



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL**  
**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS**



**IDENTIFICACIÓN DE RESIDUOS  
TÓXICOS MINEROS POR PERCEPCIÓN  
REMOTA Y SU VERIFICACIÓN  
GEOQUÍMICA EN EL TRIUNFO (BCS):  
PROPUESTA METODOLÓGICA PARA  
PRIORIZAR ACCIONES DE  
RESTAURACIÓN**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN  
CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS**

**PRESENTA**

**ROMÁN AHUMADA MEXÍA**

**LA PAZ, B.C.S., MARZO DE 2017.**



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**  
**ACTA DE REVISIÓN DE TESIS**

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., siendo las 12:00 horas del día 10 del mes de Febrero del 2017 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICIMAR para examinar la tesis titulada:

**"IDENTIFICACIÓN DE RESIDUOS TÓXICOS MINEROS POR PERCEPCIÓN REMOTA  
Y SU VERIFICACIÓN GEOQUÍMICA EN EL TRIUNFO (BCS): PROPUESTA METODOLÓGICA  
PARA PRIORIZAR ACCIONES DE RESTAURACIÓN"**

Presentada por el alumno:

AHUMADA	MEXIA	ROMÁN
Apellido paterno	materno	nombre(s)
		Con registro:
		A 1 5 0 1 1 8

Aspirante de:

**MAESTRIA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA DEFENSA DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

**LA COMISION REVISORA**

Directores de Tesis

  
DRA. JANETTE MACALZA MURILLO JIMÉNEZ  
Directora de Tesis

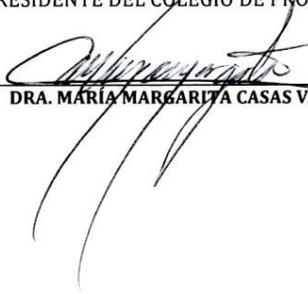
  
DR. ALFREDO ORTEGA RUBIO  
2º. Director de Tesis

  
DR. ENRIQUE HIPARCO NAVA SÁNCHEZ

  
DRA. ANA JUDITH MARMOLEJO RODRÍGUEZ

  
DR. SERGIO AGUILERA GARCÍA

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

  
DRA. MARÍA MARGARITA CASAS VALDEZ



I.P.N.  
CICIMAR  
DIRECCIÓN



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESIÓN DE DERECHOS**

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., el día 14 del mes de Febrero del año 2017

El (la) que suscribe ING. ROMÁN AHUMADA MEXIA Alumno (a) del Programa

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS

con número de registro A150118 adscrito al CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS

manifiesta que es autor(a) intelectual del presente trabajo de tesis, bajo la dirección de:

DRA. JANETTE MAGALLI MURILLO JIMÉNEZ Y DR. ALFREDO ORTEGA RUBIO

y cede los derechos del trabajo titulado:

"IDENTIFICACIÓN DE RESIDUOS TÓXICOS MINEROS POR PERCEPCIÓN REMOTA Y SU VERIFICACIÓN

GEOQUÍMICA EN EL TRIUNFO (BCS): PROPUESTA METODOLÓGICA PARA PRIORIZAR ACCIONES DE RESTAURACIÓN"

al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Éste, puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: roman\_ahumada@hotmail.com - jmurillo@ipn.mx - aortega@cibnor.mx

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

*Román Ahumada M.*

ING. ROMÁN AHUMADA MEXIA

*Nombre y firma del alumno*

## **AGRADECIMIENTOS**

Esta investigación fue apoyada por los proyectos CONACYT 251919 de Ciencia Básica, el proyecto CONACYT 269540 de Redes Temáticas y los proyectos institucionales SIP 20150581 y SIP 20161201.

Quisiera expresar mi agradecimiento al Instituto Politécnico Nacional (IPN), que a través del Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas (CICIMAR-IPN), me brindó la oportunidad de realizar mis estudios de maestría.

Agradecimiento especial a mis directores de tesis, Dra. Janette Magalli Murillo Jiménez y Dr. Alfredo Ortega Rubio, por su gran disposición, apoyo y paciencia en el transcurso de este trabajo de investigación, además reconocer el gran trabajo que realizan como investigadores, ese sentido humano y entrega ante los problemas y necesidades de la sociedad actual. Excelente ejemplo a seguir.

Agradezco a los integrantes de mi comité, Dr. Enrique H. Nava Sánchez, Dra. Ana Judith Marmolejo Rodríguez y Dr. Sergio Aguiñiga García, por el seguimiento y consejos de carácter académico y vivencial, su siempre disposición y optimismo con el que hicieron viera las cosas. Agradezco también al Dr. Guillermo Martínez Flores por su apoyo, colaboración y sugerencias, que ayudaron a enriquecer el trabajo.

A Humberto Ceseña Amador y César Cervando Casas Núñez, gracias por su apoyo, consejos y amabilidad en todo momento.

Siempre agradezco a mi familia, por ese gran ejemplo que me han dado, su apoyo y unión incondicional, el corazón con el que hacen las cosas y la calidad humana con el que ven y están en esta vida.

# ÍNDICE

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>I</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	<b>II</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>2. ANTECEDENTES</b> .....	<b>4</b>
2.1. Antecedentes generales	4
2.1.1. Actividad minera	4
2.1.2. Percepción remota	7
2.1.2.1. Clasificación de imágenes de satélite	8
2.1.2.2. Clasificación supervisada	8
2.1.2.3. Casos de estudio	9
2.2. Antecedentes regionales	10
2.2.1. Desechos mineros	10
2.2.1.1. Elementos tóxicos solubles (biodisponibilidad)	12
2.2.1.2. Agua subterránea	12
<b>3. JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>14</b>
<b>4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	<b>15</b>
<b>5. HIPÓTESIS</b> .....	<b>15</b>
<b>6. OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS PARTICULARES</b> .....	<b>15</b>
6.1. Objetivo general	15
6.2. Objetivos Particulares	15
<b>7. AREA DE ESTUDIO</b> .....	<b>16</b>
7.1. Ubicación del área de estudio	16

