



CENICA
**Centro Nacional de Investigación
y Capacitación Ambiental**

**Dirección de Investigación en Residuos y
Proyectos Regionales**

INFORME FINAL

***REMEDIACION DE SITIOS CONTAMINADOS POR METALES
PROVENIENTES DE JALES MINEROS EN LOS DISTRITOS DE EL
TRIUNFO-SAN ANTONIO Y SANTA ROSALÍA,
BAJA CALIFORNIA SUR***

Responsable del proyecto:

Dra. Tania Volke Sepúlveda

Participantes:

M. en I. Gustavo Solórzano Ochoa

M. en I. Anabell Rosas Domínguez

Dr. Chiaki Izumikawa

M. en I. Guillermo Encarnación Aguilar

M. en I. Juan Antonio Velasco Trejo

Ing. Sergio Flores Martínez

Noviembre, 2003

INDICE

RESUMEN EJECUTIVO	2
INTRODUCCIÓN	3
MARCO TEÓRICO.....	5
1. <i>Distribución de la superficie en Baja California Sur</i>	<i>5</i>
2. <i>Geología del estado.....</i>	<i>5</i>
3. <i>Geología económica.....</i>	<i>5</i>
4. <i>Clima.....</i>	<i>6</i>
ANTECEDENTES DE LAS REGIONES DE ESTUDIO	6
1. <i>Yacimientos minerales en Baja California Sur</i>	<i>7</i>
2. <i>Distrito de El Triunfo-San Antonio</i>	<i>7</i>
3. <i>Distrito de Santa Rosalía</i>	<i>9</i>
JUSTIFICACION	10
OBJETIVOS.....	11
1. <i>Objetivos generales</i>	<i>11</i>
2. <i>Objetivos particulares.....</i>	<i>11</i>
METODOS Y MATERIALES.....	11
1. <i>Investigación preliminar de los sitios de estudio.....</i>	<i>11</i>
2. <i>Acondicionamiento de muestras.....</i>	<i>13</i>
3. <i>Caracterización de muestras.....</i>	<i>15</i>
RESULTADOS Y DISCUSION	16
1. <i>Distribución del tamaño de partícula</i>	<i>16</i>
2. <i>Caracterización química</i>	<i>17</i>
3. <i>Caracterización mineralógica</i>	<i>26</i>
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	27
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29
ANEXO 1. Resultados de la caracterización química.....	31
ANEXO 2. Alternativas tecnológicas para la remediación.....	34
1. <i>Remediación electrocinética.....</i>	<i>34</i>
2. <i>Fitorremediación</i>	<i>35</i>
3. <i>Inundación de suelos (soil flushing)</i>	<i>36</i>
4. <i>Solidificación/estabilización (S/E).....</i>	<i>36</i>

RESUMEN EJECUTIVO

En el presente documento se muestran los resultados de la caracterización de residuos provenientes de actividades mineras de los distritos de El Triunfo-San Antonio y Santa Rosalía, Baja California Sur. En abril de 2002, personal del CENICA y de la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA), por solicitud de la delegación de la SEMARNAT del Estado de Baja California Sur, hizo una visita a las regiones mencionadas y realizaron el muestreo de colas de cianuración, jales y cenizas de tostación en la zona de El Triunfo-San Antonio, en donde se benefició principalmente oro y plata; así como de escorias de fundición y jales en la zona de Santa Rosalía, en donde se explotó cobre durante más de 100 años. Las muestras recolectadas se acondicionaron y prepararon para su caracterización en cuanto a la distribución por tamaño de partícula, así como a la concentración de metales y cianuros reactivos. Adicionalmente se determinó el contenido de metales lixiviables para cada muestra.

En general, las muestras de ambas regiones mostraron patrones similares en cuanto a la distribución del tamaño de partícula. En los residuos de El Triunfo-San Antonio, la fracción predominante (> 25%) fue < 38 μm ; a diferencia del suelo natural, en donde se observó una mayor proporción de partículas más gruesas. En Santa Rosalía, la fracción predominante (~ 50%) en los jales fue < 38 μm ; en las escorias, la fracción mayoritaria (80%) fue la mayor a 0.25 mm. Estos resultados son importantes para una posterior definición de alternativas tecnológicas para la remediación de los sitios.

Se encontró que los residuos mineros de la zona de El Triunfo-San Antonio, e incluso suelos naturales cercanos, presentan concentraciones de As, Cd, Pb y Zn muy superiores a los límites máximos establecidos por la PROFEPA. En general, se encontró que las fracciones más finas contienen la mayor concentración de los metales analizados. Aunque hay registros del uso de Hg para el beneficio de Au y Ag en la región, no se detectaron niveles significativos en los residuos. De acuerdo con estos resultados, se recomienda especial cuidado con las zonas cercanas a los depósitos de cenizas de tostación, ya que el material se encuentra superficial y su contenido de metales tóxicos (As, Cd, Pb y Zn) es muy elevado. Especialmente para estas zonas potencialmente peligrosas, y en función del volumen de los residuos, podría sugerirse su contención o su recubrimiento con material impermeable con el objeto de evitar la dispersión y lixiviación de los contaminantes hacia el acuífero.

En Santa Rosalía, aunque se registraron altas concentraciones de Cd, Ni, Pb, Ba y Zn en las muestras, no se detectaron cantidades significativas en lixiviados. Con respecto a los jales, las mayores concentraciones de metales, especialmente de As y Cr, se detectaron en el lado oeste de la presa. En la mayoría de las muestras se encontraron concentraciones de Cd, Pb, Ba y Zn superiores a los límites máximos para uso de suelo residencial, establecidos por la PROFEPA. Sin embargo, ninguno de estos metales se detectó en niveles significativos en lixiviados. Se observó que la concentración de Cu, Cr, Cd, Ba y Ag normalmente se incrementa proporcionalmente al tamaño de partícula. Los residuos contenidos en la presa de jales se caracterizaron por su elevada concentración de Cu, superior a 60 g/kg, por lo que se recomienda el estudio de alternativas tecnológicas para la recuperación del metal. Por otra parte, se sugiere la reparación del muro de contención de la presa de

jales, y con respecto a las escorias, continuar su utilización para sandblasteo, o bien como material de relleno, para construcción de carreteras o como sustituto de material para construcción.

INTRODUCCIÓN

La actividad minera, uno de los pilares del desarrollo económico de México, se inició en la época prehispánica y posteriormente, en la época de la colonia, su desarrollo se intensificó. La mayor parte de los distritos mineros se ubicaron en zonas montañosas, áridas y apartadas. La industria minera, una de las más antiguas en el país, tiene un alto impacto ya que afecta al ambiente desde el subsuelo hasta la atmósfera, incluyendo suelos y cuerpos de agua. Durante los procesos mineros se genera una gran cantidad de desechos sólidos, líquidos y gaseosos (gases, humos, partículas, aguas residuales y jales -colas y escorias-). Algunas de las principales afectaciones al ambiente por las actividades mineras se relacionan con: (i) destrucción de la capa de suelo, flora y fauna durante el descapote; (ii) formación de terreros y movimientos de sedimentos; (iii) oxidación de minerales insolubles y formación de sustancias solubles ácidas con alto contenido de metales; (iv) alto consumo de agua; (v) descarga de lixiviados con presencia de iones metálicos y reactivos tóxicos; (vi) generación de jales como remanente del beneficio. De esta manera, la generación de residuos peligrosos en la minería constituye un problema difícil de resolver (Gutiérrez y Moreno, 1995).

Un ejemplo de lo anterior se encuentra en el estado de Baja California Sur, en donde durante los tres últimos siglos las principales sustancias metálicas explotadas fueron Cu, Au, Ag, Cr, y Mn ; fortaleciéndose en el último siglo el aprovechamiento de minerales no metálicos como yeso, fosforita, sal sódica, magnesita y diversos materiales pétreos utilizados en la industria de la construcción (COREMI, 1999). Dos de los distritos más explotados por sus altos contenidos de minerales metálicos, fueron El Triunfo-San Antonio y Santa Rosalía.

En el primer caso, en los alrededores de los poblados de El Triunfo y San Antonio durante los siglos XVII y XVIII se fueron descubriendo varias vetas y depósitos de oro, lo que condujo a un periodo de explotación regular de 1753 a 1765. Más tarde, la actividad minera en la región se reactivó con el descubrimiento de nuevas vetas, y así varias empresas pequeñas se fusionaron en *The Progreso Mining Co.*, realizando trabajos de explotación entre 1878 y 1911. Mientras tanto, en el norte del estado, en los alrededores de Santa Rosalía, se descubrieron los depósitos de cobre de *El Boleo*. De 1875 a 1884 operaron varias compañías pequeñas en la zona, alcanzando una producción de 54,000 Ton con leyes hasta de 24% de Cu. Hacia 1884 una misión de ingenieros franceses encontró en los depósitos de El Boleo la existencia de más de 700 000 Ton de mineral (ley promedio de 12% de Cu). De esta manera se conformó la *Compagnie du Boleo, S.A.* de capital francés, que explotó el depósito de 1886 a 1953, produciendo 14 439 600 Ton de Cu (ley promedio de 4%). A partir de 1954 el depósito pasó a manos de la *Compañía Minera Santa Rosalía, S.A.*, que laboró hasta 1985, convirtiendo al distrito de El Boleo en un gran productor de cobre por 117 años (COREMI, 1999).

Todas estas actividades en ambos distritos mineros, condujeron a la generación de grandes cantidades de residuos. En el caso de El Triunfo-San Antonio, se calculan cerca de 800 000 Ton de desechos mineros (con altas concentraciones de As) y aproximadamente 600 000 Ton de arsenolita

pura abandonada en cámaras (Carrillo y Drever, 1997). Por su parte, se calcula que en la región de Santa Rosalía hay más de 3 millones de Ton de escorias de fundición en tierra, más una cantidad no cuantificada dentro del mar, y cerca de 1 375 358 Ton de jales con elevadas concentraciones de Pb y Cd depositados en presas.

En agosto de 2001, la delegación de la SEMARNAT en Baja California Sur solicitó al CENICA la elaboración de un diagnóstico, así como la evaluación de posibles impactos relacionados con la presencia de residuos de los procesos de extracción y beneficio de minerales en los alrededores de los poblados de El Triunfo, San Antonio y Santa Rosalía.

Con base en lo anterior, en el presente estudio se planteó el objetivo de realizar un diagnóstico acerca del estado actual de los sitios contaminados con residuos que contienen metales, en los distritos de El Triunfo-San Antonio y Santa Rosalía; así como proponer una o varias alternativas tecnológicas para la restauración de dichos sitios.

En el documento se presentan algunos antecedentes referentes al tipo de depósitos minerales y principales actividades mineras en ambas regiones de estudio, posteriormente se describen las estrategias de muestreo utilizadas y las técnicas de análisis para la caracterización de las muestras. En la Sección de Resultados, se detallan y discuten los resultados obtenidos en cuanto a distribución de tamaño de partícula y acerca del contenido de metales en residuos y lixiviados para las zonas de estudio. Finalmente se plantean algunas bases teóricas relativas a las alternativas tecnológicas factibles para la remediación de sitios contaminados con metales; así como algunas conclusiones y recomendaciones derivadas del presente estudio.

MARCO TEÓRICO

1. Distribución de la superficie en Baja California Sur

El Estado de Baja California Sur se ubica en la parte sur de la Península de Baja California. Colinda al norte con el Estado de Baja California, al sur y este con el Golfo de California y al oeste con el Océano Pacífico. De acuerdo al censo de población del año 2000, la población total del Estado, es de 424 041 habitantes (INEGI, 2001).

Baja California Sur posee una superficie total de 73 677.5 km² (3.8% de la superficie del país), de la cual, el 2.3 % está destinada para labores agrícolas (producción de maíz, garbanzo, trigo, alfalfa y naranja); el 1.3 % de esta superficie está cubierta por bosques de encino roble, encino negro, pino piñón y guayabillo; la selva abarca una extensión de 5.7 % de la superficie, con vegetación de palo blanco, torote colorado, cajalosuchil. La mayor parte del territorio (77.8 %), se conforma por matorrales, encontrándose cardón pelón, pitahaya y palo adán; el 12.8 % lo conforma otro tipo de flora como chamizo, alfombrilla y ceitilla (INEGI-DGG, 1999: Superficies Nacional y Estatales; INEGI-BCS, 2002).

2. Geología del estado

La geología de Baja California Sur (Figura 1) evolucionó de acuerdo con la tectónica de placas, como la separación de las placas litosféricas móviles que ocasionó el desprendimiento paulatino del territorio de Baja California del continente americano, a través de la falla de San Andrés. Aunado a este suceso, han ocurrido otros eventos que contribuyeron a la separación de la península y dieron origen a unidades litológicas de los tres tipos fundamentales, es decir: ígneas, sedimentarias y metamórficas, cuyas edades de formación abarcan desde la era Mesozoica hasta la Cenozoica (INEGI, 2003; COREMI, 1999).

3. Geología económica

Es un Estado potencialmente rico en sus recursos minerales, tanto metálicos como no metálicos, y representa grandes posibilidades de descubrir nuevos depósitos en virtud de que ha sido poco explorado.

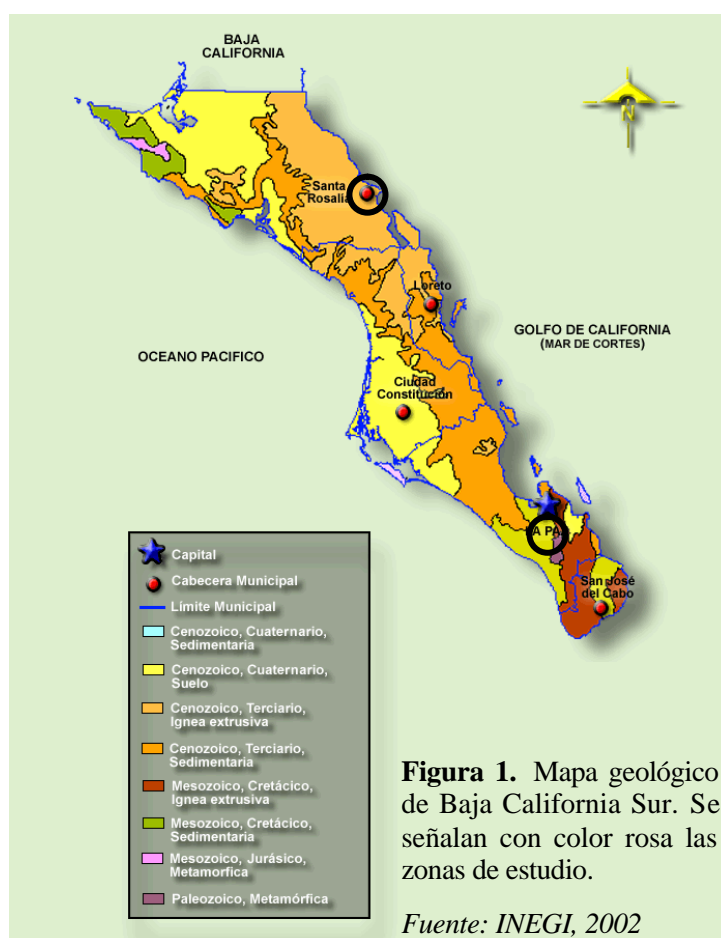


Figura 1. Mapa geológico de Baja California Sur. Se señalan con color rosa las zonas de estudio.

