican la presencia de mineral oxidado del pasivo ambiental. Para confirmar que se trata de mineral oxidado arrastrado y no la coloración natural de los sedimentos se utilizó como referencia los datos obtenidos por FRX por lo que una concentración de Cobre mayor a 600 ppm indicará una influencia de tipo antropogénica, esto lo suponemos debido a la estimación de los valores de fondo de la zona el cual podría decirse que toda concentración por debajo de 600 ppm es natural para esta zona mineralizada. Los valores obtenidos están basados en un análisis estadístico de cuartiles en las muestras de fondo, por lo que toda concentración que se encuentre por debajo del cuarto cuartil se puede considerar valores normales de la zona (Laboratorio de Geoquímica Ambiental Aplicada, IGL, UNAM, 2020). Una vez obtenidos los puntos de concentraciones que representan una anomalía geoquímica se determinaron las zonas donde es más probable que se encuentre el arrastre de los pasivos ambientales. Para ello se utilizó una referencia satelital que contrasta mejor la orografía e hidrografía de la zona para mejorar este criterio se utilizaron las memorias fotográficas del muestreo además del uso de curvas de nivel, concordando que las zonas más altas presentan una menor concentración de cobre y otros elementos.

Otros parámetros para la determinación de la zona afectada por el arrastre de los pasivos ambientales es el pH y la conductividad eléctrica. Los residuos mineros sulfurados expuestos al oxígeno y agua provocan drenaje ácido de mina aunado a la formación de otras especies químicas que presentan características ácidas. Esto se debe a la oxidación de la pirita (FeS_2), por ser uno de los sulfuros minerales más comunes que acompañan a las menas de interés económico. La reacción involucrada en la formación de drenaje ácido de mina es:



La cual genera protones, de tal forma que un pH bajo en el arroyo puede significar que existe la presencia de mineral sulfurado. Este fenómeno de pH puede ser apreciado mejor en la Figura 12.

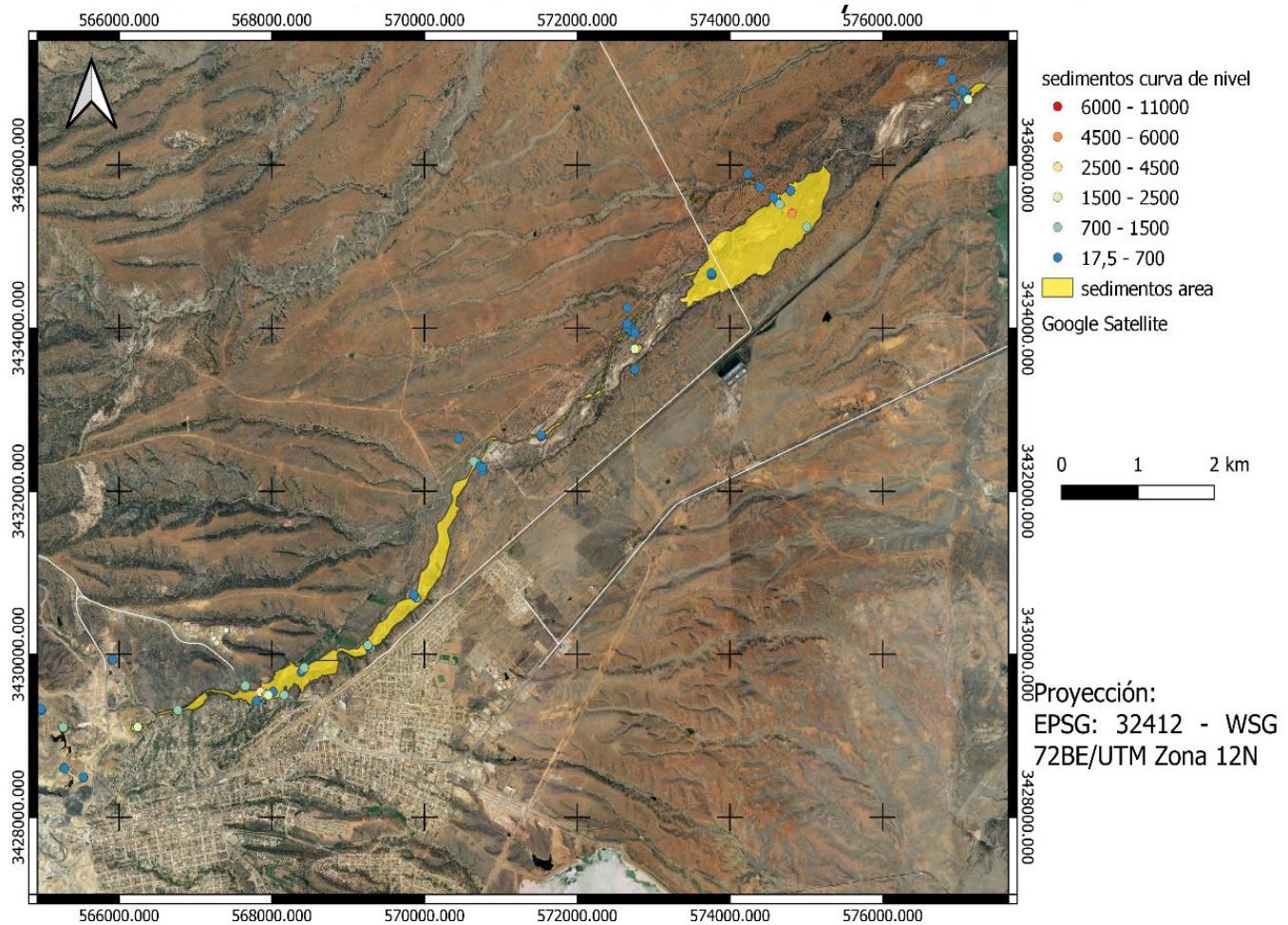


Figura 16. Área revalorizable del sistema fluvial El Barrilito elaborado con Qgis 3.28.2

En la figura 16 se puede observar el área de sedimentos posiblemente revalorizable procedente del impacto de los diferentes pasivos ambientales presentes en la zona de estudio. Esta área se ha establecido con base en la concentración de cobre tomando el valor de 1500 ppm para delimitar los márgenes del área. Toda concentración mayor a 1500 ppm dentro del perímetro de la curva de nivel se ha englobado para determinar el área presente en la Figura 16. Es por lo que el área presenta una morfología irregular ya que sigue la orografía de la zona circundante al arroyo y tiene un área calculada de 2,165,085 m².

Las áreas mostradas en la figura 17 y 18 pertenecen a los pasivos ambientales .se observa el área del pasivo ambiental 1 (figura 17) la cual tiene un área aproximada de 37,631.4 m². La figura 18 pertenece al pasivo ambiental 2 cuya área es aproximada a 53,315.2 m².



Figura 17. Área revalorizable en el pasivo ambiental 1 elaborado con Qgis 3.28.2

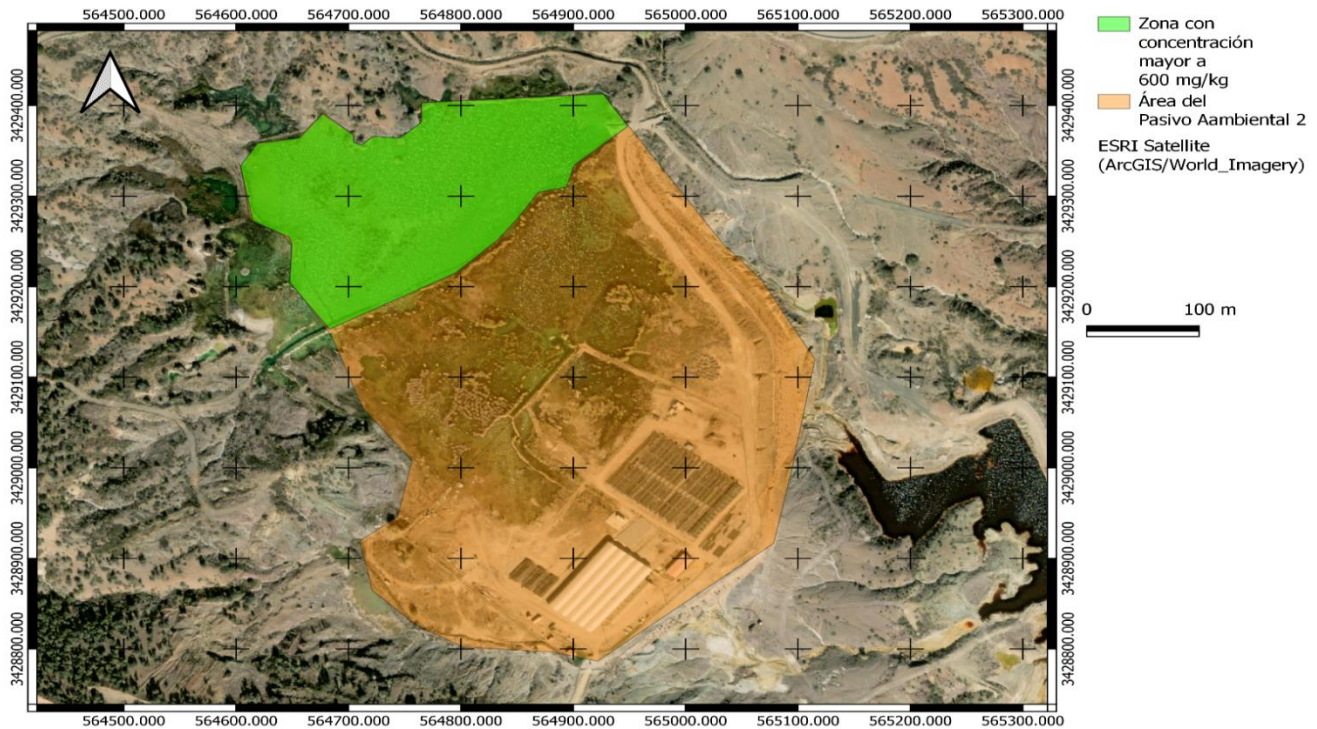


Figura 18. Área posiblemente revalorizables de Pasivo Ambiental 2 elaborado con Qgis 3.28.2

7.7.1. Determinación del volumen

La determinación del volumen parte del área calculada y la profundidad de la zona revalorizable, esto se realizó con base en la concentración de cobre, para los sedimentos la mayor concentración de cobre se encuentra en la zanja 01 la cual es la más cercana a la fuente de contaminación por lo que se esperaba una concentración alta. Para el resto de las zanjas la concentración baja drásticamente en la profundidad mayor a 25 cm lo que nos indica que las concentraciones son superficiales. Esto lo podemos observar con más detalle en la Figura 19. Se observa que las concentraciones más altas están ubicadas en la superficie excepto por la muestra de ZSED-01 cuya concentración varía, las concentraciones más altas en la superficie y a 1 m de profundidad. El área con mayor concentración correspondiente a los sedimentos del arroyo Cananea Vieja esta área equivalente a 349,960 m² a una profundidad de un metro obteniendo 349,960 m³ de material para el resto del área en el sistema fluvial El Barrilito el área determinada es de 1,815,100 m² a una profundidad superficial de 25 cm por lo que el volumen estimado es de 453,773.2 m³. Bajo estas consideraciones el volumen aproximado sería de 803,733.2 m³ con una concentración promedio de Cu de 1068 ppm esta concentración es inferior a la requerida para integrar al proceso de lixiviación; sin embargo, una extracción mayor al 62% del cobre podría cubrir todos los gastos operativos.

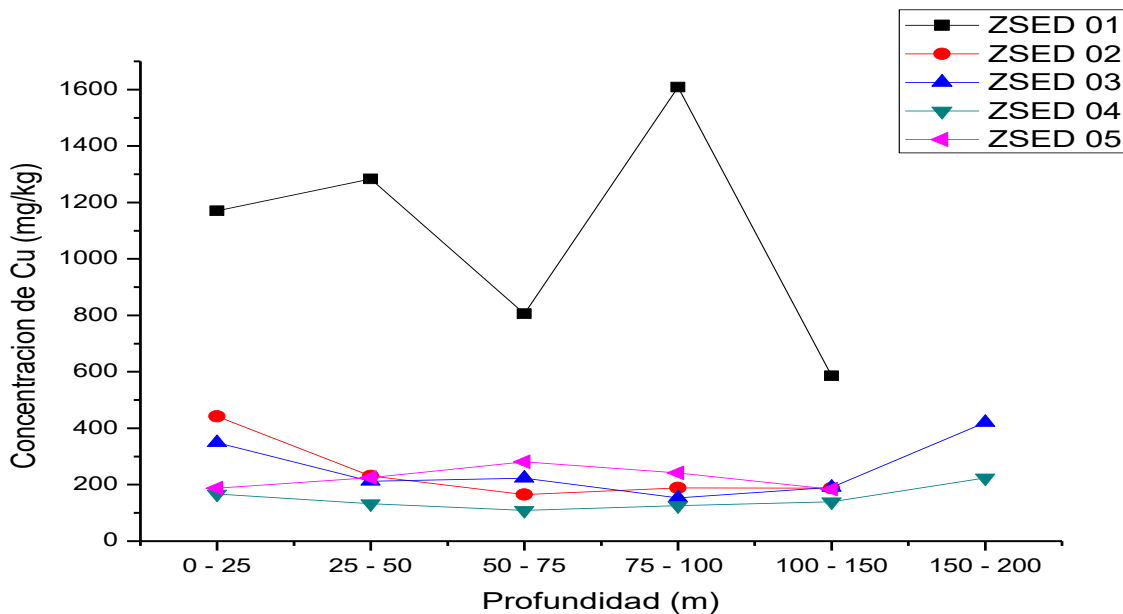


Figura 19. Gráfica de la concentración de cobre en las zanjas en los sedimentos del sistema fluvial El Barrilito y el Río San Pedro.

La concentración de Cu en el pasivo ambiental 1 se graficó en la figura 20. En esta gráfica se observa que la concentración es mayor a mayor profundidad y llega a su máximo a los 2.5 m en la zanja 1, en el resto de las zanjas la concentración tiene la misma tendencia, sin embargo, la profundidad de las zanjas solo llega hasta 2 m por lo que no se tiene el perfil completo de concentraciones y no se puede establecer si a 2.5 metros es la máxima concentración o si a mayor profundidad esta aumenta o disminuye, se recomienda un muestreo extendido a mayor profundidad para tener todo el perfil de concentraciones.

El fenómeno del aumento de concentración directamente proporcional al aumento de profundidad puede ser producto de percolación del mineral de cobre y también se asocia al tiempo ya que a mayor profundidad se esperaría que los pasivos ambientales fuesen más viejos y tuvieran una menor eficiencia en el proceso.

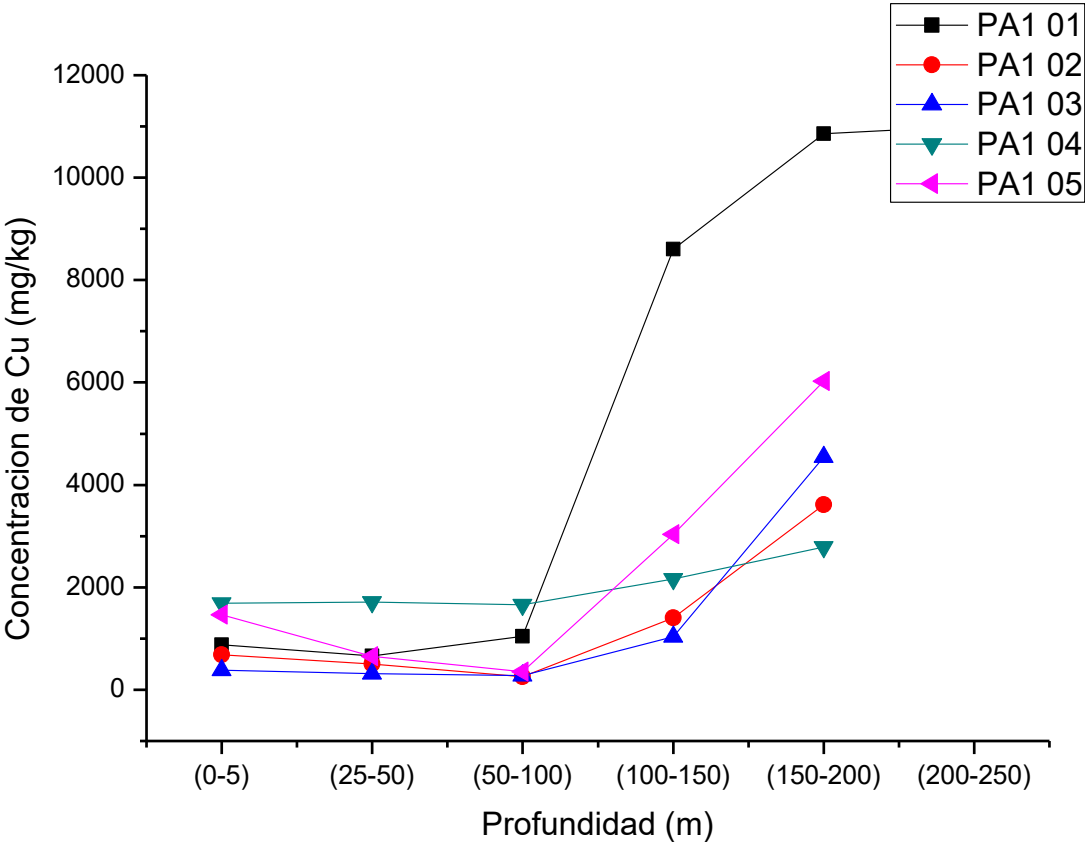


Figura 20. Gráfico de concentración vs profundidad de la zanja en los Pasivos ambientales 1.

En la figura 21. se observa la gráfica de concentración vs profundidad para el pasivo ambiental 2. En esta zona la concentración más alta es aproximada a 1200 ppm. La tendencia en este pasivo ambiental es más errática, aunque pareciera que en algunas zanjas la concentración sube a medida que aumenta la profundidad, es probable que en algún punto el proceso fuera mejorado dejando una menor concentración de cobre en los residuos y el aumento de concentración a la profundidad de 50 a 100 cm sea producto de la percolación del cobre solubilizado a lo largo del tiempo.

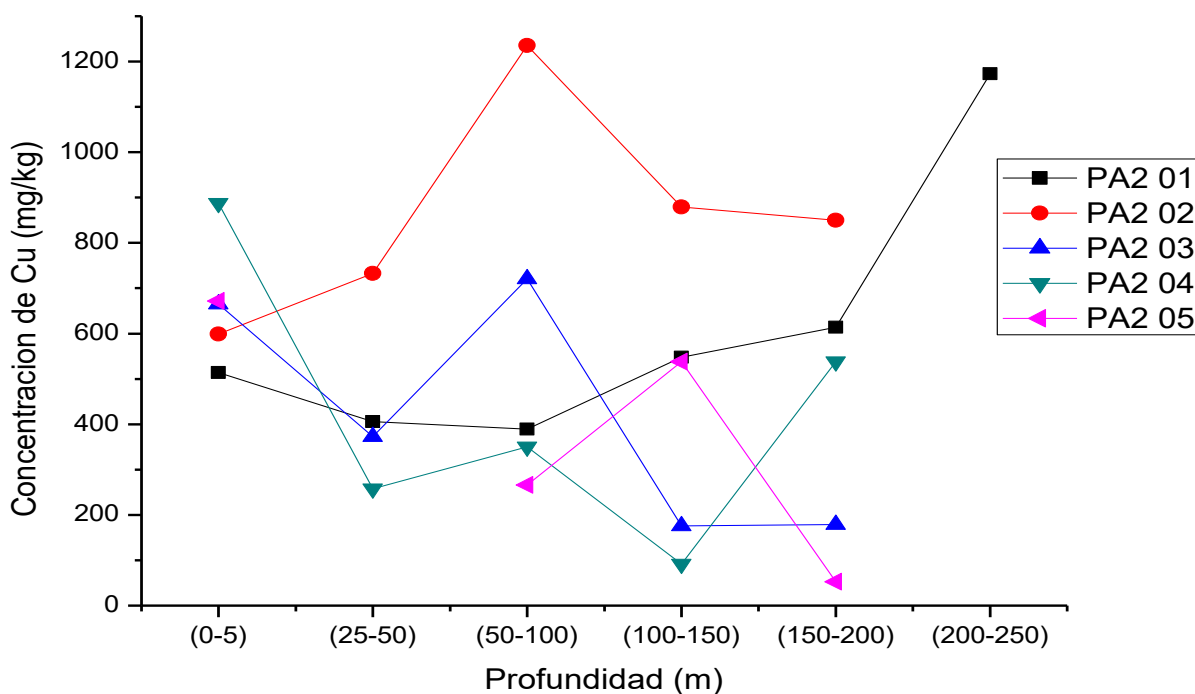


Figura 21. Gráfico de concentración vs profundidad de las muestras del Pasivo ambiental 2.

7.8. Conclusión preliminar de la caracterización geoquímica

Se ha observado que existen concentraciones atractivas de cobre, molibdeno y galio, el elemento que se ha seleccionado para revalorizar es el cobre, debido a su alta concentración y proceso de extracción relativamente sencillo. Podemos inferir que debido al pH bajo presente en la zona de estudio y la presencia de alta conductividad eléctrica se puede suponer que existen condiciones oxidantes, sin embargo, el cobre soluble solo representa el 5% del total de la concentración del

elemento y la mineralogía presente ha mostrado que en la superficie de los pasivos ambientales se encuentran como sulfatos o probablemente estén absorbidos en minerales metaestables a pH bajo como la jarosita, por otro lado a mayor profundidad el cobre se encuentra en un ambiente anóxico en el que predominan los sulfuros por lo que se planteó una extracción del cobre imponiendo las condiciones de estabilidad de los iones de Cu^{2+} que se muestran en el diagrama de Pourbaix de la Figura 3. Con la caracterización ha estimado un volumen revalorizable de 884,338 m³ el cual contiene una cantidad inferida 2,547.72 toneladas de Cu.

7.9. Extracción de cobre mediante lixiviación.

7.9.1. Permeabilidad.

La práctica ha mostrado que existen cambios de permeabilidad en las pilas durante el proceso de lixiviación. Lo que afecta la colección de las soluciones y puede influir negativamente en la estabilidad estática y sísmica de las pilas.

Los cambios de permeabilidad en las pilas se deben a la migración y reubicación de partículas de menor tamaño, terminan por relocalizarse en determinados planos constituyendo substratos comparativamente impermeables. La migración podría potenciarse debido a la creación de finos por efecto del chancado químico de las partículas mayores producto del ácido sulfúrico (Emilio López, 2012). Es por lo que la permeabilidad juega un papel tan importante y será crucial en los experimentos presentados ya que estos residuos al ser subproducto del proceso de concentración gravimétrica presentan una granulometría muy fina.

7.9.2. Granulometría

El tamaño de partícula es uno de los factores más importantes en el proceso de lixiviación debido a que la superficie interacciona con la solución lixivante. A medida que el tamaño de partícula disminuye, el área superficial por unidad de masas aumenta. La adición de porosidad, especialmente si se trata de poros muy pequeños hace que la superficie aumente mucho más.

Polvos muy gruesos pueden tener áreas superficiales de unos pocos centímetros cuadrados por gramo mientras que materiales porosos pueden tener áreas mayores que un campo de fútbol (varios miles de metros cuadrados por gramo) (iesmat, 2023).

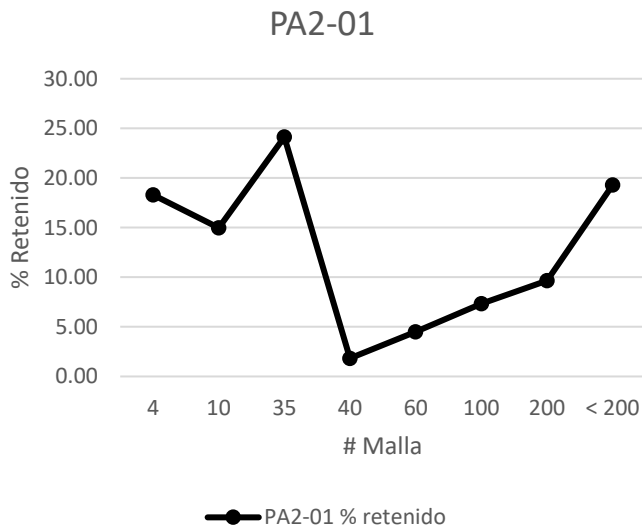


Figura 22. Distribución granulométrica de la muestra del Pasivo ambiental 2 (PA2-01)

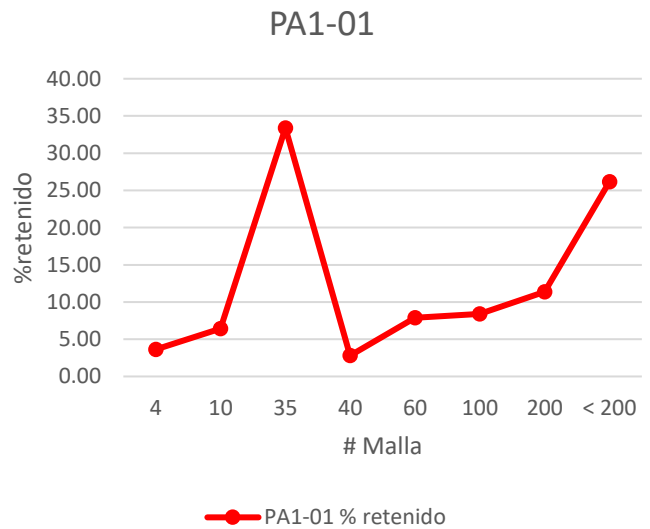


Figura 23. Distribución granulométrica de la muestra del Pasivo ambiental 1 (PA1-01)

En la Figura 22. se observa el Pasivo ambiental 2 la cantidad de finos es el 37% y varía significativamente con el material grueso mayor a la malla 35 (0.5 mm) hasta la malla 4 (4.56 mm) es superior al 57%.

Para la figura 23 se observa la distribución del tamaño de partículas del pasivo ambiental 1 zanja 3 que se usaron para realizar los experimentos de lixiviación, en las muestras el tamaño de partícula en mayor proporción se encuentra en la malla 35 (0.5 mm) de 24% a 42%, el material que se considera polvo fino a partir de la malla 60 (0.250 mm) y lo que atraviesa el tamiz 200 (0.127 mm) para el Pasivo ambiental

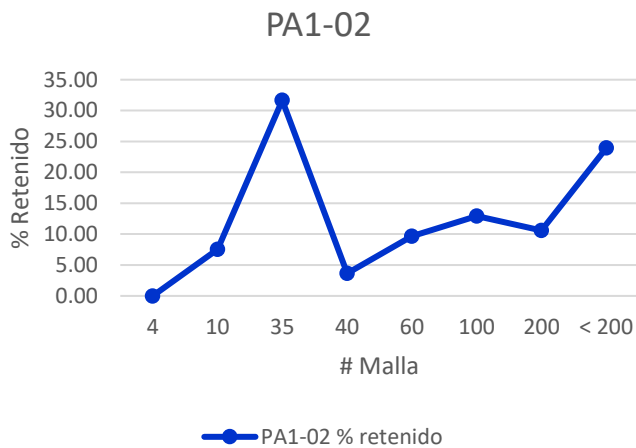


Figura 25. Distribución granulométrica de las muestras del Pasivo ambiental 1 (PA1-02)

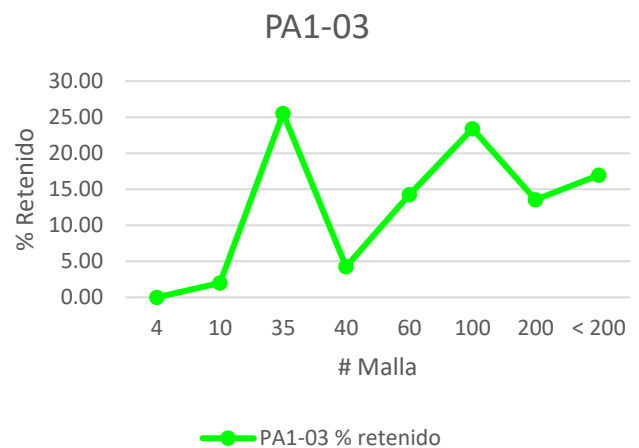


Figura 26 Distribución granulométrica de las muestras del Pasivo ambiental 1 (PA1-03)

En las figuras 23, 24, 25, 26 y 27. se puede observar la distribución granulométrica de la zanja de las muestras del pasivo ambiental 1, se eligieron estas 5 zanjas para caracterizar esos pasivos ambientales que han presentado la mayor concentración de cobre encontrada en los residuos. Como podemos observar en las muestras PA1-01, PA1-02, PA1-03, PA1-04 y PA1-05 la mayor proporción se encuentra en la malla 35 (0.5 mm) del 25% al 41%. Los finos se encuentran entre el 49% y el 67% por lo que se formarán substratos que bloquearán el flujo de la solución lixiviante por lo que es necesario aumentar la permeabilidad agregando material grueso.

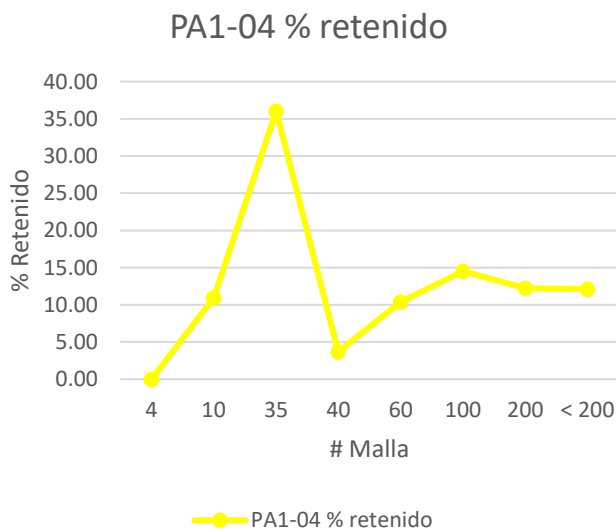


Figura 27. Distribución granulométrica de las muestras del Pasivo ambiental 1 (PA1-04)

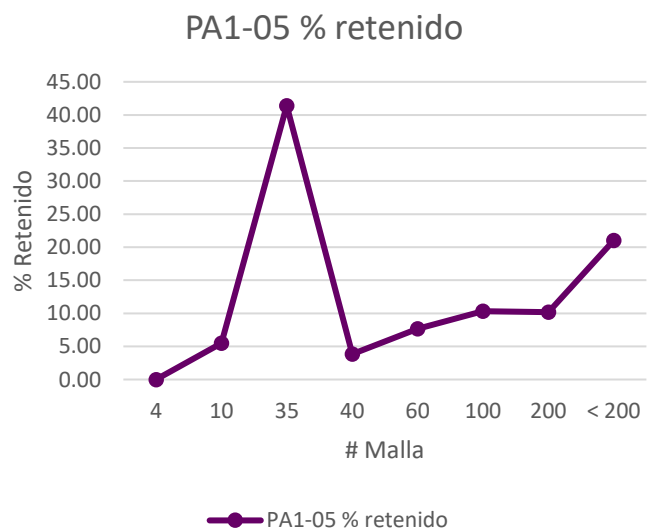


Figura 24 Distribución granulométrica de las muestras del Pasivo ambiental 1 (PA1-05)

En la Figura 28 los sedimentos presentan una granulometría del 47% del material son gruesos entre la malla 4 (4.56 mm) y la malla 35 (0.5 mm) y el 52% de material fino siendo la mayor proporción partículas con un tamaño menor a malla 200 (0.127 mm).