7.2. Clima del área de estudio	16
7.3. Descripción Fisiográfica del área de estudio	17
7.4 Descripción Litológica del área de estudio	19
7.5. Descripción Hidrológica del área de estudio	20
7.5.1. Hidrología superficial	20
7.5.2. Hidrología subterránea	22
<b>8. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>24</b>
8.1. Teledetección: Procesamiento de imágenes de satélite	24
8.1.1. Configuración y especificación de canales	25
8.1.2. Selección de áreas de entrenamiento	26
8.1.3. Análisis de áreas de entrenamiento	27
8.1.3.1. Medida de separabilidad: Distancia Bhattacharyya	27
8.1.3.2. Matriz de confusión	28
8.1.4. Algoritmo de máxima verosimilitud	28
8.1.5. Análisis post-clasificación	28
8.1.5.1. Selección de posibles puntos identificados como jales mineros	28
8.2. Verificación en campo de la clase Jales mineros	29
8.2.1. Descripción visual del material	29
8.2.2. Muestreo del material	29
8.3. Análisis granulométrico del material	30
8.4. Análisis de elementos potencialmente tóxicos del material	31
8.4.1. Preparación de las muestras	31
8.4.2. Análisis geoquímico de EPT (As, Cd, Cu, Pb, Sb, Zn)	32
8.5. Factor de enriquecimiento normalizado e índice de geoacumulación en muestras del material	33
8.5.1. Factor de enriquecimiento normalizado	33
8.5.2. Índice de geoacumulación	34
<b>9. RESULTADOS.....</b>	<b>36</b>

9.1. Procesamiento de imagen Pleiades, identificación de jales mineros	36
9.1.1. Clasificación supervisada	36
9.2. Verificación en campo de la clase “jale minero” y muestreo del material	40
9.2.1. Características físicas de los sitios y sus materiales	40
9.3. Características granulométricas de los materiales	43
9.4. Análisis geoquímico	46
9.4.1. Validación del método geoquímico	46
9.4.2. Concentraciones de Elementos Potencialmente Tóxicos	46
9.4.3. Factor de enriquecimiento normalizado	48
9.4.4. Índice de geoacumulación	50
<b>10. DISCUSIÓN .....</b>	<b>53</b>
10.1. Teledetección: Identificación de jales mineros mediante clasificación supervisada	53
10.2. Granulometría: dispersión de los materiales de los jales mineros	54
10.3. Geoquímica: EPT en jales mineros y su comparación con jales reportados en otros trabajos	55
10.4. FEN e Igeo: niveles de enriquecimiento de EPT y afectación en el ambiente	57
10.4.1. Arsénico	57
10.4.2. Cadmio	58
10.4.3. Cobre	59
10.4.4. Plomo	60
10.4.5. Antimonio	60
<b>11. CONCLUSIÓN .....</b>	<b>62</b>
<b>12. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>63</b>
<b>13. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>64</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Antiguas plantas de fundición en el Distrito Minero ET-SA.	11
<b>Figura 2.</b> Zona de estudio: poblado El Triunfo y zonas aledañas, BCS.	16
<b>Figura 3.</b> Provincias y subprovincias fisiográficas de México (INEGI).	17
<b>Figura 4.</b> Mapa geológico generalizado de la zona de estudio.	19
<b>Figura 5.</b> Cuenca hidrológica El Carrizal, porción sur del estado de Baja California Sur.	21
<b>Figura 6.</b> Arroyos en la cuenca hidrológica El Carrizal.	22
<b>Figura 7.</b> Imagen de satélite Pleiades.	24
<b>Figura 8.</b> Flujo de tareas en el procesamiento de la imagen con el programa Geomatica 2015.	26
<b>Figura 9.</b> Polígonos de áreas de entrenamiento correspondientes a tipos de clases previamente conocidas.	27
<b>Figura 10.</b> Clasificación supervisada (Algoritmo "Máxima verosimilitud").	38
<b>Figura 11.</b> Recorte de la imagen clasificada con la presencia de los sitios clasificados como jale minero (12 km <sup>2</sup> ).	38
<b>Figura 12.</b> Polígonos de la clase jale minero que mostraron mayor y menor área.	40
<b>Figura 13.</b> Sitios de verificación de la clase jale minero en el área del poblado El Triunfo y zonas aledañas.	41
<b>Figura 14.</b> Pilas de lixiviación y ruinas de plantas de fundición minera en sitios de verificación de la clase jale minero en el poblado El Triunfo y zonas aledañas.	42
<b>Figura 15.</b> Tamaño medio de grano de los materiales clasificados como jales mineros.	44
<b>Figura 16.</b> Diagrama de dispersión de la Desviación Estándar y Sesgo de los tamaños de grano de los materiales clasificados como jales mineros.	44
<b>Figura 17.</b> Tamaño de partículas en materiales de la clase jale minero.	45
<b>Figura 18.</b> Distribución y concentración de As en el poblado El Triunfo y zonas aledañas	52

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Relación de la actividad minera y su impacto al ambiente.	5
<b>Tabla 2.</b> Regiones de interés geológico-minero en BCS (SGM, 2015).	11
<b>Tabla 3.</b> Lista de subprovincias fisiográficas y municipios en BCS.	18
<b>Tabla 4.</b> Disponibilidad de agua subterránea en el acuífero El Carrizal, BCS.	23
<b>Tabla 5.</b> Características espectrales y de resolución de la imagen del satélite Pleiades.	25
<b>Tabla 6.</b> Coordenadas geográficas de la imagen de satélite Pleiades	25
<b>Tabla 7.</b> Elementos y límites de detección de los equipos INAA, ICP e ICP/MS.	33
<b>Tabla 8.</b> Clases de índice de geoacumulación y grado de contaminación.	35
<b>Tabla 9.</b> Distancia de Bhattacharyya: medida de separabilidad entre clases.	36
<b>Tabla 10.</b> Matriz de confusión.	37
<b>Tabla 11.</b> Coordenadas geográficas de las zonas identificadas con la clase jale minero.	39
<b>Tabla 12.</b> Descripción de los sitios clasificados en la clase jale minero.	43
<b>Tabla 13.</b> Porcentajes de Recuperación de EPT en estándares certificados.	46
<b>Tabla 17.</b> Índice de geoacumulación de EPT en material de la clase jale minero.	51
<b>Tabla 18.</b> Comparación del promedio de las concentraciones de EPT en los jales mineros identificados en este trabajo con otros lugares.	56