Fuente: INEGI, 2002

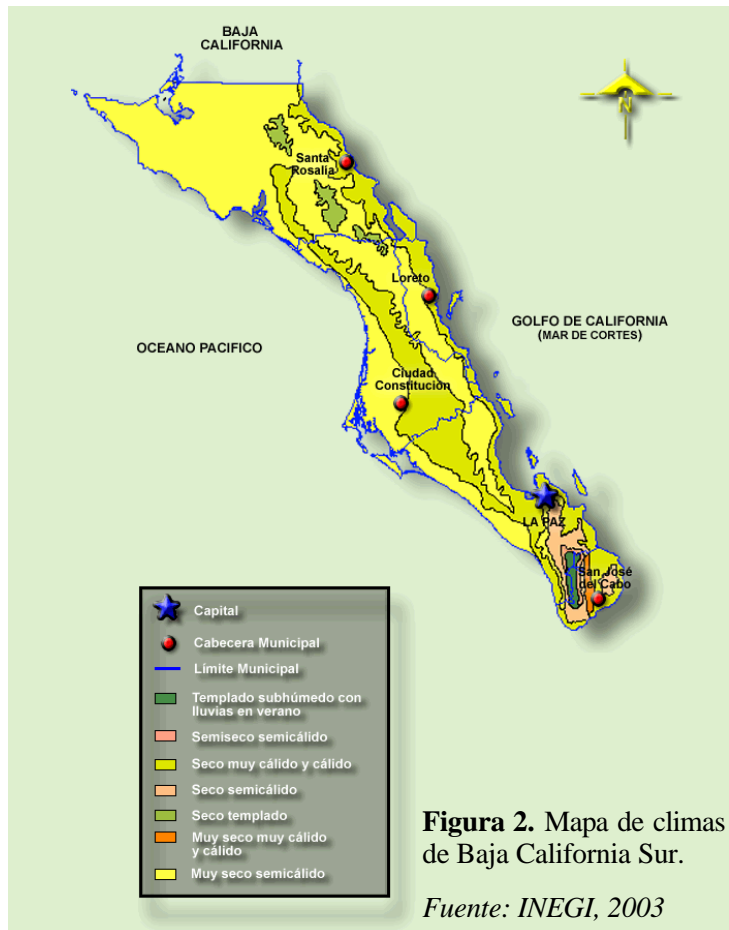
Baja California Sur tiene una antigua tradición minera desde la época de la Colonia. Esta actividad ocupa un renglón muy importante de la economía estatal, ya que representa uno de los más altos índices en la participación del Producto Interno Bruto estatal (INEGI, 2003).

4. *Clima*

En Baja California Sur, los climas que prevalecen son los muy secos semi-cálidos y cálidos (Figura 2), cuyas características principales son lo extremoso de sus temperaturas diurnas y la gran sequedad ambiental. Ello se debe a la interacción de los factores: latitud, el relieve y las corrientes marinas.

En los meses de invierno, las masas de aire polar invaden a la península y enfrían aún más el ambiente durante la noche, por lo cual se producen las heladas en el estado; excepto en la franja costera occidental (desde el paralelo 26° N) hasta la Bahía Sebastián Vizcaíno, donde imperan los climas muy secos semi-cálidos.

De acuerdo con datos de la CNA (INEGI, 2003), la temperatura media anual en el Estado (de 1984 a 1999) oscila entre 22 y 24.4 °C; y la precipitación pluvial promedio (1984 a 1999) entre 160.6 y 345.4 mm para el municipio de Mulegé y San José del Cabo, respectivamente. Sin embargo, con respecto a este último parámetro, la precipitación promedio en el Estado es del orden de 170 mm.



ANTECEDENTES DE LAS REGIONES DE ESTUDIO

Durante el gobierno de Porfirio Díaz tuvo lugar un importante crecimiento de la economía mexicana, resultado tanto de factores externos como internos. En efecto, a fines del siglo XIX y principios del XX, se gestaba una fuerte expansión del capital monopolista en Estados Unidos y en algunos países europeos: Inglaterra, Francia y Alemania. El sur de la Baja California no fue ajeno a este proceso; los capitales de Estados Unidos y Francia se invirtieron fundamentalmente en la industria minera. En Santa Rosalía se estableció la Compañía El Boleo, de capital francés y en El Triunfo, la Compañía El Progreso, de capital norteamericano (Rivas, 2000a).

1. Yacimientos minerales en Baja California Sur

La industria extractiva se apoya fundamentalmente en la producción de minerales no metálicos como: la sal, que se obtiene en Guerrero Negro; el yeso, en Santa Rosalía y la isla de San Marcos; la fosforita, en San Juan de la Costa, en Santo Domingo y al norte del poblado El Conejo; y la magnesita, en las islas Magdalena, Santa Margarita, en el noroeste de Santa Rosalía y en Punta Eugenia.

Dentro de los minerales metálicos de importancia se hallan los depósitos hidrotermales de oro y plata de la región del Cabo; el cobre en el área de Santa Rosalía y al noreste de la Sierra San José de Castro; y el manganeso en el noroeste del poblado de Mulegé y desde la Punta Concepción hasta el arroyo San Bruno (INEGI, 2003).

2. Distrito de El Triunfo-San Antonio

El distrito minero de El Triunfo-San Antonio se encuentra ubicado en el municipio de La Paz (24° 09' N, 110° 19' O) a 60 km al SE de la ciudad de La Paz (Figuras 1 y 2). De acuerdo con información preliminar, en el sitio se encuentran cerca de 800 000 toneladas de desechos mineros (con cerca de 4% de óxido de arsénico) y aproximadamente 600 000 toneladas de arsenolita pura abandonada en cámaras (Carrillo y Drever, 1997).

2.1. Depósitos metamórficos

Se han identificado numerosas estructuras tabulares, vetas-fallas con valores de Au y Ag emplazadas principalmente en granodiorita, tinaliota, diorita, grabo, esquisto de biotita y cuarzo feldespático, con una longitud de hasta 6 km y un espesor promedio de 0.9 m. Todas estas estructuras se encuentran dentro de las tres principales regiones de El Triunfo y San Antonio, y contienen por lo general oro libre, pirita, galena, arsenopirita, esfalerita y calcopirita, alojados en una matriz de cuarzo y calcita, con frecuencia brechada (COREMI, 1999).

2.2. Depósitos diseminados

En la región existen zonas de diseminación con valores bajos en Au, asociadas por lo general a los sistemas de vetas y vetas-falla de la mineralización hidrotermal. Los minerales consisten principalmente de oro libre, asociado a pirita y arsenopirita con una distribución restringida, en donde algunas vetas pueden alcanzar 8 000 m de longitud por 200 m de ancho (COREMI, 1999).

2.3. Infraestructura y actividades mineras en la zona

La explotación de las minas de El Triunfo data de la época colonial cuando, en 1748, Manuel de Ocio fundó el Real de Santa Ana. Más tarde, en 1769, el laboreo y beneficio de las minas pasaron al control del gobierno virreinal a través de la Real Hacienda; durante este período la región tuvo un auge minero que se prolongó hasta 1786.

Entre 1890 y 1900, la explotación minera en El Triunfo disminuyó drásticamente, debido por un lado, a la depreciación de la plata, y por otro, a un factor particular: el contrato de la compañía El Progreso finiquitaba en 1900, por lo que no era redituable para la empresa seguir invirtiendo (Rivas, 2000b).

Los principales valores extraídos en este distrito fueron Au, Ag, Pb, Zn y As, empleando técnicas de cianuración, medio pesado y fundición para el beneficio de los minerales. Debido a la baja eficiencia de los métodos utilizados durante esa época, se tenían pérdidas entre 25 y 40% en la recuperación de los minerales (González, 1995). En consecuencia, la elevada concentración de metales que aún contenían los jales generó un auge en el reprocesamiento de estos residuos durante la década de los 80 (González, 1995). Así, hasta 1983 se produjeron 3 600 kg de Au, 700 Ton de Ag y 2 500 Ton de Pb en este distrito (Carrillo y Dever, 1997).

En 1995, se tenía registro de 3 compañías que se encontraban trabajando en El Triunfo, realizando actividades de exploración minera: *TEPMIN*, *Compañía Minera de Recursos* y *Compañía Minera Ecko Bay*. Existen escasas instalaciones para el beneficio del mineral, y las que se encuentran, trabajan a muy baja escala; son escasos los proveedores para el desarrollo de actividades mineras en la ciudad de la Paz (González, 1995).

2.3.1. Procesos de beneficio

En el distrito de El Triunfo-San Antonio se emplearon diferentes métodos de beneficio de los minerales desde los inicios de la actividad minera. Se utilizó el método de cianuración y fundición para el mineral oxidado en el período 1748- 1874, y el de calcinación, cianuración y fundición para el mineral mixto. En la década de los 50 se utilizó el método combinado de concentración por medio pesado, flotación y fundición para tratar las minas de sulfuros. Actualmente se realiza el siguiente proceso: trituración (reducción granulométrica), molienda utilizando un molino de bolas, flotación tipo “*bulk*”, lixiviación por cianuración del concentrado, precipitación de minerales preciosos utilizando zinc y por último fundición, este es el método que utiliza la planta de beneficio de la Testera, la cual beneficia sulfuros, con una capacidad instalada de 180 Ton/día de mineral tratado, produciendo concentrados con leyes de 30 - 40 g de Au/Ton (COREMI, 1999).

2.3.2. Sistema de minado

En El Triunfo-San Antonio se utilizaron dos tipos de minas, uno mediante “tajo a cielo abierto”, y otro tipo “galerías con contra-pozos” (ventilación). En el inicio de operaciones de *Progreso Mining Company* en 1878, se colocaron tiros inclinados sobre las vetas y varios tiros verticales a lo alto de las estructuras, para ventilación y extracción con adaptaciones de malacates de vapor, la explotación se realizaba selectivamente en rebajes abiertos, dejando gran parte de mineral de baja ley como retagues, al interior de la mina. Actualmente se utiliza el sistema de minado del tipo cámaras y pilares inclinados, con un 80 a 85% de recuperación sobre veta (COREMI, 1999).

3. Distrito de Santa Rosalía

La región minera de Santa Rosalía, pertenece al municipio de Mulegé (27° 20' N, 112° 16' O) y se localiza al norte de la ciudad de La Paz (Figuras 1 y 2). Esta población cuenta con importantes depósitos de Cu, Co, Zn, Mn y yeso (COREMI, 1999). Se calcula que en el sitio hay más de 3 millones de toneladas de escorias de fundición en tierra, más una cantidad no cuantificada dentro del mar, y cerca de 1 375 358 toneladas de jales depositadas en presas (Cia. Minera de Loreto SA de CV) con elevadas concentraciones de plomo y cadmio.

3.1. Depósitos sinsedimentarios

Dentro de la geología minera de la zona, pueden citarse los depósitos sinsedimentarios, ubicados al O y SO de la localidad. Este depósito se encuentra estratificado en capas conteniendo Cu y Co de origen sinsedimentario, dentro de una secuencia vulcano-sedimentaria clástica, denominada formación "El Boleo".

En esta área, se han identificado alrededor de 5 horizontes mineralizados en una longitud de 20 km, con espesores variables entre 0.7 y 7.0 m en superficie, y leyes de 0.3 a 6.7% de Cu y de 0.03 a 0.19% de Co. La mineralogía se encuentra representada por calcosita, covelita, bornita, calcopirita, cobre nativo y galena. Dentro de los minerales secundarios, destaca la presencia de malaquita, azurita, crisocola, oxiclورو de cobre, boleíta, cumengeíta, pseudoboleíta y cuprita. De acuerdo a una clasificación de textura, de zonificación y de mineralogía realizada en las minas, se estableció que sus orígenes son sinsedimentarios, Es decir, el principal proceso de formación proviene de fumarolas submarinas del depósito de la formación El Boleo (COREMI, 1999).

3.2. Depósitos químicos

Los depósitos químicos han sido consecuencia de la formación de los Boleos en el área de Santa Rosalía, los cuales representan estratos gruesos de yeso, que afloran con un espesor de más de 200 m, y que continúan desarrollándose a otras profundidades (COREMI, 1999).

3.3. Depósitos metamórficos

En el distrito de El Boleo, se tiene el conocimiento de algunas estructuras vetiformes, de 40 a 300 m de longitud y espesores que varían de 0.30 a 3.0 m de falla, con dirección NW-SE. Estas estructuras poseen valores de Au, Ag, Pb, Zn y Cu, por lo cual, esta mineralización está compuesta de sulfuros, carbonatos, sulfatos y óxidos en forma de galena, calcosita, malaquita, celestita, azurita, pirita, calcopirita y cuarzo (COREMI, 1999).

3.4. Actividades mineras en la zona

La empresa de mayor importancia en Santa Rosalía fue la Compañía francesa El Boleo, S.A., fundada en 1885, dedicada a la explotación de Cu. En Santa Rosalía se localizaban el puerto de

altura y cabotaje, la fundición, todos los talleres mecánicos, las oficinas administrativas de la empresa y las del Gobierno Federal. Al convertirse El Boleo en una empresa exclusivamente industrial, sus trabajos tuvieron un crecimiento acelerado, acompañado del aumento en la población local. En 1886, a un año del arribo de la compañía, la población existente era de 379 habitantes; cinco años después, en 1891, la población en Santa Rosalía, incluyendo los grupos mineros, había alcanzado la cifra de 3,065 habitantes. La mayor parte de esta población provenía de Sonora, Sinaloa, Nayarit, Colima y Guerrero (González, 1985).