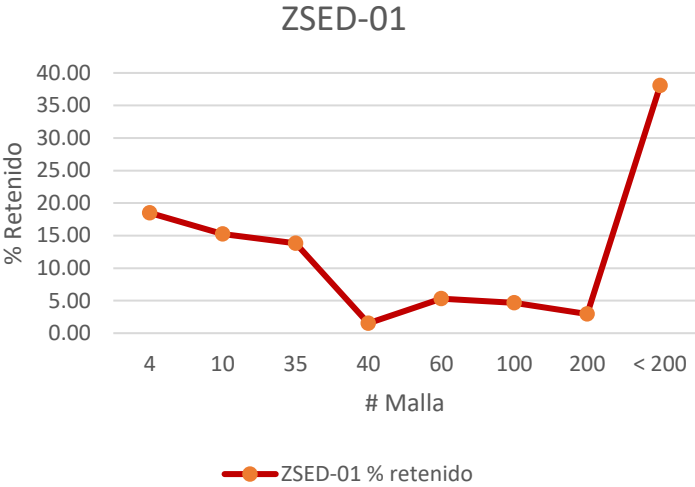


Figura 28. Distribución granulométrica de los sedimentos

7.9.3. Densidad

La densidad calculada para los pasivos ambientales y sedimentos se presenta en la tabla 17 se observa que la mayor densidad está presente en los sedimentos del sistema fluvial El Barrilito esto es debido a la concentración de elementos pesados y una granulometría más fina presente en los sedimentos, esto se puede ser debido a una mayor porosidad producto de una concentración de partículas gruesas presentes en los pasivos ambientales.

Tabla 17. Densidad calculada de las muestras

Matriz	Densidad calculada [Kg·m ⁻³]
Pasivo ambiental 1	2108.7
Pasivo ambiental 2	2334.2
Sedimentos	2480.1

7.9.4. Determinación del Coeficiente de permeabilidad específica del mineral

La determinación de la permeabilidad se realizó utilizando la ecuación 10. (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2016)

Donde:

K = Coeficiente de permeabilidad.

D = Diámetro.

h_i = Altura inicial

h_f = Altura final

t_i = tiempo inicial

t_f = tiempo final

$$K = \frac{\frac{D}{2} \cdot \ln\left(\frac{h_i}{h_f}\right)}{2(t_f - t_i)} \quad [10]$$

Para calcular el coeficiente de permeabilidad se utilizaron los datos siguientes datos:

D = 0.044 m

h_i = 0.14 m

h_f = 0.12 m

t_i = 3.864x10⁴ s

t_f = 4.65x10⁴ s

$$K = \frac{\frac{0.044 \text{ m}}{2} \cdot \ln\left(\frac{0.14 \text{ m}}{0.12 \text{ m}}\right)}{2 \cdot (4.65 \times 10^4 - 3.864 \times 10^4)} = 2.15 \times 10^{-7} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Los resultados de la permeabilidad se muestran en la tabla 20. Como se puede observar comparando los resultados obtenidos con los valores de la literatura presentes en la Tabla 22 la permeabilidad de las muestras se encuentra entre los valores típicos de la arena arcillosa y la sílice.

Tabla 18. Coeficiente de permeabilidad específica de mineral para el Pasivo ambiental 2 (PA2-01), (PA2-02), el Pasivo ambiental 1 (PA1-01), (PA1-02), (PA1-03), (PA1-04), (PA1-05), y Sedimentos del sistema fluvial El Barrilito.

Muestra	Coeficiente de permeabilidad específica de mineral [$m \cdot s^{-1}$]
SED	2.15×10^{-7}
PA1-01	6.29×10^{-6}
PA1-02	3.30×10^{-6}
PA1-03	4.78×10^{-6}
PA1-04	6.42×10^{-8}
PA1-05	7.07×10^{-8}
PA2-01	2.30×10^{-6}
PA2-02	5.87×10^{-7}

Como se puede observar en la tabla 18 los valores obtenidos se encuentran entre 2.24×10^{-8} y 6.29×10^{-6} , comparado con la tabla 19 estos valores de permeabilidad se encuentran entre los valores típicos de la arena limosa, estos valores son representativos de una permeabilidad baja a muy baja es importante tener en cuenta que se agregó 50% en volumen de arena sílica mayor a 2 mm por lo que la permeabilidad de los pasivos ambientales sería menor.

Tabla 19. Valores típicos de permeabilidad para diferentes texturas de suelo. (Berry, 1993)

Tipo de suelo	Coeficiente de permeabilidad ($m \cdot s^{-1}$)
Arcilla	$< 10^{-9}$
Arcilla arenosa	$< 10^{-9}$ a 10^{-8}
Arena limosa	10^{-9} a 10^{-6}
Turba	10^{-6} a 10^{-4}
Arena fina	10^{-4} a 10^{-3}
Arena gruesa	10^{-4} a 10^{-3}
Arena gravosa	10^{-3} a 10^{-2}

7.9.5. Lixiviación en columnas

El experimento se realizó de acuerdo con el esquema de la figura 9. Se optó por un sistema de riego continuo que dispensaba un total de 100 ml de solución lixivante por día el cual era desalojado hasta pasadas 24 horas.

Durante la lixiviación de las columnas lo más notable fue la coloración de las soluciones, las muestras del Pasivo ambiental 1 resultaron con una coloración azul o verdosa, las muestras del Pasivo ambiental 2 presentaron una coloración más amarillenta, a diferencia de los sedimentos que presentaron una coloración marrón debido a que existe una mayor concentración de Hierro en los sedimentos. Esto se puede observar en la figura 29. Las diferentes coloraciones de las soluciones lixiviadas.

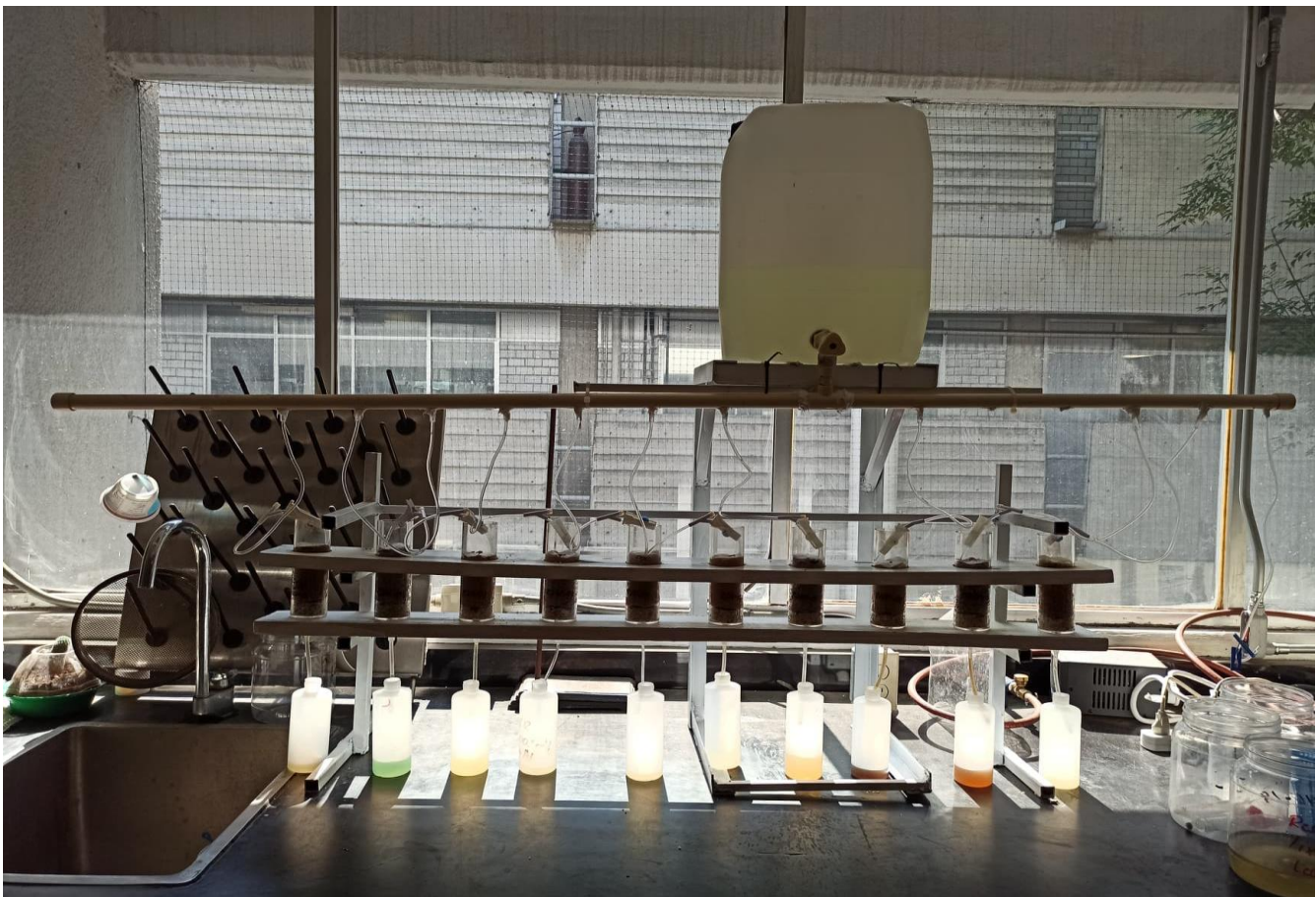


Figura 29. Sistema de lixiviación en columnas con solución preñada de distintas coloraciones respecto a la muestra.

7.9.5.1. Extracción de elementos por lixiviación en columnas.

La lixiviación es una técnica de extracción no selectiva por lo que el ácido sulfúrico propiciará la oxidación de cualquier mineral sulfurado presente, con ello la solubilización de diversos elementos, el Pb, Zn, Cu y en una cantidad significativa Fe.

En la figura 30. se puede observar la recuperación de elementos en las muestras compuestas lixiviadas. La recuperación de cobre está entre el 47.8% para los sedimentos y el 84.6% para el Pasivo ambiental 1. Para el Plomo la recuperación es muy baja ya que se encuentra entre el 0% y el 25% para el Pasivo ambiental 1. La recuperación de zinc se encuentra entre el 28% para el Pasivo ambiental 1 y el 61.9% para el Pasivo ambiental 2. Para el hierro la se presenta una extracción del 39.6% en la muestra los Pasivos ambientales superficiales y en su mayor extracción del 67.3% presente en las muestras del Pasivo ambiental 1. La presencia de hierro en solución será de interés para el proceso de la extracción por solventes ya que es un elemento indeseable.

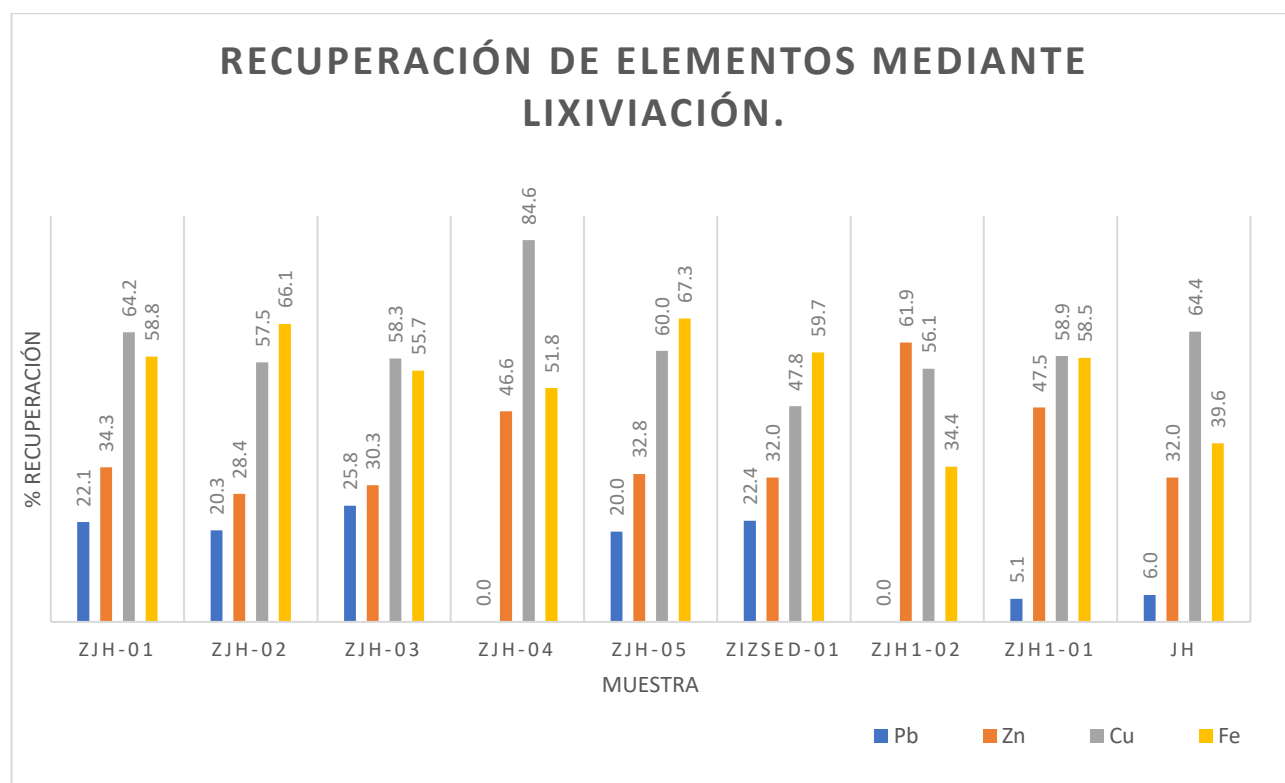


Figura 30. Recuperación mediante lixiviación de Pb, Zn, Cu y Fe.

7.9.5.2. Extracción de cobre por lixiviación en columnas

En la sección anterior se analizó el porcentaje de extracción de la solución, para dimensionar la cantidad de cobre recuperado. En la figura 31 se observa la concentración de cobre antes de ser sometido en a la lixiviación en columnas y la concentración después de la simulación del proceso, se observa que los valores disminuyen considerablemente después de lixiviar, cabe destacar que esta recuperación es correspondiente a 6 días de experimentación a diferencia del periodo habitual que es entre 2 y 5 años de riego en los terreros por lo que se esperaría una obtención mayor al incorporar al proceso cuya recuperación es aproximadamente del 65% (SOUTHERN COPPER CORPORATION, 2021) .

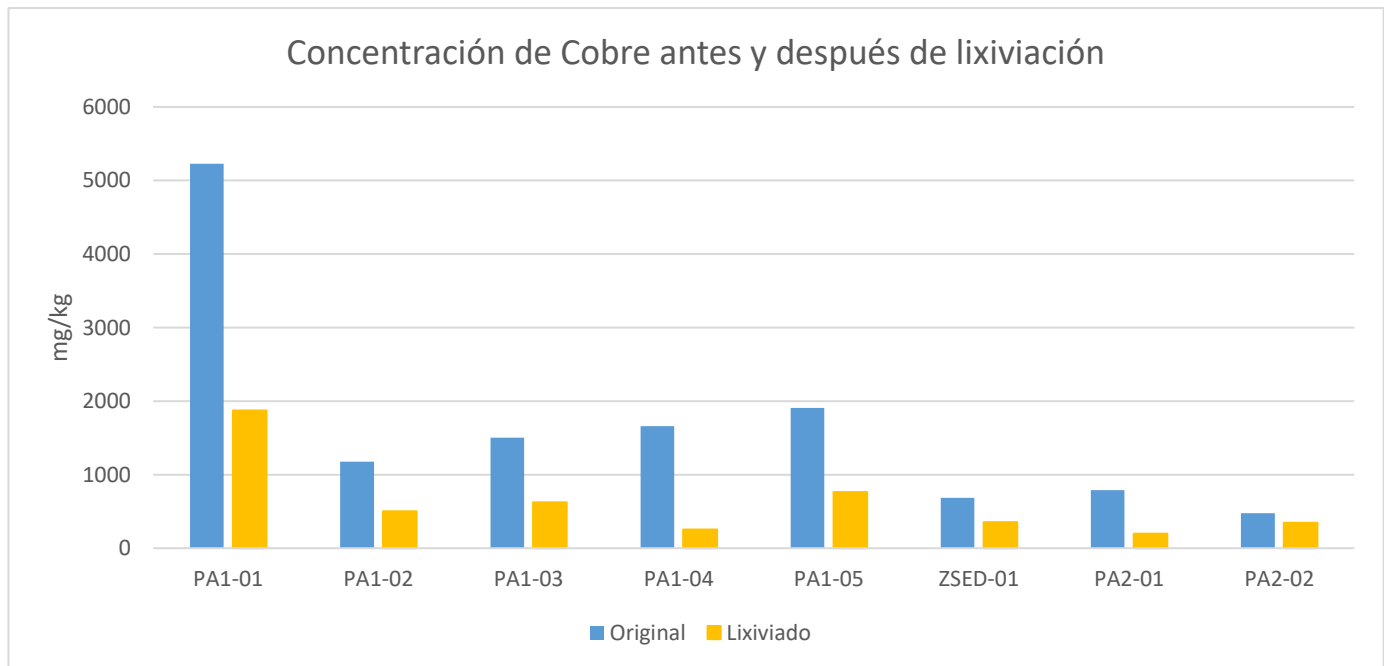


Figura 31. Gráfico comparativo de concentración de cobre antes y después de la lixiviación en columna.

7.9.5.3. Estimación de cobre.

La determinación de cobre se realizó a partir del cálculo de volumen del capítulo 7.7.1 se multiplicó el volumen calculado por la densidad de las diferentes zonas de estudio, así se obtuvo la masa que

representan las diferentes zonas de estudio y el potencial cobre contenido en estas. A continuación, se presenta un ejemplo de los cálculos realizados para estimar la cantidad de cobre:

$$\text{Estimación de cobre [Ton]} = (\text{Area [m}^2\text{)})(\text{profundidad[m]}) \left(\text{densidad promedio} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \right) \left(\text{Concentración promedio} \left[\frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right] \right) \left(\frac{1 \text{ Ton}}{1 \times 10^9 \text{ mg}} \right)$$

$$\begin{aligned} \text{Estimación de cobre [Ton]} &= (37600[\text{m}^2])(2[\text{m}]) \left(2108.7 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \right) \left(2600 \left[\frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right] \right) \left(\frac{1 \text{ Ton}}{1 \times 10^9 \text{ mg}} \right) \\ &= 412.3 \text{ Ton} \end{aligned}$$

Para determinar el valor del cobre se utilizó un valor de 9,061.00 USD/Ton de cobre cátodo grado A (indexmundi, 2023)

Tabla 20. Estimación de contenido de cobre y valor estimado en las zonas estudiadas

Zona	Área (ha)	Volumen aproximado (m ³)	Concentración promedio de Cu (ppm)	Cobre estimado (Ton)	Valor del cobre* (USD)
Sedimentos del sistema fluvial El Barrilito	216.5	803,745.75	1068	2129	19,290,869
Pasivo ambiental 1	3.76	75,262.82	2600	412.3	3,736,850
Pasivo ambiental 2	5.33	5,331.18	516	6.42	58,181

En la tabla 20 se observa la estimación de cobre de las distintas zonas que se estudiaron y el valor que representa en el mercado si se pudiera extraer el 100% en cátodos electrolíticos de pureza 99,97 - 99,99%, este valor base ayudará a calcular la rentabilidad del proyecto, es necesario evaluar otros aspectos tales como la eficiencia del proceso, costos de extracción, costos de acarreo del material, más adelante se evaluarán estos costos para definir la rentabilidad.

7.9.5.4. Recuperación experimental.

Se estableció un periodo experimental de 6 días con propósito de evaluar una extracción de Cobre y otros elementos presentes por medio del proceso de lixiviación con ácido sulfúrico. Se realizó una estimación basada en los resultados de Concentración total determinada por espectroscopía de Fluorescencia de rayos X (Anexo A) y se comparó con los resultados obtenidos de la lixiviación para comparar el cobre total contenido y el cobre extraído.

Tabla 21. Cálculo del valor de cobre basado en el rendimiento obtenido mediante la experimentación.

Zona	Cobre aproximado (Ton)	Valor del cobre (USD)	Rendimiento experimental de la lixiviación	Cobre recuperable (Ton)	Valor de cobre recuperable (USD)
Sedimentos del sistema fluvial El Barrilito	2129	19,290,869	47,8%	1018	9,221,035.4
Pasivo ambiental 1	412.3	3,736,850	64.9%	267.6	2,424,566.8
Pasivo ambiental 2	6.42	58,181	57.5%	3.69	33,448.7

En la tabla 21. Se observa un estimado de la recuperación de cobre en las diversas zonas de estudio, la zona que tiene mayor recuperación es el pasivo ambiental 1, la proyección de recuperación en toneladas de cobre representa más de 267 toneladas, lo cual solo representa el 26.29% de la zona donde existe más cobre que está ubicada en los sedimentos, la cual, aunque ha tenido la recuperación más pobre es la que representa mayor cantidad de cobre recuperable en la proyección. En total estas 3 zonas podrían representar una recuperación de 1,289.29 toneladas de

Cu el cual tendría un valor de 11,679,050.9 dólares más adelante se analizarán los costos y se realizará una comparación de los costos y beneficios.

8. Discusión de resultados

8.1. Caracterización geoquímica.

Mediante la experimentación presentada se ha determinado la presencia de minerales de los pasivos ambientales en la cuenca del río San Pedro en específico en los afluentes en los arroyos Cananea vieja y El Barrilito, utilizando el apoyo de mapas, bases de datos del INEGI, memoria fotográfica del muestreo, medición de pH, conductividad eléctrica, concentración total determinada por fluorescencia de rayos X y determinación de minerales por difracción de rayos X, se puede afirmar que existe una presencia de arrastre de los pasivos ambientales. Sin embargo, la concentración de elementos económicos representa una oportunidad para su extracción, la granulometría fina en la que se encuentran estos elementos facilita su extracción y las técnicas actuales más eficientes permiten aprovechar este pasivo ambiental como materia prima.

Mediante los análisis presentados se ha concluido que una fracción del cobre presente en la zona, se encuentra contenido en minerales sulfurados, otra fracción del cobre se encuentra fases solubles como sulfatos en el arroyo barrilito y se presume que el resto del cobre se encuentra encapsulado en la jarosita o retenido en la superficie de las arcillas presentes en los sedimentos. Es incierta la fracción que se encuentra contenida en sulfuros y la fracción encapsulada en la jarosita y arcillas debido a los límites de detección del equipo de DRX.

8.1.1. Elementos de interés y posiblemente recuperables.

En este trabajo se han establecido diversos elementos que se pueden recuperar de las diversas zonas de estudio para resumir los resultados se han sincretizado en la Tabla 22.

Tabla 22. Resumen de elementos valiosos en la zona

Elemento	Ley de corte	Concentración promedio	Potencial revalorizable	Máxima concentración [mg/kg]
Au	1,5 mg/ kg	0.0917	No	0.325
Ag	20,26mg/kg	7.52	No	19.7
Cu	1500 mg/kg	2817	Si	>10,000
Mo	100 mg/kg	118	Si	439
Zn	20000 mg/kg	1487	No	4240
Co	1500 mg/kg	30.02	No	49.5
Li	1000 mg/kg	31.03	No	45
Ga	30 mg/kg	19.14	Si	55.1
Ge	-	0.108	No	0.6
In	100 mg/kg	9.04	No	27.9
Rb	320 mg/kg	144.93	No	204
Re	150 mg/kg	0.199	No	0.204
Sr	940000 mg/kg	357	No	>1000
LREO	+	207.5	No	624
HREO + Y2O3	+	56.4	No	139
TREO + Y2O3	1000 mg/kg	263.9	No	756.9

En la Tabla 22, los elementos que son recuperables al menos desde el punto de concentración suficiente para obtener beneficio son: Cobre, molibdeno y galio, aunque en la concentración promedio el galio se encuentra por debajo de la ley de corte, en algunos puntos la concentración es casi el doble de la ley de corte por lo que se debería considerar el estudio del galio a futuro. El Pasivo ambiental 1 cuya concentración se eleva con respecto aumenta la profundidad, Es importante señalar que la zona del Pasivo ambiental es la fuente de afectación de los arroyos Cananea Vieja y El Barrilito, que contienen concentración de cobre suficiente si se deseara incorporar al proceso de lixiviación en montones.

Con el objetivo de lograr el máximo beneficio de este pasivo ambiental se estudió la posibilidad de extraer tierras raras cuyo uso en productos tecnológicos se ha incrementado exponencialmente durante los últimos años, por lo que se tomó en consideración los óxidos de tierras raras ligeras (LREO) que son: La_2O_3 , Ce_2O_3 , Pr_2O_3 , Nd_2O_3 , Sm_2O_3 y los óxidos de tierras raras pesadas

incluyendo el Itrio (HREO +Y₂O₃) son: Gd₂O₃, Tb₂O₃, Dy₂O₃, Ho₂O₃, Er₂O₃, Yb₂O₃, Lu₂O₃, Y₂O₃. Tomando en cuenta estos dos obtenemos el Total de óxidos de tierras raras (TREO) cuyo valor atractivo para su extracción es de 1000 ppm (Namibia Critical Metals Inc., 2022) desgraciadamente los resultados han demostrado que la concentración de las tierras raras contenidas en la zona de estudio no es atractiva para iniciar una recuperación de estas.

8.1.2. Determinación de área y volumen revalorizable.

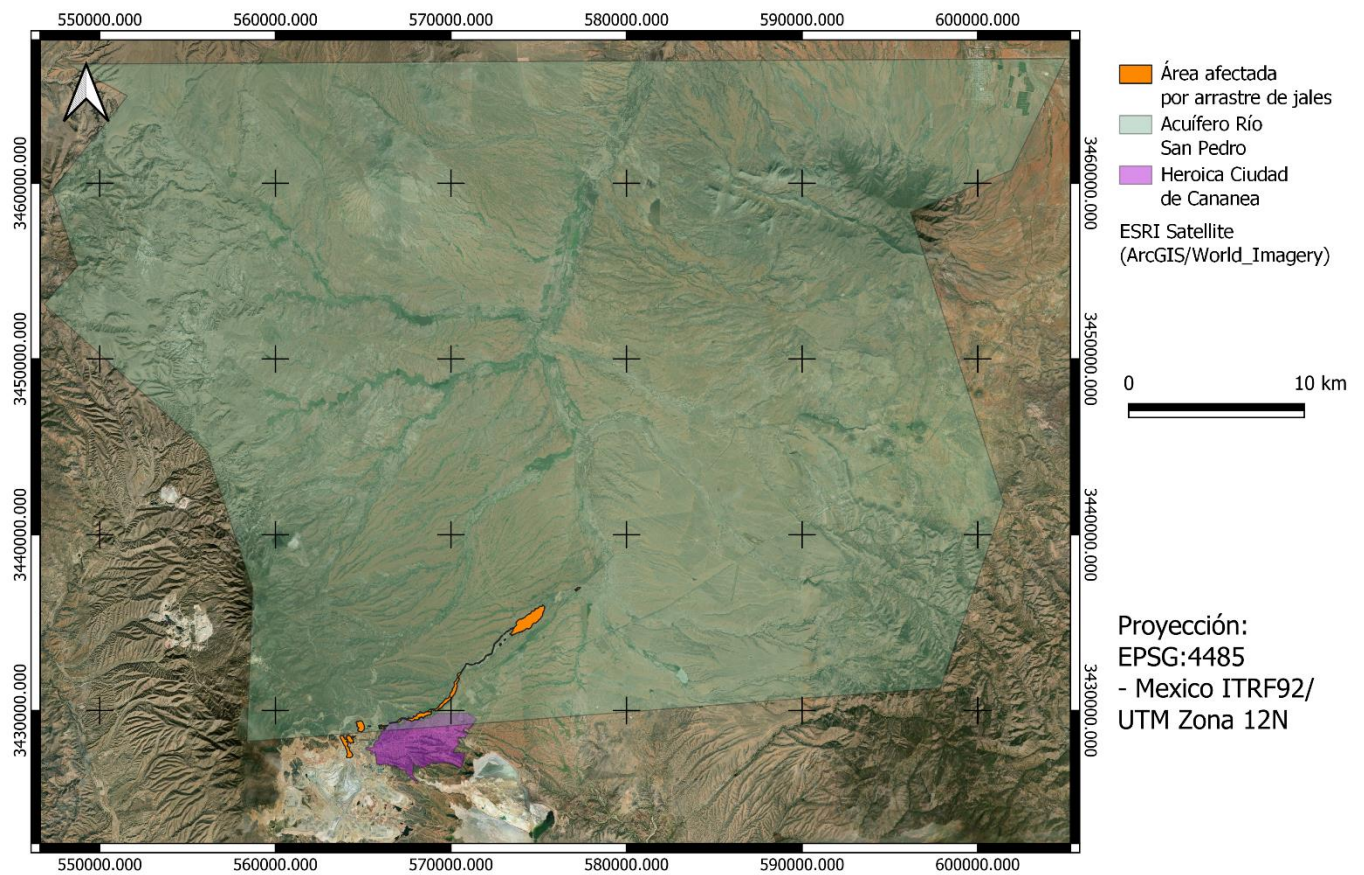


Figura 32. Mapa de la cuenca del Río San Pedro, la zona naranja señala el área afectada por el arrastre de los pasivos ambientales elaborado con Qgis 3.28.2.

Se observa en la figura 32 la cuenca del río San Pedro y en naranja el área que presenta la diseminación de los pasivos ambientales en la cuenca del río, afortunadamente la presencia de los pasivos ambientales se limita al afluente del río, el sistema fluvial El Barrilito, esparcidos en una área

aproximada de 216.5 hectáreas y en un volumen aproximado de 803,745.75 m³, esta área del Río San Pedro cuya extensión es de 173,723.4 Ha, presenta el 0.14% de la extensión total del acuífero río San Pedro.