## RESUMEN

La minería en México ha dejado graves consecuencias de impacto ambiental debido a la falta de control en el manejo de desechos mineros derivados de la extracción y proceso de elementos de interés económico, como es el caso del Distrito Minero El Triunfo-San Antonio en Baja California Sur. Desechos mineros con altas concentraciones de elementos potencialmente tóxicos (EPT), están sujetos a procesos de erosión e intemperismo, contaminando el ambiente y poniendo en riesgo la calidad de vida de los pobladores. Debido a la importancia de reducir la exposición de EPT en la población, es necesario conocer la ubicación de los desechos mineros y su composición. El presente estudio tiene como objeto identificar y georreferenciar los desechos mineros, en el poblado de El Triunfo, a través de percepción remota, usando imágenes del satélite Pleiades, procesándolas con el programa Geomática 2015, bajo la técnica de clasificación supervisada. Esta técnica fue validada verificando en campo las zonas clasificadas como jales mineros y conociendo su composición textural y geoquímica. La composición textural se obtuvo mediante las técnicas de difracción láser y tamizado, la composición geoquímica se obtuvo mediante ICP-TD, ICP-MS e INAA, validando el método con estándares certificados (PACS-2 y MESS-3). Los resultados del procesamiento de las imágenes de satélite, mostraron 32 zonas clasificadas como posibles jales mineros, las cuales fueron visitadas, encontrando que en el 87.5% de las zonas, evidenciaban desechos y jales de origen minero. Los jales presentan lomeríos hasta de 15 m de altura, coloración rojiza, con vegetación de escasa a nula. En 20 de esas zonas, se colectaron muestras superficiales para el análisis textural y geoquímico. Los resultados muestran que los jales tienen tamaños de limo medio, muy pobremente seleccionado y fuertemente sesgado a los tamaños gruesos. Las concentraciones promedio de EPT's en los jales en  $\text{mg kg}^{-1}$  fueron, As (11090), Cd (174), Cu (1147.55), Pb (61425) y Sb (9552), valores muy por arriba de la CTS y la NOM-147-SEMARNAT-2004. De acuerdo al FEN e Igeo, estos elementos están de severo a extremadamente enriquecidos y las zonas extremadamente contaminadas, siendo estos sitios focos de contaminación y alto riesgo de salud para los habitantes de El Triunfo y zonas aledañas, con necesidad de trabajos de remediación en estas zonas. La propuesta metodológica desarrollada en esta

investigación, es extrapolable a todas las zonas afectadas por desarrollos mineros, para que de una manera expedita, económica y confiable, se identifiquen las zonas más críticas que han sido contaminadas y se prioricen las acciones de restauración y remediación de las mismas.

## ABSTRACT

Mining in Mexico has left serious consequences of environmental impact due to the lack of control in the management of mining waste caused by extraction and processing elements of economic interest, such as the El Triunfo-San Antonio Mining District in South Baja California (o Baja California Sur). Mining wastes with high concentrations of potentially toxic elements (ETS) are subject to erosion and weathering processes, they pollute the environment and put the quality of life of the inhabitants in risk. Due to the importance of reducing EPT exposure in the population, it is necessary to know the location of the mineral waste and its composition. The goal of this study is to identify and georeference the mining waste in the village of El Triunfo through remote sensing using images from the Pleiades satellite, and process them through the GEOMATICS program 2015, under the supervised classification technique. This technique was validated by verifying in the field the zones classified as mine tailings and knowing its textural and geochemical composition. The textural composition was obtained by laser diffraction technique and sieving technique, the geochemical composition was obtained by ICP-TD, ICP-MS and INAA, the method is validated by certified standards (PACS-2 and MESS-3). The results of the satellite image processing showed 32 zones classified as possible mine tailings, which were visited, and found that in 87.5% of the areas, they contained waste and tailings. The tailings exhibited piles up to 15 m high, reddish color, with little to no vegetation. In 20 of these areas, surface samples were collected for textural and geochemical analysis. The results show that the tailings have medium silt sizes, very poorly selected and strongly coarse skewed. The mean concentrations of EPT in mg kg<sup>-1</sup> were As (11090), Cd (174), Cu (1147.55), Pb (61425) and Sb (9552), values well above the CTS and NOM-147-SEMARNAT-2004. According to the FEN and Igeo, these elements are from severe to extremely enriched and extremely contaminated areas, these sites are sources of contamination and high health risk for the inhabitants of El Triunfo and surrounding areas, then remediation work is needed in these areas. The proposed methodological procedure developed in this research can be applicable to all areas affected by mining works, since it allows an expeditious, economic and reliable way to identify the most critical areas that have been contaminated, and prioritize restoration and remediation actions.

## 1. INTRODUCCIÓN

La minería en México se ha caracterizado por ser una potencia minera a nivel internacional (SNL, 2015). Ha llevado al país a un gran deterioro de innumerables ecosistemas debido a que durante las actividades mineras que se realizan para la extracción de los minerales de interés comercial, se generan grandes cantidades de residuos sólidos conocidos como jales mineros y aguas residuales con alto contenido de elementos potencialmente tóxicos (EPT) como: Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cobre (Cu), Antimonio (Sb), Plomo (Pb), Níquel (Ni), Zinc (Zn), entre otros. Uno de los principales problema ambientales, asociado a los residuos mineros, se relaciona con la dispersión de éstos hacia su entorno, en donde los niveles de contaminación se ven influenciados principalmente por las condiciones climáticas y ambientales del lugar. Bajo estas condiciones la dispersión de contaminantes puede ocurrir por medios físicos (erosión, transporte eólico y pluvial) o por su alteración y movilidad química, disolución y transporte en medio acuoso (Marmolejo-Rodríguez *et al.*, 2011; Magdaleno, 2014; Z. Fu *et al.*, 2016).