3.4.1. *Procesos de beneficio*

En la región de Santa Rosalía, el mineral de cobre de El Boleo se beneficiaba mediante el siguiente proceso: fundición directa en hornos, trituración y secado. Se obtenía un rango en la ley del mineral entre 3 a 3.5 %, lo cual resultaba económico (ver Anexo 2). La capacidad de la fundidora fue de 600 000 Ton/día de mineral obteniéndose 20 Ton de cobre ampollado promedio (COREMI, 1999). Un esquema global del proceso se describe en el Anexo 3. En el anexo 4 se presentan las plantas de beneficio de minerales que operan actualmente en el Estado.

3.4.2. *Sistema de minado*

Existen evidencias de que en esta zona, se utilizaban trenes y rieles para transportar los minerales, que indican que el tipo de minado que se utilizó fue el de galería (Delegación SEMARNAT-BCS, 2001). Se conocen más de 56 tiros verticales de profundidades variables entre 90 a 225 m en esta región. El propósito de los tiros fue el de exploración, ventilación y extracción de mineral. El método "tallas", que consistía en excavar el manto mineral, fue el más utilizado (COREMI, 1999).

JUSTIFICACION

Con base en estudios previos realizados en las regiones de El Triunfo-San Antonio y Santa Rosalía, en los cuales se reporta la presencia de metales y metaloides como Pb, Cu, Mn, Zn, Co, As, Ag y Au en residuos, suelo y agua, la delegación de la SEMARNAT en Baja California Sur solicitó al CENICA la elaboración de un diagnóstico, así como la evaluación de posibles impactos relacionados con la presencia de residuos de los procesos de extracción y beneficio de minerales en los alrededores de los poblados de El Triunfo, San Antonio y Santa Rosalía. La solicitud fue hecha a través del oficio No. SEMARNAT-BCS.02.573/01 con fecha 27 de agosto de 2001. Para tal efecto, la Dirección General del CENICA dio respuesta afirmativa mediante el oficio No. CENICA/OFICIO/43101 con fecha 27 de septiembre de 2001.

OBJETIVOS

1. *Objetivos generales*

- Realizar un diagnóstico acerca del estado actual de los sitios contaminados con residuos que contienen metales, provenientes de jales mineros en los distritos de El Triunfo-San Antonio y Santa Rosalía, Baja California Sur.
- Proponer una o varias alternativas tecnológicas para la restauración de los sitios contaminados con residuos que contienen metales.

2. *Objetivos particulares*

- Realizar una investigación bibliográfica acerca de las características geográficas e hidrológicas de los sitios contaminados, así como los antecedentes relacionados con su actividad minera.
- Realizar una caracterización fisicoquímica de las muestras de suelos y residuos colectados en los sitios de estudio, para determinar su estado actual de contaminación.
- Estudiar a nivel laboratorio, diferentes alternativas para el tratamiento de las muestras de suelos y residuos contaminados.

METODOS Y MATERIALES

1. *Investigación preliminar de los sitios de estudio*

Se realizaron visitas a los distritos mineros del El Triunfo-San Antonio y Santa Rosalía para tomar muestras de suelos y residuos en los sitios seleccionados y obtener información acerca de los procesos de beneficio, durante el período de explotación de las minas.

1.1. **El Triunfo-San Antonio**

Uno de los puntos de muestreo en el distrito minero de El Triunfo-San Antonio fue el montículo de colas de cianuración de mayor volumen, en donde se tomó una muestra compuesta (Figura 3), a profundidades entre 10 y 200 cm con un equipo nucleador. Se estableció el centro de dicho montículo como punto de referencia para evaluar la posible migración de contaminantes. Adicionalmente, se tomaron muestras de suelo natural a 30 m al norte y 40 m al sur de este punto.

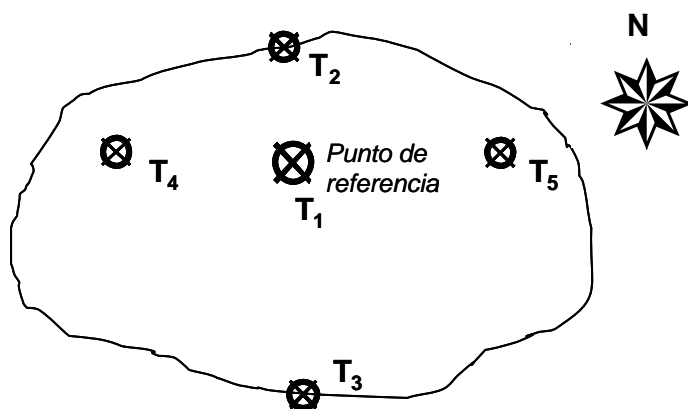


Figura 3. Sitios de muestreo en el montículo de colas de cianuración

Además de las muestras de colas de cianuración, se tomaron muestras en la sección VI de la beneficiadora y en la presa de jales (Figura 4).

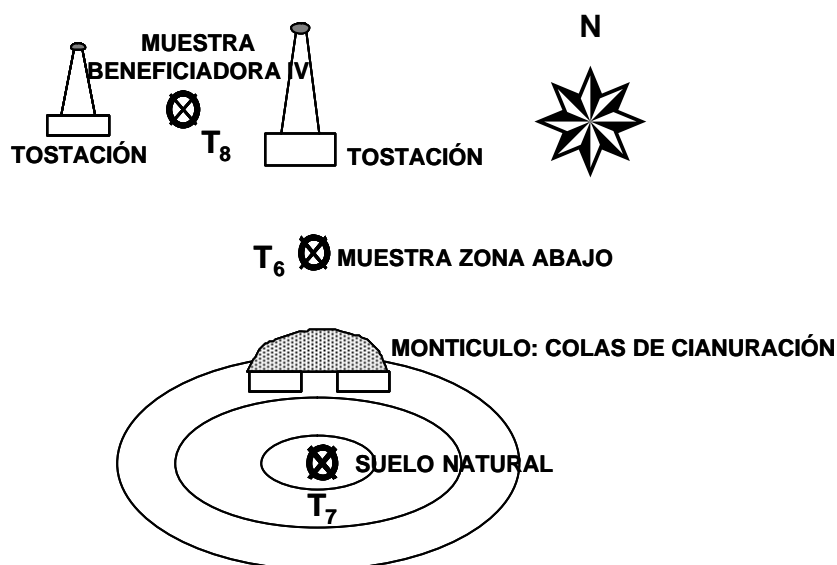


Figura 4. Esquema general de los puntos de muestreo en El Triunfo-San Antonio

1.2. Santa Rosalía

En la región minera de Santa Rosalía, se tomaron muestras compuestas hasta una profundidad de 2.0 m, en dos puntos de la presa de jales No. 4. Esta presa es la de mayor antigüedad en la zona y se estima que contiene alrededor de 65 644 Ton de jales.

1.3. Identificación y toma de muestras

En las Tablas 1 y 2 se resumen las características de las muestras, así como la profundidad y posición (geoposicionada) del sitio de muestreo, para la zona de El Triunfo-San Antonio y de Santa Rosalía, respectivamente.

Tabla 1. Identificación de muestras tomadas en la región de El Triunfo-San Antonio

Distrito	Proceso	Muestra	Identific.	Profundidad (cm)	Cantidad (kg)	Posición	
San Antonio - El Triunfo	Beneficio de Au y Ag	1. Colas de cianuración	SA-1	0 - 10	0.3	N 23°48.05' W 110°06.43' N 23°47.59' W 110°06.21'	
		2. Material térreo	SA-2	0 - 10	40		
	Beneficio de Au y Ag	1. Colas de cianuración					
		1.1. Punto referencia	T-1	10 - 250	32.0		
		1.2. Norte (9 m)	T-2	0 - 10	0.986		
		1.3. Sur (9 m)	T-3	0 - 10	0.766		
		1.4. Este (9 m)	T-4	0 - 10	0.773		
		1.5. Oeste (9 m)	T-5	0 - 10	0.738		
		2. Suelo norte	T-6	0 - 10	1.641		
3. Suelo sur	T-7	0 - 10	1.583				
		4. Cenizas de tostación	T-8	0 - 10	1.149		
		5. Jales	T-9	10 - 250	15.77		

Tabla 2. Identificación de muestras contaminadas con metales tomadas en la región de Santa Rosalía

Distrito	Proceso	Muestra	Identific.	Profundidad (cm)	Cantidad (kg)	Posición
Santa Rosalía	Beneficio de Cu	1. Presa de jales				
		1.1. Este (Part. fina)	R-1	10 - 200	8.624	N 27°21.26' W 112°15.05'
		1.2. Oeste (Part. gruesa)	R-2	10 - 200	18.0	N 27°21.24' W 112°17.06'
		1.3. Escoria negra	R-3	0 - 10	10.5	N 27°21.24' W 112°17.06'
		2. Escoria negra	R-4	0 - 40	26.4	N 27° 20.56' W 112° 15.93'
		3. Escoria roja	R-5	0 - 40	18.34	N 27° 20.49' W 112° 16.24'

2. Acondicionamiento de muestras

Las muestras tomadas en los sitios de interés se sometieron al proceso de acondicionamiento que se describe a continuación.

2.1. Secado

Las muestras se secaron a una temperatura máxima de 40 °C durante 24 horas, para evitar la pérdida de sus características originales y la volatilización de elementos como mercurio, muy probablemente contenido en las muestras. Adicionalmente, se determinó la humedad inicial de cada muestra, de acuerdo al siguiente procedimiento.

- Poner a peso constante un vaso de precipitados (50 mL) y registrar el peso.
- Colocar una cantidad (~50 g) de muestra húmeda en el vaso y registrar el peso.
- Colocar el vaso de precipitados con la muestra húmeda (MH) a 40 °C durante 24 h.
- Retirar el vaso de la estufa e introducirlo en un desecador (~15 min.).
- Registrar el peso del vaso con la muestra seca (MS) hasta peso constante.
- Determinar la humedad (%H) de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\% H = 1 - (MS/MH)$$

2.2. Triturado y cuarteo

Para las muestras con partículas de tamaño superior a malla 10 (1.7 mm), se utilizó un molino de platos (*Marcy Mc Cool Pulverizer*) con el fin de facilitar la homogeneización de las muestras.

El cuarteo se realizó utilizando un cortador de Jones (Figura 5), para obtener dos porciones semejantes y homogéneas de la muestra (Figura 6), de acuerdo al siguiente procedimiento.

- Registrar el peso total de la muestra a tratar.
- Triturar la muestra (si es necesario) para obtener un tamaño de partícula menor a 2/3 del tamaño de los rifles del cortador (cada abertura de los orificios inferiores de las divisiones del cortador).

- c) Hacer la primera partición en el cortador de Jones para obtener una proporción 1:1 de la muestra.
- d) Tomar una de las porciones de la muestra y realizar el mismo procedimiento (paso c) para obtener una nueva partición de la misma.
- e) La operación debe realizarse hasta obtener muestras con un peso aproximado de 100 a 200 g.

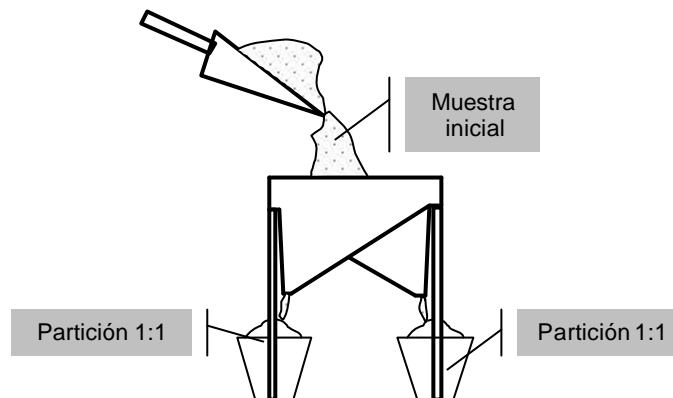


Figura 5. Esquema de operación del cortador de Jones

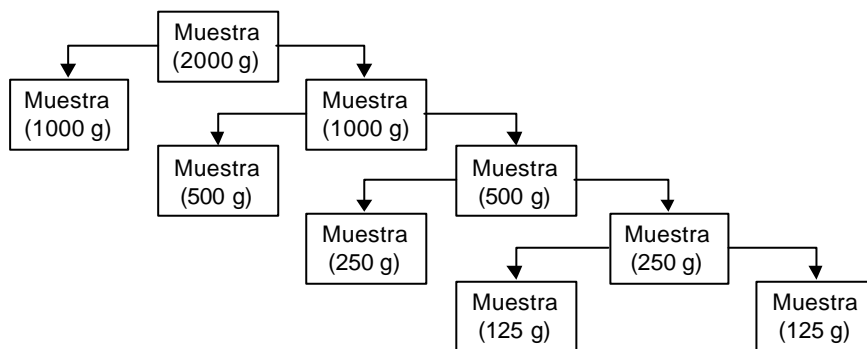


Figura 6. Procedimiento para la separación de muestras con el cortador de Jones. Ejemplo para 2000 g de muestra inicial, obteniendo 16 muestras de 125 g después de 4 separaciones.

2.3. Tamizado

Después del proceso de secado de las muestras de suelos y residuos, éstas fueron tamizadas para el análisis de distribución de partículas. Con los resultados obtenidos en esta fase, se obtendrán gráficos de distribución de tamaño de partícula para cada una de las muestras analizadas, así como la caracterización mineralógica y química de cada fracción. Se llevaron a cabo dos procesos de tamizado: uno en húmedo seguido de uno en seco (Figura 7).

2.3.1. Tamizado en húmedo

La muestra colocada en un tamiz de malla 400 (38 μm) se asperjó con agua. Las partículas <38 μm obtenidas, se colectaron en un recipiente, en donde se adicionó un flocculante para favorecer su sedimentación. Las muestras se dejaron sedimentar, se secaron y se analizaron (Figura 7a).

2.3.2. Tamizado en seco

Las partículas mayores a 35 μm obtenidas después del proceso de tamizado en húmedo, fueron secadas y tamizadas nuevamente para obtener la distribución de tamaño de partícula (Figura 7b). En esta fase de tamizado se utilizaron mallas 270 (0.053 mm), 200 (0.075 mm), 150 (0.106 mm), 100 (0.150 mm), 60 (0.250 mm), 48 (0.300mm), 20 (0.850 mm) y 10 (1.700 mm).