Se ha determinado que el área y volumen revalorizable en el arroyo se encuentra diseminado en 216.5 Ha, esta área representa el 16.2% del total del sistema fluvial El Barrilito cuya área calculada es de 1336.7 Ha. Esto se puede apreciar a detalle en la Figura 33. Donde se observa el área del aluvión del arroyo en color verde y en anaranjado se observa el área con concentraciones revalorizables.

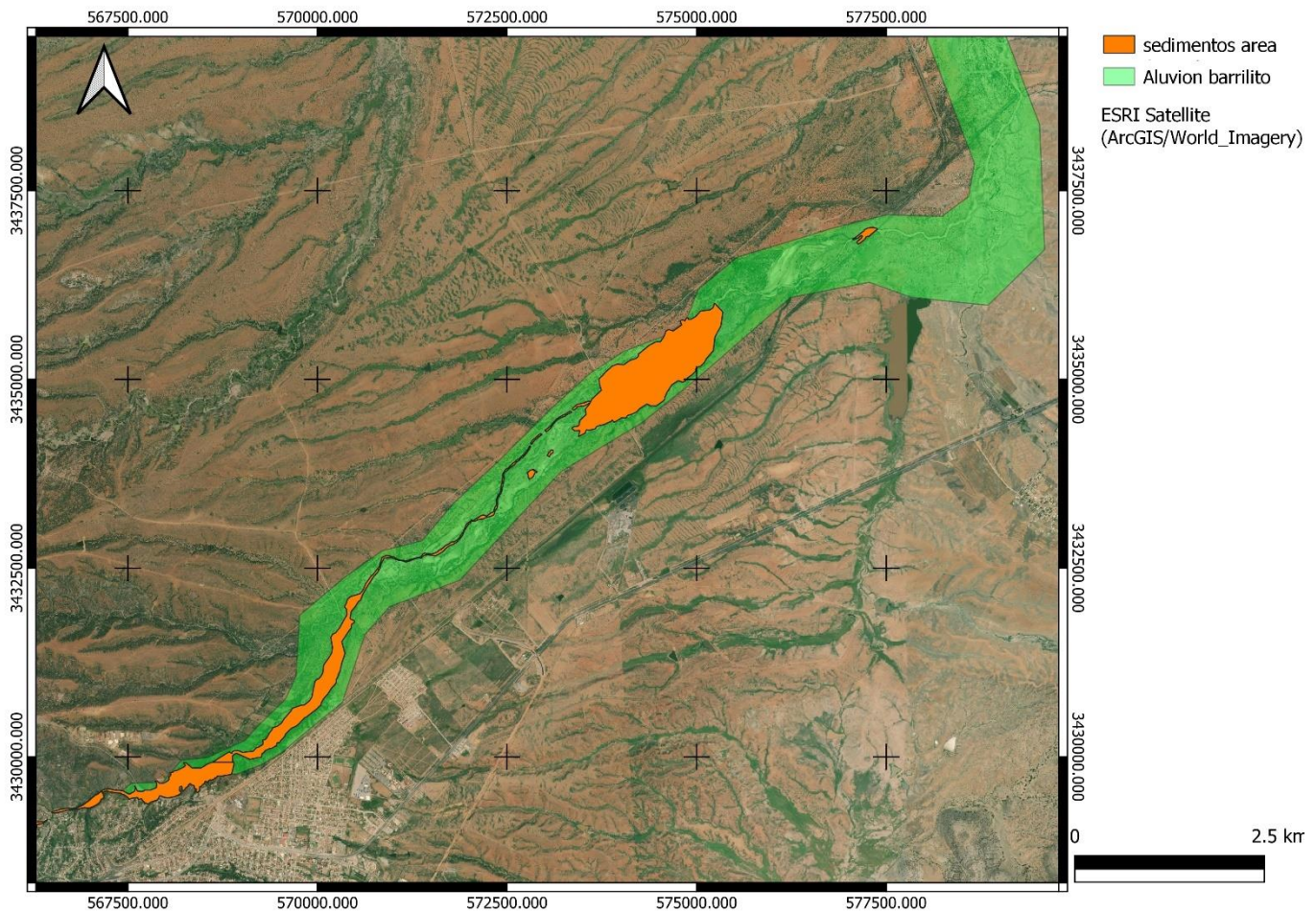


Figura 33. Área revalorizable del arroyo El Barrilito elaborado con Qgis 3.28.2

En la Figura 34. Se observan los pasivos ambientales, el pasivo ambiental 1 marcado con la letra A del lado derecho, este pasivo ambiental tiene un área total de 77,629 m² (7.76 Ha) el área

revalorizable es de 37,631 m² (3.76 Ha), esta área revalorizable representa el 48.5% del total del pasivo ambiental y contiene el volumen revalorizable de 75,262.82 m³.

Del lado izquierdo con la letra B se observa el pasivo ambiental 2 tiene área total de 211,155 m² (21.11 Ha) el área con la mayor concentración de cobre (mayor a 600 mg/kg) es de 53,315.18 m² (5.33 Ha) esta área representa el 25.3% del total del Pasivo ambiental 2 y contiene el volumen de 53,315.18 m³.

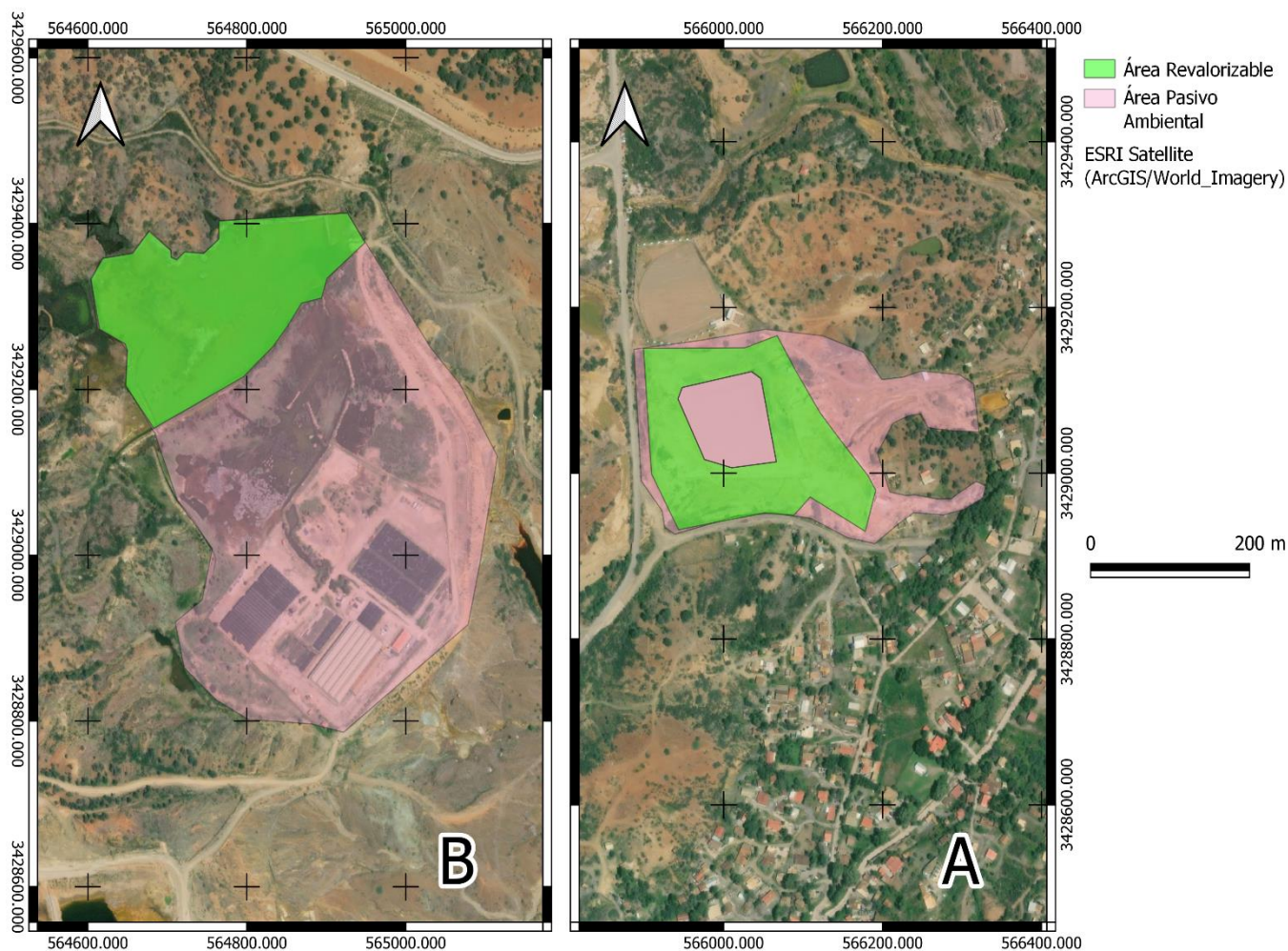


Figura 34. Área revalorizable en los pasivos ambientales elaborado con Qgis 3.28.2.

Se recomienda realizar un muestreo más detallado para determinar con mayor precisión el área, volumen y densidad aparente ya que esta medición in situ obtendría una densidad más exacta y estos datos impactan significativamente en la estimación del cobre contenido.

8.2. Permeabilidad y lixiviación.

La propuesta experimental para la determinación del porcentaje de recobro real mediante lixiviación en columnas que se llevó a cabo está basada en el artículo de Borie (2019) y los experimentos de (J. Sosa, 2019) y la (NOM-157-SEMARNAT, 2009) Anexo Normativo 2. Modificando las dimensiones de la columna debido a la limitación de la cantidad de muestra, respetando la relación de diámetro y altura de 1:3 siendo las dimensiones de la columna de acrílico 2" diámetro y 6" de altura.

Se utilizó una solución ácida con concentración de iones férricos para fomentar la oxidación de los sulfuros de cobre, se impusieron condiciones que propician la solubilización de cobre mostradas en la figura 3 por el diagrama de Pourbaix.

Los resultados obtenidos durante las pruebas de permeabilidad han demostrado que los pasivos ambientales presentan una granulometría muy fina lo cual ha repercutido en los resultados de la lixiviación si bien el tamaño de partícula fomenta la extracción debido a la mayor superficie de la partícula, también representó una dificultad durante la experimentación por lo que fue necesario añadir material grueso para mejorar la permeabilidad y permitir el paso de la solución a través de la columna. Por otra parte, cabe la posibilidad del arrastre del material fino que podría formar substratos impermeables los cuales provocarían que la solución lixivante no infiltre en el resto del mineral. Para solucionar este inconveniente se propuso que los pasivos ambientales y sedimentos sean mezclados con mineral. Otra de las posibles soluciones que se ha encontrado en la literatura es el aglomerado y curado ácido. La aglomeración de los finos en torno a las partículas mayores con agua y ácido sulfúrico concentrado permite elevar la resistencia del material mientras se mantiene una buena permeabilidad del lecho de mineral con el fin de alcanzar alturas de pilas adecuadas, mejorar los índices de recuperación de cobre y acortar los ciclos de lixiviación (Marín, 2007)

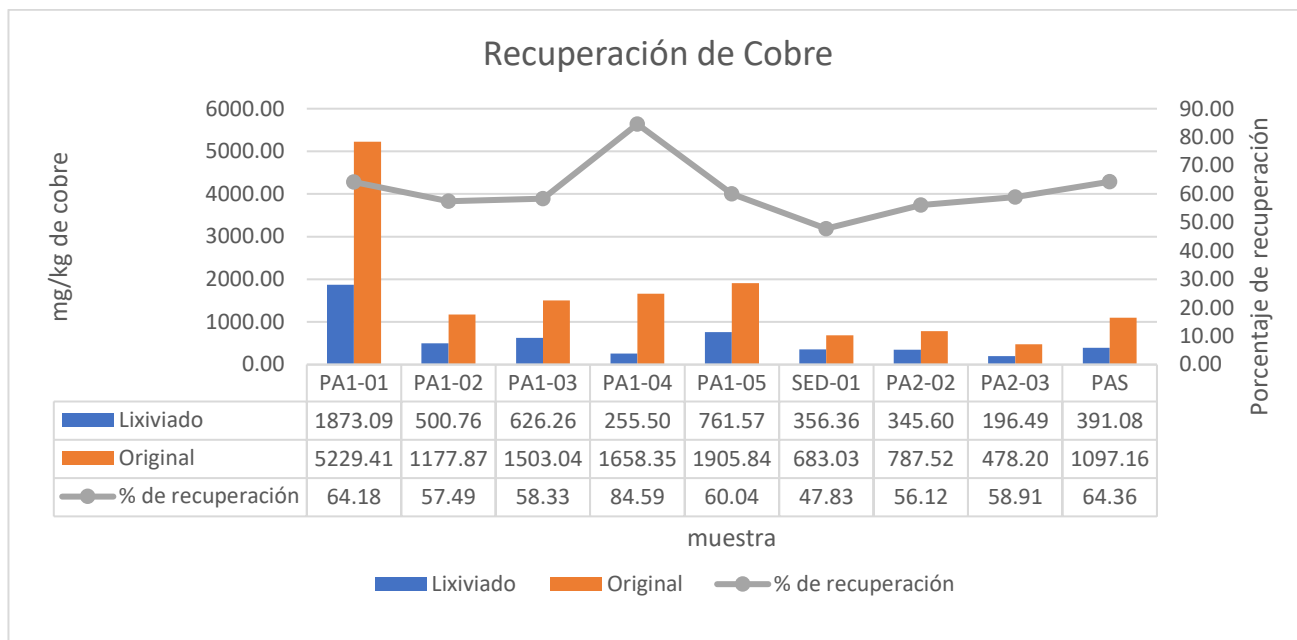


Figura 35. Concentración de cobre inicial y concentración de cobre después de la lixiviación.

La recuperación de cobre se puede observar en la figura 35. La concentración inicial de los pasivos ambientales y sedimentos al comparar con la con la concentración final, se aprecia que más del 47% del cobre en todas las muestras ha migrado a la solución lixivianante, para facilitar la comparación se agregó una gráfica que señala el porcentaje de cobre que se ha extraído, la familia de muestras PA1 obtuvo la mejor recuperación de las zonas con las que se experimentó, obteniendo como menor recuperación 57.49% y como máxima un 84.59%, las muestras PA2 obtuvieron una extracción del 56.12% a 58.91% ,en los sedimentos se ha obtenido la menor recuperación siendo del 47.83%. La diferencia de rendimiento entre las diferentes zonas puede ser debido a que el procedimiento es más adecuado para minerales solubles como los sulfatos y la oxidación de los sulfuros presentes en los pasivos ambientales, en los sedimentos los fenómenos de superficie de las arcillas pueden presentar una dificultad para la lixiviación, también puede estar involucrada la absorción de los cationes en minerales como la jarosita, la jarosita presenta estabilidad en pH ácido por lo que podría dificultar la solubilidad de los cationes. Es necesario resaltar que estos resultados son producto de 6 días de lixiviación por lo que se puede inferir que el tamaño de partícula ha influido enormemente disminuyendo considerablemente el tiempo para la extracción a comparación de los 180 días requeridos para obtener una recuperación de las pruebas realizadas por (SOUTHERN COPPER, 2022) cuyas condiciones experimentales son: Columna de 6 metros de altura, irrigación de 7.8L/h/m²

de solución lixiviante compuesta de agua y ácido sulfúrico (10g/L). con una extracción de cobre entre 51.34 a 70%.

8.3. Viabilidad de extracción de cobre mediante lixiviación.

La evaluación de las muestras sometidas a lixiviación ha mostrado que es posible recuperar cobre de las zonas evaluadas por lo que se realizó un análisis de costos basado en los resultados obtenidos. Se utilizaron los valores de procesamiento obtenidos del informe anual de Southern Copper Corporation (2021) en el que el costo de minado fue 1.16 USD/t, el costo de lixiviado de 1.04 USD/t y costo de procesamiento de extracción por solventes y electro obtención fue de 5.94 USD/t.

Con los datos obtenidos experimentalmente y la determinación de volumen de material se realizó una proyección de estos resultados al total del volumen y se comparó con la extracción obtenida en el proceso de lixiviación reportada por los proyectos mineros de la zona el proceso de flotación presenta una eficiencia del 85% y en el proceso de lixiviación de 65%.

Este análisis se presenta en la tabla 23. Más adelante se contrasta este análisis contra el costo de enviar estos residuos a un confinamiento ubicado en Hidalgo del Parral, Chihuahua.

8.3.1. Análisis de costos de procesamiento de residuos y valor de la recuperación de cobre.

Tabla 23. Balance de costos vs valor del cobre extraíble

Zona	masa (ton)	costo de procesamiento total	Posible recuperación experimental (USD)	Posible recuperación al 78.3% de recuperación	RBC* con recuperación experimental	RBC con recuperación 78.3%
Pasivo ambiental 1	158,654	\$1,291,872	\$2,425,745	\$2,927,564	1.88	2.27
Pasivo ambiental 2	12,444	\$101,294	\$33,454	\$45,55	0.33	0.45
Sedimentos	1,993,338	\$16,226,030	\$9,220,540	\$ 15,104,175.63	0.57	0.93

*RCB Relación Costo Beneficio

Para obtener un estimado de viabilidad del proyecto se realizó un balance entre las posibles ganancias de la obtención de cobre y los costos de procesamiento, el costo del procesamiento es invariable al rendimiento, este costo es de 8.14 USD/ton. Se realizó una estimación del cobre obtenido basado en los resultados experimentales y una proyección basada en la eficiencia del proceso de lixiviación reportada por Buenavista del Cobre. Para estimar el valor del cobre se tomó en consideración el precio del cobre cátodo grado A por tonelada el cual es 9,061.00 dólares por tonelada el 16 de febrero del 2023.

Para apreciar mejor la eficiencia de revalorizar un buen indicador es la RBC, la Relación Beneficio Costo (RBC) consiste en dividir el valor de la ganancia entre el valor de los costos. Si el resultado del cociente es mayor o igual a uno el proyecto se considera viable. Se observa esto en la Tabla 23. Por lo que podemos observar que experimentalmente solo el Pasivo ambiental 1 tienen un rendimiento mayor al costo del procesamiento, los sedimentos tienen una mayor RBC; sin embargo, no llega a 1, para el Pasivo ambiental 2 tienen un costo de procesamiento mucho mayor que la posible recuperación. Cabe destacar que el costo de procesamiento incluye costo de minado, costo de lixiviación, extracción por solventes y electrobeneficio. El costo de minado suele ser de los costos más elevados por el alto costo energético de la disminución de partícula, en este caso no es necesario, pero se sugiere que el los pasivos ambientales o sedimento sea aglomerado y curado con ácido lo que involucraría otro costo probablemente menor que el costo de minado y triturado, por lo que se toma este balance como un escenario pesimista. Se ha realizado la proyección al 78.3% esto es debido a que es el rendimiento necesario para que las ganancias y costos de producción sean iguales y el proyecto sea viable, este rendimiento es una meta alcanzable implementando mejoras a la lixiviación con el curado y aglomerado ácido o por medio de liberar el cobre de los sedimentos identificando concretamente la especie en la que se encuentra contenido ya sea en las arcillas o la jarosita lo cual permitirá mayor extracción de cobre.

8.3.2. Confinamiento de residuos.

Una de las opciones para solucionar el aspecto ambiental es el confinamiento, el confinamiento es una disposición final de los residuos que implica muchos costos entre los que resaltan el acarreo

del material y el costo por almacenamiento. Para comparar las opciones de llevar el material afectado a un confinamiento e integrar al proceso de lixiviación.

Se necesitan además diversos permisos y tramites todo esto bajo las siguientes normas de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales:

- *NOM-055-SEMARNAT-2003, Que establece los requisitos que deben reunir los sitios que se destinarán para un confinamiento controlado de residuos peligrosos previamente estabilizados.*
- *NOM-056-SEMARNAT-1993. Requisitos para el diseño y construcción de las obras complementarias de un confinamiento controlado de residuos peligrosos.*
- *NOM-057-SEMARNAT-1993. Requisitos que deben observarse en el diseño, construcción y operación de celdas de un confinamiento controlado para residuos peligrosos.*
- *NOM-058-SEMARNAT-1993. Requisitos para la operación de un confinamiento controlado de residuos peligrosos*

Para obtener la autorización para el manejo de residuos peligrosos es requerido seguir los lineamientos del permiso SEMARNAT 07-033. Engloba varios aspectos tales como instalaciones, el tipo de residuo, el proceso señalando generación de emisiones, descargas de aguas residuales, subproductos y residuos, así como los volúmenes. Este trámite tiene un costo de \$109,991.99 pesos además requiere un programa de capacitación del personal involucrado en el manejo de residuos, necesita un programa de prevención de y atención de contingencias o emergencias ambientales y accidentes que puedan surgir del manejo de los residuos.

A continuación, se presenta una tabla que presenta un costo aproximado de enviar a un confinamiento

Tabla 24. Costo de confinamiento de residuos peligrosos.

<i>Zona</i>	<i>Volumen (m³)</i>	<i>masa (ton)</i>	<i>Precio por Confinamiento Tonelada (USD)</i>	<i>Flete 60 m³ o 50 Ton (USD)</i>	<i>Costo por confinamiento (USD)</i>	<i>Costo por Flete (USD)</i>	<i>Costo total por confinamiento de residuos (USD)</i>
<i>Pasivo ambiental 2</i>	5,331.18	12,444.0	\$51.88	\$2,949.21	\$645,649.28	\$734,001.29	\$1,379,650.57
<i>Pasivo ambiental 1</i>	75,262.82	158,654.0	\$51.88	\$2,949.21	\$8,231,639.72	\$9,358,074.63	\$17,589,714.36
<i>Sedimentos del sistema fluvial El Barrilito</i>	803,745.75	1,993,338.7	\$51.88	\$2,949.21	\$103,422,814.76	\$117,575,410.47	\$220,998,225.23
<i>Volumen total del material</i>	930,211.15	2,164,436.7	\$51.88	\$2,949.21	\$112,300,103.77	\$127,667,486.39	\$239,967,590.15

Como se puede observar en la tabla 24 los costos de confinamiento de residuos son muy altos, el costo total de 239,967,590.15 dólares representa el 5.59% del total de las operaciones a nivel internacional del 2021 de la SOUTHERN COPPER CORPORATION, esta cantidad representa el 152.2% del capital invertido en materia ambiental del 2019 al 2021 en las operaciones mineras mexicanas de la transnacional Southern Copper Corporation (SOUTHERN COPPER CORPORATION, 2021). Esto resulta inviable para la mayoría de las operaciones mineras por lo que en este caso la mejor opción sería una revalorización o estabilización in situ del pasivo ambiental que pueda representar un riesgo ambiental o a la salud humana.

8.3.3. Balance de costos y ganancia

Tabla 25. Comparación de costos de procesamiento contra los costos de confinamiento.

Zona	Volumen (m ³)	masa (ton)	Costo total por confinamiento de residuos (USD)	Costo de procesamiento de residuos (USD)	Posibles ganancias por la recuperación de cobre (USD)
Pasivo ambiental 1	75,262.82	158,654.0	\$17,589,714.36	\$1,291,872	\$1,134,678
Pasivo ambiental 2	5,331.18	12,444.0	\$1,379,650.57	\$101,294	\$ -67,839
Sedimentos	803,745.75	1,993,338.7	\$220,998,225.23	\$16,226,030	\$ -7,005,345
Total	884,339.75	2,164,436.7	\$239,967,590.15	\$17,619,196	\$ -5,938,506

Como se puede observar en la tabla 25. Si comparamos los costos de reprocesamiento los cuales son más de 17 millones de dólares representan el 7.34% del total de los costos de confinamiento, además de la probable recuperación de cobre las zonas de estudio excepto el pasivo ambiental 2 que han demostrado que las concentraciones son insuficientes para obtener beneficio; sin embargo, los costos de reprocesar son mucho menores a los que representaría enviar a confinamiento. En la columna amarilla se muestra la evaluación de la ganancia bruta del posible reprocesamiento de los pasivos ambientales y sedimentos, aunque el pasivo ambiental 2 y los sedimentos demuestran tener un costo de procesamiento mayor que la ganancia El Pasivo ambiental 1 contiene una cantidad que absorbe ese costo.

La comparación de costos nos permite reevaluar las opciones de las mineras a los pasivos ambientales que se han generado ya sea por descuido o porque fueron dispuestos antes de que existiese una ley de protección al ambiente tal y como es en este caso. En la Tabla 25 se observa la comparación de los costos operativos y las posibles ganancias de la recuperación. Los costos asociados a la extracción de cobre comprenden de minado cuyo costo es de 1.16 USD/t, el costo de lixiviado 1.04 USD/t y el costo de procesamiento extracción por solventes y electro obtención de 5.94 USD/t. (SOUTHERN COPPER CORPORATION, 2021). La intención de esta propuesta es financiar el saneamiento del arroyo, en este caso abatir los costos con las ganancias de la recuperación del cobre.

9. Conclusiones

Mediante la determinación de la concentración total determinada por fluorescencia de rayos X se confirmó la presencia de cobre y molibdeno así mismo mediante el análisis por activación neutrónica se comprobó galio en concentraciones lo suficientemente altas como para obtener un beneficio económico.

El área en la que se ha determinado la presencia de los pasivos ambientales es de 216 hectáreas y se ha estimado que representa un volumen aproximado de 803,745.75 m³. Además de un área de 5.33 Ha del Pasivo ambiental 2 y 3.76 Ha del Pasivo ambiental 1 en un volumen respectivo de 5,331.18 m³ para el Pasivo ambiental 2 y 75,262.82 m³ para el Pasivo ambiental 1.

Se llevó a cabo una extracción en columnas mediante lixiviación con solución de ácido sulfúrico al 5% en volumen con concentración de 1g/L de Fe²⁺ y 1 g/L de Fe³⁺ para extraer cobre de las zonas en las que se encuentran los pasivos ambientales y los sedimentos del sistema fluvial El Barrilito.

Por medio de la lixiviación se obtuvo una recuperación de Cu con promedio de 57.5% para el Pasivo ambiental 1, 64.9% para el Pasivo ambiental 2 y 47.8% para los sedimentos del sistema fluvial El Barrilito.

Se realizó una estimación del cobre obtenido experimentalmente y se realizó una proyección utilizando los rendimientos operativos de lixiviación de la zona, comparando los costos de procesamiento y de enviar a un confinamiento se determinó que es viable integrar al proceso de lixiviación a las zonas de estudio.

Se hacen diversas recomendaciones para ampliar el alcance de este estudio por ejemplo realizar un muestreo más detallado para definir un valor más exacto del área, volumen y densidad aparente, implementar a la experimentación curado ácido para aumentar el rendimiento de la lixiviación, profundizar el análisis sobre los minerales en los que está contenido el cobre para realizar una extracción más focalizada, considerar los otros elementos en concentraciones atractivas para su recuperación esto podría reducir aún más los costos de saneamiento de la zona.

Bibliografía

- Adiansyah, J. S., R. M. (2015). A framework for a sustainable approach to mine tailings management: disposal strategies. *Elsevier*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.139>
- Aguirre, H. B. (2017). *Diseño de una planta de tratamiento de minerales de 350T/h para producir concentrados de plomo y cinc*. Universidad de Oviedo [Titulo de maestría]. Obtenido de https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/48478/TFM_%20Haizea%20Bidaurrazaga%20Aguirre.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Álvarez, M.L., M. A.-P.-F. (2021). Recovery of Zinc and Copper from Mine Tailings by Acid Leaching Solutions Combined with Carbon-Based Materials. *Applied Sciences*. doi:<https://doi.org/10.3390/app11115166>
- ASTM D3987-85. (s.f.). *Standard Test Method For Shake Extraction Of Solid Waste With Water*. Pensilvania: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D6913-04. (2009). *Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis*. American Society for Testing and Materials . doi:10.1520/D6913-04R09E01
- Beckel, J. (2000). *El proceso hidrometalúrgico de lixiviación en pilas y el desarrollo de la minería cuprífera en Chile*. Santiago, Chile: Red de Reestructuración y Competitividad División de Desarrollo Productivo y Empresarial. Obtenido de https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/4453/1/S00050422_es.pdf
- Borie, C. (2019). *Columnas de Lixiviación, una excelente herramienta para evaluar la movilidad de los contaminantes provenientes de botaderos y suelos afectados por la actividad minera*. AGQ Labs Chile. Obtenido de <https://agqlabs.cl/wp-content/uploads/Columnas-de-lixivacion-y-contaminantes-provenientes-de-la-actividad-minera.pdf>
- British Geological Survey. (2009). Cobalt. *Natural Environmental Research Council*. Obtenido de https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/8727/1/Cobalt_Profile.pdf
- Buitelaar, R. M. (2001). *Aglomeraciones Mineras y Desarrollo Local en América Latina*. Colombia: Alfaomega.