Se ha observado que existe contaminación de arsénico en los alrededores de las minas de extracción de metal (oro y plata principalmente) y este puede inducir a problemas graves de salud, en particular el cáncer. El peligro a la salud atribuido a As en suelo y agua contaminados en las inmediaciones de las minas cerradas o abandonadas puede ser muy alto en comparación con los índices permisibles establecidos por cada país (Cho *et al.*, 2013; Colín *et al.*, 2014).

La actividad minera en el estado de Baja California Sur, data de mediados del siglo XVIII; siendo el Distrito Minero El Triunfo-San Antonio (ET-SA) el más importante y antiguo del estado, en donde los minerales de interés han sido principalmente el oro y la plata. Uno de los principales problemas en el Distrito Minero ET-SA es que las rocas mineralizadas contienen arsénico y durante el proceso de extracción de oro, obtuvieron como subproducto óxido de arsénico (arsenolita ( $As_2O_3$ )), mineral muy soluble. De acuerdo a Carrillo y Drever (1998) estimaron que en esta región se presentan aproximadamente 800,000 toneladas de desechos mineros, dispersos en el ambiente, con un contenido promedio de 4% de óxido de arsénico, lo que equivale a 32,000 toneladas de material altamente tóxico, sujeto a ser transportado por el agua y viento,

siendo una fuente potencial de contaminación del agua subterránea y la atmósfera. Se ha encontrado que el agua subterránea en esa zona presenta concentraciones de arsénico hasta de  $0.41 \text{ mg L}^{-1}$  (Carrillo, 1996; Naranjo-Pulido, 2004; Wurl *et al.*, 2014), valor por arriba del límite máximo permisible (LMP) para consumo de agua potable de acuerdo a la NOM-127-SSA 1994 que es de  $0.025 \text{ mg/L}$  y a la Organización Mundial de la Salud (2011) con un valor de  $0.01 \text{ mg/L}$ . Esta problemática está evidenciada con los resultados de un estudio de As urinario en pobladores de la región, en donde se presentaron valores hasta de  $399 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$  de As (Colín *et al.*, 2014), valor superior al Índice Biológico de Exposición (BEI, por sus siglas en ingles) de  $35 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$  (ACGIH, 2010).

Por lo antes mencionado, existe la necesidad de identificar la ubicación de los antiguos jales mineros y conocer las concentraciones de los elementos potencialmente tóxicos, ya que son focos de contaminación al ambiente que requieren ser confinados o estabilizados para reducir el impacto a la salud de los pobladores expuestos. Este trabajo propone la identificación de jales mineros por medio de la técnica de teledetección como se describe a continuación.

En la actualidad, las nuevas tecnologías han permitido que investigaciones en diferentes áreas del conocimiento se desarrollen satisfactoriamente y con una mayor rapidez. La teledetección o percepción remota es una técnica basada en un sistema de adquisición de información a pequeña o gran escala de un objeto o fenómeno sin estar en contacto con ello, utiliza instrumentos de grabación o escaneo como: aviones, satélites, aeronaves, boyas o barcos (Spring, 2000). Esta técnica permite realizar reconocimientos o evaluaciones de distintas áreas en la superficie terrestre en lugares en que el acceso se presenta como una limitante, ya sea por las características del terreno o las dificultades que representan estas zonas por distintos factores (político, social, cultural, seguridad, etc.).

Para propósitos de esta investigación se utilizó el procesamiento de imágenes de satélite como herramienta para identificar zonas con desechos mineros a través de la técnica de clasificación supervisada. Esta técnica utiliza las propiedades de la radiación electromagnética y su interacción con los materiales de la superficie terrestre, de manera que todos los elementos de la naturaleza tienen una respuesta

espectral propia que se denomina firma espectral, la cual se define como el comportamiento diferencial que presenta la radiación reflejada (reflectancia) o emitida (emitancia) desde algún tipo de superficie u objeto terrestre en los distintos rangos del espectro electromagnético (Hernández y Montaner, 2009). La técnica de clasificación supervisada, se basa en la disponibilidad de áreas de entrenamiento de las que se conoce *a priori* la clase a la que pertenecen (jales mineros, vegetación, suelo desnudo, zonas urbanas, entre otros). Esto sirve para generar una respuesta espectral característica de cada una de las clases mediante el algoritmo de máxima verosimilitud, técnica que ayuda a identificar y diferenciar entre otras cosas, los sitios con presencia de jales mineros y los tipos de cubierta utilizando un modelo probabilístico (distribución gaussiana) para formar sus reglas de decisión en la categorización de los píxeles. También se ha reportado la relación entre reflectancia para distintos tipos de suelo incluidos jales mineros y la presencia de elementos tóxicos en los mismos, permitiendo que futuras investigaciones cuenten con una base de datos más completa pudiendo reducir costos en los procesos de investigación, eficiencia en tiempo, así como disminuir los riesgos que representan para algunas zonas la investigación de campo, realizar muestreos o la adquisición de algún dato *in situ* (J. Emel *et al.*, 2014; Pantoja-Espinoza, 2010; Nanni y Dematte, 2006).

En este trabajo se utilizaron imágenes del satélite Pleiades, las cuales a través de las características en sus píxeles fueron procesadas utilizando la técnica de clasificación supervisada mediante el algoritmo de máxima verosimilitud, los resultados fueron verificados por observación directa en campo y el análisis de algunas muestras para conocer la composición geoquímica de los puntos clasificados como jales minero en el área de estudio.