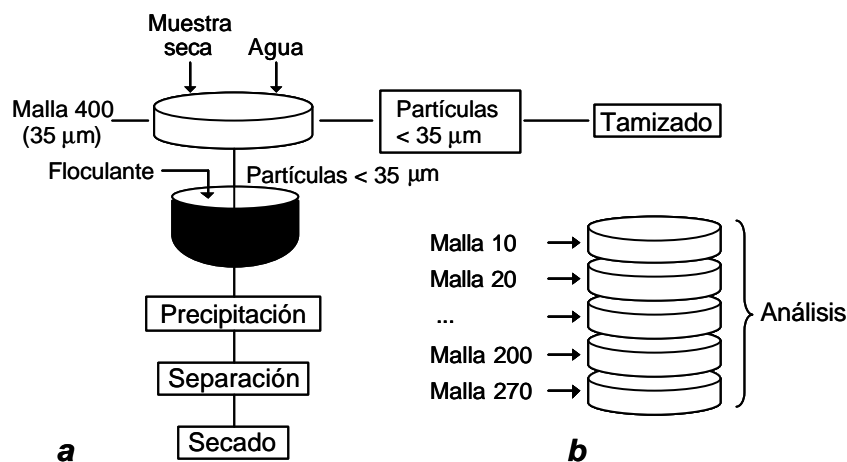


Figura 7. Esquema del proceso de tamizado. *a*: proceso en húmedo; *b*: proceso en seco

2.4. Conservación de muestras

Una vez que las muestras se encuentran secas y tamizadas, cada fracción de diferente tamaño de partícula se conservó a temperatura ambiente en bolsas de plástico selladas hasta su utilización.

3. Caracterización de muestras

3.1. Tamaño de partícula

Como se mencionó anteriormente, en esta fase se determinará la distribución del tamaño de partícula de cada fracción, y posteriormente se realizará el análisis mineralógico y químico de cada muestra, con el objeto de sentar bases para proponer una tecnología de remediación para cada sitio de estudio.

3.2. Caracterización química

La caracterización química de cada una de las fracciones de las muestras se llevó a cabo en el Laboratorio de Análisis Ambientales del CENICA con el uso de un analizador ICP, para 15 metales que fueron seleccionados con base en la mineralogía de los sitios y las referencias de estudios

anteriores. El contenido de oro en las muestras no se determinó, debido a que no se cuenta con el equipo necesario para su cuantificación.

Dentro de la caracterización química de las muestras, se evaluó el contenido de metales en lixiviados de las muestras sin tamizar. La lixiviación de las muestras se llevó a cabo mediante el método EPA 1311, diseñado para determinar la movilidad de analitos orgánicos e inorgánicos presentes en residuos sólidos o líquidos.

3.3. Caracterización mineralógica

La caracterización mineralógica de las fracciones obtenidas se realizó en los laboratorios analíticos del Consejo de Recursos Minerales (COREMI) en Oaxaca, por medio de difracción de rayos X.

RESULTADOS Y DISCUSION

1. Distribución del tamaño de partícula

En las Figuras 8 y 9 se muestra la distribución de tamaño de partícula, entre las mallas 10 (1.7 mm) y 400 (38 μm) para las muestras tomadas en El-Triunfo-San Antonio y Santa Rosalía, respectivamente. Puede observarse que en general, la distribución del tamaño de partícula en las muestras de ambas zonas de estudio siguió un patrón similar. Es decir, todas las muestras en general mostraron un comportamiento similar en cuanto a distribución de tamaño de partícula.

Puede verse que en las muestras correspondientes a colas de cianuración (T_1), cenizas (T_8) y jales (T_9), provenientes de El Triunfo-San Antonio (Figura 8), la fracción predominante fue la de tamaño de partícula menor a 38 μm (malla 400). En cambio, en las muestras de suelo natural (T_6 y T_7), se observó menor cantidad de partículas finas y una predominancia de fracciones más gruesas.

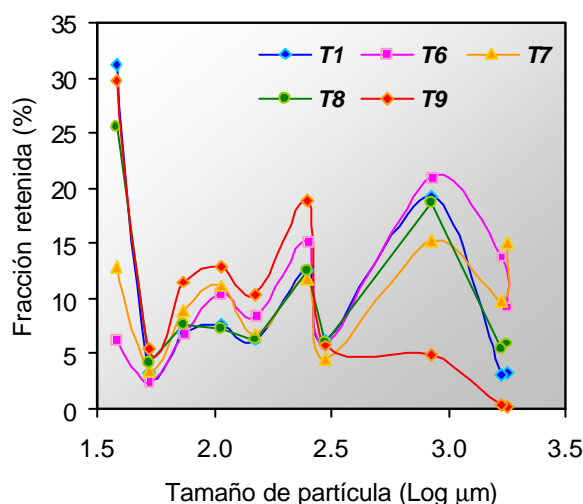


Figura 8. Distribución de tamaño de partícula de muestras provenientes de la zona de El-Triunfo-San Antonio. Los datos de las abscisas corresponden al logaritmo del tamaño de partícula correspondiente a cada tamiz.

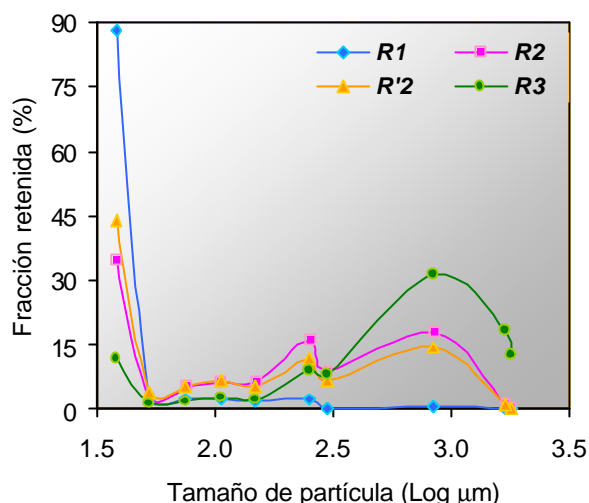


Figura 9. Distribución de tamaño de partícula de muestras provenientes de Santa Rosalía. Los datos de las abscisas corresponden al logaritmo del tamaño de partícula correspondiente a cada tamiz.

Con respecto a la zona de Santa Rosalía (Figura 9), en las muestras provenientes de la presa de jales (R_1 , R_2 y R'_2), la fracción predominante fue la fracción con tamaño de partícula menor a $38 \mu\text{m}$ (88, 35 y 44%, respectivamente), a diferencia de la muestra de escorias (R_3), en la cual las fracciones predominantes fueron las de tamaño de partícula mayor a 0.25 mm (80% del total). Es importante resaltar que la muestra R_1 , fue tomada directamente de la presa de jales, en el sitio en donde se concentraba la fracción fina de los residuos.

Los resultados obtenidos en esta fase del estudio son determinantes para una posterior definición de posibles propuestas tecnológicas de remediación de los sitios.

2. Caracterización química

En las Tablas 3 y 4 y en el Anexo 1, se presentan los resultados del análisis químico cuantitativo para las muestras obtenidas de El Triunfo-San Antonio y Santa Rosalía, respectivamente, para diferentes tamaños de partícula de cada muestra. Se incluyen los límites máximos permisibles (LMP) para algunos elementos potencialmente tóxicos en suelos, propuestos por la PROFEPA en base a estudios de riesgo.

Es importante mencionar que actualmente se está elaborando la Norma Oficial Mexicana (NOM) que establece los criterios para la remediación de suelos contaminados con metales y metaloides, por lo que eventualmente los criterios interinos serán reemplazados. Se consideraron los criterios de limpieza para suelo industrial y residencial, ya que en los dos distritos mineros visitados se encontraron asentamientos humanos prácticamente dentro de la zona afectada.

En ninguna de las muestras provenientes de las dos zonas mineras se detectó la presencia de Se, dentro de los límites de detección de los equipos de análisis. Asimismo, las concentraciones de Hg

encontradas en ambas zonas no rebasaron los LMP de los criterios interinos, ni aún en las muestras provenientes de la zona donde se reporta el empleo de la técnica de amalgamamiento para la obtención de Au y Ag. Posiblemente la ausencia de Hg en las muestras se deba a que todos los residuos han estado expuestos a la intemperie por varias décadas, por lo que este metal pudo haberse volatilizado.

2.1. Región de El Triunfo-San Antonio

En la Figura 10, se muestran los patrones de distribución en función al tamaño de partícula, de las concentraciones de algunos de los metales considerados en los criterios interinos de la PROFEPA, además de los contenidos de cobre y plata en la zona de El Triunfo.

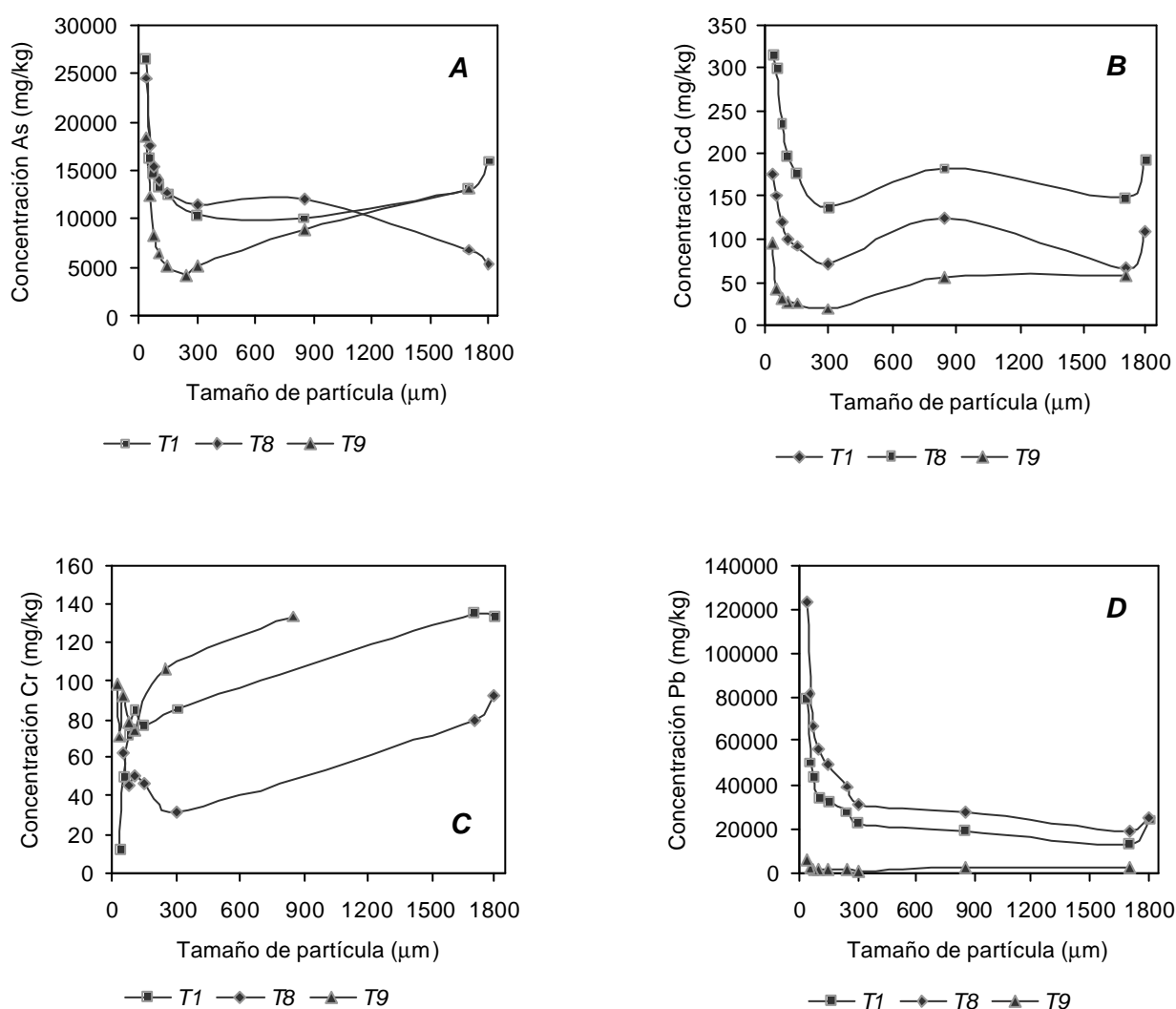


Figura 10. Distribución de la concentración de algunos metales en función al tamaño de partícula, para muestras de cenizas y jales de la región de El Triunfo. Se muestran algunos de los metales considerados en los criterios interinos que presentaron un patrón en función al tamaño de partícula. A: arsénico; B: cadmio; C: cromo; D: plomo; E: cobre y F: plata.

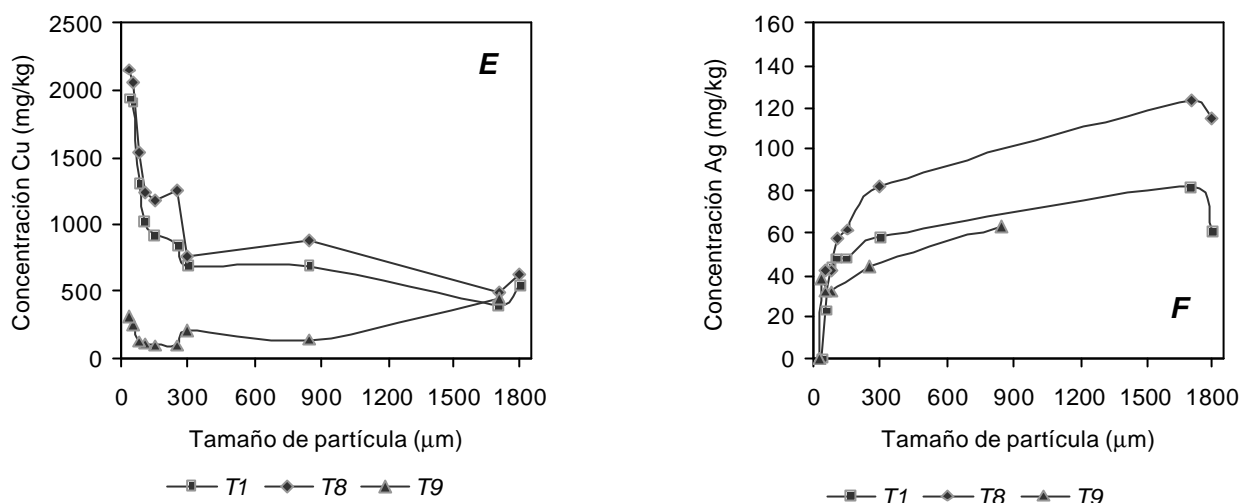


Figura 10 (continuación). Distribución de la concentración de algunos metales en función al tamaño de partícula, para muestras de cenizas y jales de la región de El Triunfo. Se muestran algunos de los metales considerados en los criterios interinos que presentaron un patrón en función al tamaño de partícula. A: arsénico; B: cadmio; C: cromo; D: plomo; E: cobre y F: plata.