CILA. (2011). *Actividades hidrogeológicas en el acuífero río San Pedro, estado de Sonora, primera etapa*. CONAGUA, Comisión Internacional de Límites y Aguas, Hermosillo, Sonora. Obtenido de <http://www.cila.gob.mx/as/aharspE1.pdf>

Data México. (2022). *Cananea*. Obtenido de <https://datamexico.org/https://datamexico.org/es/profile/geo/cananea#economy>

Díaz, Ó. Y. (2017). Puesta en funcionamiento del permeámetro de carga variable, un equipo de laboratorio para ensayos de permeabilidad en suelos cohesivos. Colombia. Obtenido de <https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/8149/tfg-yel-pue.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

E.M. Córdoba, J. M. (2008). Leaching of chalcopyrite with ferric ion. Part I: General aspects. *Elsevier*. doi:10.1016/j.hydromet.2008.04.015

Emilio López, R. V. (2012). *Estudio Experimental de la permeabilidad de materiales depositados en pilas de lixiviación de cobre*. (S. d. Chile, Ed.) Santiago de Chile. Obtenido de https://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2012/cf-lopez_ea/html/index-frames.html

Endeavour Silver. (2021). *GlobeNewsWire*. Obtenido de Endeavour Silver: <https://www.globenewswire.com/news-release/2021/09/09/2294103/0/en/Endeavour-Silver-Completes-Feasibility-Study-on-the-Terronera-Project-in-Jalisco-State-Mexico-Robust-Economics-Supported-by-Larger-Mineral-Reserves-Higher-Annual-Silver-Production-.html>

EPA Method 6200. (2007). *SW-846 Test Method 6200: Field Portable X-Ray Fluorescence Spectrometry for the Determination of Elemental Concentrations in Soil and Sediment*. U.S. Environmental Protection Agency. Obtenido de <https://www.epa.gov/hw-sw846/sw-846-test-method-6200-field-portable-x-ray-fluorescence-spectrometry-determination>

Escobar-Quiroz, I. N., Villalobos-Peñalosa, M., Pi-Puig, T., & Martín Romero, F. (2019). Identification of jarosite and other major mineral Fe phases in acidic environments affected by mining-metallurgy. (U. N. México, Ed.) *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 36(2). Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57265251007>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (Noviembre de 2016). *FAO.ORG*. Obtenido de

https://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s09.htm#102b

Gómez Álvarez, A., Villalba Atondo, A., Acosta Ruíz, G., & Castañeda Olivares, M. (2002). Metales pesados en el agua superficial del río San Pedro. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 20(1), 2. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37020101>

Gómez Alvares, A., & al, e. (2009). Estimation of potential pollution from mine tailings in the San Pedro River (1993–2005), Mexico–US border. *Environ Geol*. doi:10.1007/s00254-008-1424-8

Gómez Álvarez, A., & al, e. (2004). Metales pesados en el agua superficial del río San Pedro durante 1997 y 1999. *Revista Internacional Contaminación al Ambiente*. Obtenido de <https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/23124>

Gonzalez Navarro, J. J. (2020). *The Cananea Consolidated Copper Company, S.A. (1899-1905). Constitución, cambio tecnológico y expansión empresarial*. Hermosillo, Sonora, México: El colegio de Sonora. Obtenido de <https://repositorio.colson.edu.mx/bitstream/handle/2012/44584/The%20Cananea%20Consolidated%20Copper%20Company.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Gunn, G. (2013). *Critical Metals Handbook*. American Geophysical Union. doi:10.1002/9781118755341

iesmat. (19 de 01 de 2023). *iesmat*. Obtenido de https://iesmat.com/catalogos/WC_TECBET/area-bet/

indexmundi. (10 de 02 de 2023). *www.indexmundi.com*. Obtenido de <https://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=copper&months=60>

INEGI. (2000). Conjunto de datos Vectoriales de de información topografica. México. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/>

INEGI. (AGOSTO de 2021). *INEGI*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/>

ISO 10390:. (2005). *Soil quality Determination of pH*. Obtenido de <https://www.iso.org/standard/40879.html>

- ISO11265:. (1994). *Soil quality, Determination of the specific electrical conductivity*. Obtenido de <https://www.iso.org/standard/19243.html>
- J. Alcalde, U. K. (2018). Historical assessment of metal recovery potential from old mine tailings: A study case for porphyry copper tailings, Chile. *Elsevier*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.04.022>
- J. Sosa, R. P. (2019). *Diseño, simulación y construcción de un equipo de lixiviación en columnas, estática y automatizada, orientada a las prácticas de los alumnos de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica*. Laboratorio UNDAC Ciencia y Desarrollo. UAP. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.21503/cyd.v22i4.1832>
- J.M. Terrones, J. S. (2021). Evaluation of Copper Leaching for subsequent Recovery from the Waste Dumps of the Linares Mining District and Their Use for Construction Materials. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*. doi:<http://doi.org/10.3390/met11081328>
- Jergensen II., G. V. (2009). Extraction, and Electrowinning Technology. *Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME)*. Obtenido de <https://www.osti.gov/biblio/20050678>
- John R. Spence. (1999). *Practical Aspects of Copper Solvent Extraction from Acidic Leach Liquors*. Phoenix: ACORGA Metal Extraction Products.
- Kirke A. King, B. J. (1997). *Environmental contaminants in fish and wildlife of the lowe Gila river, Arizona*. U.S. Fish and Wildlife Service. Phoenix, Arizona: Arizona Ecological Services Field Office. Obtenido de <http://www.nativefishlab.net/library/textpdf/11686.pdf>
- Laboratorio de Geoquímica Ambiental Aplicada, IGL, UNAM. (2020). *Evaluación ambiental Control Hidrológico Norte, Sonora*. Ciudad de México.
- LEEGEPA. (AGOSTO de 2022). *Ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente*. Obtenido de <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGEEPA.pdf>
- Lottermoser, B. G. (2011). Recycling, reuse and rehabilitation of mine wastes. *elements – An International Magazine of Mineralogy, Geochemistry, and Petrology*. doi:DOI: 10.2113/gselements.7.6.405
- Martin Lokanc, R. E. (2015). The availability of indium: The present, medium term, and long term. *NREL National Renewable Energy Laboratory*. Obtenido de <https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/62409.pdf>

Martín Valencia-Moreno, L. O.-L.-A.-S. (2006). Características metalogenéticas de los depósitos de tipo pórfido cuprífero en México y su situación en el contexto mundial. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 58(1), 1-26. doi:<http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2006v58n1a1>

Mellardo, R. A. (Marzo de 2018). Lixiviación de sulfuros de cobre de baja ley pretratados con NaCl – H₂SO₄ junto con NaNO₃ O Fe(NO₃)₃, en medio sulfato-cloruro. Valparaíso, Chile. Obtenido de <https://repositorio.usm.cl/handle/11673/42455>

Miller G., N. T. (1999). *Copper heap leaching testing, interpretation and scale up*. (QLD, Ed.) Obtenido de ALTA Copper Hydrometallurgy Forum: <https://dokumen.tips/documents/copper-heap-leaching-testing-interpretation-and-scale-up.html?page=1>

Moreno Martínez, G. A. (2021). *Cananea y su minería en 1905*. Obtenido de <http://cronicasdecaneanea.blogspot.com/>: <http://cronicasdecaneanea.blogspot.com/2021/01/caneanea-y-su-mineria-en-1905.html>

Moreno, J. L. (s.f.). *Las presas de jales en Cananea; El Colegio de Sonora*. Recuperado el 17 de 05 de 2022, de El Colegio de Sonora: <https://www.colson.edu.mx/>

Namibia Critical Metals Inc. (Mayo de 2022). *Accesswire*. Obtenido de <https://www.accesswire.com/648349/Mineral-Resource-Update-More-than-650-Percent-Increase-in-Measured-and-Indicated-TREO-Mineral-Resources-for-the-Lofdal-Heavy-Rare-Earths-Project>.

Navarro, J. J. (2020). *The Cananea Consolidated Copper Company, S.A. (1899-1905). Constitución, cambio tecnológico y expansión empresarial*. Hermosillo, Sonora: UNISON. Obtenido de <https://repositorio.colson.edu.mx/bitstream/handle/2012/44584/The%20Cananea%20Consolidated%20Copper%20Company.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Nevada Silver Corporation. (2021). <https://nevadasilvercorp.com/>. Obtenido de <http://nevadasilvercorp.com>

NMX-AA-132-SCFI-. (2016). Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y de manejo de la muestra (Cancela a la NMX-AA-132-SCFI-2006).

Ciudad de México, México. Obtenido de <http://www.economia-nmx.gov.mx/normas/nmx/2010/nmx-aa-132-scfi-2016.pdf>

NOM-001-SEMARNAT. (2021). *NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.* Obtenido de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0

NOM-141-SEMARNAT. (2003). Norma oficial mexicana *NOM-141-SEMARNAT-2003, que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio.*

NOM-147-SEMARNAT/SSA1. (2004). Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsenico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. Ciudad de México: SEMARNAT. Obtenido de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4964569&fecha=02/03/2007#gsc.tab=0

NOM-155-SEMARNAT-2007. (s.f.). *NORMA Oficial Mexicana NOM-155-SEMARNAT-2007, Que establece los requisitos de protección ambiental para los sistemas de lixiviación de minerales de oro y plata.* Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Obtenido de https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5128126&fecha=15/01/2010#gsc.tab=0

NOM-157-SEMARNAT. (2009). Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros. Ciudad de México, México. Obtenido de <http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4485/semarnat1/semarnat1.htm#:~:text=de%20residuos%20mineros-,NORMA%20Oficial%20Mexicana%20NOM%2D157%2DSEMARNAT%2D2009%2C%20Que,Medio%20Ambiente%20y%20Recursos%20Naturales.>

Nora K. Foley, B. W. (2017). Gallium. *U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.* Obtenido de <https://pubs.usgs.gov/pp/1802/h/pp1802h.pdf>

Orla Mining. (2021). *Orla Mining.* Obtenido de <https://orlamining.com/news/orla-mining-reports-second-quarter-2021-results-and-provides-camino-rojo-construction-update/>

Pérez Villaba, A. M., & Solis Garza, G. (2013). *Caracterización de la calidad del agua superficial y subterránea del río San Pedro, Sonora, México*. Sonora: Universidad de Sonora. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12984/4538>

Ramos Ramírez, A. (Jul-Ago de 2014). El beneficio de patio en la hacienda “Las Mercedes” Zacatecas 1850. *Geomimet*. Obtenido de https://www.geomin.com.mx/revista/G_310.pdf

Romero Acosta, A. A. (1996). Estudio de la contaminación por metales pesados en agua y sedimento del río San Pedro, Sonora, México. Sonora. Obtenido de <http://www.bidi.uson.mx/TesisIndice.aspx?tesis=1318>

Ruiz H. Jorge. E, Z. G. (2021). Cinética de Lixiviación de cobre en un mineral mixto de baja ley. *GEOMIMET Difusión de la Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, A.C.* Obtenido de <https://www.revistageomimet.mx/2021/08/cinetica-de-lixivacion-de-cobre-en-un-mineral-mixto-de-baja-ley/>

Salager, J.-L., & Forgiani de Guedez, A. (2003). *Fundamentos de la Flotación* (Vol. 3). Mérida, Venezuela: Laboratorio FIRP, Escuela de Ingeniería química, Universidad de los Andes. Obtenido de <https://es.firp-ula.org/wp-content/uploads/2019/06/S335A.Flotacion.pdf>

Sánchez, M. A. (1998). La minería mexicana de finales del siglo XX. Colegio de México. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5615789.pdf>

Shamim Abul H. M., M. H. (2010). The effectiveness of sulfidic materials as a source of sulfur fertilizer for the production of rice in two sulfur deficient soils. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*.

Soto, R. A. (Agosto de 2014). Lixiviación de minerales sulfurados de cobre de baja ley en columnas unitarias utilizandoo la tecnología CUPROCHLOR®. Santiago de Chile, Chile. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/131917>

SOUTHERN COPPER. (2022). *S-K 1300 Technical Report Summary Feasibility Study*. Sonora. Obtenido de <https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1001838/000155837022002995/scco-20211231ex9692df9bd.pdf>

SOUTHERN COPPER COPORATION. (2022). *ANNUAL REPORT PURSUANT TO SECTION 13 OR 15(d) OF THE SECURITIES EXCHANGE ACT OF 1934*. Delaware. Obtenido de

<https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1001838/000155837023002328/scco-20221231x10k.htm>

SOUTHERN COPPER CORPORATION. (2020). *ANNUAL REPORT PURSUANT TO SECTION 13 OR 15(d) OF THE SECURITIES EXCHANGE ACT OF 1934*. DELAWARE.

SOUTHERN COPPER CORPORATION. (2021). *ANNUAL REPORT PURSUANT TO SECTION 13 OR 15(d) OF THE SECURITIES EXCHANGE ACT OF 1934*. Delaware. Obtenido de <https://minedocs.com/22/Southern-Copper-Form-10K-2021.pdf>

Tello, C. (2008). *Estado y desarrollo económico: México 1920-2006* (2a edición ed.). Ciudad de México, México: UNAM, Facultad de Economía.

Theodore L. Brown, H. E. (2011). *Química: La ciencia Central*. México: Pearson.

Titley, S. (1993). Characteristics of porphyry copper occurrence in the American Southwest. (R. S. Kirkham, Ed.) *Mineral deposit modeling: Geological Association of Canada special paper*, 40.

Villa, V. (23 de abril de 2023). La historia de los jales de Cananea desde principios del siglo pasado. Cananea, Sonora, México. Obtenido de <https://www.elmineral.com.mx/ver.php?artid=84265&s=Lo%20mas%20destacado&t=24#>

Anexos.

Anexo A: Concentración total determinada por espectroscopía de Fluorescencia de rayos X.

Suelo

Tabla 26. Concentración Total FRX Suelo.

Analito	Ag	As	Ba	Cd	Cr	Ni	Pb	Se	V	Fe	Cu	Mn	Zn	Mo
LOD (mg/kg)	20	20	800	20	85	65	20	20	70	100	35	85	25	15
Clave de campo	mg/kg													
TS-01 L25	<LOD	58.41	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	144.71	<LOD	154.47	39694.06	1295.70	1748.62	528.04	24.07
TS-01 L50	<LOD	92.44	<LOD	<LOD	<LOD	65.92	273.35	<LOD	157.57	42926.11	2251.03	1790.60	645.52	24.04
TS-01 L250	<LOD	51.54	<LOD	<LOD	262.46	65.79	199.64	<LOD	126.69	33622.30	1060.00	870.60	449.26	46.20
TS-01 R25	<LOD	101.16	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	245.87	<LOD	142.38	36463.92	1883.50	543.89	312.97	36.21
TS-01 R50	<LOD	98.16	<LOD	<LOD	89.29	<LOD	214.64	<LOD	158.94	39212.14	4297.00	514.90	581.45	43.22
TS-01 R250	<LOD	38.51	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	126.31	<LOD	110.48	27216.82	1015.12	696.88	521.00	33.04
TS-01 R250 Dup	<LOD	37.42	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	127.57	<LOD	110.81	27947.37	1073.04	750.34	542.68	34.42
TS-02 L25	<LOD	45.24	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	130.09	<LOD	86.28	26646.14	479.82	869.59	294.97	<LOD
TS-02 L25 Dup	<LOD	45.24	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	131.94	<LOD	141.81	26570.35	477.40	853.65	297.57	<LOD
TS-02 L50	<LOD	60.15	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	151.30	<LOD	156.72	29746.26	576.52	814.28	326.84	<LOD
TS-02 L250	<LOD	61.00	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	127.61	<LOD	137.90	35587.98	348.60	521.89	188.10	<LOD
TS-02 R25	<LOD	63.83	<LOD	<LOD	87.48	<LOD	323.86	<LOD	178.17	41621.20	1584.26	901.47	515.86	<LOD
TS-02 R50	<LOD	188.43	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	635.54	<LOD	156.54	33354.01	803.61	620.58	431.82	<LOD
TS-02 R250	<LOD	69.00	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	119.91	<LOD	123.31	26158.53	419.79	353.29	162.43	<LOD
TS-03 L25	<LOD	79.69	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	318.22	<LOD	163.34	47835.11	422.00	787.32	297.68	25.88
TS-03 L50	<LOD	79.29	<LOD	<LOD	<LOD	73.80	294.92	<LOD	170.49	37554.34	686.58	1005.16	378.81	<LOD
TS-03 L250	<LOD	77.32	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	473.42	<LOD	148.14	34908.37	1607.02	930.15	379.23	<LOD
TS-03 L500	<LOD	38.36	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	84.81	<LOD	111.58	19760.37	211.08	318.65	102.73	<LOD

Analito	Ag	As	Ba	Cd	Cr	Ni	Pb	Se	V	Fe	Cu	Mn	Zn	Mo
LOD (mg/kg)	20	20	800	20	85	65	20	20	70	100	35	85	25	15
Clave de campo	mg/kg													
TS-03 L500 Dup	<LOD	42.06	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	90.56	<LOD	104.69	19397.25	210.39	332.76	103.42	<LOD
TS-03 R25	<LOD	71.92	<LOD	<LOD	<LOD	68.56	246.95	<LOD	144.12	33580.00	542.29	771.20	343.71	23.44
TS-03 R50	<LOD	23.80	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	69.94	<LOD	134.58	26713.27	497.91	451.75	144.44	<LOD
TS-03 R250	<LOD	37.89	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	95.23	<LOD	139.14	29021.14	371.09	573.86	181.66	<LOD
TS-04 L25	<LOD	50.23	<LOD	<LOD	<LOD	73.06	149.55	<LOD	171.60	41948.10	687.33	2147.80	734.48	<LOD
TS-04 L50	<LOD	61.20	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	232.88	<LOD	171.89	35864.70	1425.40	1148.38	486.39	<LOD
TS-04 L250	<LOD	45.39	<LOD	<LOD	100.22	<LOD	236.91	<LOD	161.76	39050.33	4906.59	1451.93	783.23	<LOD
TS-04 L500	<LOD	62.31	<LOD	<LOD	<LOD	66.92	199.59	<LOD	164.64	35269.15	854.48	992.11	316.40	<LOD
TS-04 R25	<LOD	34.95	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	183.93	<LOD	144.97	33780.80	3150.77	850.80	426.92	<LOD
TS-04 R50	<LOD	52.61	<LOD	<LOD	<LOD	66.25	138.83	<LOD	143.02	31911.94	595.27	646.04	236.47	<LOD
TS-04 R250	<LOD	36.14	<LOD	<LOD	85.82	<LOD	103.39	<LOD	150.56	28835.09	459.36	475.36	206.99	<LOD
TS-04 R500	<LOD	63.19	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	211.95	<LOD	133.11	26757.43	350.48	444.18	219.16	<LOD
TS-05 L25	<LOD	45.45	<LOD	<LOD	<LOD	67.62	129.47	<LOD	163.59	36946.68	501.12	855.61	288.27	<LOD
TS-05 L50	<LOD	38.72	<LOD	<LOD	<LOD	70.29	89.81	<LOD	169.49	37614.24	1680.54	634.55	384.30	<LOD
TS-05 R25	<LOD	46.52	<LOD	<LOD	86.11	65.12	129.45	<LOD	175.90	38056.42	314.53	1399.06	399.21	<LOD
TS-05 R50	<LOD	51.26	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	150.18	<LOD	167.23	37927.42	408.98	1537.15	394.36	<LOD
TS-05 R250	<LOD	56.84	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	148.96	<LOD	130.74	25646.38	383.71	428.97	194.16	<LOD
TS-05 R500	<LOD	61.96	<LOD	<LOD	<LOD	68.30	187.55	<LOD	133.82	26193.93	296.00	381.64	165.22	<LOD

LOD: Límite de detección, <LOD: Menor al límite de detección.

Sedimentos

Tabla 27. Concentración Total FRX Sedimentos.

ZSED-01 (0-25)	<LOD	100.05	<LOD	<LOD	<LOD	69.12	293.92	<LOD	164.32	57387.10	1169.95	802.67	472.16	53.84
ZSED-01 (25-50)	<LOD	130.13	867.85	<LOD	<LOD	133.22	442.03	<LOD	165.33	225633.26	1283.08	1570.83	1463.26	134.25
ZSED-01 (25-50) Dup	<LOD	122.37	<LOD	<LOD	99.85	77.83	424.84	<LOD	150.98	157966.00	1043.69	1096.19	1087.58	140.22
ZSED-01 (50-75)	<LOD	297.17	<LOD	<LOD	112.79	82.20	3705.15	<LOD	147.33	124042.63	805.31	779.12	1343.49	25.92
ZSED-01 (75-100)	<LOD	267.81	<LOD	<LOD	107.03	<LOD	4288.51	<LOD	146.69	62183.73	1609.03	432.93	461.63	<LOD
ZSED-01 (100-150)	<LOD	228.57	<LOD	<LOD	86.94	81.64	4700.13	<LOD	146.50	86386.90	585.66	910.01	539.22	<LOD
ZSED-02 (0-25)	<LOD	64.79	<LOD	<LOD	<LOD	98.84	234.82	<LOD	129.94	197283.16	442.36	632.21	190.37	15.07
ZSED-02 (0-25) Dup	<LOD	62.54	<LOD	<LOD	<LOD	92.83	197.04	<LOD	144.78	179028.34	357.24	661.11	191.05	<LOD
ZSED-02 (25-50)	<LOD	57.99	<LOD	<LOD	<LOD	79.03	192.94	<LOD	165.30	137745.71	231.16	659.74	220.66	<LOD
ZSED-02 (50-75)	<LOD	49.12	<LOD	<LOD	<LOD	80.09	116.40	<LOD	146.76	88619.56	164.73	546.98	193.40	<LOD
ZSED-02 (75-100)	<LOD	55.03	<LOD	<LOD	<LOD	85.19	126.82	<LOD	146.04	104966.35	188.18	706.47	216.86	<LOD

ZSED-02 (100-150)	<LOD	47.20	<LOD	<LOD	<LOD	84.11	129.56	<LOD	146.14	95642.76	187.45	644.09	224.39	<LOD
ZSED-03 (0-25)	<LOD	45.17	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	122.16	<LOD	173.99	47319.29	348.72	473.32	331.33	<LOD
ZSED-03 (25-50)	<LOD	39.86	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	76.67	<LOD	163.48	43649.18	211.94	493.33	249.12	<LOD
ZSED-03 (50-75)	<LOD	46.81	<LOD	<LOD	<LOD	75.34	102.64	<LOD	170.68	45028.19	223.55	985.24	281.06	<LOD
ZSED-03 (75-100)	<LOD	44.37	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	98.00	<LOD	162.60	42294.66	152.90	678.81	233.82	<LOD
ZSED-03 (75-100) Dup	<LOD	44.35	<LOD	<LOD	<LOD	77.36	108.03	<LOD	175.95	46799.76	168.33	675.13	248.49	<LOD
ZSED-03 (100-150)	<LOD	47.76	<LOD	<LOD	<LOD	82.59	104.89	<LOD	175.71	50991.49	191.00	764.75	261.57	<LOD
ZSED-03 (150-200)	<LOD	44.65	<LOD	<LOD	<LOD	65.83	123.91	<LOD	168.93	41946.61	420.62	2137.15	637.68	<LOD
ZSED-04 (0-25)	<LOD	62.56	<LOD	<LOD	<LOD	87.98	221.13	<LOD	137.90	86539.63	166.92	474.59	133.62	17.86
ZSED-04 (0-25) Dup	<LOD	61.11	<LOD	<LOD	<LOD	89.23	199.71	<LOD	133.57	70918.27	150.87	426.98	142.82	15.46
ZSED-04 (25-50)	<LOD	47.90	<LOD	<LOD	94.93	<LOD	145.29	<LOD	129.88	63228.54	132.88	492.87	146.91	<LOD
ZSED-04 (50-75)	<LOD	36.63	<LOD	<LOD	<LOD	66.39	91.33	<LOD	124.12	50018.03	108.65	535.95	150.14	<LOD
ZSED-04 (75-100)	<LOD	44.55	<LOD	<LOD	97.69	67.52	122.63	<LOD	155.44	56293.17	126.00	646.94	196.40	<LOD

ZSED-04 (100-150)	<LOD	46.36	<LOD	<LOD	<LOD	65.64	124.07	<LOD	144.09	51523.14	139.72	633.76	215.52	<LOD
ZSED-04 (150-200)	<LOD	30.14	<LOD	<LOD	124.46	<LOD	73.60	<LOD	164.13	40189.53	224.43	463.91	319.19	<LOD
ZSED-05 (0-25)	<LOD	58.68	<LOD	<LOD	<LOD	79.82	160.29	<LOD	130.23	87480.25	187.29	439.99	145.99	19.40
SED-05 (25-50)	<LOD	47.45	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	117.84	<LOD	143.73	67040.12	224.61	424.97	272.79	<LOD
SED-05 (25-50) Dup	<LOD	42.15	<LOD	<LOD	104.10	<LOD	109.37	<LOD	157.41	65879.74	228.59	405.31	261.88	<LOD
SED-05 (50-75)	<LOD	44.34	<LOD	<LOD	103.02	<LOD	131.99	<LOD	134.74	63282.07	281.48	406.73	318.12	<LOD
SED-05 (75-100)	<LOD	47.74	<LOD	<LOD	96.28	<LOD	116.55	<LOD	143.32	60951.54	241.80	418.93	281.34	<LOD
SED-05 (100-150)	<LOD	40.26	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	104.40	<LOD	154.46	39693.02	183.67	459.07	242.83	<LOD
SEDTB-01 A	<LOD	67.00	<LOD	<LOD	<LOD	75.69	209.56	<LOD	103.43	66852.71	620.60	1338.75	609.63	44.53
SEDTB-01 B	<LOD	64.40	<LOD	<LOD	<LOD	89.96	273.57	<LOD	112.74	61960.36	528.92	1067.15	529.06	29.79
SEDTB-01 C	<LOD	28.92	<LOD	<LOD	<LOD	92.72	190.53	<LOD	76.33	98689.72	299.35	436.41	156.92	22.25
SEDTB-01 D	<LOD	44.76	<LOD	<LOD	<LOD	113.46	297.85	<LOD	72.07	160135.60	663.55	1393.63	401.77	37.94
SEDTB-02 A	<LOD	75.66	<LOD	<LOD	<LOD	159.69	119.43	<LOD	116.56	315984.23	770.58	4398.35	658.90	34.39

SEDTB-02 B	<LOD	85.07	<LOD	<LOD	<LOD	90.61	158.61	<LOD	117.56	73328.52	1180.30	7892.48	1762.89	42.19
SEDTB-02 C	<LOD	104.99	<LOD	<LOD	<LOD	90.76	186.68	<LOD	132.94	95270.29	980.13	4852.83	1119.43	53.06
SEDTB-02 D	<LOD	103.74	<LOD	<LOD	<LOD	94.79	191.02	<LOD	129.91	99548.26	937.29	4873.22	1110.98	51.82
SEDTB-02 E	<LOD	60.88	<LOD	<LOD	<LOD	106.93	126.50	<LOD	104.83	111792.41	822.92	3874.43	750.99	27.57
SEDTB-2.5 A	<LOD	51.60	<LOD	<LOD	<LOD	110.46	61.75	<LOD	98.18	106622.37	295.16	1661.71	666.11	60.91
SEDTB-2.5 B	<LOD	82.53	LOD	<LOD	LOD	LOD	178.16	<LOD	125.78	55088.44	265.59	895.10	626.59	144.79
SEDTB-2.5 C	<LOD	56.59	<LOD	<LOD	<LOD	86.31	97.48	<LOD	114.19	49403.99	187.98	1694.41	784.11	110.05
SEDTB-2.5 D	LOD	106.32	LOD	<LOD	106.83	103.19	149.62	<LOD	163.64	99157.21	274.84	1538.34	776.79	155.29
SEDTB-2.5 E	<LOD	72.27	<LOD	<LOD	91.59	103.61	98.16	<LOD	140.58	81430.13	324.08	1047.77	537.52	93.96
SEDTB-03 A	<LOD	133.24	<LOD	<LOD	114.77	94.64	137.44	<LOD	135.60	132020.91	453.20	534.36	306.70	84.64
SEDTB-03 B	<LOD	72.65	<LOD	<LOD	<LOD	69.01	112.61	<LOD	127.27	48418.38	528.95	760.82	367.96	71.35
SEDTB-03 C	<LOD	76.25	<LOD	<LOD	<LOD	66.43	117.01	<LOD	119.82	47309.38	525.14	834.12	398.73	62.87
SEDTB-03 D	<LOD	76.06	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	134.51	<LOD	126.83	57346.89	496.05	823.14	373.93	70.95

SEDTB-03 E	<LOD	80.11	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	134.60	<LOD	120.21	45049.63	698.04	1202.64	513.62	45.08
SEDTB-04 A	<LOD	71.67	854.62	<LOD	<LOD	82.57	333.31	<LOD	170.01	35907.45	532.10	791.30	792.07	<LOD
SEDTB-04 B	<LOD	79.19	<LOD	<LOD	86.34	69.20	307.58	<LOD	148.11	46898.49	762.32	714.15	904.84	<LOD
SEDTB-04 C	<LOD	65.15	815.13	<LOD	<LOD	72.66	260.09	<LOD	163.21	36284.67	390.38	759.81	482.29	<LOD
SEDTB-04 D	<LOD	64.92	834.66	<LOD	<LOD	84.24	276.68	<LOD	179.69	40225.19	436.21	724.17	734.36	<LOD
SEDTB-04 D Dup	<LOD	74.13	919.04	<LOD	<LOD	77.94	284.49	<LOD	172.67	39462.12	553.00	748.02	713.31	<LOD
SEDTB-04 E	<LOD	69.05	858.62	<LOD	85.49	83.14	261.65	<LOD	172.72	45465.84	418.07	686.88	753.37	<LOD
SEDTB-05 A	<LOD	224.68	<LOD	<LOD	87.22	78.14	712.59	<LOD	149.19	97345.24	1494.71	574.35	349.89	<LOD
SEDTB-05 B	<LOD	245.22	<LOD	<LOD	96.22	103.62	553.23	<LOD	124.82	128290.66	1028.52	554.48	274.15	16.66
SEDTB-05 C	<LOD	272.95	<LOD	<LOD	<LOD	105.94	557.64	<LOD	129.94	155361.67	1752.87	670.09	348.10	<LOD
SEDTB-05 D	<LOD	188.30	<LOD	<LOD	<LOD	104.98	539.44	<LOD	135.55	172172.55	2522.05	889.51	455.64	<LOD
SEDTB-05 E	<LOD	203.61	<LOD	<LOD	<LOD	98.70	545.68	<LOD	117.86	138454.01	1602.54	664.23	377.95	<LOD
SEDTRSP- 01 A	<LOD	40.34	<LOD	<LOD	<LOD	70.03	103.87	<LOD	119.57	36677.71	302.58	814.49	267.88	<LOD

SEDTRSP-01 B	<LOD	39.54	<LOD	<LOD	<LOD	75.93	118.03	<LOD	131.42	36581.48	335.69	877.02	292.33	<LOD
SEDTRSP-01 C	<LOD	42.34	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	130.97	<LOD	160.87	39033.08	390.43	949.28	311.18	<LOD
SEDTRSP-01 D	<LOD	39.83	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	121.76	<LOD	151.27	40097.18	264.53	843.23	252.70	<LOD
SEDTRSP-01 E	<LOD	30.26	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	85.08	<LOD	120.66	29455.52	150.98	974.82	188.29	<LOD
SEDTRSP-02 A	<LOD	37.96	804.18	<LOD	<LOD	73.47	88.17	<LOD	105.71	32972.55	207.89	748.35	204.43	<LOD
SEDTRSP-02 B	<LOD	36.64	805.70	<LOD	<LOD	70.69	76.21	<LOD	114.35	30555.92	197.91	777.98	181.78	<LOD
SEDTRSP-02 C	<LOD	34.77	<LOD	<LOD	<LOD	65.08	92.59	<LOD	141.89	39879.53	204.81	826.11	198.17	<LOD
SEDTRSP-02 D	<LOD	35.45	824.63	<LOD	<LOD	78.99	93.05	<LOD	117.10	30516.88	191.61	715.99	196.43	<LOD
SEDTRSP-02 E	<LOD	29.33	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	88.22	<LOD	129.53	26239.82	269.50	846.06	206.30	<LOD
SEDTRSP-03 A	<LOD	29.26	814.28	<LOD	<LOD	72.40	71.07	<LOD	105.63	25685.89	193.49	719.05	167.05	<LOD
SEDTRSP-03 B	<LOD	25.56	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	73.60	<LOD	104.45	24112.66	190.37	692.80	162.86	<LOD
SEDTRSP-03 C	<LOD	30.90	<LOD	<LOD	<LOD	79.13	77.47	<LOD	159.00	44564.02	167.27	854.56	170.92	<LOD
SEDTRSP-03 D	<LOD	21.02	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	48.78	<LOD	119.27	25147.39	110.80	744.24	133.47	<LOD

SEDTRSP-03 E	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	67.98	26.55	<LOD	140.53	27124.46	60.92	663.88	98.59	<LOD
SEDTRSP-04 A	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	36.80	<LOD	88.29	20121.53	76.60	537.70	88.50	<LOD
SEDTRSP-04 B	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	43.16	<LOD	96.07	23489.05	74.08	597.79	80.31	<LOD
SEDTRSP-04 C	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	71.11	35.60	<LOD	93.96	18462.60	87.62	602.17	113.79	<LOD
SEDTRSP-04 D	<LOD	21.10	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	37.63	<LOD	85.37	18961.80	88.82	486.33	93.24	<LOD
SEDTRSP-04 E	<LOD	22.32	810.52	<LOD	<LOD	<LOD	38.22	<LOD	77.41	17947.62	96.99	514.56	92.77	<LOD
SEDTRSP-05 A	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	22.98	<LOD	72.99	13301.90	52.20	421.99	65.28	<LOD
SEDTRSP-05 B	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	23.53	<LOD	<LOD	13601.90	44.19	403.12	61.92	<LOD
SEDTRSP-05 C	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	24.69	<LOD	76.79	13997.64	52.03	506.45	64.00	<LOD
SEDTRSP-05 D	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	76.47	13192.10	56.17	451.35	64.39	<LOD
SEDTRSP-05 E	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	22.52	<LOD	76.06	12833.62	49.73	407.18	64.15	<LOD
SEDTRSP-06 A	<LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	21.11	<LOD	LOD	10607.12	41.46	324.31	59.29	<LOD
SEDTRSP-06 B	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	23.28	<LOD	<LOD	11841.64	45.89	363.76	53.61	<LOD

SEDTRSP-06 C	<LOD	LOD	LOD	<LOD	LOD	LOD	24.26	<LOD	LOD	11764.20	53.01	344.90	53.89	<LOD
SEDTRSP-06 D	<LOD	LOD	LOD	<LOD	LOD	LOD	29.47	<LOD	89.06	16855.95	73.31	472.59	67.36	<LOD
SEDTRSP-06 E	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	26.12	<LOD	95.49	16848.30	59.47	461.12	73.94	<LOD
SEDTRSP-07 A	<LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	21.62	<LOD	LOD	10662.52	44.87	310.75	57.54	<LOD
SEDTRSP-07 B	<LOD	LOD	LOD	<LOD	LOD	LOD	21.70	<LOD	LOD	10879.58	46.96	327.64	67.30	<LOD
SEDTRSP-07 C	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	11835.52	42.75	366.11	58.74	<LOD
SEDTRSP-07 D	<LOD	LOD	LOD	<LOD	LOD	LOD	21.61	<LOD	73.77	11670.01	41.31	344.87	61.48	<LOD
SEDTRSP-07 E	<LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	21.48	<LOD	71.96	12395.48	37.62	367.67	56.03	<LOD
SEDTRSP-08 A	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	31.26	<LOD	80.85	14201.35	83.59	356.39	67.63	<LOD
SEDTRSP-08 B	<LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	20.51	<LOD	72.16	11604.13	LOD	299.86	47.40	<LOD
SEDTRSP-08 C	<LOD	LOD	LOD	<LOD	LOD	LOD	LOD	<LOD	71.05	12024.78	36.88	300.83	58.27	<LOD
SEDTRSP-09 C	<LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	23.04	<LOD	71.22	14311.81	49.06	361.70	64.06	<LOD

LOD: Límite de detección, <LOD: Menor al límite de detección

Pasivos ambientales

Tabla 28. Concentración Total FRX de los Pasivos ambientales.