## **2. ANTECEDENTES**

La contaminación del suelo se ha convertido en un grave problema generalizado en muchas partes del mundo. El suelo es un cuerpo natural, no consolidado, compuesto por sólidos (material mineral y orgánico), líquidos y gases, que se caracteriza por tener horizontes o capas diferenciales, resultado de las adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de energía y materia a través del tiempo. Es un elemento filtrante, amortiguador y transformador, que regula los ciclos del agua y biogeoquímicos. Tiene la propiedad de retener sustancias mecánicamente o fijarlas por adsorción, contribuyendo a la protección de aguas subterráneas y superficiales contra la penetración de agentes nocivos. Constituye además, junto con el agua, el aire y la luz solar, el fundamento de la vida en los ecosistemas terrestres, albergando una gran diversidad de organismos y microorganismos (Volke-Sepúlveda *et al.*, 2005; Sposito, 1989).

Se entiende por suelo contaminado una porción delimitada de terreno (superficial o subterráneo) que se encuentra en desequilibrio debido principalmente al inadecuado manejo de contaminantes físicos, químicos y biológicos. Las fuentes de contaminación de suelos pueden generarse en zonas urbanas y rurales, desde tiraderos de basura, uso de plaguicidas, uso excesivo de fertilizantes, canales de agua residuales, en las zonas industriales y de actividad minera por derrame de combustible, descargas de aguas residuales, rupturas de tanques y tuberías, mala disposición de desechos sólidos, vapores liberados al ambiente, relaves, etc. (Fundación MAPFREE, 1994).

### 2.1. Antecedentes generales de actividad minera y percepción remota

#### 2.1.1. Actividad minera y elementos potencialmente tóxicos a nivel mundial

El impacto de la actividad minera sobre el ambiente y la salud, se relaciona con la composición del mineral, el tipo de exploración, el proceso de beneficio, la escala de las operaciones y las características del entorno. En las diferentes fases de la actividad minera se presentan afectaciones al ambiente descritas en la tabla 1 (Volke-Sepúlveda *et al.*, 2005).

**Tabla 1.** Relación de la actividad minera y su impacto al ambiente. Modificado de Volke-Sepúlveda *et al.*, 2005.

<b>Etapa</b>	<b>Descripción</b>	<b>Impacto al ambiente</b>
Prospección	Estudios de gravimetría, geología superficial, densidad, etc.	Apertura de caminos, destrucción de la vegetación
Exploración	Construcción de caminos, barrenados, obras e instalación de campamentos	Destrucción de la vegetación, pérdida de suelo y ecosistema, abatimiento del nivel freático por fugas de barrenos, contaminación de agua y pérdida de agua en pozos
Explotación y beneficio	<p>Descapote del área de interés</p> <p>Construcción y obras diversas (tiros, socavones, mega excavaciones)</p> <p>Extracción y concentración de minerales, procesamiento de materiales, depósitos de terreros, tepetateras y jales</p> <p>Descarga y derrames de EPT</p> <p>Explosiones y transporte de materiales</p> <p>Reducción de tamaño del mineral por trituración y molienda para el incremento de la superficie de reacción de materiales</p> <p>Alto consumo de agua durante la excavación, molienda y procesamiento de materiales</p> <p>Mezcla de agua con elementos tóxicos usados en el proceso y propios del material</p> <p>Tratamientos previos a una fusión primaria o electro-depositación</p>	<p>Destrucción de la vegetación, del suelo y del ecosistema</p> <p>Generación de superficies que quedan expuestas a procesos de erosión, intemperismo y lixiviación</p> <p>Enriquecimiento de elementos potencialmente tóxicos en el ambiente y generación de focos de contaminación ambiental</p> <p>Dispersión de los EPT en el ambiente por infiltración, transporte fluvial y eólico</p> <p>Contaminación del aire por la generación de polvos</p> <p>Incremento del potencial de liberación de EPT y contaminación del suelo, aire, agua y biota</p> <p>Abatimiento y pérdida de agua en pozos, contaminación de fuentes de agua superficial y subterránea, infiltración de agua contaminada en fracturas y fallas del terreno.</p> <p>Consumo de agua tóxica</p>
Fundición y refinación	<p>Obtención de metales y sus aleaciones con el uso de hornos industriales.</p> <p>Eliminación de impurezas en los metales de interés</p>	Generación de aguas residuales, residuos peligrosos, emisiones a la atmósfera

La presencia de desechos mineros (jales) y aguas residuales generadas por minas abandonadas o activas, representa un grave riesgo de contaminación ambiental, incluyendo las aguas subterráneas, humedales, el suelo, flora y fauna. Se han realizado numerosos estudios para evaluar la presencia y afectación de elementos potencialmente tóxicos asociados a la actividad minera, así como los mecanismos de transporte que pudieran estar generando la dispersión de los contaminantes a zonas aledañas. Estos estudios han demostrado la presencia de algunos EPT como As, Cd, Cr, Cu, Pb, Zn y Ni en jales, suelos y aguas subterráneas en zonas cercanas a la actividad minera (Rangel *et al.*, 2011; Armendáriz-Villegas *et al.*, 2015; Osher *et al.*, 2006). Por ejemplo, en la zona minera Irankuh, mina de Zn-Pb ubicada en el área central de Irán, realizaron un estudio para conocer las concentraciones totales, especiación y movilidad de EPT provenientes del distrito minero Irankuh y la afectación en los suelos agrícolas ubicados en las zonas cercanas a éste. Los resultados para suelos de esta mina presentaron altas concentraciones de EPT con valores mínimos y máximos de As (12.9-254 mg kg<sup>-1</sup>), Cd (1.2-55.1 mg kg<sup>-1</sup>), Pb (137-6239 mg kg<sup>-1</sup>) y Zn (516-48889 mg kg<sup>-1</sup>), y los resultados para suelos agrícolas fueron, para As (5.5-57.1 mg kg<sup>-1</sup>), Cd (0.2-8.5 mg kg<sup>-1</sup>), Pb (22-3451 mg kg<sup>-1</sup>) y Zn (94-9907 mg kg<sup>-1</sup>), en donde las concentraciones más altas registradas para estos elementos, estaban en suelos influenciados directamente por las presas de jale, los resultados fueron comparados con promedios mundiales de referencia en suelo definidos por Kabata-Pendias (2011), en donde además, el factor de movilidad de As, Cd y Pb para suelos agrícolas cercanos a los jales fue alto (Forghani *et al.*, 2015). En la zona minera Xikuangshan, en la provincia de Hunan al suroeste de China, considerada la mayor mina de Sb en el mundo, se realizó un estudio en un periodo de 4 años para conocer el comportamiento de As y Sb en el entorno, los resultados mostraron para un total de 75 muestras en agua (ríos, lagunas, arroyos, represas), una concentración media de As de 2.48 (0.51-12) µg L<sup>-1</sup> y Sb de 24.7 (5.59-163) µg L<sup>-1</sup>, en donde el 18% de las muestras de As y 95% de Sb, presentan concentraciones que exceden los límites máximos permisibles para el agua de consumo establecido por China (As: 10 µg L<sup>-1</sup>, Sb: 5 µg L<sup>-1</sup>). En los resultados del análisis de suelo aledaños a esta zona minera (81 muestras), las concentraciones de As y Sb presentaron una media de 69.8 (14.9-280)