En la región de El Triunfo se confirmó la presencia de altas concentraciones de As (hasta 34 456 mg/kg) en las muestras de jales y cenizas obtenidas en dicho sitio, debido probablemente a que el mineral procesado para la obtención de oro y plata es precisamente arsenopirita (FeAsS). En este lugar, la concentración de As en todas las muestras de residuos e incluso en las de suelo natural (Tabla 3), rebasan los LMP para uso de suelo residencial establecidos por la PROFEPA. En los residuos del proceso de extracción de Au y Ag, las mayores concentraciones de As se encontraron en las partículas $< 35 \mu\text{m}$ (Figura 10 A).

Prácticamente en todas las muestras de residuos y suelos se encontró Cd en concentraciones importantes (Tabla 3 y Anexo 1). Se observó que en general, las mayores concentraciones del metal (hasta 313 mg/kg en cenizas) se presentaron en la fracción menor a $35 \mu\text{m}$ (Figura 10 B). Aunque la concentración de Cd en las muestras de suelo natural no rebasó el LMP para el rubro industrial, ésta se encuentra por arriba del criterio que aplica para uso de suelo residencial. En las muestras T_1 (colas de cianuración) y T_8 (cenizas) se encontraron las mayores concentraciones de este metal.

En la mayoría de las muestras se detectó presencia de Cr, sin embargo, en ninguno de los casos se obtuvieron concentraciones mayores que las establecidas en los criterios interinos. En este caso se observó que al aumentar el tamaño de partícula, la concentración de Cr también se incrementa (Figura 10 C). Para el caso del Ni, al igual que el Cr, las mayores concentraciones se detectaron en las muestras de suelo natural. Para el caso del Ni, las dos muestras de suelo natural (T_6 y T_7) excedieron los LMP para uso de suelo residencial.

En todas las muestras provenientes de los residuos del proceso de extracción de Ag (T_1 , T_8 y T_9), se detectaron concentraciones de Pb que exceden hasta en 400 veces (muestra T_1) los LMP para uso

de suelo residencial. Para este caso, al igual que para As y Cd, las mayores concentraciones del metal se detectan en las partículas más finas (Figura 10 D).

Tabla 3. Contenido de metales en muestras de suelo natural de la región de El Triunfo - San Antonio, BCS

Tamaño de partícula (μm)				T ₆ (Suelo natural)			T ₇ (Suelo natural)		
				850-1700	250-300	<38	850-1700	250-300	<38
	LMP ^a (mg/kg)		LD ^b (mg/kg)	Concentración de metales (mg/kg)					
	Ind	Res							
As	40	20	0.4	45	106	675	12	27	279
Ca	--	--	3.8	32839	32491	34810	44676	42428	36270
Cd	100	20	2.6	79.2	76.4	95.5	88.2	93.2	91.3
Co	--	--	2.2	35.3	25.9	41.9	<LD	39.1	35.2
Cr	750	375	2.8	62.0	121.0	76.2	69.4	161.7	175.4
Cu	--	--	4.0	150	194	638	240	316	682
Fe	--	--	3.0	45912	57535	83224	53595	66924	72758
Mn	--	--	0.2	858	681	1137	990	941	793
Ni	700	150	3.4	113	143	216	172	234	266
Pb	1500	200	6.0	196	195	641	179	187	341
Sb	--	--	6.2	26.3	23.5	352.7	5.8	1.6	109.5
Se	100	20	0.2	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Ag	--	--	1.2	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Ba	1500	750	1.6	382	607	1813	7167	556	485
K	--	--	2.0	6950	10637	13349	7147	9510	9224
Zn	1500	800	1.0	151	243	1205	123	167	416
Hg	100	20	0.06	<LD	<LD	1.22	<LD	<LD	0.47

^a LMP. Límites máximos permisibles de los criterios interinos establecidos por la PROFEPA

^b LD. Límite de detección CENICA

Las marcas gris claro (■) y gris oscuro (■), indican las concentraciones de metales que exceden los LMP para uso de suelo agrícola e industrial, respectivamente.

NOTA: los resultados para todos los tamaños de partícula del resto de las muestras (T₁, T₈ y T₉), se presentan en el Anexo 1.

Otro metal que se encontró en cantidades importantes en las muestras de colas de cianuración, cenizas y jales fue el Zn (Anexo 1), que en todos los casos rebasó los criterios para uso de suelo agrícola. El Sb también se encontró en cantidades elevadas en estas mismas muestras, en este caso, su presencia puede deberse a que la plata puede encontrarse asociada con este metal en diferentes minerales (estefanita (Ag₅SbS₄), polibasita [(Ag,Cu)₁₆Sb₂S₁₁] y plata roja oscura o pirargirita (Ag₃SbS₃)). En la Figura 10 E y F se observa que especialmente en las muestras de colas de cianuración (T₁) y de cenizas (T₈) aún se encuentran valores significativos de plata y cobre (hasta 2 155 y 123 mg/kg, respectivamente), detectándose las mayores concentraciones de Cu en las fracciones más finas y las de Ag en las más gruesas.

Como se mencionó anteriormente, en la zona de El Triunfo-San Antonio, los principales valores extraídos fueron Au, Ag, Pb, Zn y As, por medio de técnicas de cianuración, medio pesado y fundición. Entre los minerales de la zona, se encuentran principalmente Au libre y Au asociado con pirita y arsenopirita, además de estructuras con valores de Au y Ag asociadas con granodiorita, tinaliota,

diorita, grabo, esquisto de biotita y cuarzo feldespático. El procedimiento de cianuración para extracción de Au y Ag consiste en lixiviar el mineral triturado con una solución alcalina de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ con cianuro sódico o potásico inyectando aire al mismo tiempo. De este proceso, se forma $\text{Na}[\text{Au}(\text{CN})_2]$ o $\text{K}[\text{Au}(\text{CN})_2]$, del que se precipita Au con virutas de Zn. El precipitado se seca, calcina y funde con bórax/silicatos para oxidar metales contaminantes (Pb, Fe y Zn) que originan boratos y silicatos. Es posible entonces, que las elevadas concentraciones de Zn, Sb, Pb y Fe en cenizas, jales, e incluso en suelos naturales de la zona de El Triunfo-San Antonio, se deba en gran medida a dichas razones.

Las muestras de suelo natural (T_6 y T_7) se tomaron con el objeto de determinar la posible migración de contaminantes por erosión e incluso escurrimiento (temporada de lluvias) de los montículos. En la zona de muestreo no se observó ninguna evidencia que indicara deposición de material contaminado sobre ellos. Sin embargo, la concentración de la mayoría de los metales analizados, es similar y en ocasiones mayor que las muestras de jales y cenizas. Es decir, los suelos cercanos a la zona, presuntamente no contaminados, contienen altas concentraciones de ciertos metales (As, Cd, Fe, Ni, Pb, Ba y Zn), lo cual puede deberse a la mineralogía propia de la zona, o bien, a un arrastre de contaminantes por factores como viento. Para determinar la posible migración así como la biodisponibilidad de los contaminantes, además del cianuro contenido en los residuos mineros, se determinó la presencia de metales en lixiviados de cada muestra obtenida en la región, estos resultados se muestran en la Tabla 4.

La biodisponibilidad se refiere al grado en el que un receptor biológico (seres humanos y componentes de un ecosistema) queda expuesto a un contaminante en un suelo o sedimento. El proceso de biodisponibilidad puede definirse como las interacciones físicas, químicas y biológicas que determinan la exposición de un organismo a los químicos asociados con un suelo. Recientemente este término se está adoptando como una consideración importante para la determinación de niveles de limpieza (Ehlers y Luthy, 2003). De esta manera, para el caso de este estudio, la biodisponibilidad de los contaminantes en los sitios muestreados se evaluó a través de la proporción del metal que puede solubilizarse en condiciones ácidas.

Tabla 4. Contenido de metales solubles (lixiviables) en las muestras de la región de El Triunfo - San Antonio, BCS

	CMP ^a (mg/L)	LD ^b (mg/L)	Muestra				
			T1	T6	T7	T8	T9
			Concentración (mg/L)				
Ba	100	0.01	<LD	2.12	1.79	<LD	<LD
Cd	1.0	0.002	0.44	<LD	<LD	1.64	0.91
Pb	5.0	0.042	8.84	2.31	<LD	15.21	0.22
Ni	5.0	0.014	0.58	0.03	<LD	0.07	0.57
Ag	5.0	0.022	0.04	<LD	<LD	<LD	0.06
As	5.0	0.001	4.51	0.23	0.44	2.97	3.56
Hg	0.2	0.0003	0.0003	0.0007	<LD	0.0030	<LD
Cu	-	0.007	3.93	<LD	<LD	3.15	0.83
Fe	-	0.011	0.07	0.09	0.14	0.11	23.50

Tabla 4 (continuación). Contenido de metales solubles (lixiviables) en las muestras de la región de El Triunfo - San Antonio, BCS

	CMP ^a (mg/L)	LD ^b (mg/L)	Muestra				
			T1	T6	T7	T8	T9
			Concentración (mg/L)				
Mn	-	0.002	2.21	0.44	0.31	2.13	25.9
Sb	-	0.02	1.21	0.06	0.06	0.86	0.74
Zn	-	0.002	38.86	0.35	0.30	71.06	63.76
Ca	-	0.028	787.6	87.6	86.6	689.6	1059.6
Co	-	0.011	0.03	0.03	<LD	<LD	0.03
Cr ^c	5.0	0.007	<LD	<LD	<LD	<LD	0.01
CN ^d	-	20.1	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD

^a CMP. Concentración máxima permitida en lixiviados, de acuerdo con lo establecido en la NOM-052-ECOL-93. Las marcas grises (■) indican las concentraciones que exceden estos valores.

^b LD. Límite de detección CENICA

^c Los LMP se refieren a Cr(VI)

^d El contenido de cianuros, se refiere a cianuros reactivos

Puede observarse que para las muestras de colas de cianuración (T₁) y de cenizas (T₈), el contenido de plomo y cadmio en lixiviados exceden las concentraciones máximas permitidas de la NOM-052-ECOL-93. La importancia de esta determinación radica en que el contenido total de los metales detectados como contaminantes, (i) puede encontrarse formando parte de la mineralogía propia del sitio, o bien (ii) éstos pueden transformarse o incorporarse en fases sólidas que se vuelven más estables con el tiempo, lo cual puede conducir a una disminución en la biodisponibilidad del contaminante, este proceso se conoce como envejecimiento o intemperización (Ehlers y Luthy, 2003). Es decir, el contenido de metales encontrados en lixiviados, son las fracciones del contaminante que se encuentran biodisponibles y a las que la población o el ecosistema pueden quedar expuestos.

2.2. Región de Santa Rosalía

Como se mencionó, los depósitos de la zona de Santa Rosalía contienen Cu y Co en estructuras minerales como calcosita, covelita, bornita, calcopirita, cobre nativo y galena, además de algunos minerales secundarios como malaquita, azurita, crisocola, oxiclورو de cobre, boleíta, cumengeíta, pseudoboleíta y cuprita. Estas estructuras poseen además valores de Au, Ag, Pb y Zn, por lo que también pueden encontrarse sulfuros, carbonatos, sulfatos y óxidos dentro de las formas minerales anteriores (COREMI, 1999).

En ninguna de las muestras provenientes de esta región (Anexo 1 y Tabla 5), con excepción de una de las obtenidas en la presa de jales (R₁), se detectó presencia de As. Este resultado, así como las altas concentraciones de Ca, se debe a las características de los minerales de la zona, los cuales no contienen As en cantidades significativas. Por otra parte, en todas las muestras analizadas se encontraron concentraciones significativas de Co, lo que corresponde a la mineralogía característica de la región. En la Tabla 5 se muestran los contenidos de metales para estas muestras.

Tabla 5. Contenido de metales en muestras de jales intemperizados y escorias de la región de Santa Rosalía, BCS

Tamaño de partícula (µm)	R ₂ (Jales intemp.)			R ₃ (Muestra negra)			R ₄	R ₅				
	850-1700	250-300	<38	850-1700	250-300	<38	--	--				
LMP ^a (mg/kg)	LD ^b (mg/kg)	Concentración de metales (mg/kg)										
		Ind	Res									
As	40	20	0.4	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Ca	--	--	3.8	11756	18427	13327	17135	12300	14053	30165	88043	
Cd	100	20	2.6	64.6	58.9	62.7	85.3	87.4	74.4	8.8	65.6	
Co	--	--	2.2	1158.0	562.7	265.1	883.1	491.3	363.9	499.1	1091.9	
Cr	750	375	2.8	114.4	33.9	41.4	1076.3	605.7	629.1	7.1	103.9	
Cu	--	--	4.0	21896	11811	9138	81153	57437	98800	8273	6191	
Fe	--	--	3.0	89390	79912	75578	158390	170493	101580	35962	132502	
Mn	--	--	0.2	34433	25799	7375	72247	59194	39032	36639	49492	
Ni	700	150	3.4	222	136	158	765	437	588	61	161	
Pb	1500	200	6.0	715	1111	656	670	712	847	237	579	
Sb	--	--	6.2	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	21.5	36.0	
Se	100	20	0.2	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	
Ag	--	--	1.2	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	
Ba	1500	750	1.6	2935	4663	1237	7559	14590	1821	4167	6357	
K	--	--	2.0	6116	6969	8498	5849	6580	7691	6739	15725	
Zn	1500	800	1.0	4635	3860	4470	4211	3458	4361	4635	8407	
Hg	100	20	0.06	0.57	0.54	0.58	2.01	1.56	2.46	0.19	0.79	

^a LMP. Límites máximos permisibles de los criterios interinos establecidos por la PROFEPA

^b LD. Límite de detección CENICA

R₄ y R₅ corresponden a muestras de escorias

Las marcas en color gris claro (■) y gris oscuro (■), indican las concentraciones de metales que exceden los LMP para uso de suelo agrícola e industrial, respectivamente.

NOTA: los resultados para las muestras R₁ y R₂, incluyendo todos los tamaños de partícula analizados, se presentan en el Anexo I.

Por otro lado, aunque se detectó presencia de Cr en las muestras de la presa de jales y de escorias, ninguna de ellas, con excepción de la muestra de escoria negra de la presa de jales (R₃), excedió los LMP de los criterios interinos. Sin embargo, para el caso del Cd, todas las muestras excedieron los LMP para uso de suelo residencial. El Cd principalmente se obtiene como subproducto en el procesado de minerales de Zn, Cu y Pb, a partir de polvos arrastrados por los gases de tostación de los sulfuros de dichos elementos, lo cual sugiere que la presencia de este metal en elevadas concentraciones, se debe al procesamiento del cobre en la zona.