Analito	Ag	As	Ba	Cd	Cr	Pb	Se	Ni	V	Fe	Cu	Mn	Zn	Mo
LOD (mg/kg)	20	20	800	20	85	20	20	65	70	100	35	85	25	15
Clave de campo	mg/kg													
PAS-01	<LOD	216.12	<LOD	<LOD	135.33	764.48	<LOD	<LOD	111.75	58153.32	1176.54	286.55	299.59	34.42
PAS-02	<LOD	302.06	<LOD	<LOD	219.65	546.95	<LOD	68.86	126.31	141313.3	3187.95	696.6	1151.21	1105.95
PAS-03	<LOD	178.42	<LOD	<LOD	107.19	666.93	<LOD	81.2	114.46	44721.39	471.62	365.98	197.99	35.74
PAS-04	<LOD	220.65	<LOD	<LOD	148.04	757.02	<LOD	<LOD	131.48	62807.21	397.12	633.56	273.93	37.2
PAS-05	<LOD	167.13	<LOD	<LOD	133.23	707.93	<LOD	<LOD	110.67	31300.99	1294.1	312.93	309.69	29.49
PAS-06	<LOD	89.62	<LOD	<LOD	114.81	340.49	<LOD	<LOD	99.96	58966.08	577.74	432.16	162.96	29.08
PAS-07	<LOD	130.27	<LOD	<LOD	108.35	239.72	<LOD	<LOD	94.62	97790.8	464.18	442.29	148.28	35.74
PAS-07 Dup	<LOD	131.81	<LOD	<LOD	92.42	231.21	<LOD	<LOD	109.38	98006.92	458.16	415.27	143.97	35.3
PAS-08	<LOD	291.94	<LOD	<LOD	141.61	974.91	<LOD	<LOD	129.9	56466.98	585.44	425.23	240.56	17.16
PAS-09	<LOD	260.51	<LOD	<LOD	140.83	1024.1	<LOD	93.06	123.54	123187.27	301.84	300.72	137.92	18.32
PAS-09 Dup	<LOD	232.95	<LOD	<LOD	131.99	924.43	<LOD	90.66	125.71	119970.2	312.58	290.37	136.73	17.95
PAS-10	<LOD	214.43	<LOD	<LOD	134.2	793.27	<LOD	<LOD	119.16	31794.21	610.58	271.21	177.97	37.91
PAS-11	<LOD	200.55	<LOD	<LOD	133.03	617.12	<LOD	<LOD	109.02	56714.58	640.19	330.79	185.95	31.62
PAS-12	<LOD	260.53	<LOD	<LOD	127.92	763.19	<LOD	<LOD	115.6	60590.08	399.15	291.96	193.67	28.28
PAS-13	<LOD	239.96	<LOD	<LOD	121.99	486.87	<LOD	67.84	112.42	308769.14	734.13	631.47	254.05	44.84

PAS-14	<LOD	317.53	<LOD	<LOD	149.12	1105.31	<LOD	<LOD	130	107360.94	2450.7	313.5	383.54	17.77
PAS-15	<LOD	226.98	<LOD	<LOD	97.15	433.45	<LOD	93.24	106.69	425119.84	942.94	684.25	291.9	16.88
PAS-16	<LOD	177.69	<LOD	<LOD	129.19	632.63	<LOD	66.84	129.47	51771.4	702.81	278.17	231.71	45.73
PAS-17	<LOD	97.28	<LOD	<LOD	129.39	202.21	<LOD	77.1	147.71	90567.74	886.89	647.15	260.79	60.41
PAS-18	<LOD	209.55	<LOD	<LOD	122.02	487.65	<LOD	81.31	130.44	97977.84	772.62	368.3	212.26	59.01
PAS-19	<LOD	167.08	<LOD	<LOD	115.13	796.6	<LOD	86.3	129.13	108717.83	691.8	310.6	178.38	50.16
PAS-20	<LOD	315.5	<LOD	<LOD	124.65	777	<LOD	<LOD	131.18	49309.93	2292.62	903.98	710.22	<LOD
PAS-21	<LOD	473.15	<LOD	<LOD	136.09	862.93	<LOD	<LOD	126.69	66005.37	7105.3	1183.33	1091.59	<LOD
PA1-01 (0-5)	<LOD	237.98	<LOD	<LOD	116.15	789.39	<LOD	65.01	113.18	60962.05	881.59	266.59	239.82	127.49
PA1-01 (25-50)	<LOD	360.5	<LOD	<LOD	87.53	1497.73	<LOD	<LOD	120.89	66796.3	660.25	205.49	292.6	24.55
PA1-01 (50-100)	<LOD	454.74	<LOD	<LOD	89.39	1736.48	<LOD	<LOD	129.96	15505.01	1043.18	171.75	481.75	22.87
PA1-01 (100-150)	<LOD	385.78	<LOD	<LOD	162.68	1464.46	<LOD	<LOD	151.51	20239.13	8605.54	241.37	907.84	18.16
PA1-01 (150-200)	<LOD	372.09	<LOD	<LOD	119.65	1079.4	<LOD	<LOD	125.36	20544.71	10860.47	283.52	1212.39	32.55
PA1-01 (150-200) Dup	<LOD	412.14	<LOD	<LOD	125.6	1100.06	<LOD	<LOD	128.4	21678.67	11462.58	283.91	1323.52	35.84

PA1-01 (200-250)	<LOD	280.78	<LOD	<LOD	169.91	1212.67	<LOD	<LOD	140.94	14669.25	11010.67	212.79	899.36	33.46
PA1-02 (0-25)	<LOD	203.11	<LOD	<LOD	<LOD	401.61	<LOD	<LOD	81.86	351749.82	679.72	234.4	177.64	107.64

PA1-02 (25-50)	<LOD	309.56	<LOD	<LOD	122.85	1072.93	<LOD	<LOD	154.63	66705.01	501.51	233.42	261.49	78.55
PA1-02 (50-100)	<LOD	235.88	<LOD	<LOD	<LOD	1180.8	<LOD	<LOD	159.54	27057.32	254.66	210.07	256.67	<LOD
PA1-02 (100-150)	<LOD	418.8	<LOD	<LOD	154.93	1410.85	<LOD	<LOD	156.65	16470.71	1404.75	131.26	350.75	22.71
PA1-02 (150-200)	<LOD	268.21	<LOD	<LOD	157.31	946.16	<LOD	<LOD	156.33	25146.3	3610.23	212.2	449.24	31.26
PA1-02 (150-200) Dup	<LOD	238.2	<LOD	<LOD	150.69	841.79	<LOD	<LOD	138.52	19435.94	3342.05	186.31	399.53	43.32
PA1-03 (0-25)	<LOD	284.41	<LOD	<LOD	109.58	1047.31	<LOD	<LOD	112.58	22449.16	383.79	182.7	148.42	23.8
PA1-03 (25-50)	<LOD	193.71	<LOD	<LOD	110.4	737.43	<LOD	<LOD	83.15	31346.39	315.48	176.56	100.41	24.29
PA1-03 (50-100)	<LOD	333.66	<LOD	<LOD	132.38	1683.94	<LOD	<LOD	145.12	23399.21	280.7	134.56	245.95	25.76
PA1-03 (100-150)	<LOD	255.45	<LOD	<LOD	133.11	896.13	<LOD	<LOD	123.75	15338.61	1035.3	133.61	265.26	28.86
PA1-03 (100-150) Dup	<LOD	270.42	<LOD	<LOD	113.65	1118.62	<LOD	<LOD	135.72	14898.04	1557.64	146.64	527.99	23.63
PA1-03 (150-200)	<LOD	265.83	<LOD	<LOD	118.75	906.46	<LOD	<LOD	111.59	9972.33	4548.41	141.01	704.74	38.47
PA1-04 (0-25)	<LOD	311.53	<LOD	<LOD	140.44	959.88	<LOD	<LOD	158.17	65983.42	1687.99	291.87	336.27	22.32

PA1-04 (0-25) Dup	<LOD	400.15	<LOD	<LOD	138.31	1113.69	<LOD	<LOD	158.99	61972.28	1755.73	308.55	392.28	18.87
PA1-04 (25-50)	<LOD	339.72	<LOD	<LOD	150.53	1227.42	<LOD	<LOD	153.1	48883.22	1709.16	219.39	389.31	16.38
PA1-04 (50-100)	<LOD	276.28	<LOD	<LOD	127.73	1195.86	<LOD	<LOD	180.47	31502.23	1657.22	279.02	421.43	<LOD
PA1-04 (100-150)	<LOD	403.02	<LOD	<LOD	154.85	1647.31	<LOD	<LOD	151.47	25463.21	2164.27	300.31	525.63	15.43
PA1-04 (150-200)	<LOD	333.6	<LOD	<LOD	162.55	1125.9	<LOD	<LOD	158.84	22827.31	2785.72	281.2	539.89	20.31
PA1-05 (0-25)	<LOD	203.67	<LOD	<LOD	120.21	298.03	<LOD	93.31	94.84	342732.59	1463.9	856.92	454.52	383.15
PA1-05 (25-50)	<LOD	238.4	<LOD	<LOD	<LOD	410.95	<LOD	<LOD	92.74	343326.99	656.08	384.9	158.85	46.75
PA1-05 (50-100)	<LOD	411.66	<LOD	<LOD	138.32	2072.11	<LOD	<LOD	206.46	19559.61	354.18	155.42	451.96	23.01
PA1-05 (50-100) DUP	<LOD	404.95	<LOD	<LOD	140	2073.47	<LOD	<LOD	200.69	19249.8	359.46	198.49	454.22	21.48
PA1-05 (100-150)	<LOD	425.31	<LOD	<LOD	196.58	1884.53	<LOD	<LOD	169.4	18963.95	3038.25	254.59	636.74	16.57
PA1-05 (150-200)	<LOD	365.29	<LOD	<LOD	161.95	1573.01	<LOD	<LOD	163.89	21999.67	6026.62	366.35	676.89	23.11
PA2-01 (0-25)	<LOD	92.27	<LOD	<LOD	<LOD	386.1	<LOD	<LOD	107.08	35597.32	513.84	1091.68	892.22	<LOD

PA2-01 (25-50)	<LOD	106.08	<LOD	<LOD	86.82	441.24	<LOD	<LOD	129.09	41697.75	405.75	733.43	874.46	25.03
PA2-01 (50-100)	<LOD	112.96	<LOD	<LOD	87.74	345.64	<LOD	<LOD	131.24	37892.45	389.12	1458.65	764.39	<LOD
PA2-01 (100-150)	<LOD	178.08	<LOD	<LOD	101.23	149.77	<LOD	86.52	108.36	209427.35	547.48	1040.68	326.81	250.05
PA2-01 (150-200)	<LOD	102.13	<LOD	<LOD	129	103.58	<LOD	<LOD	159.25	28171.33	613.86	513.55	265.2	519.48
PA2-01 >200	<LOD	137.87	<LOD	<LOD	121.58	74.1	<LOD	<LOD	118.05	27090.92	1172.81	502.85	212.17	482.07
PA2-02 (0-25)	<LOD	96.54	<LOD	<LOD	<LOD	159.72	<LOD	<LOD	94.51	216263.3	598.66	1028.09	363.29	54.86
PA2-02 (25-50)	<LOD	121.58	<LOD	<LOD	<LOD	151.13	<LOD	87.81	79.75	237816.71	732.66	1605.77	473.81	93.61
PA2-02 (80-100)	<LOD	102.47	<LOD	<LOD	<LOD	116.18	<LOD	76.81	<LOD	205947.99	1235.41	3043.6	910.36	80.16
PA2-02 (100-150)	<LOD	23.76	<LOD	<LOD	119.24	40.6	<LOD	<LOD	152.69	24432.27	879.54	1413.88	699.76	179.92
PA2-02 (150-200)	<LOD	23.79	<LOD	<LOD	140.16	42.58	<LOD	<LOD	167.15	18743.84	849.52	1195.35	690.2	72.68
PA2-03 (0-25)	<LOD	74.32	<LOD	<LOD	107.74	241.83	<LOD	<LOD	139.79	40135.46	664.89	972.81	659.19	<LOD
PA2-03 (25-50)	<LOD	62.56	<LOD	<LOD	94.83	125.45	<LOD	<LOD	154.31	47971.77	372.6	615.4	368.57	<LOD
PA2-03 (50-100)	<LOD	178.09	<LOD	<LOD	<LOD	92.24	<LOD	<LOD	77.7	411437.19	720.45	547.51	178.68	116.61

PA2-03 (100-150)	<LOD	70.05	<LOD	<LOD	127.87	70.55	<LOD	<LOD	239.65	21682.87	175.51	292.08	160.26	193.98
PA2-03 (150-180)	<LOD	101.61	<LOD	<LOD	124.38	77.71	<LOD	<LOD	207.23	17646.88	178.6	255.17	153.59	103.53
PA2-04 (0-25)	<LOD	343.62	<LOD	<LOD	120.89	221.65	<LOD	<LOD	163.57	48920.23	887.37	747.72	659.89	55.88
PA2-04 (25-50)	<LOD	95.64	<LOD	<LOD	126.88	371.55	<LOD	<LOD	129.26	31119.29	257.86	1434.61	884.89	<LOD
PA2-04 (50-100)	<LOD	88.47	<LOD	<LOD	111.08	436.08	<LOD	<LOD	131.36	35597.29	350.11	1777.76	969.21	<LOD
PA2-04 (100-150)	<LOD	38.98	<LOD	<LOD	119.4	42.56	<LOD	<LOD	148.78	25817.63	91.9	157.86	32.92	304.36
PA2-04 (150-200)	<LOD	37.05	<LOD	<LOD	<LOD	40.24	<LOD	<LOD	136.12	6634.42	537.94	118.87	33.45	627.81
PA2-05 (0-25)	<LOD	86.66	<LOD	<LOD	109.79	100.93	<LOD	<LOD	136.43	39467.15	672.09	969.93	428.59	<LOD
PA2-05 (25-50)	<LOD	81.68	LOD	<LOD	88.01	123.99	<LOD	LOD	119.34	30654.82	318.42	1007.56	359.2	LOD
PA2-05 (50-120)	<LOD	90.78	<LOD	<LOD	<LOD	374.1	<LOD	<LOD	91	32490.98	265.71	1441.22	860	<LOD
PA2-05 (120-150)	<LOD	224.55	<LOD	<LOD	<LOD	178.37	<LOD	83.36	115.25	649954.29	537.96	684.22	219.89	175.63
PA2-05 (150-200)	<LOD	48.05	<LOD	<LOD	111.23	45.46	<LOD	<LOD	223.44	20683.27	52.34	<LOD	31.77	163.23

LOD: Límite de detección, <LOD: Menor al límite de detección

Anexo B: Conductividad y pH

Suelo

Tabla 29. pH y Conductividad eléctrica en suelos

Clave de la muestra	pH	CE (µs/cm)
TS-01-L25	5.95	46
TS-01-L50	6.11	40.4
TS-01-L250	6.01	128.5
TS-01-R25	4.67	114.5
TS-01-R50	4.93	76
TS-01-R250	5.57	73.9
TS-01-R250 DUP	5.76	69.9
TS-02-L25	5.47	104.9
TS-02-L25 DUP	5.61	92.8
TS-02-L50	5.45	87
TS-02-L250	5.79	922
TS-02-R25	5.9	31.8
TS-02-R50	5.48	38
TS-02-R250	4.94	31.1
TS-03-L25	5.52	25.2
TS-03-L50	5.96	11.3
TS-03-L250	5.98	11.01
TS-03-L500	9.3	17.71
TS-03-L500 DUP	5.87	12.2
TS-03-R25	5.53	32.2
TS-03-R50	5.95	7.83

Clave de la muestra	pH	CE (µs/cm)
TS-03-R250	6.09	7.99
TS-04-L25	5.51	248
TS-04-L50	6.13	31.2
TS-04-L250	5.28	646
TS-04-L500	9.45	7.67
TS-04-R25	4.85	1626
TS-04-R50	5.66	76.3
TS-04-R250	6.12	16.06
TS-04-R500	5.67	50.7
TS-05-L25	7.67	9.66
TS-05-L50	5.9	498
TS-05-R25	8.19	39
TS-05-R50	8.36	24.7
TS-05-R250	6.94	111.4
TS-05-R500	7.22	24

Sedimentos

Tabla 30. pH y Conductividad eléctrica en sedimentos

Clave de la muestra	pH	CE (µs/cm)
ZSED-01 (0-25)	7.07	737
ZSED-01 (25-50)	6.4	290
ZSED-01 (25-50) Dup	5.67	272
ZSED-01 (50-75)	5.7	265
ZSED-01 (75-100)	5.95	219
ZSED-01 (100-150)	6.14	98.4

Clave de la muestra	pH	CE ($\mu\text{s/cm}$)
ZSED-02 (0-25)	5.28	136.4
ZSED-02 (0-25) Dup	5.56	137.2
ZSED-02 (25-50)	5.41	153
ZSED-02 (50-75)	5.07	145.4
ZSED-02 (75-100)	5.83	83
ZSED-02 (100-150)	5.73	77.2
ZSED-03 (0-25)	4.73	135.8
ZSED-03 (25-50)	4.58	219
ZSED-03 (50-75)	4.55	139.2
ZSED-03 (75-100)	4.42	186.1
ZSED-03 (75-100) Dup	4.36	188
ZSED-03 (100-150)	4.47	143
ZSED-03 (150-200)	4.47	443
ZSED-04 (0-25)	9.73	59.1
ZSED-04 (0-25) Dup	9.35	57.8
ZSED-04 (25-50)	8.81	45.7
ZSED-04 (50-75)	8.36	60.2
ZSED-04 (75-100)	8.48	63.3
ZSED-04 (100-150)	7.86	60.4
ZSED-04 (150-200)	5.03	181
ZSED-05 (0-25)	5.5	88.7
ZSED-05 (25-50)	4.62	189.3
ZSED-05 (25-50) Dup	4.3	176.4
ZSED-05 (50-75)	3.92	187.1
ZSED-05 (75-100)	3.82	174.9
ZSED-05 (100-150)	4.21	97.9

Clave de la muestra	pH	CE ($\mu\text{s/cm}$)
SEDTB-01 A	2.76	5430
SEDTB-01 B	3.28	4200
SEDTB-01 C	2.47	2730
SEDTB-01 D	2.15	5640
SEDTB-02 A	2.38	4790
SEDTB-02 B	2.67	9790
SEDTB-02 C	2.64	6600
SEDTB-02 D	2.66	6620
SEDTB-02 E	2.58	5430
SEDTB-2.5 A	1.97	6930
SEDTB-2.5 B	2.12	4760
SEDTB-2.5 C	2.23	6830
SEDTB-2.5 D	2.6	5430
SEDTB-2.5 E	2.43	3530
SEDTB-03 A	3.32	783
SEDTB-03 B	4.11	266
SEDTB-03 C	3.74	835
SEDTB-03 D	3.88	516
SEDTB-03 E	3.85	1063
SEDTB-04 A	4.64	650
SEDTB-04 B	4.67	238
SEDTB-04 C	4.44	211
SEDTB-04 D	4.31	259
SEDTB-04 D Dup	4.35	271
SEDTB-04 E	3.95	351
SEDTB-05 A	3.3	1182

Clave de la muestra	pH	CE ($\mu\text{s/cm}$)
SEDTB-05 B	3.26	963
SEDTB-05 C	2.81	1485
SEDTB-05 D	2.66	2440
SEDTB-05 E	2.75	2810
SEDTRSP-01 A	6.52	21.2
SEDTRSP-01 B	6.63	21.8
SEDTRSP-01 C	6.5	1.9
SEDTRSP-01 D	6.76	13.89
SEDTRSP-01 E	6.7	82.5
SEDTRSP-02 A	7.17	20.7
SEDTRSP-02 B	7.02	34.1
SEDTRSP-02 C	7.17	33.2
SEDTRSP-02 D	7.19	23.7
SEDTRSP-02 E	7.05	56
SEDTRSP-03 A	7.4	22.7
SEDTRSP-03 B	7.14	22.4
SEDTRSP-03 C	7.16	23.6
SEDTRSP-03 D	7.04	40.8
SEDTRSP-03 E	7.3	23.6
SEDTRSP-04 A	7.28	28.4
SEDTRSP-04 B	7.31	30.9
SEDTRSP-04 C	7.25	31.4
SEDTRSP-04 D	7.31	33.9
SEDTRSP-04 E	7.67	33.1
SEDTRSP-05 A	7.59	19.19
SEDTRSP-05 B	7.8	19.33

Clave de la muestra	pH	CE ($\mu\text{s/cm}$)
SEDTRSP-05 C	7.84	18.17
SEDTRSP-05 D	7.68	20.3
SEDTRSP-05 E	7.47	23.2

Pasivos Ambientales

Tabla 31. pH y Conductividad eléctrica en los Pasivos ambientales

Clave de la muestra	pH	CE ($\mu\text{s/cm}$)
PAS-01	3.84	1563
PAS-02	4.12	1045
PAS-03	3.74	866
PAS-04	4.48	1066
PAS-05	4.1	1230
PAS-06	4.23	922
PAS-07	3.61	2010
PAS-07 Dup	3.53	1909
PAS-08	3.41	1423
PAS-09	3.14	332
PAS-09 Dup	3.18	293
PAS-10	3.86	209
PAS-11	3.66	919
PAS-12	3.37	1258
PAS-13	2.91	2530
PAS-14	2.95	1302
PAS-15	2.66	2210
PAS-16	3.63	230
PAS-17	3.96	145.9
PAS-18	3.57	1241

Clave de la muestra	pH	CE (µs/cm)
PAS-19	3.45	1086
PAS-20	3.45	2580
PAS-21	3.41	3220
PA1-01 (0-25)	4.39	962
PA1-01 (25-50)	3.78	231
PA1-01 (50-100)	3.72	256
PA1-01 (100-150)	4.11	166.2
PA1-01 (150-200)	5.44	109.2
PA1-01 (150-200) Dup	4.99	166
PA1-01 (200-250)	5.57	179.9
PA1-02 (0-25)	3.08	1254
PA1-02 (25-50)	3.51	279
PA1-02 (50-100)	3.58	171.1
PA1-02 (100-150)	3.82	307
PA1-02 (150-200)	3.8	265
PA1-02 (150-200) Dup	4.13	205
PA1-03 (0-25)	4.18	123.6
PA1-03 (25-50)	4.31	88.2
PA1-03 (50-100)	3.73	130.8
PA1-03 (100-150)	3.85	128.4
PA1-03 (100-150) Dup	3.96	94.8
PA1-03 (150-200)	4.32	135.3
PA1-04 (0-25)	3.43	1240
PA1-04 (0-25) Dup	3.38	1046
PA1-04 (25-50)	3.43	966
PA1-04 (50-100)	3.38	851

Clave de la muestra	pH	CE (µs/cm)
PA1-04 (100-150)	3.46	1119
PA1-04 (150-200)	3.46	1518
PA1-05 (0-25)	3.1	2720
PA1-05 (25-50)	2.82	1976
PA1-05 (50-100)	3.41	531
PA1-05 (50-100) Dup	3.40	820
PA1-05 (100-150)	3.62	789
PA1-05 (150-200)	3.75	1165
PA2-01 (0-25)	3.96	1500
PA2-01 (25-50)	3.91	763
PA2-01 (50-100)	3.97	772
PA2-01 (100-150)	2.66	2560
PA2-01 (150-200)	2.94	2120
PA2-01 >200	3.46	1798
PA2-02 (0-25)	2.57	3150
PA2-02 (25-50)	2.51	3490
PA2-02 (80-100)	2.52	5050
PA2-02 (100-150)	2.55	3770
PA2-02 (150-200)	2.58	3030
PA2-03 (0-25)	3.72	1413
PA2-03 (25-50)	3.89	858
PA2-03 (50-100)	2.74	1896
PA2-03 (100-150)	3.02	659
PA2-03 (150-180)	2.69	684
PA2-04 (0-25)	3.96	1439
PA2-04 (25-50)	2.34	293

Clave de la muestra	pH	CE ($\mu\text{s}/\text{cm}$)
PA2-04 (50-100)	4.03	509
PA2-04 (100-150)	3.12	572
PA2-04 (150-200)	3.8	505
PA2-05 (0-25)	4.36	228
PA2-05 (25-50)	4.8	95
PA2-05 (50-120)	4.89	96.7
PA2-05 (120-150)	2.91	666
PA2-05 (150-200)	3.3	451

Anexo C: concentración soluble mediante la prueba de extracción de metales y metaloides con agua en equilibrio con CO₂.