mg kg<sup>-1</sup> y 1315 (141-8733) mg kg<sup>-1</sup> respectivamente. Para el caso de las concentraciones en donde se ubican los jales (50 muestras), la media para As fue de 169 (29.1-853) mg kg<sup>-1</sup> y para Sb 3789 (687-17196) mg kg<sup>-1</sup>, a partir de los resultados, los autores sugieren que los jales mineros en la mina Xikuangshan, son una fuente potencial importante de As y Sb en agua y suelos, debido principalmente a que los residuos fueron apilados sin las medidas pertinentes de seguridad, expuestas en superficie, sujetos a procesos de erosión e intemperismo (Z. Fu *et al.*, 2016). Se ha demostrado además la presencia de metales y metaloides en el polvo atmosférico y aerosoles relacionados con las operaciones mineras (Csavina *et al.*, 2012; Soto-Jiménez *et al.*, 2011; Luo *et al.*, 2016). En el pueblo minero Nacozari de García (Sonora, México), la dispersión de metales y metaloides de las presas de jales, es influenciado principalmente por escorrentías superficiales y la dispersión por viento de eflorescencia de sales, los resultados para el total de las muestras analizadas revelan altas concentraciones de As, Ag, Cu y Hg para la zona de jales, mientras que los suelos residenciales (casas) presentaron niveles altos de As y Cu, superando los niveles máximos permisibles establecidos por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (Meza-Figueroa *et al.*, 2009).

### 2.1.2. Percepción remota

Es la utilización de sensores para la adquisición de información sobre objetos o fenómenos sin que haya contacto directo entre el sensor y los objetos. Se basa en el fenómeno de la radiación electromagnética en el cual, las ondas electromagnéticas que lo componen pueden ser representadas como campos eléctricos y magnéticos autopropagados en forma de ondas transversales. Todos los elementos de la naturaleza tienen una respuesta espectral propia que se denomina “firma espectral”. La teledetección estudia las variaciones espectrales, espaciales y temporales de las ondas electromagnéticas, y pone de manifiesto las correlaciones existentes entre éstas y las características de los diferentes materiales terrestres (Sacristán-Romero, 2006).

La Teledetección es una técnica que puede aportar información muy valiosa para el medio ambiente. La observación terrestre que realizan los satélites de recursos naturales facilita información crítica sobre el estado de la cubierta vegetal o las superficies marinas, complementando la adquirida por otros medios convencionales,

como la fotografía aérea o los trabajos de campo (Chuvieco, 2010). La acelerada evolución de la tecnología espacial, óptica, electrónica, la mayor posibilidad del uso de la computación y la demanda de información sobre los fenómenos naturales, ha provocado que en la actualidad esta disciplina, sea muy utilizada en muchos campos de las actividades desarrolladas por el hombre.

#### 2.1.2.1. Clasificación de imágenes de satélite

La clasificación de imágenes de satélite, se basa en la extracción de información de la imagen mediante técnicas cuantitativas que ayudan a automatizar la identificación de los objetos en una escena. Esto implica el análisis de datos de escenas multiespectrales aplicando distintas técnicas, entre ellas reglas de decisión basadas en conceptos estadísticos para establecer la identidad de cada pixel en una imagen. El objetivo de toda clasificación es el reconocimiento de clases o grupos (vegetación, zonas urbanas, lagos, jales mineros, ríos, etc.) cuyos miembros (pixeles) tengan ciertas características en común (Sacristán-Romero, 2006). Comúnmente se utilizan dos tipos de clasificación: clasificación supervisada y no supervisada.

#### 2.1.2.2. Clasificación supervisada

El enfoque de esta clasificación supone un entrenamiento del clasificador a través de un conocimiento a priori de las condiciones y características del terreno que se ha seleccionado como representativo de las clases informacionales que se quieren reconocer en la imagen (Sacristán-Romero, 2006). De esta manera, pixeles de identidad conocida en el área de entrenamiento, se utilizan para clasificar pixeles de identidad desconocida. Una de las etapas más importantes en la clasificación es la selección del algoritmo de clasificación adecuado. Los principales algoritmos que se utilizan actualmente para esta técnica son: clasificación por mínima distancia, por paralelepípedos y el de máxima verosimilitud (MV), este último considerado como uno de los más empleados para la clasificación supervisada. El algoritmo de MV considera que los pixeles (con un determinado número digital (ND)) en el seno de cada clase se ajustan a una distribución normal, permitiendo describir cada categoría, por medio de una función de probabilidad a partir de su vector de medias y matriz de varianza-covarianza. El cálculo se realiza para todas las categorías que intervienen en la clasificación, de modo que el pixel se asigna a la clase a la que es más probable que

pertenezca (Chuvieco, 1995). Para obtener la probabilidad de que un pixel  $x$ , a través de su ND pertenezca a una clase  $A$ , se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$p(x/A) = (2\pi)^{-m/2} |V_A|^{-0.5} \exp\{-0.5(X - M_A)^T V_A^{-1} (X - M_A)\}$$

Donde  $m$  indica el número de bandas,  $|V_A|$  la determinante de la matriz de varianza-covarianza para la clase  $A$ ;  $X$  el vector de ND asociado con el pixel  $x$ , el vector  $M_A$ , el vector de la media de ND de la categoría  $A$ , y los superíndices  $T$  y  $-1$ , la transpuesta y la inversa de las matrices a las que afectan, respectivamente (Chuvieco, 1995).