Al igual que en las muestras de El Triunfo-San Antonio, las cantidades elevadas de Fe, Ni, Pb y Zn pueden atribuirse a las características mineralógicas propias de la zona, o bien a la contaminación derivada del proceso de obtención de cobre. Generalmente los minerales de cobre se encuentran asociados con hierro, níquel, plomo, plata y oro. En la Figura 11 se muestran la distribución del contenido de metales en función del tamaño de partícula para cada muestra.

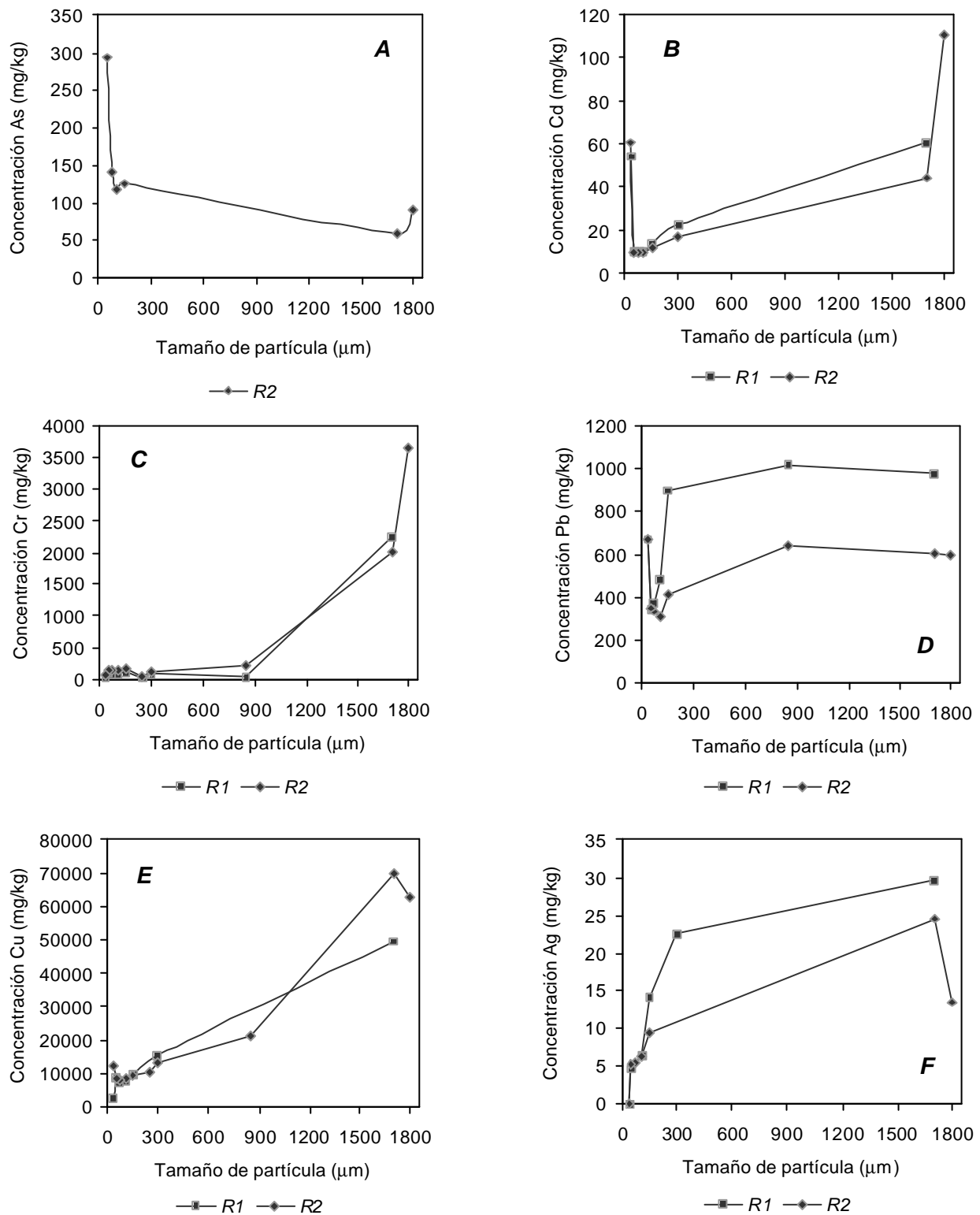


Figura 11. Distribución de la concentración de algunos metales en función al tamaño de partícula, para muestras obtenidas en la presa de jales de la región de Santa Rosalía. Se muestran algunos de los metales considerados en los criterios interinos que presentaron un patrón en función al tamaño de partícula. A: arsénico; B: cadmio; C: cromo; D: plomo; E: cobre y F: plata.

Para la región de Santa Rosalía se observó que, en general, las concentraciones más altas de metales se concentran en las partículas de mayor tamaño (Figura 11). Esta información es de gran utilidad para plantear un proceso eficaz para la remediación de los sitios contaminados. En las muestras provenientes de la presa de jales, se detectaron niveles de zinc y de bario (Anexo I), de 2 a 3 y de 2 a 8 veces mayores, respectivamente, que los niveles máximos permitidos por la PROFEPA. Otro dato importante a considerar para el planteamiento de una estrategia de recuperación para este sitio, es que los valores de cobre contenidos en general (para todos los tamaños de partícula) exceden los 3 000 mg por kg de residuos, y que las concentraciones promedio de cobre son de 8 149 mg/kg para la muestra R₁ y de 22558 mg/kg para la muestra R₂. Cabe mencionar que las mayores concentraciones de Cu se registraron en las muestras con tamaño de partícula mayor a 250 µm.

Una opción para el reciclaje de Cu puede ser sencillamente a través de su refundición y combinación con cobre electro-refinado. Aleaciones de cobre o mezclas físicas con otros metales, pueden fundirse por fundición primaria o secundaria y combinarse, a lo largo de los ánodos, con el metal virgen antes de un electo-refinamiento (Wernick y Themelis, 1998).

Adicionalmente a la caracterización de metales en fracciones con diferente tamaño de partícula, como parte de la caracterización química, se incluye la determinación de metales en lixiviados obtenidos de las muestras. En la Tabla 6 se muestran los resultados obtenidos, y se comparan con los CMP para lixiviados de residuos peligrosos establecidos en la NOM-052-ECOL-93.

Tabla 6. Contenido de metales solubles (lixiviables) en muestras de Santa Rosalía, BCS

	CMP ^a (mg/L)	LD ^b (mg/L)	Muestra					
			R ₁	R ₂	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅
			Concentración (mg/L)					
Ba	100	0.01	<LD	<LD	<LD	0.08	0.29	0.39
Cd	1.0	0.002	0.11	0.29	0.33	0.83	<LD	<LD
Pb	5.0	0.042	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Ni	5.0	0.014	0.62	1.58	0.90	5.77	0.02	0.03
Ag	5.0	0.022	0.04	<LD	<LD	0.05	<LD	<LD
As	5.0	0.001	0.002	<LD	0.002	<LD	0.002	0.006
Hg	0.2	0.0003	0.0004	<LD	<LD	0.0005	<LD	0.0004
Cu	-	0.007	25.4	304.9	194.9	1959.9	3.5	9.6
Fe	-	0.011	0.13	<LD	0.13	<LD	0.71	0.60
Mn	-	0.002	273.0	127.0	136.0	246.0	1.91	0.71
Sb	-	0.02	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Zn	-	0.002	24.76	19.26	25.26	14.26	0.61	0.32
Ca	-	0.028	623.6	470.6	463.6	425.6	57.9	7.6
Co	-	0.011	1.39	1.34	1.38	2.96	0.03	0.09
Cr ^c	5.0	0.007	0.11	0.24	0.13	0.10	<LD	<LD
CN ^d	-	20.06	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD

^a CMP. Concentración máxima permitida en lixiviados, de acuerdo con lo establecido en la NOM-052-ECOL-93. Las marcas grises (■) indican las concentraciones que exceden estos valores.

^b LD. Límite de detección CENICA

^c Los LMP se refieren a Cr(VI)

^d El contenido de cianuros, se refiere a cianuros reactivos

En la región de Santa Rosalía, el contenido de metales lixiviables contenidos en los jales así como en las escorias, en general, no representa un riesgo para la población en base a su biodisponibilidad. Es posible que por el tiempo transcurrido entre la explotación minera en el lugar hasta el día de hoy, los metales contenidos en los materiales no se encuentren biodisponibles (intemperización).

La capacidad de un metal en solución para provocar algún efecto negativo en el ambiente depende de su solubilidad, y su capacidad para lixiviar a través del suelo se relaciona directamente con las características fisicoquímicas y composición del medio. Debido a que los metales no se destruyen, la remediación de un suelo contaminado con metales consiste principalmente en manipular (fijar o estabilizar) la movilidad de los contaminantes para producir un suelo con un contenido aceptable de metales lixiviables. La movilidad de los metales en el suelo, depende además de: (i) tipo de suelo (características fisicoquímicas); (ii) concentración y especiación del metal; (iii) concentración y tipo de iones y ligandos que se acomplejan; (iv) presencia de compuestos orgánicos e inorgánicos; (v) pH; (vi) potencial redox (EPA, 1997).

3. Caracterización mineralógica

Los resultados obtenidos del análisis por difracción de rayos X para dos de las muestras (R₂ y T₁) se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados del análisis por difracción de rayos X

PORCIÓN DE LA MUESTRA	MUESTRA	
	R ₂	T ₁
Mayor	Yeso	Cuarzo
Mediana	Feldespato	Yeso Hematita
Menor	Hornblenda Hematita	Feldespato Escoradita Magnetita Muscovita Arsenolita
Pequeña	Cuarzo Arsenopirita	

En los resultados que se muestran en la Tabla 6 se verifica la presencia de diferentes minerales. En las muestras de la presa de jales de la región de Santa Rosalía se encontró hematita, arsenopirita, y cuarzo, aunque no se cuenta con las leyes de estos compuestos; también se encontró yeso y feldespato en los residuos, lo cual explica la presencia de metales como K, Ca y Ba. En esta misma región, se detectó presencia de hornblenda, que puede aportar principalmente Al y Si.

Otros minerales detectados en la zona de El Triunfo fueron muscovita, escoradita y magnetita, que pueden aportar metales como Fe, Al, Si y K en las muestras analizadas. Sin embargo, no se tiene registro del uso de algunos de estos minerales en estos sitios para el beneficio de metales.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en datos históricos del sitio y en la caracterización fisicoquímica de muestras de residuos y suelos obtenidas en las regiones mineras de El Triunfo-San Antonio y Santa Rosalía, en el presente informe se plantea un diagnóstico preliminar acerca del estado actual de contaminación por metales en dichos sitios.

El Triunfo-San Antonio

La zona de El Triunfo-San Antonio presenta problemas de contaminación con altas concentraciones (muy superiores a los LMP establecidos por la PROFEPA) de As, Cd, Pb y Zn en los residuos mineros, e incluso en suelos naturales. Sin embargo, es importante mencionar que el As, Pb y Zn forman parte de los minerales que se procesan en la zona. Por otra parte, aunque se tienen registros del uso de Hg para el beneficio de Au y Ag en la zona, no se detectaron contenidos significativos del metal en los residuos, esto puede deberse a la volatilización del metal con el paso del tiempo.

Los mayores niveles de As ($> 20\ 000$ mg/kg) se encontraron en cenizas y colas de cianuración. Sin embargo, aunque las muestras de jales presentaron menos As, éstas rebasan en más de 400 veces los LMP para uso de suelo industrial. Es importante mencionar que aunque el metal fue encontrado en lixiviados, su concentración no supera las CMP (5 mg/L).

En todas las muestras de la región, los niveles de Cd rebasaron el LMP para uso de suelo residencial. Se registraron concentraciones significativas (> 300 mg/kg) en las cenizas y colas de cianuración, así como en suelos naturales (cerca de 100 mg/kg) y lixiviados (hasta 1.64 mg/L). El contenido de Pb en colas de cianuración y cenizas rebasó el LMP para uso de suelo industrial en más de 80 veces, registrándose valores promedio $> 35\ 000$ mg/kg y máximos $> 120\ 000$ mg/kg, en los lixiviados de estas muestras también se encontraron niveles de Pb superiores a la CMP. En suelo natural se registraron valores por arriba del LMP para uso de suelo residencial.

En general, se observaron patrones de distribución para la mayoría de los elementos cuantificados en función al tamaño de partícula. Pudo detectarse que la mayor concentración de los contaminantes normalmente se encuentra en la fracción más fina (tamaño de partícula $< 38\ \mu\text{m}$), con excepción del Ca y Cr que se encontraron más concentrados en la fracción más gruesa (partículas $> 1\ 700\ \mu\text{m}$).

De acuerdo con los resultados obtenidos, es recomendable tener especial cuidado con la zona cercana a las cenizas de tostación (T_8), ya que se trata de una muestra superficial (fácil exposición) y su contenido de metales tóxicos (As, Cd, Pb y Zn) es muy elevado. Este resultado indica que el contacto con este material puede resultar potencialmente peligroso.

Santa Rosalía

Uno de los problemas más serios en esta región, es la gran cantidad de escorias de fundición. Aunque se registraron altas concentraciones de Cd (> 65 mg/kg), Ni (> 160 mg/kg), Pb (> 500 mg/kg), Ba ($> 6\ 000$ mg/kg) y Zn ($> 8\ 000$ mg/kg) en estas muestras, es posible que dichos metales se encuentren en formas estables no lixiviables, ya que no se detectaron cantidades significativas de los metales en sus lixiviados. En los lixiviados de estos residuos, recolectados de dos diferentes lugares,

solamente se detectaron cantidades significativas de Cu y Ca, lo cual no representa un riesgo a la salud. Por lo anterior, puede concluirse que el principal problema de este tipo de residuos es su volumen, no su toxicidad.

Por otra parte, con respecto a los jales contenidos en la presa, fue en el lado oeste de ésta en donde se detectaron las mayores concentraciones de contaminantes, especialmente de As (casi 300 mg/kg) y Cr (más de 3 000 mg/kg). En la gran mayoría de las muestras analizadas se detectaron concentraciones de Cd y Pb que superan los LMP para uso de suelo residencial (hasta 111 y 1 552 mg/kg, respectivamente). Otros dos metales que se encontraron en cantidades que superan los LMP para uso de suelo residencial fueron el Ba (> 14 000 mg/kg) y el Zn (> 5 000 mg/kg). Sin embargo, en general no se detectaron niveles significativos de metales tóxicos en solución (biodisponibles), por lo que las concentraciones detectadas pueden deberse a su presencia en formas minerales estables propias de la zona.