Suelos

Tabla 32. Concentración soluble de elementos en suelos

Elemento	Ag	As	Ba	Cd	Cr	Ni	Pb	Se	V	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
λ(nm)	328.06 8	193.69 6	233.52 7	226.50 2	267.71 6	231.60 4	220.35 3	196.02 6	292.40 1	327.39 5	238.20 4	259.37 2	204.59 8	213.85 7
LD (mg/L)	0.06	0.04	0.05	0.03	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
LC (mg/L)	0.19	0.14	0.18	0.1	0.18	0.18	0.16	0.21	0.17	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Clave de campo	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
TS-01-R25	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.91	1.22	0.19	<LD	0.14
TS-01-R50	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	2.11	2.16	0.31	<LD	0.39
TS-01-R250	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.22	0.04	0.01	<LD	0.04
TS-01-R250 DUP	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.19	0.07	0.01	<LD	0.04
TS-01-L25	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.26	0.7	0.08	<LD	0.14
TS-01-L50	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.1	<LD	0.01	<LD	0.01
TS-01-L250	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.15	0.09	0.01	<LD	0.05
TS-02-R25	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.39	0.13	0.3	<LD	0.13
TS-02-R50	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.55	0.69	0.33	<LD	0.28
TS-02-R250	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.1	0.91	0.04	<LD	0.03
TS-02-L25	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.16	1.26	0.06	<LD	0.06
TS-02-L25 DUP	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.16	2.65	0.07	<LD	0.1
TS-02-L50	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.22	0.98	0.16	<LD	0.08

Elemento	Ag	As	Ba	Cd	Cr	Ni	Pb	Se	V	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
TS-02-L250	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.05	0.25	0.07	<LD	0.01
TS-03-R25	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.13	0.92	0.18	<LD	0.06
TS-03-R50	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.19	1.57	0.11	<LD	0.04
TS-03-R250	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.05	2.38	0.07	<LD	0.03
TS-03-L25	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.04	0.05	0.14	<LD	0.05
TS-03-L50	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.06	0.17	0.14	<LD	0.03
TS-03-L250	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.24	0.52	0.22	<LD	0.09
TS-03-L500	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.06	0.81	0.05	<LD	0.06
TS-03-L500 DUP	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.08	0.44	0.06	<LD	0.04
TS-04-R25	<LD	<LD	0.11	0.12	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	6.15	0.77	8.75	<LD	3.13
TS-04-R50	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.19	1.97	0.44	<LD	0.08
TS-04-R250	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.09	4.27	0.06	<LD	0.07
TS-04-R500	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.19	3.71	0.04	<LD	0.09
TS-04-L25	<LD	<LD	0.07	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.13	1.37	1.25	0.03	0.23
TS-04-L50	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.29	1.46	0.22	0.02	0.11
TS-04-L250	<LD	<LD	0.13	0.07	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	7.89	0.11	17.84	0.02	5.2
TS-04-L500	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.14	1.24	0.08	0.01	0.04
TS-05-R25	<LD	0.06	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.05	1.78	0.07	0.01	0.08
TS-05-R50	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.07	1.56	0.09	0.02	0.06
TS-05-R250	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.27	0.53	0.09	0.01	0.06
TS-05-R500	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.28	1.43	0.08	0.01	0.06
TS-05-L25	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.12	2.31	0.25	0.01	0.65
TS-05-L50	<LD	<LD	0.06	0.04	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	1.7	0.02	1.91	0.01	1.11
TS-06-R25	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.08	0.85	0.05	0.02	0.03
TS-06-R50	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.09	1.1	0.09	0.02	0.06
TS-06-R250	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.33	1.6	0.56	0.02	0.2
TS-06-R500	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.03	0.91	0.05	0.01	0.01
TS-06-L25	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.18	0.66	0.24	0.01	0.16
TS-06-L50	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.21	0.49	0.08	0.01	0.08

Elemento	Ag	As	Ba	Cd	Cr	Ni	Pb	Se	V	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
TS-06-L250	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.18	0.08	3.73	0.01	0.24
TS-06-L500	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.05	1.9	0.1	0.01	0.04
TS-07-R25	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.07	0.59	0.01	0.02	0.02
TS-07-R50	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.07	0.03	1.28	0.02	0.02	0.02
TS-07-R250	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.04	0.71	0.05	0.01	0.01
TS-07-R500	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.02	0.85	0.08	<LD	0.01
TS-07-L10	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.03	1.17	0.03	0.01	0.02
TS-07-L21	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.07	0.81	0.03	0.01	0.04
TS-07-L107	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.17	1.36	0.03	<LD	0.04
TS-07-L215	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.01	0.43	0.03	0.01	0.02

Sedimentos

Tabla 33. Concentración de elementos solubles en los sedimentos del sistema fluvial El Barrilito

Elemento	Ag	As	Ba	Cd	Cr	Ni	Pb	Se	V	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
λ (nm)	328.0 68	193.6 96	233.5 27	226.5 02	267.7 16	231.6 04	220.3 53	196.0 26	292.4 01	327.3 95	238.2 04	259.3 72	204.5 98	213.8 57
LD (mg/L)	0.06	0.04	0.05	0.03	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.003	0.030	0.003	0.076	0.003
LC (mg/L)	0.19	0.14	0.18	0.1	0.18	0.18	0.16	0.21	0.17	0.01	0.1	0.01	0.25	0.01
Clave de campo	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
ZSED-01 (0-25)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.24	<LD	0.9	<LD	0.93
ZSED-01 (25-50)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.27	<LD	1.18	0.01	1.58
ZSED-01 (25-50) DUP	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.35	<LD	1.2	0.02	1.11
ZSED-01 (50-75)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.04	0.11	0.32	0.01	0.34
ZSED-01 (75-100)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.73	<LD	0.3	<LD	0.06
ZSED-01 (100-150)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.01	0.27	0.11	0.01	0.06
ZSED-02 (0-25)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.02	<LD	0.11	0.01	0.03

Elemento	Ag	As	Ba	Cd	Cr	Ni	Pb	Se	V	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
ZSED-02 (0-25) DUP	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.02	<LD	0.12	<LD	0.04
ZSED-02 (25-50)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.02	<LD	0.01
ZSED-02 (50-75)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.01	<LD	0.01	0.01	0.01
ZSED-02 (75-100)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.02	5.21	0.03	<LD	0.02
ZSED-02 (100-150)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.93	0.01	0.01	0.01
ZSED-03 (0-25)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.08	0.01	0.16	0.01	0.05
ZSED-03 (25-50)	<LD	<LD	0.06	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.12	<LD	0.22	<LD	0.05
ZSED-03 (50-75)	<LD	<LD	0.07	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.1	<LD	0.49	0.01	0.07
ZSED-03 (75-100)	<LD	<LD	0.06	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.16	<LD	0.31	0.01	0.1
ZSED-03 (75-100) DUP	<LD	<LD	0.07	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.1	0.02	0.2	<LD	0.06
ZSED-03 (100-150)	<LD	<LD	0.08	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.13	<LD	0.51	0.01	0.12
ZSED-03 (150-200)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.07	<LD	<LD	<LD	0.2	<LD	10.13	0.01	2.16
ZSED-04 (0-25)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.01	<LD	0.01
ZSED-04 (0-25) DUP	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.01	<LD	<LD	0.01	0.01
ZSED-04 (25-50)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.14	<LD	0.01	<LD
ZSED-04 (50-75)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.04	0.01	0.01	<LD
ZSED-04 (75-100)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.01	1.27	0.02	0.01	0.02
ZSED-04 (100-150)	<LD	<LD	0.06	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.02	0.05	0.01	0.02
ZSED-04 (150-200)	<LD	<LD	0.09	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.05	0.01	0.3	<LD	0.03
ZSED-05 (0-25)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.01	<LD	0.01
ZSED-05 (25-50)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.03	<LD	0.03	<LD	0.08
ZSED-05 (25-50) DUP	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.05	<LD	0.03	0.01	0.03
ZSED-05 (50-75)	<LD	<LD	0.06	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.06	<LD	0.06	0.01	0.04

Elemento	Ag	As	Ba	Cd	Cr	Ni	Pb	Se	V	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
ZSED-05 (75-100)	<LD	<LD	0.07	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.06	<LD	0.08	0.01	0.03
ZSED-05 (100-150)	<LD	<LD	0.08	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.06	<LD	0.12	0.01	0.05

Elemento	Ag	As	Ba	Cd	Cr	Ni	Pb	Se	V	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
λ (nm)	328.0 68	193.6 96	233.5 27	226.5 02	267.7 16	231.6 04	220.3 53	196.0 26	292.4 01	327.3 95	238.2 04	259.3 72	204.5 98	213.8 57
LD (mg/L)	0.06	0.04	0.05	0.03	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
LC (mg/L)	0.19	0.14	0.18	0.1	0.18	0.18	0.16	0.21	0.17	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Clave de campo	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
SEDTB-01 A	<LD	<LD	<LD	0.14	<LD	0.52	<LD	<LD	<LD	16.2	1	54.3	0.02	21.89
SEDTB-01 B	<LD	<LD	<LD	0.08	<LD	0.29	<LD	<LD	<LD	9.49	0.17	30.88	0.01	12.55
SEDTB-01 C	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.06	<LD	<LD	<LD	1.56	1.99	5.54	0.01	2.05
SEDTB-01 D	<LD	<LD	<LD	0.11	<LD	0.41	<LD	<LD	<LD	13.29	7.55	42.11	0.05	15.71
SEDTB-02 A	<LD	<LD	<LD	0.12	<LD	0.5	<LD	<LD	<LD	12.73	3.49	37	0.03	21.71
SEDTB-02 B	<LD	<LD	<LD	0.36	0.06	1.68	<LD	0.2	<LD	41.24	10.53	427.1	0.03	72.18
SEDTB-02 C	<LD	<LD	<LD	0.23	<LD	1.03	<LD	0.13	<LD	28.11	3.01	251	0.03	44.78
SEDTB-02 D	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.29	0.09	0.02	0.03
SEDTB-02 E	<LD	<LD	<LD	0.17	<LD	0.74	<LD	0.07	<LD	19.8	2.12	101.3	0.01	31.45
SEDTB-2.5 A	<LD	<LD	<LD	0.11	0.07	0.62	<LD	<LD	<LD	6.01	73.9	63.2	0.01	26.77
SEDTB-2.5 B	<LD	<LD	<LD	0.09	<LD	0.42	<LD	<LD	<LD	4.03	144	41.77	<LD	20.23
SEDTB-2.5 C	<LD	<LD	<LD	0.14	<LD	0.66	<LD	<LD	<LD	2.59	469	76.4	0.01	30.8
SEDTB-2.5 D	<LD	<LD	<LD	0.09	<LD	0.45	<LD	<LD	<LD	2.14	347	46.11	<LD	21.5
SEDTB-2.5 E	<LD	<LD	<LD	0.06	<LD	0.29	<LD	<LD	<LD	5.64	9.31	27.9	<LD	12.35
SEDTB-03 A	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	1.16	0.06	2.21	<LD	0.7
SEDTB-03 B	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.59	<LD	1.82	<LD	0.52
SEDTB-03 C	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	2.43	<LD	7.87	<LD	2.48
SEDTB-03 D	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	1.58	0.22	5.9	<LD	2.07
SEDTB-03 E	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.07	<LD	<LD	<LD	4.65	0.01	16.29	0.01	5.59

Elemento	Ag	As	Ba	Cd	Cr	Ni	Pb	Se	V	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
SEDTB-04 A	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.03	<LD	0.94	<LD	0.46
SEDTB-04 B	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	1.82	0.19	0.94	<LD	3.07
SEDTB-04 C	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.78	0.04	0.78	<LD	1.62
SEDTB-04 D	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.91	0.02	0.98	<LD	1.98
SEDTB-04 D DUP	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.85	0.02	0.89	<LD	1.79
SEDTB-04 E	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	1.32	0.04	1.17	<LD	2.53
SEDTB-05 A	<LD	<LD	<LD	0.04	<LD	0.06	<LD	<LD	<LD	25.89	0.08	7.45	<LD	5.71
SEDTB-05 B	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	8.79	0.03	3.77	<LD	2.48
SEDTB-05 C	<LD	<LD	<LD	0.08	<LD	0.14	<LD	<LD	<LD	83.2	0.63	13.54	<LD	13.23
SEDTB-05 D	<LD	<LD	<LD	0.05	<LD	0.09	<LD	<LD	<LD	39.02	0.42	8.28	0.01	7.84
SEDTB-05 E	<LD	<LD	<LD	0.07	<LD	0.11	<LD	<LD	<LD	52.37	1.51	11.54	<LD	10.78

Elemento	Ag	As	Ba	Cd	Cr	Ni	Pb	Se	V	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
λ (nm)	328.0 7	193.7 0	233.5 3	226.5 0	267.7 2	231.6 0	220.3 5	196.0 3	292.4 0	327.4 0	238.2 0	259.3 7	204.6 0	213.8 6
LD (mg/L)	0.06	0.04	0.05	0.03	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
LC (mg/L)	0.19	0.14	0.18	0.1	0.18	0.18	0.16	0.21	0.17	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Clave de campo	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
SEDTRSP-01 A	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.02	0.06	0.13	<LD	0.05
SEDTRSP-01 B	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.02	0.03	0.14	0.01	0.05
SEDTRSP-01 C	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.02	0.03	0.08	<LD	0.04
SEDTRSP-01 D	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.01	0.08	0.07	<LD	0.02
SEDTRSP-01 E	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
SEDTRSP-02 A	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.01	0.02	0.02	<LD	0.01
SEDTRSP-02 B	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
SEDTRSP-02 C	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.03	0.01	<LD	0.01

Elemento	Ag	As	Ba	Cd	Cr	Ni	Pb	Se	V	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
SEDTRSP-02 D	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.01	0.02	0.01	<LD	0.01
SEDTRSP-02 E	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.01	0.01	<LD	<LD	<LD
SEDTRSP-03 A	<LD	<LD	0.06	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.01	0.02	0.01	<LD	<LD
SEDTRSP-03 B	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.01	0.02	0.01	0.01	<LD
SEDTRSP-03 C	<LD	<LD	0.06	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.01	0.03	0.02	<LD	0.01
SEDTRSP-03 D	<LD	<LD	0.09	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.01	<LD
SEDTRSP-03 E	<LD	<LD	0.07	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.01	0.01	<LD	<LD
SEDTRSP-04 A	<LD	<LD	0.06	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.02	0.01	<LD	<LD
SEDTRSP-04 B	<LD	<LD	0.06	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.02	0.01	0.01	<LD
SEDTRSP-04 C	<LD	<LD	0.06	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.02	0.01	<LD	<LD
SEDTRSP-04 D	<LD	<LD	0.06	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.01	0.01	<LD	<LD
SEDTRSP-04 E	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.03	0.02	<LD	<LD

Pasivos Ambientales

Tabla 34. Concentración de elementos solubles en los pasivos ambientales.

Elemento	Ag	As	Ba	Cd	Cr	Ni	Pb	Se	Cu	Fe	Mn	Mo	V	Zn
λ (nm)	328.0 7	193.7 0	233.5 3	226.5 0	267.7 2	231.6 0	220.3 5	196.0 3	327.4 0	238.2 0	259.3 7	204.6 0	292.4 0	213.8 6
LD (mg/L)	0.06	0.04	0.05	0.03	0.05	0.05	0.05	0.06	0.030	0.003	0.003	0.003	0.050	0.003
LC (mg/L)	0.19	0.14	0.18	0.1	0.18	0.18	0.16	0.21	0.1	0.01	0.01	0.01	0.17	0.01
Clave de campo	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
PAS-01	<LD	<LD	<LD	0.04	<LD	0.06	<LD	<LD	28.81	0.07	4.71	0.02	<LD	8.36
PAS-02	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.09	<LD	<LD	16.77	0.2	9.32	0.01	<LD	8
PAS-03	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.06	<LD	<LD	5.42	0.05	6.93	0.01	<LD	3.46
PAS-04	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.04	0.01	<LD	0.01
PAS-05	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.06	<LD	<LD	17.6	0.02	4.39	<LD	<LD	5.55
PAS-06	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.47	<LD	2.47	0.01	<LD	1.12

Elemento	Ag	As	Ba	Cd	Cr	Ni	Pb	Se	Cu	Fe	Mn	Mo	V	Zn
PAS-07	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.07	<LD	<LD	2.39	0.02	6.85	0.01	<LD	2.58
PAS-07 DUP	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.07	<LD	<LD	2.64	0.02	6.92	0.02	<LD	2.68
PAS-08	<LD	<LD	<LD	0.04	<LD	0.13	<LD	<LD	6.82	0.16	13.08	0.01	<LD	5.47
PAS-09	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.52	0.11	0.45	<LD	<LD	0.23
PAS-09 DUP	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.56	0.14	0.48	0.01	<LD	0.27
PAS-10	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	3.36	0.01	1.03	0.01	<LD	0.94
PAS-11	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	7.58	0.02	4.36	0.01	<LD	3.14
PAS-12	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	4.5	0.08	4.65	0.01	<LD	3.13
PAS-13	<LD	<LD	<LD	0.05	<LD	0.16	<LD	<LD	7.42	0.33	15.66	0.01	<LD	9.17
PAS-14	<LD	<LD	<LD	0.07	<LD	0.07	<LD	<LD	85.8	0.26	4.77	0.01	<LD	10.32
PAS-15	<LD	<LD	<LD	0.06	<LD	0.19	<LD	<LD	25.17	1.55	16.34	0.01	<LD	12.69
PAS-16	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	2.79	0.01	0.89	<LD	<LD	0.73
PAS-17	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.69	<LD	1.44	0.01	<LD	0.43
PAS-18	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.06	<LD	<LD	4.41	0.05	5.26	0.01	<LD	2.78
PAS-19	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	4.02	0.04	2.03	0.02	<LD	1.76
PAS-20	<LD	<LD	<LD	0.11	<LD	0.38	<LD	<LD	86.6	3.67	37.04	0.01	<LD	23.42
PAS-21	<LD	<LD	<LD	0.47	<LD	0.54	<LD	<LD	287.1	1.02	43.8	0.01	<LD	43.92

Elemento	Ag	As	Ba	Cd	Cr	Ni	Pb	Se	Cu	Fe	Mn	Mo	Sb	V	Zn
λ (nm)	328.0 7	193.7 0	233.5 3	226.5 0	267.7 2	231.6 0	220.3 5	196.0 3	327.4 0	238.2 0	259.3 7	204.6 0	206.8 3	292.4 0	213.8 6
LD (mg/L)	0.06	0.04	0.05	0.03	0.05	0.05	0.05	0.06	0.003	0.030	0.003	0.076	0.076	0.050	0.003
LC (mg/L)	0.19	0.14	0.18	0.1	0.18	0.18	0.16	0.21	0.01	0.1	0.01	0.25	0.25	0.17	0.01
Clave de campo	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
PA1-01 (0-5)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	15.83	<LD	2.13	<LD	0.09	<LD	4.31
PA1-01 (25-50)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	22.1	0.15	1.44	<LD	<LD	<LD	3.29
PA1-01 (50-100)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	32.07	0.8	1.73	<LD	<LD	<LD	4.31
PA1-01 (100-150)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	102.7	0.15	2.93	<LD	<LD	<LD	4.25
PA1-01 (150-200)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	88.93	<LD	2.33	<LD	<LD	<LD	2.4

Elemento	Ag	As	Ba	Cd	Cr	Ni	Pb	Se	Cu	Fe	Mn	Mo	Sb	V	Zn
PA1-01 (150-200) Dup	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	79.71	<LD	2.28	<LD	<LD	<LD	2.31
PA1-01 (200-250)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	80.63	<LD	2.69	<LD	<LD	<LD	2.39
PA1-02 (0-25)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	4.27	3.82	2.06	<LD	<LD	<LD	2.13
PA1-02 (25-50)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	3.05	9.9	1.42	<LD	<LD	<LD	1.43
PA1-02 (50-100)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	2.46	0.71	1.33	<LD	<LD	<LD	0.98
PA1-02 (100-150)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	24.53	0.69	1.56	<LD	0.09	<LD	1.4
PA1-02 (150-200)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	32.08	0.15	1.62	<LD	<LD	<LD	1.5
PA1-02 (150-200) Dup	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	29.69	0.4	1.75	<LD	<LD	<LD	1.38
PA1-03 (0-25)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	2.34	<LD	0.27	<LD	<LD	<LD	0.25
PA1-03 (25-50)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	1.38	<LD	0.19	<LD	<LD	<LD	0.19
PA1-03 (50-100)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	2.31	0.86	0.46	<LD	<LD	<LD	0.46
PA1-03 (100-150)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	9.27	0.43	0.54	<LD	0.08	<LD	0.68
PA1-03 (100-150) Dup	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	12.32	0.3	0.67	<LD	0.08	<LD	0.85
PA1-03 (150-200)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	42.89	<LD	0.62	<LD	<LD	<LD	1.01
PA1-04 (0-25)	<LD	<LD	<LD	0.04	<LD	<LD	<LD	<LD	58.72	1.7	4.5	<LD	<LD	<LD	6.61
PA1-04 (0-25) Dup	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	53.95	3.88	3.77	<LD	<LD	<LD	5.81
PA1-04 (25-50)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	57.9	4.07	3.64	<LD	<LD	<LD	6.11
PA1-04 (50-100)	<LD	<LD	<LD	0.05	<LD	0.06	<LD	<LD	73.78	1.37	4.6	<LD	<LD	<LD	8.15
PA1-04 (100-150)	<LD	<LD	<LD	0.06	<LD	0.12	<LD	<LD	37.1	0.63	9.15	<LD	<LD	<LD	10.91
PA1-04 (150-200)	<LD	<LD	<LD	0.06	<LD	0.11	<LD	<LD	115.5	0.21	7.9	<LD	<LD	<LD	12.37
PA1-05 (0-25)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.13	<LD	<LD	12.22	0.07	4.8	<LD	<LD	<LD	9.09
PA1-05 (25-50)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	3.59	0.17	4.99	<LD	<LD	<LD	2.4
PA1-05 (50-100)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	3.72	0.04	4.81	<LD	0.08	<LD	2.09
PA1-05 (50-100) DUP	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	3.21	<LD	4.57	<LD	<LD	<LD	1.97
PA1-05 (100-150)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.09	<LD	<LD	41.55	1.6	9.48	<LD	<LD	<LD	5.31
PA1-05 (150-200)	<LD	<LD	<LD	0.04	<LD	0.11	<LD	<LD	50.3	1.56	5.3	<LD	<LD	<LD	7.05

Elemento	Ag	As	Ba	Cd	Cr	Ni	Pb	Se	Cu	Fe	Mn	Mo	V	Zn
λ(nm)	328.0 7	193.7 0	233.5 3	226.5 0	267.7 2	231.6 0	220.3 5	196.0 3	327.4 0	238.2 0	259.3 7	204.6 0	292.4 0	213.8 6
LD (mg/L)	0.06	0.04	0.05	0.03	0.05	0.05	0.05	0.06	0.030	0.003	0.003	0.003	0.050	0.003
LC (mg/L)	0.19	0.14	0.18	0.1	0.18	0.18	0.16	0.21	0.1	0.01	0.01	0.01	0.17	0.01
Clave de campo	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
PA2-01 (0-25)	<LD	<LD	<LD	0.06	<LD	0.09	<LD	<LD	5.97	<LD	19.7	<LD	<LD	6.24
PA2-01 (25-50)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	2.54	<LD	8.27	<LD	<LD	2.57
PA2-01 (50-100)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.07	<LD	<LD	3.12	<LD	8.4	<LD	<LD	4.66
PA2-01 (100-150)	<LD	<LD	<LD	0.06	<LD	0.26	<LD	<LD	11.31	8.51	24	<LD	<LD	9.9
PA2-01 (150-200)	<LD	<LD	<LD	0.05	<LD	0.21	<LD	<LD	9.83	21.14	10.6	<LD	<LD	8.19
PA2-01 (>200)	<LD	<LD	<LD	0.05	<LD	0.25	<LD	<LD	31.64	31.45	17.42	<LD	<LD	8.48
PA2-02 (0-25)	<LD	<LD	<LD	0.09	<LD	0.32	<LD	<LD	16.82	45.02	16.8	<LD	<LD	13.76
PA2-02 (25-50)	<LD	<LD	<LD	0.14	0.07	0.54	<LD	<LD	27.28	132.4	41.1	<LD	<LD	22.29
PA2-02 (50-100)	<LD	<LD	<LD	0.32	0.2	1.32	<LD	0.08	72.7	527	108.2 4	0.01	<LD	57.7
PA2-02 (100-150)	<LD	<LD	<LD	0.22	0.12	0.9	<LD	<LD	47.15	344.5	83.6	<LD	<LD	35.91
PA2-02 (150-200)	<LD	0.05	<LD	0.25	0.13	0.97	<LD	<LD	56.4	460	89.5	0.01	<LD	41.12
PA2-03 (0-25)	<LD	<LD	<LD	0.05	<LD	0.15	<LD	<LD	5.09	0.45	6.1	<LD	<LD	6.51
PA2-03 (25-50)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.11	<LD	<LD	2.33	0.09	17.81	<LD	<LD	4.37
PA2-03 (50-100)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.15	<LD	<LD	5.92	1.82	11.7	<LD	<LD	4.39
PA2-03 (100-150)	<LD	<LD	<LD	0.04	<LD	0.19	<LD	<LD	6.54	7.08	13.79	<LD	<LD	6.62
PA2-03 (150-180)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.16	<LD	<LD	6.17	4.97	12.56	0.01	<LD	5.91
PA2-04 (0-25)	<LD	<LD	<LD	0.05	<LD	<LD	<LD	<LD	1.81	<LD	11.1	<LD	<LD	5.02
PA2-04 (25-50)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.09	0.03	5.61	<LD	<LD	3.71

Elemento	Ag	As	Ba	Cd	Cr	Ni	Pb	Se	Cu	Fe	Mn	Mo	V	Zn
PA2-04 (50-100)	<LD	<LD	<LD	0.04	<LD	0.08	<LD	<LD	2.14	<LD	18.06	<LD	<LD	6.38
PA2-04 (100-150)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.44	0.15	2.4	<LD	<LD	0.61
PA2-04 (150-200)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	11.06	0.25	2.09	<LD	<LD	0.61
PA2-05 (0-25)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.07	0.59	0.85	<LD	<LD	0.77
PA2-05 (25-50)	<LD	<LD	0.07	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.02	<LD	<LD	0.01	<LD	0.02
PA2-05 (50-100)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.01	<LD	<LD	<LD	<LD	0.09
PA2-05 (100-150)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.44	0.5	5.82	<LD	<LD	1.78
PA2-05 (150-200)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.14	<LD	0.39	<LD	<LD	0.11

Anexo D: Difracción de Rayos X.

Pasivos Ambientales

PAS-06

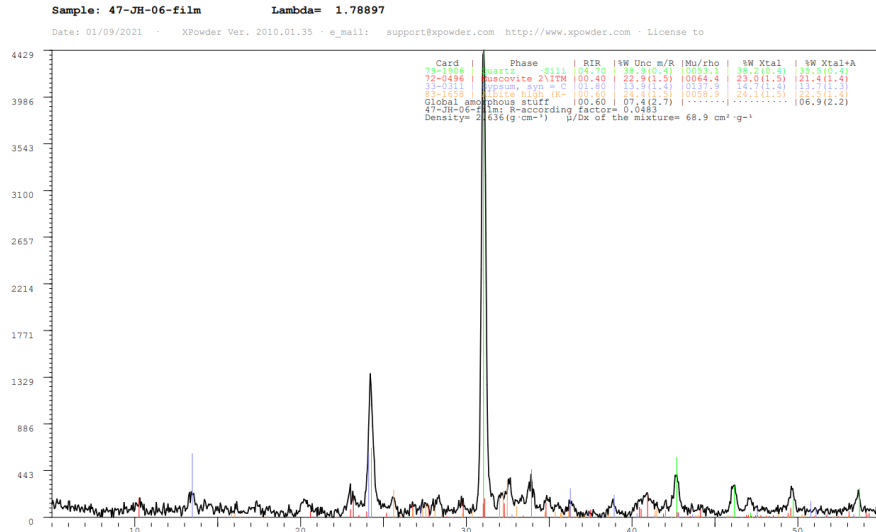


Tabla 35. Minerales identificados en la muestra PAS-06

Clave de muestra	Ficha PDF2	Fases minerales identificadas	Fórmula química
PAS-06	79-1906	Cuarzo	SiO ₂
	72-0496	Moscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(F,OH) ₂
	33-0311	Yeso	CaSO ₄ 2H ₂ O
	83-1658	Albita	NaAlSi ₃ O ₈

PAS-07

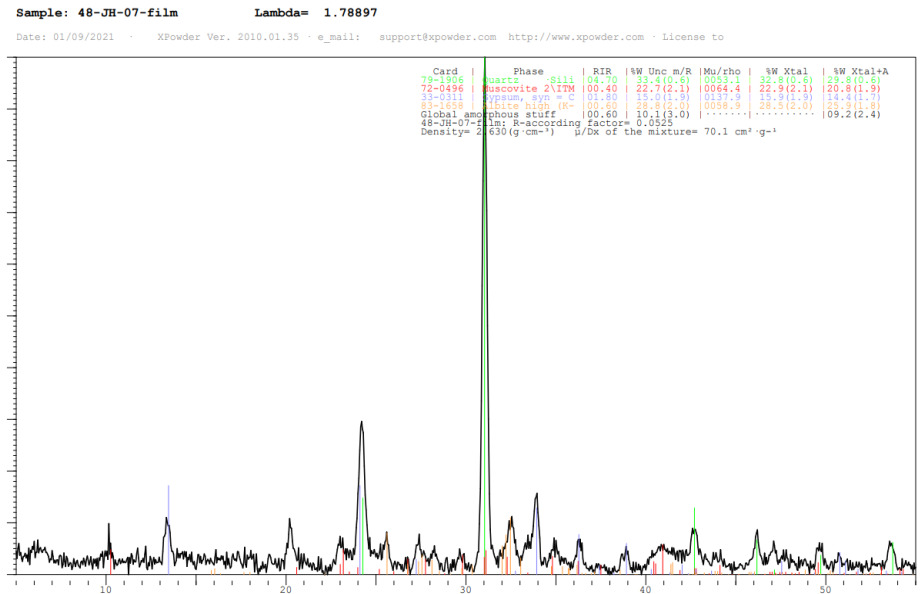


Tabla 36. Minerales identificados en la muestra PAS-07

Clave de muestra	Ficha PDF2	Fases minerales identificadas	Fórmula química
PAS-07	79-1906	Cuarzo	SiO ₂
	72-0496	Moscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(F,OH) ₂
	33-0311	Yeso	CaSO ₄ 2H ₂ O
	83-1658	Albita	NaAlSi ₃ O ₈

➤ PA1-01 (0-25)

Sample: 39-ZJH-01_0-5-film Lambda= 1.78897

Date: 31/08/2021 X Powder Ver. 2010.01.35 e_mail: support@xpowder.com http://www.xpowder.com License to

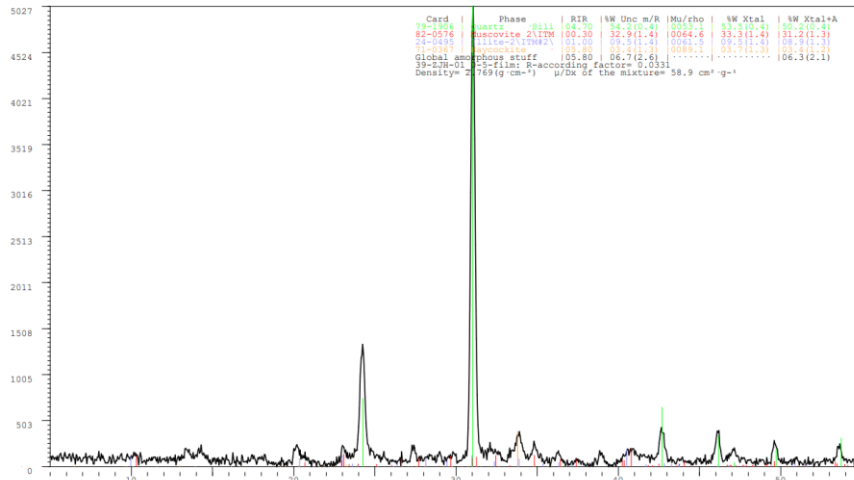


Tabla 37. Minerales identificados en la muestra PA1-01(0-25)

Clave de muestra	Ficha PDF2	Fases minerales identificadas	Fórmula química
PA1-01 (0-25)	79-1906	Cuarzo	SiO ₂
	82-0576	Moscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(F,OH) ₂
	24-0495	Illita	(K,H ₃ O)(Al,Mg,Fe) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ [(OH) ₂ ,(H ₂ O)]
	71-0367	Haycockita	Cu ₄ Fe ₅ S ₈

➤ PA1-01 (100-150)

Sample: 40-ZJH-01_100-150-film Lambda= 1.78897

Date: 31/08/2021 X Powder Ver. 2010.01.35 e_mail: support@xpowder.com http://www.xpowder.com License to