### 2.1.2.3. Casos de estudio de percepción remota

La percepción remota es utilizada en varios ramos de la investigación, desde el monitoreo de zonas afectadas por contaminación en ríos, mares, suelos, inclusive los de contaminación en viento. Es de gran utilidad para ubicar focos de impacto ambiental en zonas en las que no se tiene acceso o se desconocía su existencia, desarrollo urbano, sector minero y sus implicaciones ambientales, zonas de cultivo, manejo de bosques, etc. (Li *et al.*, 2004; Pantoja-Espinoza, 2010; Altamirano *et al.*, 2012; Schmid *et al.*, 2013; Emel *et al.*, 2014). Por ejemplo, el distrito minero Almadén, una mina de Hg que se encuentra en la provincia de Ciudad Real al suroeste de España, se hicieron estudios para conocer el comportamiento del Hg en el entorno, utilizaron imágenes de tres diferentes sensores, Landsat TM (LTM), Landsat ETM+ (LETM) y EO-1 ALI (EOA). Hicieron un reconocimiento del área utilizando la técnica de clasificación supervisada a partir de las siguientes clases: zona minera, terreno rocoso, suelo desnudo, tierras de cultivo, pastos, arbustos, dehesa, bosques, suelo urbano, zona con pino y agua. Utilizaron el algoritmo basado en la asistencia vectorial (SVM, Support Vector Machine), en donde la validación se realizó mediante matriz de confusión (ver sección 8.1.3.2) y la verificación en campo para cada una de las clases de interés. La precisión obtenida de los datos para LTM, LETM y EOA fue de 69%, 74% y 82% respectivamente. La evaluación se considera de alta precisión teniendo en cuenta que las diferentes cubiertas de suelo presentan un mosaico complejo para el área de estudio (Schmid *et al.*, 2013).

El Knersvlakte (zona natural protegida) cubre una región de alrededor de 10 000 km<sup>2</sup> en el extremo oeste de África del Sur, se hicieron estudios para conocer la presencia y tipo de vegetación entre los parches de cuarzo que caracterizan el área

de estudio, utilizaron imágenes de los satélites SPOT 5 y Landsat 8, las imágenes fueron clasificadas mediante los algoritmo de Máxima Verosimilitud (MV) y máquina de soporte vectorial (SVM, Support vector machine). Las técnicas utilizadas fueron por píxel (PP) y basado en objetos (BO). En general, tanto los métodos PP y BO fueron capaces de distinguir entre los parches de cuarzo y los distintos sustratos en el área, los valores globales de precisión fueron de 59.6 - 92.2 %, con una media para ambos sensores de 75.43 - 80.09 % (Klerk *et al.*, 2016).

El rendimiento de la clasificación está ligado a factores como las propiedades espaciales y espectrales de las entidades de destino, datos de entrenamiento disponible y las características de las imágenes utilizadas (Pantoja-Espinoza, 2010; Klerk *et al.*, 2016).

## 2.2. Antecedentes regionales

El Servicio Geológico Mexicano a través del documento titulado “Panorama Minero del estado de Baja California Sur” (Junio de 2015), brinda información actual de las condiciones y planes del sector minero en el estado, donde se consideran 11 regiones de interés geológico-minero (Tabla 2).

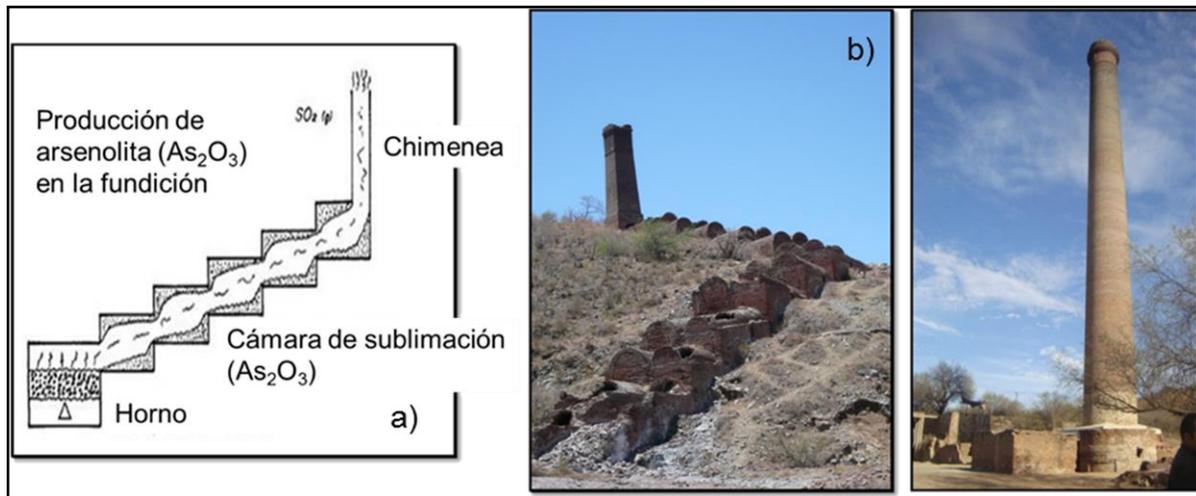
La actividad minera en el estado de Baja California Sur, desde el siglo XVIII en el Distrito Minero ET-SA, ha estado presente de una u otra manera en la zona, en donde la principal actividad minera era la extracción de oro y plata.