En todos los residuos analizados se detectaron cantidades elevadas de Cu, alcanzándose concentraciones superiores a 60 g/kg en la presa de jales, y una distribución del metal en función al tamaño de partícula: la mayor concentración de Cu se encontró en las partículas de mayor tamaño.

En general, estas muestras no presentaron patrones de distribución claros en cuanto a la concentración de metales en función al tamaño de partícula, con excepción del Cu, Cr, Cd, Ba y Ag, para los que la concentración sí se incrementa proporcionalmente con el tamaño de partícula.

Recomendaciones generales

Con base en el diagnóstico preliminar presentado y en las condiciones particulares de cada sitio, de manera preliminar, puede recomendarse el uso de alguna(s) de las siguientes alternativas para la recuperación y/o disminución de potenciales riesgos en los sitios de estudio:

El Triunfo-San Antonio. Es importante mencionar que para plantear una alternativa definitiva para la recuperación de este sitio, es necesario contar con datos precisos de los volúmenes de residuos acumulados en la zona, actividad no contemplada en esta etapa del estudio. De manera preliminar y debido a la detección de zonas potencialmente peligrosas por su alto contenido de metales tóxicos, especialmente residuos de cenizas de tostación, puede plantearse su contención o recubrimiento con material impermeable, con el objeto de evitar la dispersión y lixiviación de los contaminantes. En una etapa posterior, pueden realizarse estudios específicos con muestras del sitio con técnicas de fitoextracción (selección de especies adecuadas para las condiciones del lugar) y/o estabilización/solidificación.

Santa Rosalía. Para esta región se recomienda la reparación del muro de contención existente en la presa de jales y la construcción de un nuevo muro en la zona más cercana al mar, con el fin de evitar el deslizamiento de residuos hacia el mar. Por otra parte, por el alto contenido de cobre en los jales contenidos en la presa (hasta 60 g/kg), existe la opción de un reprocesamiento para su recuperación. Con respecto a las escorias, cuyo principal problema es el volumen, pueden plantearse algunas alternativas para su utilización, por ejemplo, como material de relleno, para construcción de carreteras o para sandblasteo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Acosta, B., Méndez, L.R., Romero, H.S. y Ortega, A.R. 2000. Recomendaciones ambientales para la restauración del complejo minero El Triunfo, Baja California Sur. Informe técnico. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste.
2. Carrillo, A. y Drever, J.L. 1997. Environmental assessment of the potential for arsenic leaching into groundwater from mine wastes in Baja California Sur, México. Department of geology and geophysics. University of Wyoming, Laramie, Wyoming, USA.
3. CCA. 2002. Resumen de derecho ambiental en los Estados Unidos. Informe de la Comisión de Cooperación Ambiental del Tratado de Libre Comercio de América del Norte
4. COREMI. 1999. Monografía geológico-minera del estado de Baja California Sur. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Coordinación General de Minería, México. 237 pp.
5. Delegación SEMARNAT-BCS. 2001. Sitios contaminados con residuos sólidos peligrosos de origen minero. Informe presentado por la Delegación de la SEMARNAT en Baja California Sur a la Dirección General del CENICA. La Paz, BCS., enero de 2001.
6. Ehlers, L.J. y Luthy, R.G. 2003. Contaminant bioavailability in soil and sediment. *Environmental Science and Technology*. August: 292-302.
7. Gaceta Consular. 1997. México en el corazón de Texas: Baja California Sur. VI (29).
8. González, A. G. 1995. Información general sobre la existencia de jales y terreros en el distrito El Triunfo-San Antonio. Consejo de Recursos Minerales, La Paz, BCS.
9. González, E. C. 1985. La inversión francesa en la minería durante el porfiriato: la compañía El Boleo, Santa Rosalía, Baja California Sur. Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz.
10. Gutiérrez Ruiz, M.E. y Moreno Turrent, M. 1995. Los residuos en la minería mexicana. En: Garfias y Ayala, F.J. y Barojas Weber, L. (Eds.). *Residuos Peligrosos en México*. SEMARNAP - INE. Primera Edición. 126 pp.
11. Industrial Minerals. 1997. Feldespato y arenas feldespáticas. Mineral Commodity Summaries. USA.
12. INEGI, 2003. http://bcs.inegi.gob.mx/territorio/espanol/info_geo.html
13. INEGI. 2001. Tabulados Básicos. Estados Unidos Mexicanos. XII Censo General de Población y Vivienda, 2000. México
14. INEGI-BCS. 2002. Información geográfica de Baja California Sur. Aspectos geográficos de Baja California Sur en la página Web del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
15. Meagher, R.B. 2000. Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants. *Current Opinion in Plant Biology*, 3:153-162
16. Minera paredones amarillos. 1997. Diseño final de la presa de jales. Proyecto paredones amarillos. Informe del proyecto No. 7-417-000152, Baja California Sur. Diciembre, 1997.
17. Mining watch Canada. 2000. Federal timidity on tough regulations to limit mine pollution places communities, environment at risk. City Centre Building Wellington. Ottawa, Ontario, Canada

18. Perales, F.A. 1993. Plano general de los terrenos que solicitan en renta al H. Ayuntamiento de Mulegé, Baja California Sur. Compañía Minera de Loreto, S. de R.L. de C.V., Santa Rosalía, Baja California Sur.
19. PROFEPA. 2000. Segundo grupo de criterios interinos de restauración de suelos contaminados con inorgánicos tóxicos (metales pesados) y otros. Actualizados en la XXV reunión del GDT, 9 de febrero de 2000.
20. Riser-Roberts, E. 1998. Remediation of petroleum contaminated soils. *Lewis Publishers*. USA
21. Rivas, I. 2000a. El desarrollo minero en San Antonio y El Triunfo, Baja California 1856 – 1925. COBACH.
22. Rivas, I. 2000b. El “Progreso Mining Company”. Su impacto social en el triunfo, Baja California, 1878-1905. Artículo publicado en la página Web de la Universidad Autónoma de Baja California Sur
23. Rodríguez, G.F., Shumlin, E., Páez, F.O., Nava, E.O. y Sapozhnikov. D. 1998. Ocurrencia de metales y metaloides en sedimentos superficiales de cuatro abanicos-delta de la costa oriental de Baja California Sur. Instituto Nacional de Geoquímica. Actas INAGEQ, pp. 43-50.
24. Salt, D. E., Smith, R.D. y Raskin, I., 1998. Phytoremediation. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 49: 643-668
25. U.S. Environmental Protection Agency. 1997. Recent developments for in situ treatment of metal contaminated soils. Office of Solid Waste and Emergency Response. *Technology Innovation Office*. Washington D.C. 48 pp.
26. Van Cauwenberghe, L. 1997. Electrokinetics. Technology evaluation reports TO-97-03. GWRTAC E series. USA. <http://www.gwrtac.org>.
27. Wernick, I.K. y Themelis, N.J. 1998. Recycling metals for the environment. *Annu. Rev. Energy Environ.* 23: 465 - 97

ANEXO 1. Resultados de la caracterización química

Tabla 8. Caracterización química de la muestra T_1 , correspondiente a colas de cianuración de El Triunfo (10 - 250 cm).

	LMP ^a (mg/kg)		LD ^b (mg/kg)	Tamaño de partícula (µm)									
	Ind	Res		> 1700	850-1700	300-850	250-300	150-250	106-150	75-106	53-75	38-53	<38
As	40	20	6.0	15984	13155	10099	10369	13519	12589	13335	14704	16406	26300
Ca	--	--	4	25915	23919	10700	8268	9302	8678	7969	7990	8799	8784
Cd	100	20	2.0	109.2	67.4	125.2	71.5	144.0	92.9	100.4	120.3	149.6	176.0
Co	--	--	1.0	30.9	80.3	51.7	50.1	48.0	68.7	72.9	79.7	86.8	86.0
Cr	750	375	0.6	133.1	135.1	<LD	84.8	<LD	76.8	84.5	72.3	49.9	12.8
Cu	--	--	1	546	403	686	683	849	923	1020	1303	1909	1935
Fe	--	--	2	67854	78533	124488	158091	144440	183479	181836	195457	203363	211040
Mn	--	--	0	344	431	483	664	638	941	1008	1251	1471	2009
Ni	700	150	1.0	15.4	14.7	12.0	12.8	20.0	18.7	26.8	25.9	31.3	58.0
Pb	1500	200	2	24728	13275	19676	22977	27663	32367	34579	43435	50450	79753
Sb	--	--	4	2097	1662	3108.7	3260	4229.4	4587	5068	6177	6942	7500
Zn	1500	800	0	8230	5063	14715	15181	24366	26013	33188	34071	38717	47800
Ag	--	--	4.0	60.9	81.5	<LD	58.3	<LD	47.9	47.9	43.2	23.3	<LD
Ba	1500	750	2	362	576	382	336	275	389	372	385	389	399
K	--	--	**	7260	9906	6724	7306	6684	7367	7572	7551	6883	7098
Hg	100	20	0.1	1.10	2.30	0.54	1.50	0.48	1.40	1.40	1.90	1.80	0.99

^a LMP. Límites máximos permisibles de los criterios interinos establecidos por la PROFEPA

^b LD. Límite de detección CENICA

Las marcas grises (■) indican las concentraciones de metales que exceden los LMP para uso de suelo industrial.

Tabla 9. Caracterización química de la muestra T_8 , correspondiente a cenizas de tostación tomadas en El Triunfo (muestra superficial: 0 - 10 cm).

	LMP ^a (mg/kg)		LD ^b (mg/kg)	Tamaño de partícula (µm)									
	Ind	Res		> 1700	850-1700	300-850	250-300	150-250	106-150	75-106	53-75	38-53	<38
As	40	20	6.0	5229	6814	12037	11335	14757	12815	14031	15409	17390	24468
Ca	--	--	4	37659	34658	15375	10983	10870	9869	8712	7863	10724	3569
Cd	100	20	2.0	193.6	147.8	183.0	137.0	200.4	175.3	197.9	233.7	298.4	313.3
Co	--	--	1.0	20.3	17.0	26.2	20.9	20.2	20.7	23.0	23.4	24.7	4.2
Cr	750	375	0.6	91.5	79.9	<LD	31.3	<LD	47.2	50.4	45.9	62.7	<LD
Cu	--	--	1	632	492	879	766	1245	1184	1238	1537	2049	2155
Fe	--	--	2	137561	71079	114356	144871	162682	175931	180790	190137	188221	189624
Mn	--	--	0	1165	1486	811	1114	951	1397	1566	1822	2109	1909
Ni	700	150	1.0	23.4	21.1	99.0	9.0	94.0	14.4	15.1	14.7	20.5	56.0
Pb	1500	200	2	24976	19170	27422	30932	39596	49347	55964	66746	81377	122838
Sb	--	--	4	3083	2330	4031.3	4640	6700	7938	8851	10933	12535	16056.5
Zn	1500	800	0	14576	8635	19785	25255	36906	42130	46239	54268	59690	79308
Ag	--	--	4.0	115.3	123.4	0	82.0	<LD	61.8	56.8	42.4	42.4	<LD
Ba	1500	750	2	250	411	258	272	243	265	266	261	263	189
K	--	--	**	8137	9477	5531	6421	5501	6203	6172	5645	4954	5029
Hg	100	20	0.1	6.3	7.0	2.4	3.8	2.0	3.8	4.3	4.5	8.1	7.6

^a LMP. Límites máximos permisibles de los criterios interinos establecidos por la PROFEPA

^b LD. Límite de detección CENICA

Las marcas grises (■) indican las concentraciones de metales que exceden los LMP para uso de suelo industrial.

Tabla 10. Caracterización química de la muestra T_9 , correspondiente a jales de El Triunfo (10 - 250 cm).

	LMP ^a (mg/kg)		LD ^b (mg/kg)	Tamaño de partícula (µm)								
	Ind	Res		850-1700	300-850	250-300	150-250	106-150	75-106	53-75	38-53	<38
As	40	20	6.0	13095	8833	5039	4229	5188	6452	8283	12256	18360
Ca	--	--	4	66905	10693	12067	12497	16702	17130	18392	21300	16951
Cd	100	20	2.0	57.2	55.6	18.7	54.4	26.2	28.5	32.8	42.4	97.5
Co	--	--	1.0	14.7	3.3	9.6	<LD	11.2	12.1	13.2	14.8	9.0
Cr	750	375	0.6	133.1	8.2	105.9	6.8	75.2	78.1	91.9	70.8	98.0
Cu	--	--	1	447	137	221	99	107	122	132	256	313
Fe	--	--	2	49374	33301	22244	29613	28737	34501	38027	47112	66127
Mn	--	--	0	819	466	492	507	773	819	870	982	1004
Ni	700	150	1.0	25.4	55.0	21.5	60.0	22.4	22.9	23.9	33.0	46.0
Pb	1500	200	2	2229	2314	1203	1628	1335	1482	1674	2455	5722
Sb	--	--	4	1027	773.9	600	593.3	664	737	806	1049	2063
Zn	1500	800	0	3231	1281	1171	1094	1487	1642	1770	2509	3399
Ag	--	--	4.0	63.3	<LD	43.7	<LD	86.2	32.6	32.6	38.4	<LD
Ba	1500	750	2	313	322	604	320	471	561	505	493	319
K	--	--	**	18318	13874	18465	13567	14677	18630	16698	16047	17180
Hg	100	20	0.1	2.10	0.31	1.50	0.30	0.80	0.80	0.80	1.10	0.94

^a LMP. Límites máximos permisibles de los criterios interinos establecidos por la PROFEPA

^b LD. Límite de detección CENICA

Las marcas grises (■) indican las concentraciones de metales que exceden los LMP para uso de suelo industrial.

Tabla 11. Caracterización química de la muestra R_1 , correspondiente a la parte este (fracción fina) de la presa de jales en Santa Rosalía (10 - 200 cm).