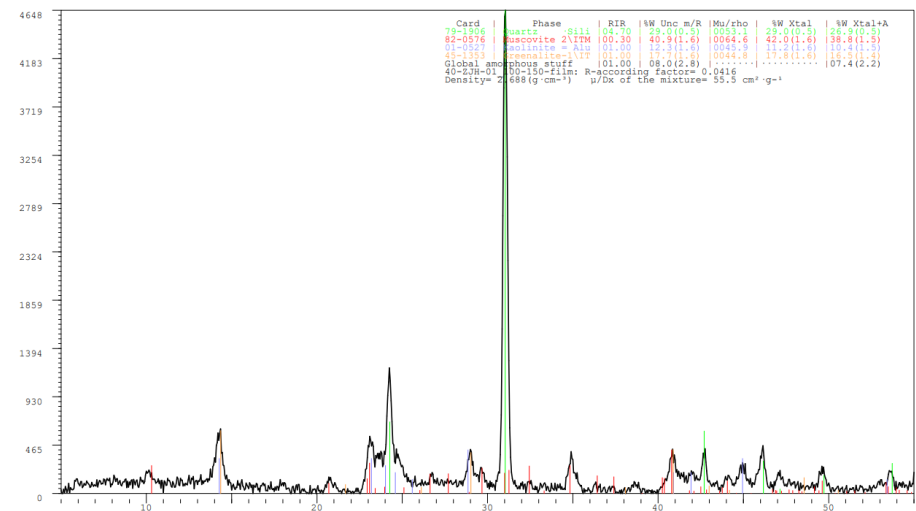


Tabla 38. Minerales identificados en la muestra PA1-01(100-150)

Clave de muestra	Ficha PDF2	Fases minerales identificadas	Fórmula química
PA1-01 (100-150)	79-1906	Cuarzo	SiO ₂
	82-0576	Moscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(F,OH) ₂
	01-0527	Caolinita	Al ₂ (OH) ₄ Si ₂ O ₅
	45-1353	Greenalita	(Fe ²⁺ ,Fe ³⁺) ₂ 3Si ₂ O ₅ (OH) ₄

➤ PA1-01 (150-200)

Sample: 41-ZJH-01-150_200-film

Lambda= 1.78897

Date: 31/08/2021 X Powder Ver. 2010.01.35 e_mail: support@xpowder.com http://www.xpowder.com License to

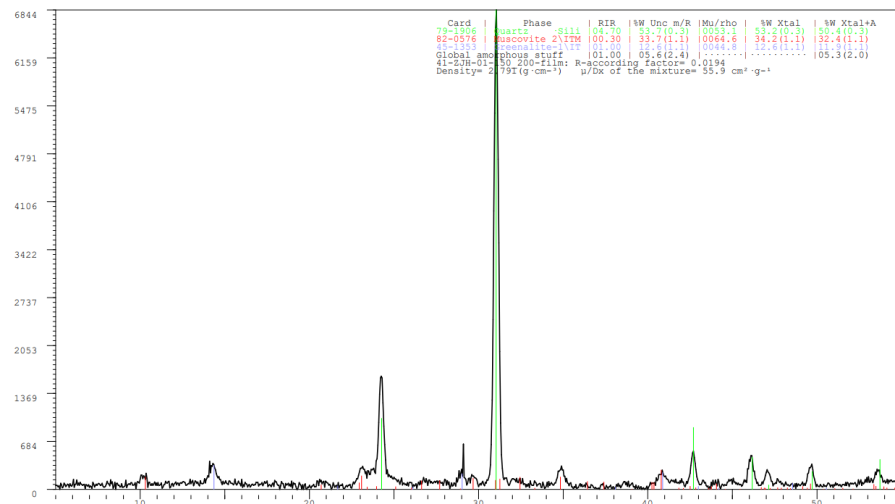


Tabla 39. Minerales identificados en la muestra PA1-01(50-200)

Clave de muestra	Ficha PDF2	Fases minerales identificadas	Fórmula química
PA1-01 (150-200)	79-1906	Cuarzo	SiO ₂
	82-0576	Moscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(F,OH) ₂
	45-1353	Greenalita	(Fe ²⁺ ,Fe ³⁺) ₂ 3Si ₂ O ₅ (OH) ₄

➤ PA1-05 (0-25)

Sample: 42-ZJH-05-0_25-film

Lambda= 1.78897

Date: 31/08/2021 X Powder Ver. 2010.01.35 e_mail: support@xpowder.com http://www.xpowder.com License to

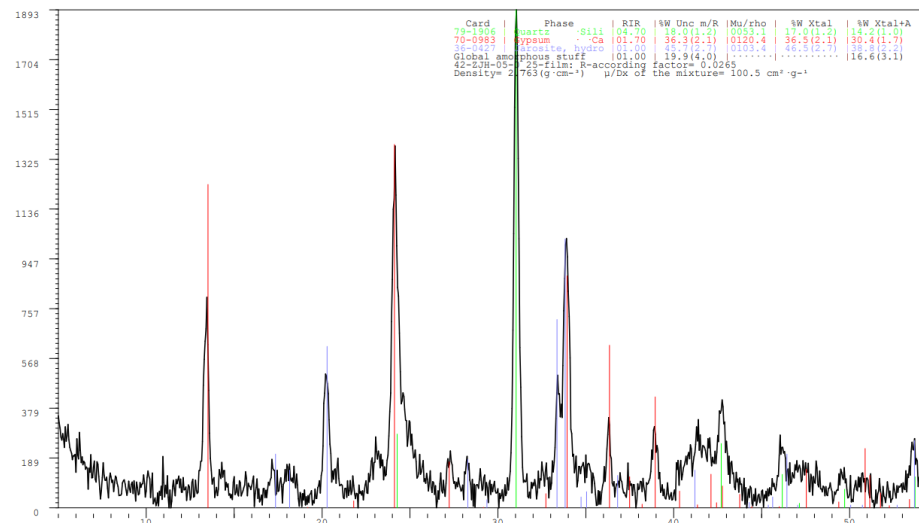


Tabla 40. Minerales identificados en la muestra PA1-05(0-25)

Clave de muestra	Ficha PDF2	Fases minerales identificadas	Fórmula química
PA1-05 (0-25)	79-1906	Cuarzo	SiO ₂
	70-0983	Yeso	CaSO ₄ 2H ₂ O
	36-0427	Jarosita	KFe ³⁺ ₃ (OH) ₆ (SO ₄) ₂

➤ PA1-05 (50-100)

Sample: 43-ZJH-05-50_100-film Lambda= 1.78897

Date: 31/08/2021 X Powder Ver. 2010.01.35 e_mail: support@xpowder.com http://www.xpowder.com License to

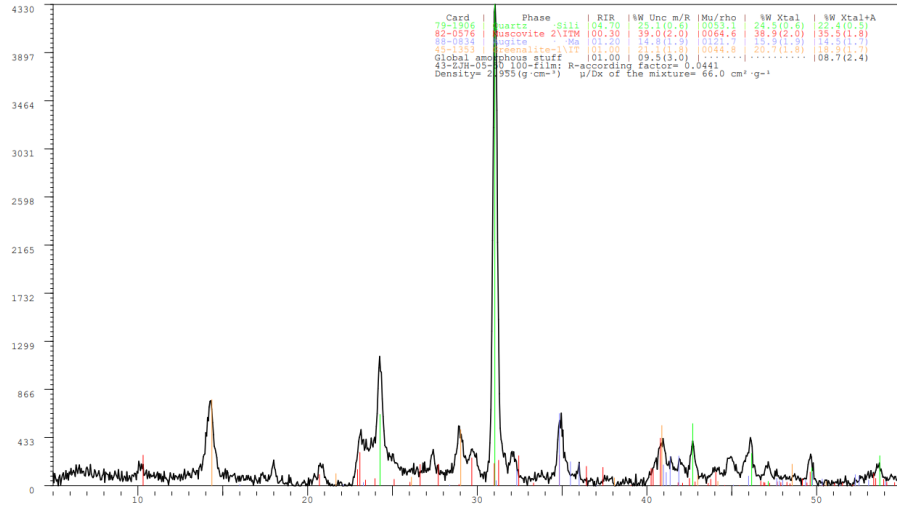


Tabla 41. Minerales identificados en la muestra PA1-05(50-100)

Clave de muestra	Ficha PDF2	Fases minerales identificadas	Fórmula química
PA1-05 (50-100)	79-1906	Cuarzo	SiO ₂
	82-0576	Moscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(F,OH) ₂
	88-0834	Augita	(Ca,Na)(Mg,Fe,Al,Ti)(Si,Al) ₂ O ₆
	45-1353	Greenalita	(Fe ²⁺ ,Fe ³⁺) ₂ 3Si ₂ O ₅ (OH) ₄

➤ PA2-02 (0-25)

Sample: 44-ZJH1-02_0_50-film Lambda= 1.78897

Date: 31/08/2021 X Powder Ver. 2010.01.35 e_mail: support@xpowder.com http://www.xpowder.com License to

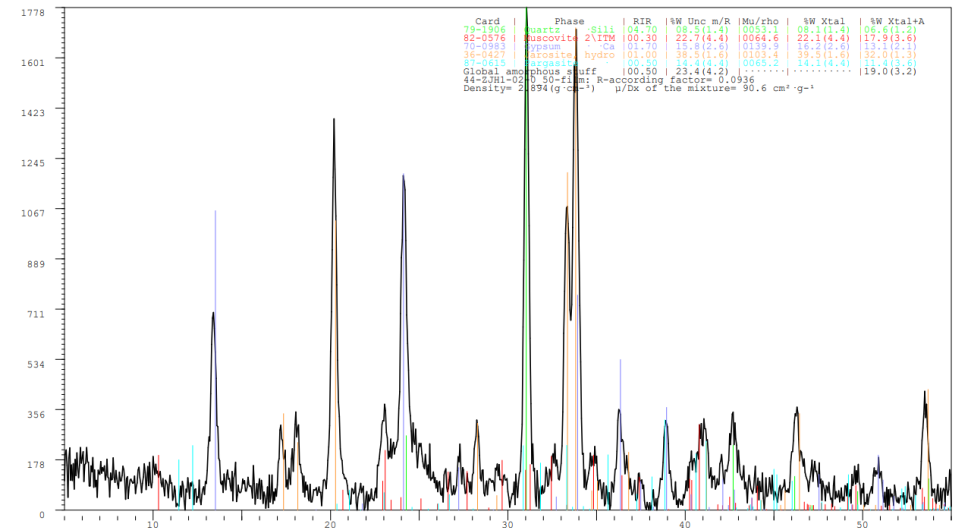


Tabla 42. Minerales identificados en la muestra PA2-02(0-25)

Clave de muestra	Ficha PDF2	Fases minerales identificadas	Fórmula química
PA2-02 (0-25)	79-1906	Cuarzo	SiO ₂
	82-0576	Moscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(F,OH) ₂
	70-0983	Yeso	CaSO ₄ 2H ₂ O
	36-0427	Jarosita	KFe ³⁺ ₃ (OH) ₆ (SO ₄) ₂
	87-0615	Pargasita	NaCa ₂ (Mg ₄ Al)(Si ₆ Al ₂)O ₂₂ (OH) ₂

➤ PA2-02 (50-100)

Sample: 45-ZJH1-02-80_100-film Lambda= 1.78897

Date: 31/08/2021 XPowder Ver. 2010.01.35 e_mail: support@xpowder.com http://www.xpowder.com License to

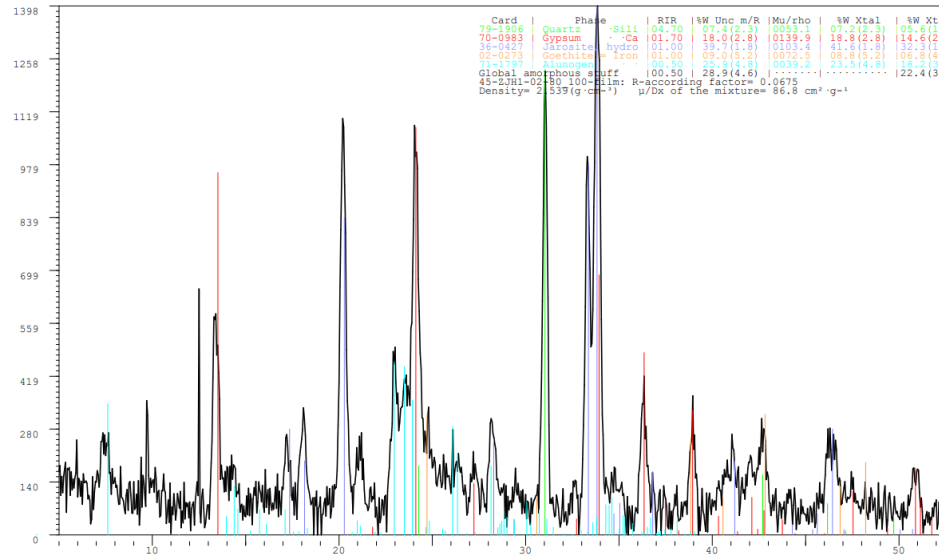


Tabla 43. Minerales identificados en la muestra PA2-02(50-100)

Clave de muestra	Ficha PDF2	Fases minerales identificadas	Fórmula química
PA2-02 (0-25)	79-1906	Cuarzo	SiO ₂
	70-0983	Yeso	CaSO ₄ 2H ₂ O
	36-0427	Jarosita	KFe ³⁺ ₃ (OH) ₆ (SO ₄) ₂
	02-0273	Goethita	Fe ³⁺ O(OH)
	71-1797	Alunógeno	Al ₂ (SO ₄) ₃ (H ₂ O) ₁₂ 5H ₂ O

➤ PA2-02 (150-200)

Sample: 46-ZJH1-02-150_200-film Lambda= 1.78897

Date: 31/08/2021 XPowder Ver. 2010.01.35 e_mail: support@xpowder.com http://www.xpowder.com License to

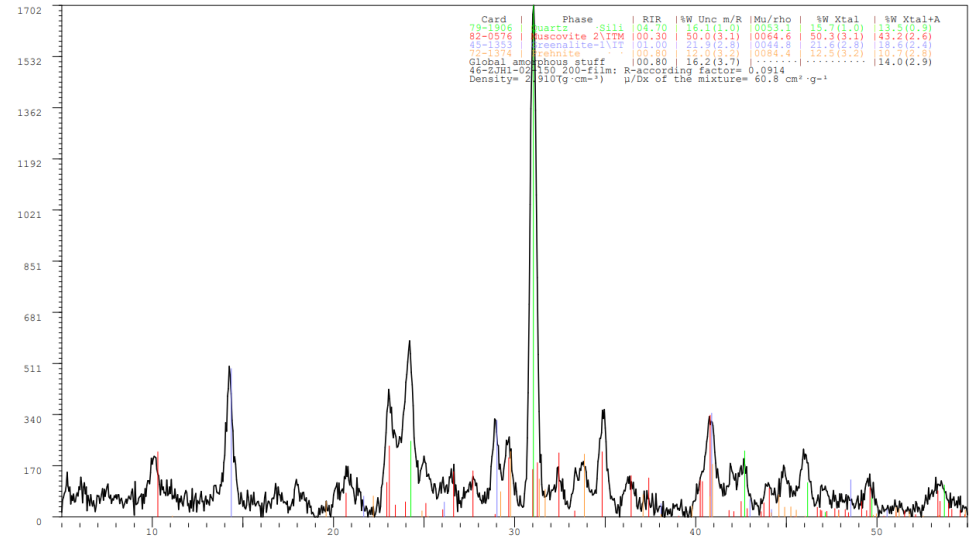


Tabla 44. Minerales identificados en la muestra PA2-02(150-200)

Clave de muestra	Ficha PDF2	Fases minerales identificadas	Fórmula química
PA2-02 (150-200)	79-1906	Cuarzo	SiO ₂
	82-0576	Moscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(F,OH) ₂
	45-1353	Greenalita	(Fe ²⁺ , Fe ³⁺) ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
	72-1374	Prehnita	Ca ₂ Al(AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂

Sedimentos

➤ ZSED-01 (0-25)

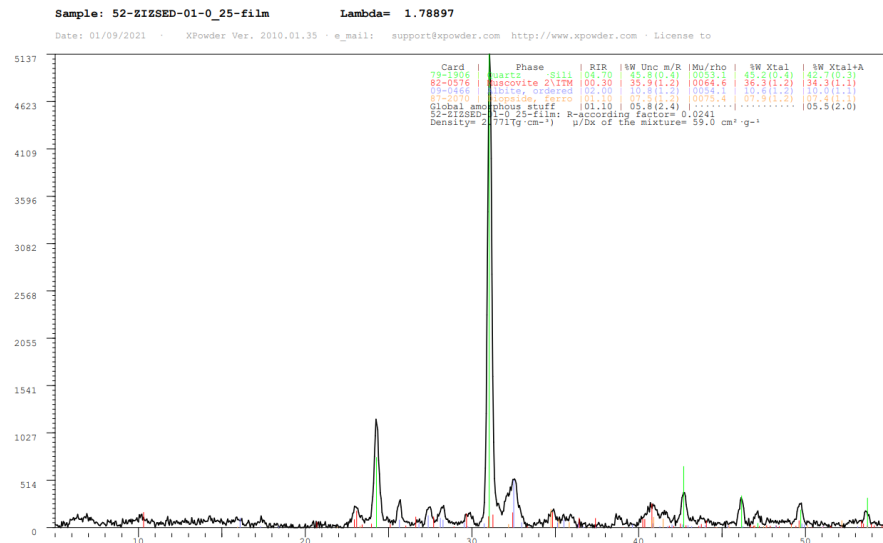


Tabla 45. Minerales identificados en la muestra ZSED-01(0-25)

Clave de muestra	Ficha PDF2	Fases minerales identificadas	Fórmula química
ZSED-01 (0-25)	79-1906	Cuarzo	SiO ₂
	82-0576	Moscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(F,OH) ₂
	09-0466	Albita	NaAlSi ₃ O ₈
	87-2070	Diópsido	MgCaSi ₂ O ₆

➤ ZSED-01 (100-150)

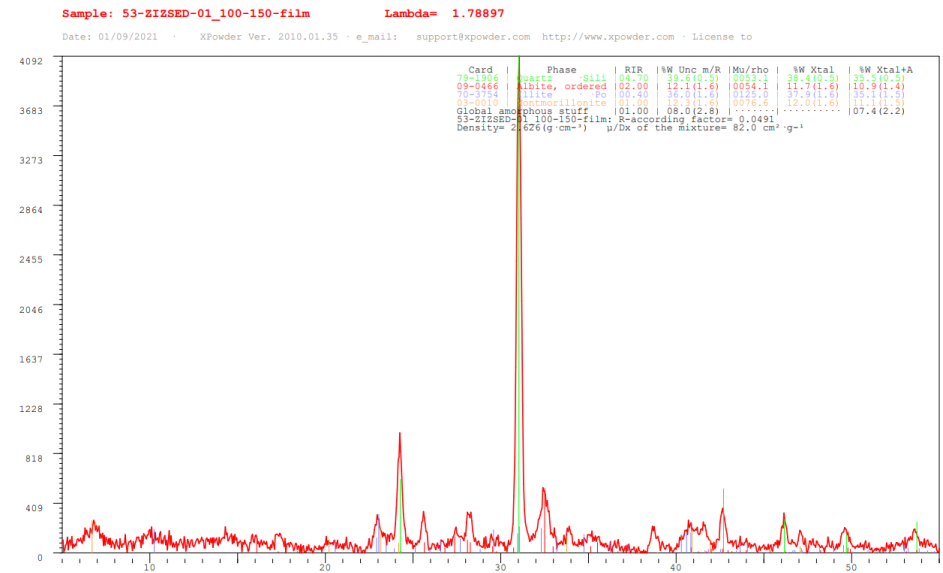


Tabla 46. Minerales identificados en la muestra ZSED-01(100-150)

Clave de muestra	Ficha PDF2	Fases minerales identificadas	Fórmula química
ZSED-01 (100-150)	79-1906	Cuarzo	SiO ₂
	09-0466	Albita	NaAlSi ₃ O ₈
	70-3754	Illita	(K,H ₃ O)(Al,Mg,Fe) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ [(OH) ₂ ,(H ₂ O)]
	03-0010	Montmorillonita	(Na,Ca) _{0.33} (Al,Mg) ₂ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₂ nH ₂ O

➤ ZSED-02 (0-25)

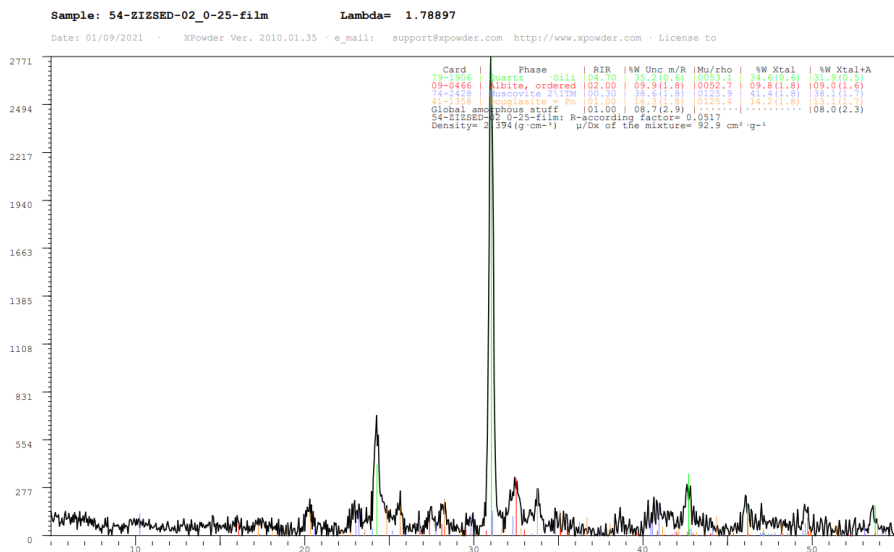


Tabla 47. Minerales identificados en la muestra ZSED-02(0-25)

Clave de muestra	Ficha PDF2	Fases minerales identificadas	Fórmula química
ZSED-02 (0-25)	79-1906	Cuarzo	SiO ₂
	74-2428	Moscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(F,OH) ₂
	09-0466	Albita	NaAlSi ₃ O ₈
	41-1358	Douglasita	K ₂ [Fe ²⁺ Cl ₄ (OH ₂) ₂]

➤ ZSED-02 (100-150)

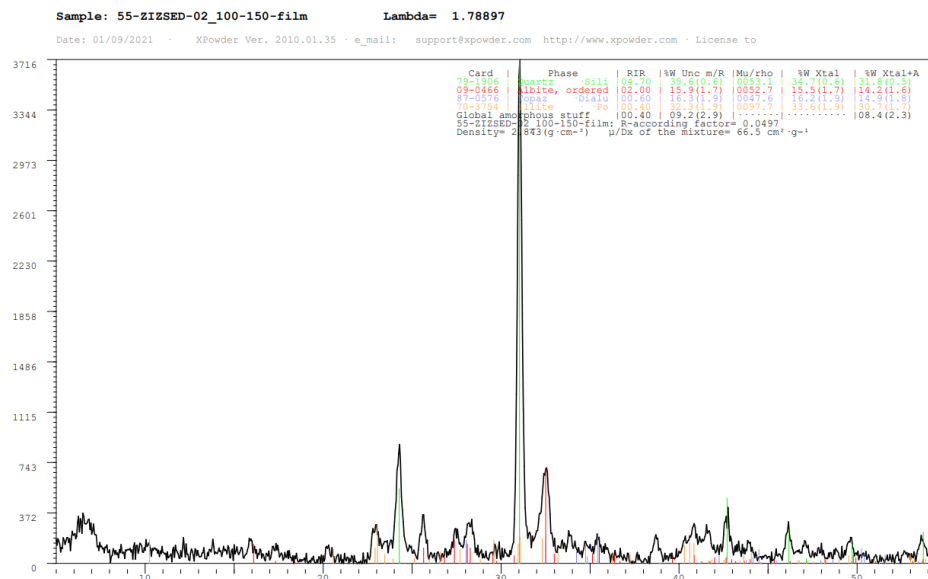


Tabla 48. Minerales identificados en la muestra ZSED-02(100-150)

Clave de muestra	Ficha PDF2	Fases minerales identificadas	Fórmula química
ZSED-02 (100-150)	79-1906	Cuarzo	SiO ₂
	09-0466	Albita	NaAlSi ₃ O ₈
	87-0576	Topacio	Al ₂ SiO ₄ (F,OH) ₂
	70-3754	Illita	(K,H ₃ O)(Al,Mg,Fe) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ [(OH) ₂ ,(H ₂ O)]

➤ ZSED-05 (0-25)

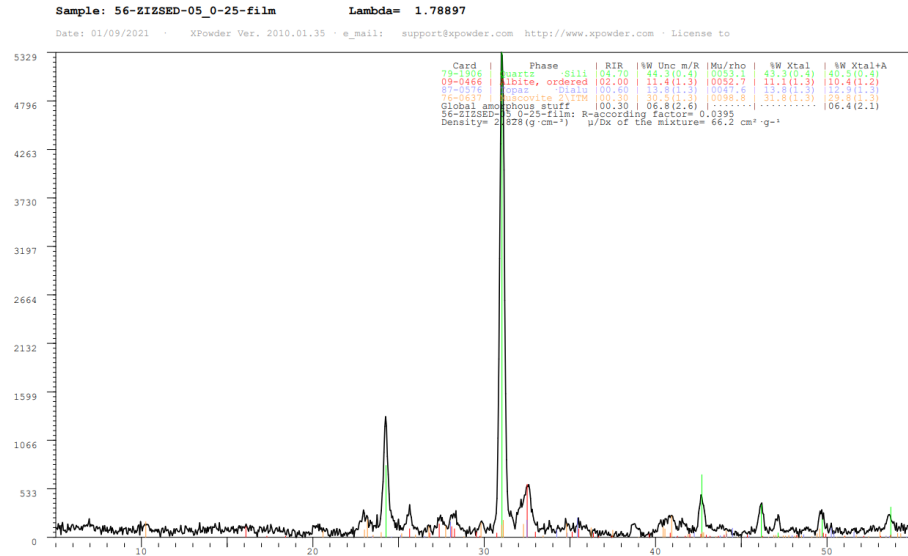


Tabla 49. Minerales identificados en la muestra ZSED-05(0-25)

Clave de muestra	Ficha PDF2	Fases minerales identificadas	Fórmula química
ZSED-05 (0-25)	79-1906	Cuarzo	SiO ₂
	09-0466	Albita	NaAlSi ₃ O ₈
	87-0576	Topacio	Al ₂ SiO ₄ (F,OH) ₂
	76-0637	Moscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(F,OH) ₂

➤ ZSED-05 (75-100)

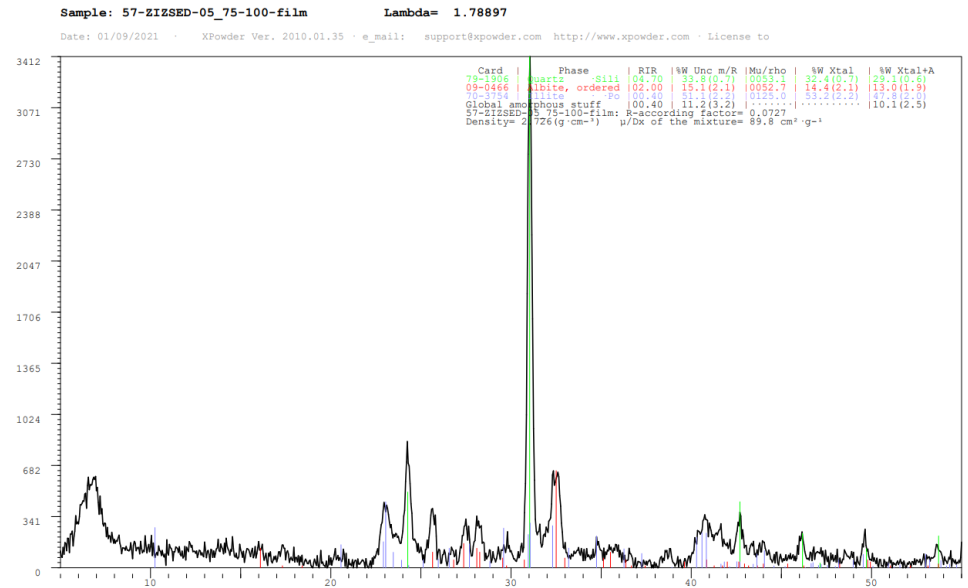


Tabla 50. Minerales identificados en la muestra ZSED-05(75-100)

Clave de muestra	Ficha PDF2	Fases minerales identificadas	Fórmula química
ZSED-05 (75-100)	79-1906	Cuarzo	SiO ₂
	09-0466	Albita	NaAlSi ₃ O ₈
	70-3754	Illita	(K,H ₃ O)(Al,Mg,Fe) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ [(OH) ₂ ,(H ₂ O)]

➤ ZSED-07 (0-25)

Sample: 58-ZIZED-07_0-25-film Lambda= 1.78897

Date: 01/09/2021 XPowder Ver. 2010.01.35 e_mail: support@xpowder.com http://www.xpowder.com License to

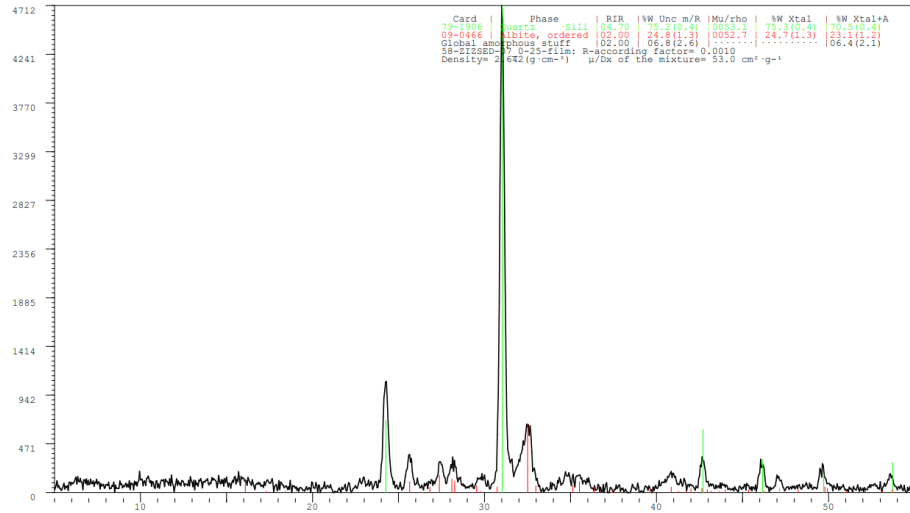


Tabla 51. Minerales identificados en la muestra ZSED-07(0-25)