	LMP ^a (mg/kg)		LD ^b (mg/kg)	Tamaño de partícula (µm)								
	Ind	Res		850-1700	300-850	250-300	150-250	106-150	75-106	53-75	38-53	<38
As	40	20	6.0	<LD	36	<LD	286	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Ca	--	--	4	11135	7865	16689	13781	25631	24869	25946	15307	10224
Cd	100	20	2.0	60.7	46.1	22.9	50.8	13.9	9.9	9.6	10.1	54.3
Co	--	--	1.0	1502.4	360.7	1251.6	317.5	628.4	488.0	409.7	443.5	270.5
Cr	750	375	0.6	2258.4	36.1	84.1	21.1	123.2	106.4	99.3	112.6	39.0
Cu	--	--	1	49489	4168	15298	4348	9645	7891	7179	8514	2701
Fe	--	--	2	167321	69323	81152	63472	72717	66754	65548	66617	67129
Mn	--	--	0	97604	19770	33050	17796	40820	24682	16797	13192	12455
Ni	700	150	1.0	820.9	172.0	178.3	157.0	138.6	132.6	129.9	156.8	153.0
Pb	1500	200	2	974	1014	385	1552	894	484	369	342	665
Sb	--	--	4	1443	<LD	1212	116.7	610	471	396	429	<LD
Zn	1500	800	0	5401	3893	4598	4357	3418	3179	3121	3705	3572
Ag	--	--	4.0	29.5	<LD	22.6	<LD	14.0	6.5	33.9	4.7	<LD
Ba	1500	750	2	12569	712	7150	578	7632	4974	4077	2826	998
K	--	--	**	7875	8464	10160	8679	10347	10191	13207	13342	10238
Hg	100	20	0.1	1.80	0.43	1.30	0.38	2.00	1.70	1.50	1.40	1.02

^a LMP. Límites máximos permisibles de los criterios interinos establecidos por la PROFEPA

^b LD. Límite de detección CENICA

Las marcas grises (■) indican las concentraciones de metales que exceden los LMP para uso de suelo industrial.

Tabla 12. Caracterización química de la muestra R_2 , correspondiente a la parte oeste (fracción gruesa) de la presa de jales en Santa Rosalía (10 - 200 cm).

	LMP ^a (mg/kg)		LD ^b (mg/kg)	Tamaño de partícula (µm)									
	Ind	Res		> 1700	850-1700	300-850	250-300	150-250	106-150	75-106	53-75	38-53	<38
As	40	20	6.0	91	59	<LD	<LD	<LD	126	117	141	294	<LD
Ca	--	--	4	25135	13347	19885	26419	25444	32559	31664	28532	23762	11494
Cd	100	20	2.0	110.7	44.8	62.8	16.6	61.5	11.7	9.9	9.8	10.2	61.0
Co	--	--	1.0	756.0	1362.3	904.4	896.3	406.6	422.9	348.3	305.3	311.5	290.9
Cr	750	375	0.6	3630.6	2013.8	219.9	129.7	45.3	170.3	149.0	145.7	155.4	69.4
Cu	--	--	1	62637	69891	21553	13268	10609	9530	8728	8380	8846	12142
Fe	--	--	2	196489	127345	82658	75538	81246	75839	72036	67837	71086	75655
Mn	--	--	0	37702	77986	32420	28963	26443	27993	18722	11652	9764	10476
Ni	700	150	1.0	1563.9	1003.0	287.0	155.8	128.0	138.6	138.1	133.5	149.4	190.0
Pb	1500	200	2	598	600	637	249	778	411	303	335	347	668
Sb	--	--	4	726	1343	<LD	869	<LD	415	338	295	298	<LD
Zn	1500	800	0	2733	3554	2980	2740	2187	2025	2038	2155	2536	3417
Ag	--	--	4.0	13.4	24.5	<LD	<LD	<LD	9.5	6.3	5.4	5.2	<LD
Ba	1500	750	2	3052	5331	1441	5010	4100	5122	3740	2873	3115	1203
K	--	--	**	7441	8667	6546	10568	7561	9132	9104	9597	11342	7458
Hg	100	20	0.1	1.80	3.70	0.57	1.00	0.61	1.10	1.10	0.80	0.80	0.61

^a LMP. Límites máximos permisibles de los criterios interinos establecidos por la PROFEPA

^b LD. Límite de detección CENICA

Las marcas grises (■) indican las concentraciones de metales que exceden los LMP para uso de suelo industrial.

ANEXO 2. Alternativas tecnológicas para la remediación

Las tecnologías de tratamiento reportadas para disminuir la biodisponibilidad de un contaminante, generalmente intentan impedir la transferencia de un contaminante desde el suelo hasta un organismo vivo. Una opción que puede utilizarse particularmente para suelos contaminados con metales, es la vitrificación o solidificación, la cual disminuye la movilidad de los contaminantes a través de un incremento en la resistencia a la transferencia de masa hacia fuera del sólido vitrificado. Otra opción es la alteración química para disminuir su biodisponibilidad, e incluye la conversión de los compuestos a formas menos solubles con el uso de ciertos aditivos. Por ejemplo, el fósforo, hierro y biosólidos son aditivos comunes para estabilizar el plomo en suelos (Ehlers y Luthy, 2003).

Una generalización acerca del uso de una tecnología para un contaminante en particular, solo sirve como guía para predecir el comportamiento esperado de un metal en un suelo. El uso de literatura o datos de laboratorio que no simulen las condiciones específicas de un sitio, pueden no resultar adecuadas para describir o predecir el comportamiento del metal, es decir, los datos deben ser específicos para cada sitio y los posibles efectos a largo plazo también deben considerarse. Como los constituyentes orgánicos de la matriz se degradan, o como el pH o condiciones redox cambian, ya sea por procesos naturales de intemperización o por manipulación humana, la movilidad potencial del metal varía junto con las condiciones del suelo (EPA, 1997).

En general, las tecnologías *in situ* generalmente tienen la particularidad de ser más económicas comparados con los métodos de tratamiento tradicionales. Sin embargo, existen relativamente pocas alternativas para el tratamiento *in situ* de metales. A continuación se presenta un panorama general de cuatro de las más promisorias alternativas tecnológicas para el tratamiento *in situ* de suelos contaminados con metales: (i) electrocinética; (ii) fitorremediación; (iii) inundación de suelos; (iv) solidificación/estabilización (EPA, 1997).

1. Remediación electrocinética

La remediación electrocinética implica la aplicación de una corriente directa de bajo voltaje o de un gradiente de potencial bajo a través de un electrodo positivo (ánodo) y uno negativo (cátodo) que se insertan en el suelo (Riser-Roberts, 1998). Los contaminantes se movilizan en forma de especies cargadas, partículas o iones, hasta zonas de tratamiento en donde los metales pueden retirarse del suelo y tratarse. La electrocinética también puede usarse para disminuir o prevenir la migración de los contaminantes, a través de la configuración de cátodos y ánodos de manera que los contaminantes fluyan hacia el centro de un área de suelo contaminada (EPA, 1997).

La experiencia con esta tecnología se limita a demostraciones a escala piloto y de exhibición, con excepción de un proceso de remoción de metales operado comercialmente en Europa y recientemente patentado en los Estados Unidos. Dentro de los metales pesados que han sido tratados por este tipo de tratamiento, se encuentran Pb, Hg, Cd, Ni, Cu, Zn y Cr, además de algunas especies radioactivas, cianuros, algunos aniones tóxicos (NO₃⁻, SO₄⁻) y algunos hidrocarburos (Van Cauwenberghe, 1997).

El consumo diario de energía para sitios con conductividades cercanas a 500 $\mu\text{mhos/cm}$, es de aproximadamente 12 kWh/m³ por día (cerca de 0.40 USD/m³ por día), y 12 USD/m³ por mes. El tiempo del proceso depende de diferentes factores, incluyendo el espacio entre electrodos y las condiciones a utilizar. Estudios a escala piloto con suelos reales, indican que los gastos en energía para la extracción de metales puede ser de 500 kWh/m³ o más, con espacios de 1.0 a 1.5 m entre electrodos. Se estima que los costos directos para esta cantidad de energía son cercanos a 15 USD/m³ (~ 0.03 USD/kWh), que junto con el costo de la instalación puede elevarse a 50 USD/m³ o más (EPA, 1997).

En caso de no existir otras opciones tecnológicas aplicables *in situ*, para remediar sitios con tamaños de partícula pequeños y heterogéneos contaminados con metales, esta técnica puede resultar potencialmente competitiva.

2. Fitorremediación

La fitorremediación es una estrategia de biorremediación, que se define como el uso de vegetación y la microbiota asociada para el tratamiento *in situ* de suelos, sedimentos y aguas contaminadas; puede aplicarse a contaminantes inorgánicos como metales, así como para compuestos orgánicos como herbicidas, pesticidas e hidrocarburos, entre otros (Salt y col., 1998; Meagher, 2000).

Esta tecnología se encuentra en una etapa inicial de comercialización para el tratamiento de suelos contaminados con metales, y en un futuro puede implicar una opción de bajo costo bajo ciertas circunstancias. Hasta la etapa actual de desarrollo, el proceso es adecuado para sitios en donde los contaminantes se encuentran muy dispersos y en baja concentración, y en donde solo se requiere de un tratamiento superficial (EPA, 1997).

Dos tecnologías básicas para la remediación de metales incluyen la fitoextracción y la fitoestabilización. La primera implica la captación de contaminantes del suelo y su translocación hacia los tejidos de la planta, que finalmente son cosechados y tratados. Se ha observado que el Ni y el Zn son los metales absorbidos más fácilmente, aunque pruebas con Cu y Cd también han sido alentadoras. Con el uso de la fitoestabilización pueden disminuirse riesgos a través de la estabilización de contaminantes cercanos a la superficie, por medio de la secreción de compuestos que alteran el pH del suelo y forman complejos metálicos de solubilidad reducida (EPA, 1997).

El objetivo práctico de la fitorremediación es alcanzar mayores reducciones en costos de limpieza para un sitio. Por ejemplo, la limpieza de un acre (0.4 Ha) de un suelo arenoso (50 cm) por fitorremediación, típicamente puede costar de 60 mil a 100 mil USD, en comparación con un costo de al menos 400 mil USD para la excavación del sitio y disposición sin tratamiento. Se calcula que el procesamiento y disposición final de la biomasa generada puede implicar el mayor porcentaje de los costos totales, particularmente cuando existen metales altamente tóxicos (EPA, 1997).

3. Inundación de suelos (soil flushing)

Esta tecnología implica la extracción de contaminantes del suelo con el uso de agua u otra solución acuosa. Aunque aditivos como ácidos y agentes quelantes han tenido cierto uso comercial en proyectos *ex situ* a gran escala, no se ha demostrado su factibilidad para aplicaciones *in situ*. Para metales, la inundación de suelos podría ser más efectiva para la remoción de especies solubles en agua (Cr^{VI}). Los contaminantes lixiviados normalmente pueden recuperarse del agua superficial con el uso de métodos de bombeo y tratamiento. Las condiciones específicas de cada sitio deben considerarse cuidadosamente para evitar la posible dispersión de la contaminación (EPA, 1997).

Debido a que la aplicación *in situ* de esta tecnología ha sido limitada, es difícil obtener datos detallados de costos. Algunos de los factores que afectan significativamente sus costos son: concentración inicial y final (esperada) de contaminantes, permeabilidad del suelo y profundidad del acuífero (EPA, 1997).

4. Solidificación/estabilización (S/E)

Este proceso, también conocido como inmovilización, cambia las características físicas y químicas de un residuo con el objeto de inmovilizar los contaminantes. En los Estados Unidos, sitios contaminados con metales comúnmente han sido remediados por solidificación *ex situ* con pozzolanos y otros aditivos. Esta técnica se ha aplicado *in situ* con el uso de barrenas que liberan y mezclan los aditivos. Sin embargo, es una tecnología no muy utilizada debido a las implicaciones en cuanto a su fiabilidad a largo plazo.

Una segunda técnica de solidificación implica la vitrificación, en la cual se pasa una corriente eléctrica entre electrodos para fundir el suelo e incorporar los metales a un producto vitrificado. En Estados Unidos, esta tecnología se encuentra actualmente disponible comercialmente y se ha empleado con éxito en dos sitios, uno de ellos contaminado con metales. Para la vitrificación debe utilizarse una campana o sistema de recuperación para metales volátiles como el mercurio (EPA, 1997).

Los costos de la S/E *in situ* pueden variar desde 26 a 52 hasta 130 a 260 USD/m³, dependiendo del volumen a tratar, la estructura del suelo, la profundidad del tratamiento, el tipo de contaminante, y de los objetivos deseados después del tratamiento. Para la aplicación en un sitio con residuos peligrosos, conformado por arena y sedimentos, a una profundidad de 7 m, pueden esperarse costos entre 100 y 120 USD/m³ (EPA, 1997). En la Tabla 13 se compara el estado de desarrollo, aplicabilidad, factores limitantes y consideraciones para el uso de cada una de estas alternativas tecnológicas aplicadas para la remediación de suelos contaminados con metales.

Tabla 13. Comparación de tecnologías aplicables *in situ* para la remediación de suelos contaminados con metales (EPA, 1997).

Factor de evaluación	Tecnología			
	Electrocinética	Fitorremediación	Inundación de suelos	Solidificación/Estabilización
Estado	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicaciones a gran escala en Europa • Recientemente autorizado en E.U. 	<ul style="list-style-type: none"> • Escala piloto • Actualmente en pruebas de campo en E.U. y en Chernobyl, Ucrania 	<ul style="list-style-type: none"> • Comercial • Seleccionado para la remediación de sitios en E.U. 	<ul style="list-style-type: none"> • Comercial
Rango de metales tratados	Extenso	Extenso	Limitado	Extenso
Principales factores limitantes	<ul style="list-style-type: none"> • Etapa de desarrollo 	<ul style="list-style-type: none"> • Etapa de desarrollo • Mayores tiempos de tratamiento • Rendimientos del cultivo y patrones de crecimiento 	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminación potencial de acuíferos debida a la solución residual de lavado 	<ul style="list-style-type: none"> • Implica la integridad a largo plazo del material solidificado/estabilizado
Consideraciones específicas del sitio	<ul style="list-style-type: none"> • Homogeneidad del suelo • Humedad del suelo 	<ul style="list-style-type: none"> • Profundidad de la contaminación • Concentración de contaminantes 	<ul style="list-style-type: none"> • Permeabilidad del suelo • Flujo y profundidad de acuíferos 	<ul style="list-style-type: none"> • Presencia de ruinas o escombros • Profundidad de la contaminación

Como puede verse en la Tabla 13, la electrocinética, el lavado de suelos y la S/E se encuentran en etapas de desarrollo más avanzadas que la fitorremediación. La inundación de suelos actualmente puede aplicarse a un rango limitado de metales y su uso requiere considerar el potencial riesgo de contaminación del acuífero por la solución de lavado. La electrocinética es más aplicable en sitios con suelos homogéneos y niveles de humedad relativamente altos. La fitorremediación requiere de periodos de tratamiento más largos que las otras tecnologías y puede aplicarse en sitios en los que los contaminantes se encuentran superficiales y en relativamente baja concentración. La S/E está limitada por la falta de datos respectivos a la integridad del material tratado a largo plazo.