Clave de muestra	Ficha PDF2	Fases minerales identificadas	Fórmula química
ZSED-07 (0-25)	79-1906	Cuarzo	SiO ₂
	09-0466	Albita	NaAlSi ₃ O ₈

➤ ZSED-07 (150-200)

Sample: 59-ZIZED-07_150-200-film Lambda= 1.78897

Date: 01/09/2021 XPowder Ver. 2010.01.35 e_mail: support@xpowder.com http://www.xpowder.com License to \inXitu Inc:Inner Use

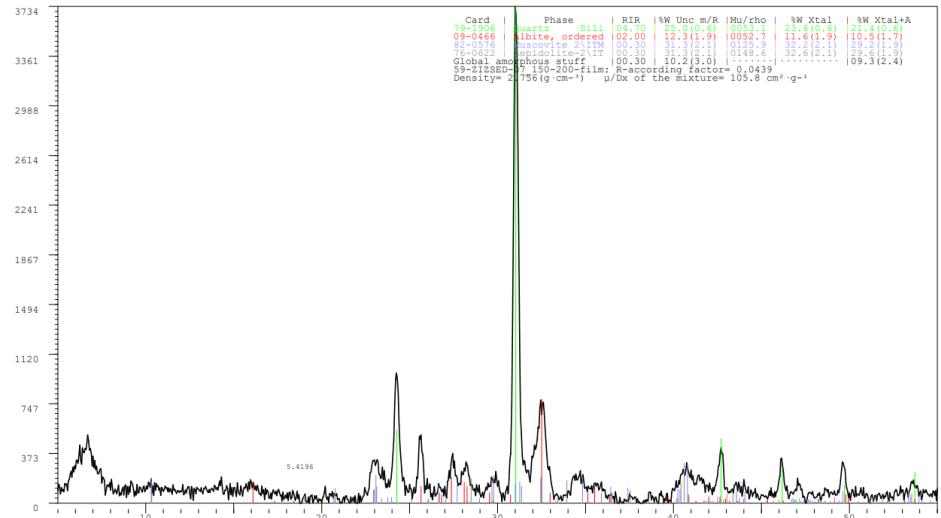


Tabla 52. Minerales identificados en la muestra ZSED-07(150-200)

Clave de muestra	Ficha PDF2	Fases minerales identificadas	Fórmula química
ZSED-07 (150-200)	79-1906	Cuarzo	SiO ₂
	82-0576	Moscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(F,OH) ₂
	09-0466	Albita	NaAlSi ₃ O ₈
	76-0622	Lepidolita	K(Li,Al) ₃ (Al,Si,Rb) ₄ O ₁₀ (F,OH) ₂

➤ ZSED-09 (0-25)

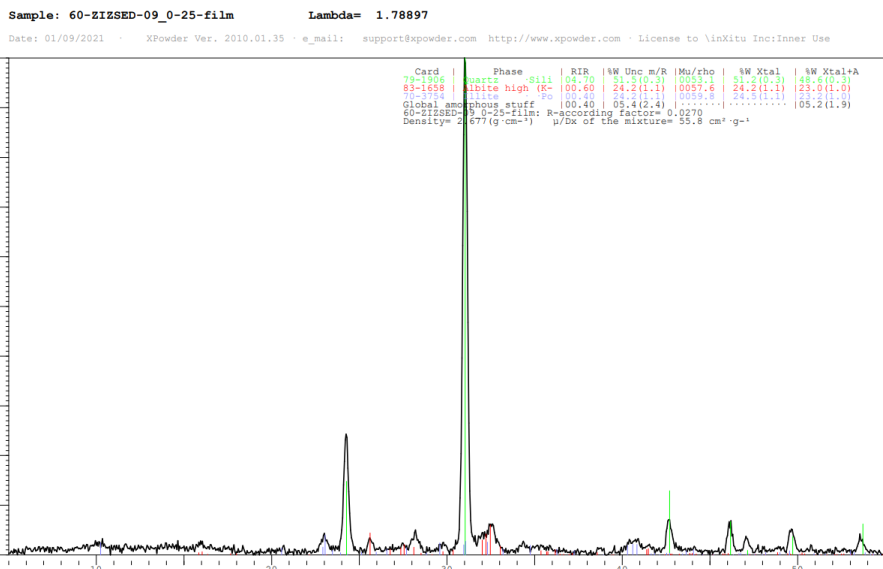


Tabla 53. Minerales identificados en la muestra ZSED-09(0-25)

Clave de muestra	Ficha PDF2	Fases minerales identificadas	Fórmula química
ZSED-09 (0-25)	79-1906	Cuarzo	SiO ₂
	83-1658	Albita	NaAlSi ₃ O ₈
	70-3754	Illita	(K,H ₃ O)(Al,Mg,Fe) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ [(OH) ₂ ,(H ₂ O)]

➤ ZSED-09 (100-130)

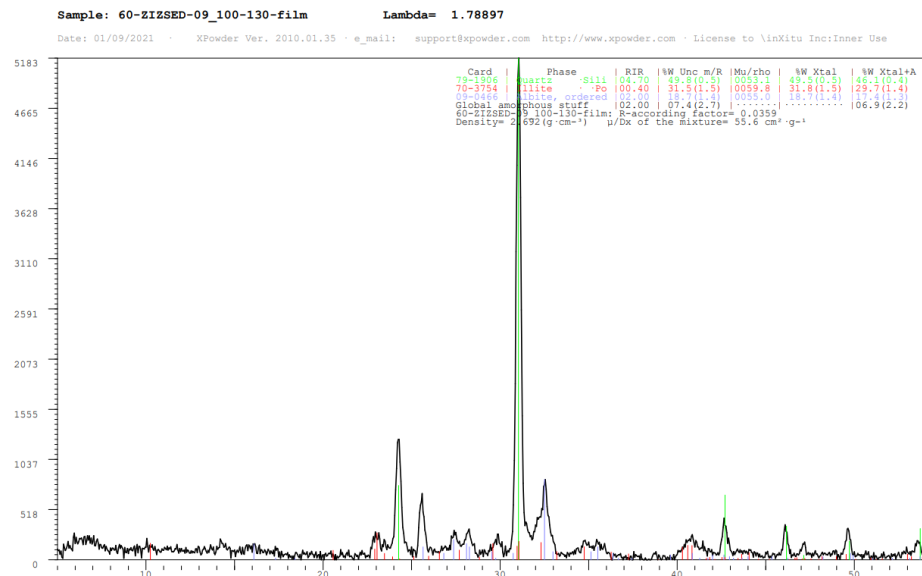


Tabla 54. Minerales identificados en la muestra ZSED-09(100-130)

Clave de muestra	Ficha PDF2	Fases minerales identificadas	Fórmula química
ZSED-09 (100-130)	79-1906	Cuarzo	SiO ₂
	09-0466	Albita	NaAlSi ₃ O ₈
	70-3754	Illita	(K,H ₃ O)(Al,Mg,Fe) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ [(OH) ₂ ,(H ₂ O)]

SEDTB-01 D

Sample: 62-ZISEDTB-01D-film Lambda= 1.78897

Date: 01/09/2021 XPowder Ver. 2010.01.35 e_mail: support@xpowder.com http://www.xpowder.com License to \inXitu Inc:Inner Use

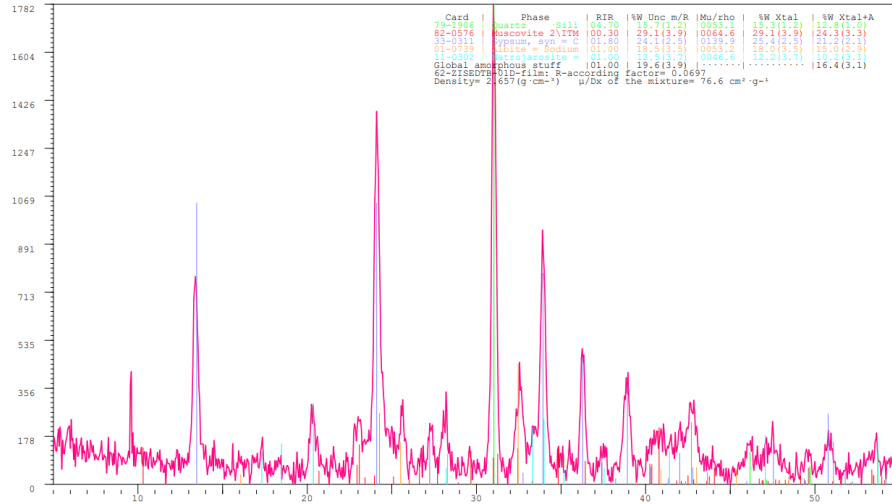


Tabla 55. Minerales identificados en la muestra SEDTB-01D

Clave de muestra	Ficha PDF2	Fases minerales identificadas	Fórmula química
20-SONCHN ZISEDTB-01 D	79-1906	Cuarzo	SiO ₂
	82-0576	Moscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(F,OH) ₂
	33-0311	Yeso	CaSO ₄ 2H ₂ O
	01-0739	Albita	NaAlSi ₃ O ₈
	11-0302	Natrojarosita	NaFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆

SEDTB-2.5 B

Sample: 63-ZISEDTB-2_5B-film Lambda= 1.78897

Date: 01/09/2021 XPowder Ver. 2010.01.35 e_mail: support@xpowder.com http://www.xpowder.com License to \inXitu Inc:Inner Use

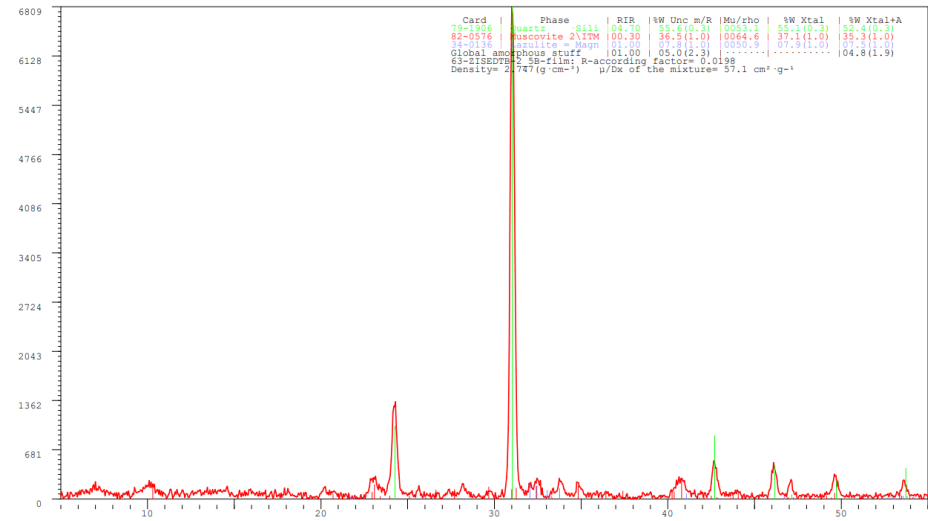


Tabla 56. Minerales identificados en la muestra SEDTB-2.5B

Clave de muestra	Ficha PDF2	Fases minerales identificadas	Fórmula química
SEDTB-2.5 B	79-1906	Cuarzo	SiO ₂
	82-0576	Moscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(F,OH) ₂
	34-0136	Lazulita	MgAl ₂ (PO ₄) ₂ (OH) ₂

➤ SEDTB-04 B

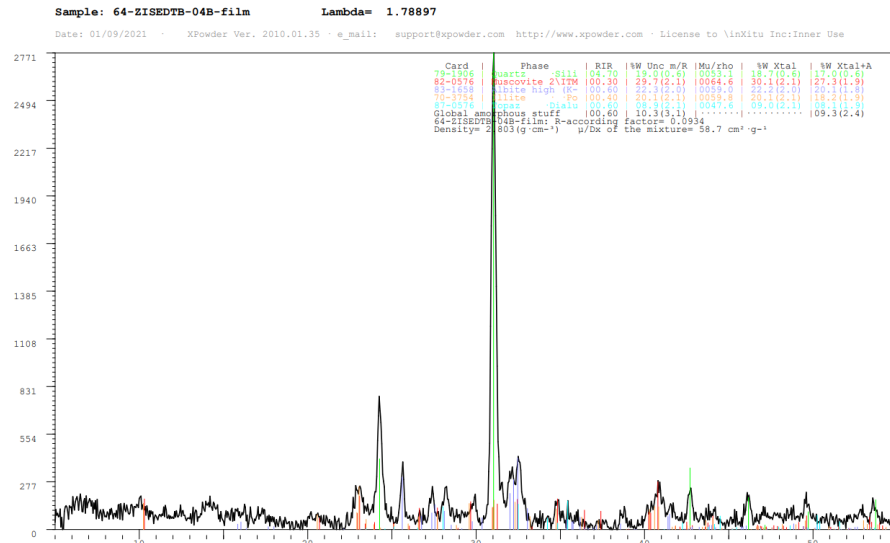


Tabla 57. Minerales identificados en la muestra SEDTB-04B

Clave de muestra	Ficha PDF2	Fases minerales identificadas	Fórmula química
20-SONCHN ZISEDTB-04 B	79-1906	Cuarzo	SiO ₂
	82-0576	Moscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(F,OH) ₂
	83-1658	Albita	NaAlSi ₃ O ₈
	70-3754	Illita	(K,H ₃ O)(Al,Mg,Fe) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ [(OH) ₂ ,(H ₂ O)]
	87-0576	Topacio	Al ₂ SiO ₄ (F,OH) ₂

➤ SEDTB-07 D

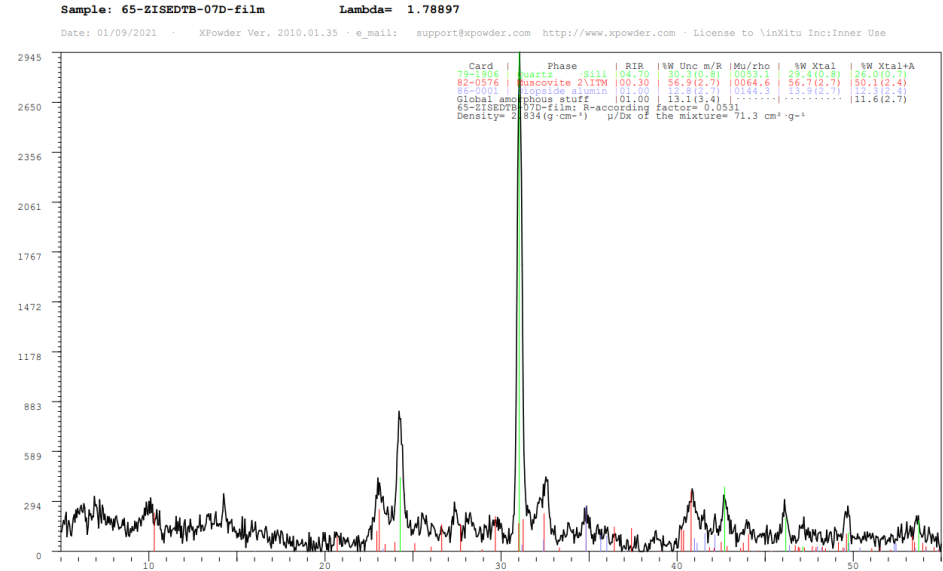


Tabla 58. Minerales identificados en la muestra SEDTB-07D

Clave de muestra	Ficha PDF2	Fases minerales identificadas	Fórmula química
SEDTB-07 D	79-1906	Cuarzo	SiO ₂
	82-0576	Moscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(F,OH) ₂
	86-0001	Diópsido	MgCaSi ₂ O ₆

➤ SEDTB-10 C

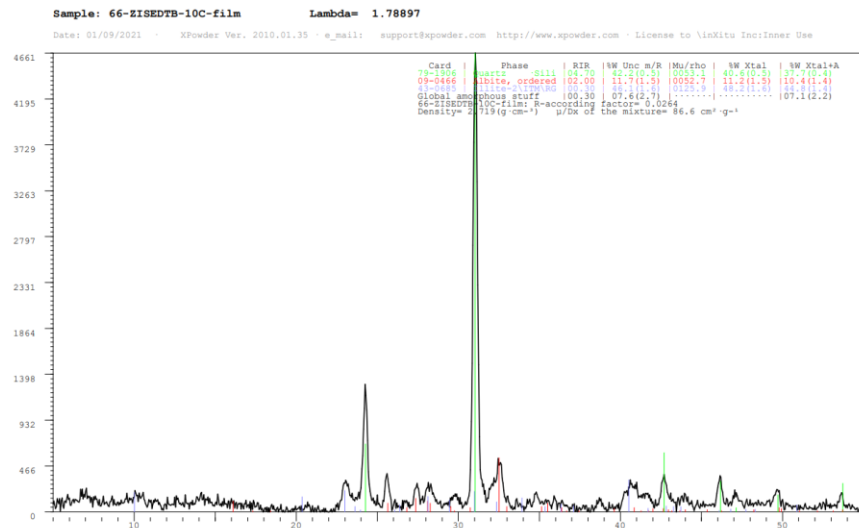


Tabla 59. Minerales identificados en la muestra SEDTB-10C

Clave de muestra	Ficha PDF2	Fases minerales identificadas	Fórmula química
SEDTB-10 C	79-1906	Cuarzo	SiO ₂
	09-0466	Albita	NaAlSi ₃ O ₈
	43-0685	Illita	(K,H ₃ O)(Al,Mg,Fe) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ [(OH) ₂ ,(H ₂ O)]

➤ SEDTB-12 A

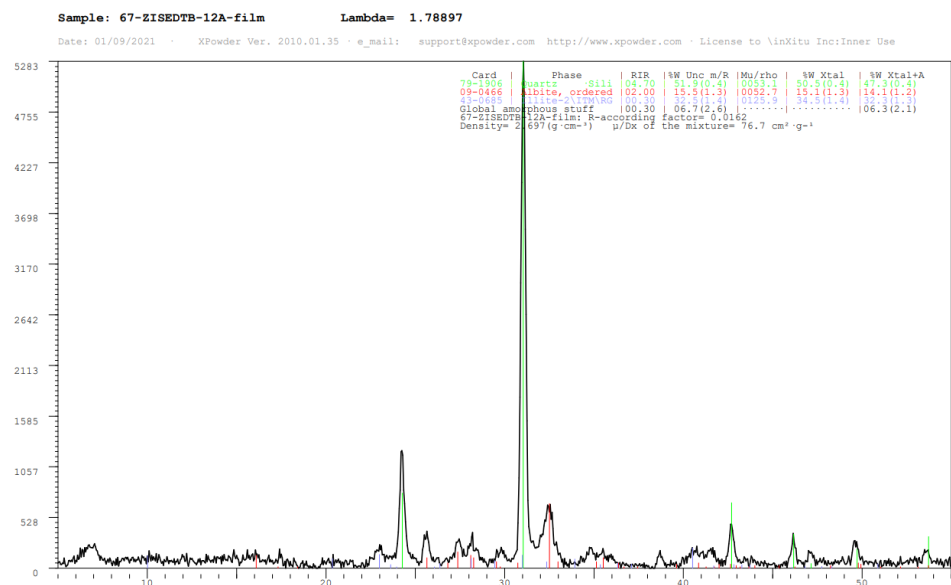


Tabla 60. Minerales identificados en la muestra SEDTB-12A

Clave de muestra	Ficha PDF2	Fases minerales identificadas	Fórmula química
SEDTB-12 A	79-1906	Cuarzo	SiO ₂
	09-0466	Albita	NaAlSi ₃ O ₈
	43-0685	Illita	(K,H ₃ O)(Al,Mg,Fe) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ [(OH) ₂ ,(H ₂ O)]

➤ SEDTB-14 D

Sample: 68-ZISEDTB-14D-film Lambda= 1.78897

Date: 01/09/2021 X Powder Ver. 2010.01.35 e_mail: support@xpowder.com http://www.xpowder.com License to \inXitu Inc:Inner Use

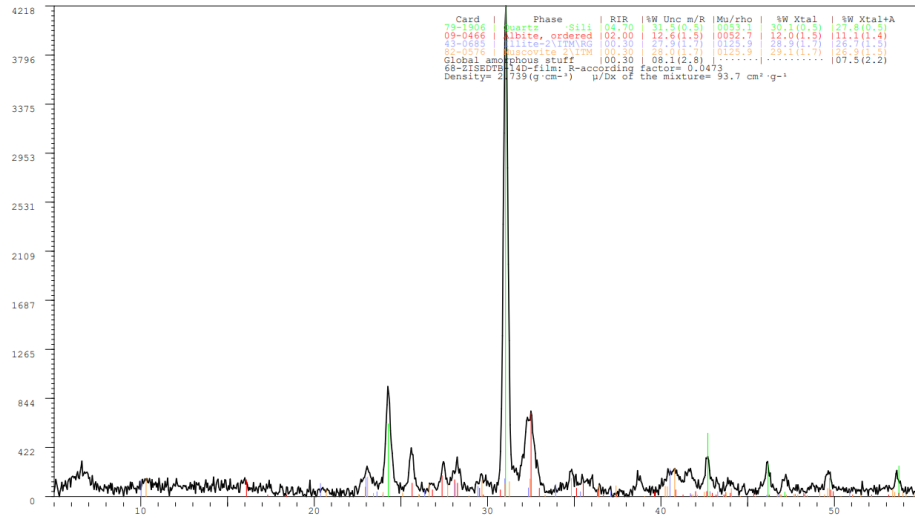


Tabla 61. Minerales identificados en la muestra SEDTB-14D

Clave de muestra	Ficha PDF2	Fases minerales identificadas	Fórmula química
SEDTB-14 D	79-1906	Cuarzo	SiO ₂
	09-0466	Albita	NaAlSi ₃ O ₈
	43-0685	Illita	(K,H ₃ O)(Al,Mg,Fe) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ [(OH) ₂ ,(H ₂ O)]
	82-0576	Moscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(F,OH) ₂

➤ SEDTRSP-01 C

Sample: 69-ZISEDTRSP-01C-film Lambda= 1.78897

Date: 01/09/2021 X Powder Ver. 2010.01.35 e_mail: support@xpowder.com http://www.xpowder.com License to \inXitu Inc:Inner Use

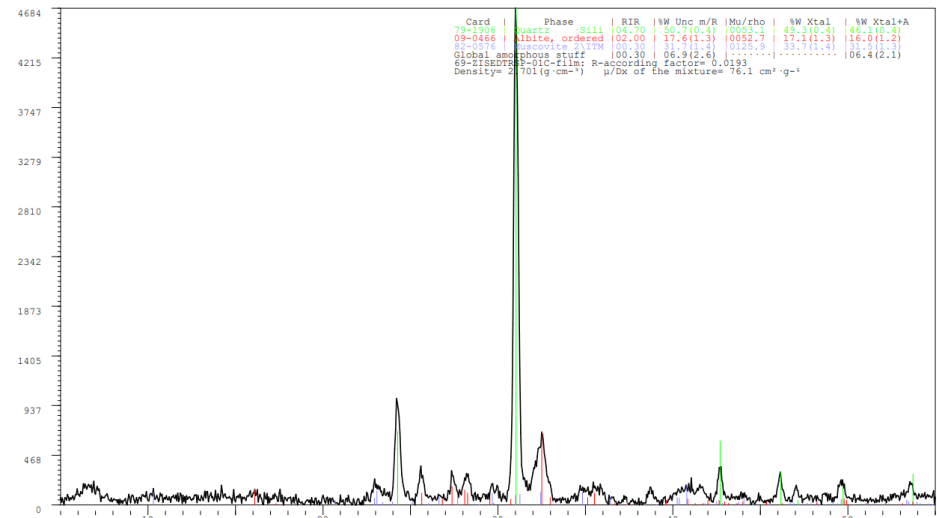


Tabla 62. Minerales identificados en la muestra SEDTRSP-01C

Clave de muestra	Ficha PDF2	Fases minerales identificadas	Fórmula química
SEDTRSP-01 C	79-1906	Cuarzo	SiO ₂
	09-0466	Albita	NaAlSi ₃ O ₈
	82-0576	Moscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(F,OH) ₂

➤ SEDTRSP-02 E

Sample: 70-ZISEDTRSP-02E-film Lambda= 1.78897
 Date: 01/09/2021 XPowder Ver. 2010.01.35 e_mail: support@xpowder.com http://www.xpowder.com License to \InXitu Inc:Inner Use

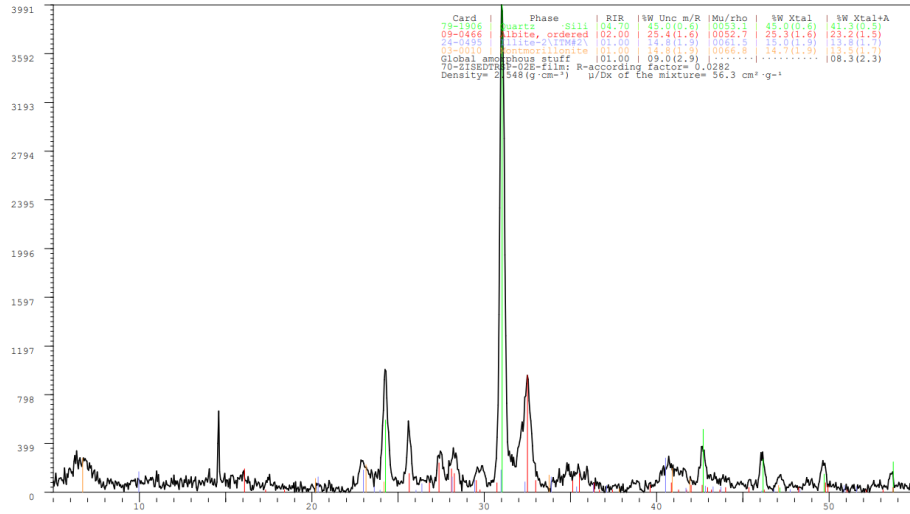


Tabla 63. Minerales identificados en la muestra SEDTRSP-02E

Clave de muestra	Ficha PDF2	Fases minerales identificadas	Fórmula química
SEDTRSP-02 E	79-1906	Cuarzo	SiO ₂
	09-0466	Albita	NaAlSi ₃ O ₈
	24-0495	Illita	(K,H ₃ O)(Al,Mg,Fe) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ [(OH) ₂ ,(H ₂ O)]
	03-0010	Montmorillonita	(Na,Ca) _{0.33} (Al,Mg) ₂ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₂ nH ₂ O

➤ SEDTRSP-03 B

Sample: 71-ZISEDTRSP-03B-film Lambda= 1.78897
 Date: 01/09/2021 XPowder Ver. 2010.01.35 e_mail: support@xpowder.com http://www.xpowder.com License to \InXitu Inc:Inner Use

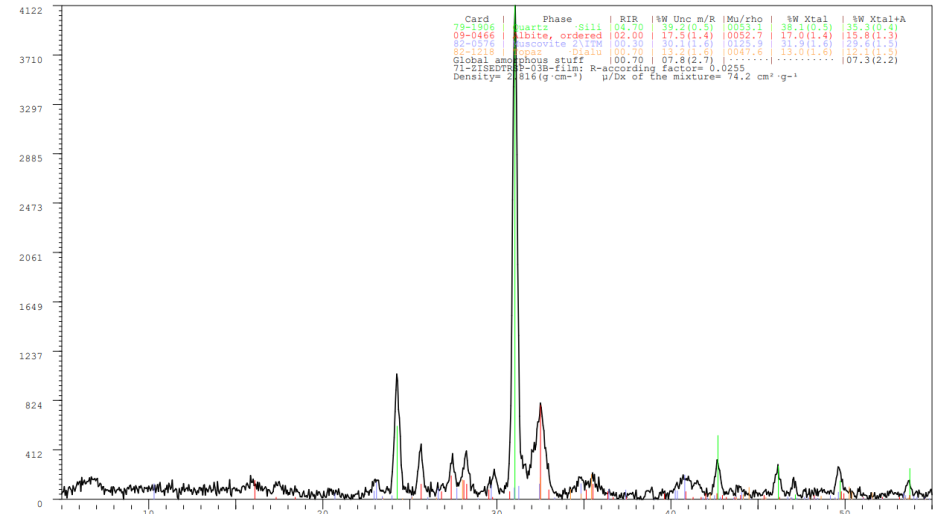


Tabla 64. Minerales identificados en la muestra SEDTRSP-03B

Clave de muestra	Ficha PDF2	Fases minerales identificadas	Fórmula química
SEDTRSP-03 B	79-1906	Cuarzo	SiO ₂
	09-0466	Albita	NaAlSi ₃ O ₈
	82-0576	Moscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(F,OH) ₂
	82-1218	Topacio	Al ₂ SiO ₄ (F,OH) ₂

➤ SEDTRSP-05 D

Sample: 72ZISEDTRSP-05D-film Lambda= 1.78897

Date: 01/09/2021 X Powder Ver. 2010.01.35 e_mail: support@xpowder.com http://www.xpowder.com License to \inXitu Inc:Inner Use

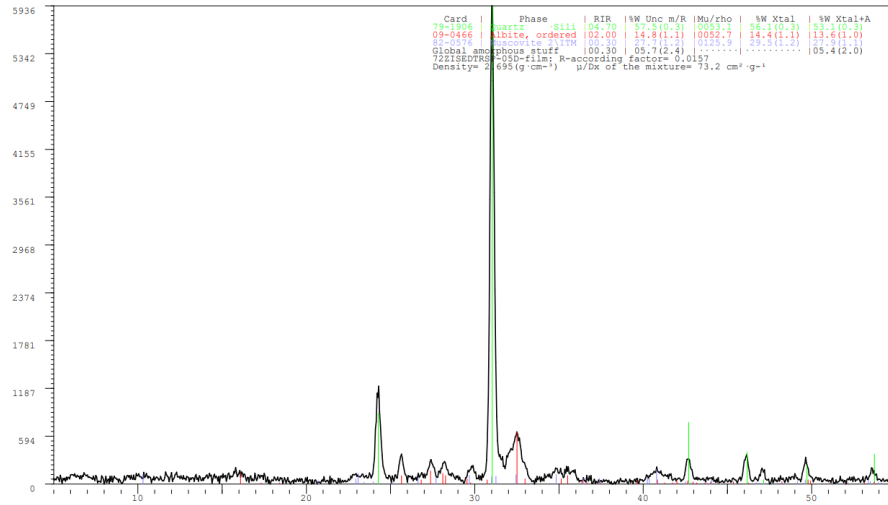


Tabla 65. Minerales identificados en la muestra SEDTRSP-05D

Clave de muestra	Ficha PDF2	Fases minerales identificadas	Fórmula química
SEDTRSP-05 D	79-1906	Cuarzo	SiO ₂
	09-0466	Albita	NaAlSi ₃ O ₈
	82-0576	Moscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(F,OH) ₂