### 2.2.1. Desechos mineros

Las condiciones y afectaciones en las cuales quedaron las zonas explotadas en el Distrito Minero ET-SA, han sido estudiadas en los últimos años por varios investigadores. Carrillo y Drever (1998), reportaron que en el sitio se encuentran cerca de 800,000 toneladas de desechos mineros, con un contenido promedio de 4% de óxido de arsénico equivalente a 32,000 toneladas, reportan que al ser abandonadas las cámaras de sublimación (Figura 1) de las antiguas plantas de fundición, se encontraban con aproximadamente 600 toneladas de arsenolita pura ( $As_2O_3$ ), las cuales se formaron en estas cámaras, por un proceso de sublimación inversa. Se estima que el área contiene más de 100 sitios mineros abandonados y más de 30 pilas de lixiviación (Carrillo, 1996).

**Tabla 2.** Regiones de interés geológico-minero en Baja California Sur (SGM, 2015).

Región	Mineralización	Tipo de yacimiento	Distritos mineros importantes
Guerrero Negro	Sal (Na Cl)	Evaporítico	Guerrero Negro
Vizcaíno	Au, Cu, Co, Cr, Ni, Magnesita, Talco, Diatomitas	Vetas, diseminados Mantos, ortomagmáticos	San José de Castro
Laguna San Ignacio	Sal (Na Cl)	Evaporítico	No existe
Santa Rosalía	Co, Cu, Zn, Mn, yeso	Mantos	Santa Rosalía, Isla San Marcos, El Boleo
Punta Concepción	Cu, Mn	Brechas, diseminados (Dm) y stockwork (venero mineralizado)	No existe
San Juan de la Costa	Fosforita	Mantos	San Juan de la Costa
Isla Magdalena	Magnesita	Vetas, stockwork	No existe
Tembabiche	Fosforita	Mantos	No existe
El Triunfo-San Antonio (ET-SA)	Au, Ag, Pb, Zn	Vetas, stockwork y Dm	El Triunfo-San Antonio
Paredones Amarillos La Trinidad	Au, Ag, Cu, Mo	Vetas, stockwork	No existe
Sierra de San Francisco	Cu		No existe



**Figura 1.** Antiguas plantas de fundición en el Distrito Minero ET-SA. Tomado de a) Carrillo, 2006, b) Posada-Ayala, 2011.

Se han reportado altas concentraciones de EPT en los residuos mineros (cenizas, terreros y jales). Las concentraciones varían dependiendo de la zona de muestreo con intervalos de: As 45-480093 mg kg<sup>-1</sup>, Ag 24-885 mg kg<sup>-1</sup>, Cd 20-316 mg kg<sup>-1</sup>, Pb 20-84700 mg kg<sup>-1</sup>, Sb 23-3295 y Zn 26-68604 mg kg<sup>-1</sup> (Volke-Sepúlveda *et al.*, 2003; Sánchez-Martínez *et al.*, 2013; Sánchez-Martínez, 2013; Magdaleno-Rico, 2014; Posada-Ayala *et al.*, 2016). El promedio de estos valores están por arriba de los límites máximos permisibles (LMP) para los elementos normados en suelos que establecen la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 y los valores obtenidos por Wedepohl (1995) en relación a las concentraciones de la corteza terrestre superior (CTS).

En cuanto a las características visuales, los desechos de minería y fundición presentan de escasa a nula vegetación, tienen coloración rojiza y presentan sedimentos de grano fino a muy fino, el cual debido a su tamaño, es susceptible a ser movilizado por el aire (Carrillo, 1996; Posada-Ayala, 2011).

#### 2.2.1.1. Elementos tóxicos solubles (biodisponibilidad)

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 (Volke-Sepúlveda *et al.*, 2003). Estudios locales realizados para valorar la peligrosidad de los residuos por su toxicidad mediante pruebas de lixiviación, han reportado para cenizas en las plantas de fundición concentraciones de 668.800 mg L<sup>-1</sup> de As, 6.206 mg L<sup>-1</sup> de Cd, 4.857 mg L<sup>-1</sup> de Sb, 15.210 mg L<sup>-1</sup> de Pb y en pilas de lixiviación concentraciones de 8.84 mg L<sup>-1</sup> de Pb (Magdaleno-Rico, 2014), en donde estos valores superan los LMP establecidos en la NOM-157-SEMARNAT-2009. En relación al As en muestras de jales, las concentraciones fueron de hasta de 34680 mg kg<sup>-1</sup> y en pruebas de lixiviación presentaron concentraciones entre 0.01 a 1.62 mg L<sup>-1</sup> de As.

#### 2.2.1.2. Agua subterránea

Estudios realizados en la zona, reportan altas concentraciones de As en el agua de pozo, por encima de la NOM-127-SSA 1994 (0.025 mg L<sup>-1</sup> de As;) y los establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) de (0.01 mg L<sup>-1</sup> de As; OMS, 2001). Niparajá A.C., en colaboración con la Comisión Nacional del Agua, realizó en 2004-2005 el muestreo de agua en 500 pozos a lo largo del Estado de Baja California Sur,

para analizar la calidad de ella en tres rubros: salinidad (sólidos disueltos totales), nivel bacteriano y As. Los resultados arrojan que el 21% de los pozos rebasan los LMP por la NOM-127-SSA 1994 ( $1000 \text{ mg L}^{-1}$  de salinidad), para el caso del nivel bacteriano, el 42% de los pozos rurales presentan bacteria *E. Coli*, el cual es un indicador de contaminación fecal, por último reportaron que la presencia de As se presentó en el 17% de los pozos con niveles por encima de la Norma Mexicana y el 24% por encima de lo establecido por la OMS. Wurl y colaboradores (Wurl *et al.*, 2014), reportaron que para un total de 29 pozos muestreados distribuidos en la zona ET-SA, el As disuelto superó los valores establecidos por la OMS en el 41% de los sitios, donde la concentración mayor fue de  $0.45 \text{ mg L}^{-1}$ .

### **3. JUSTIFICACIÓN**

La actividad minera en el Distrito Minero ET-SA, desde sus inicios, se caracterizó por la falta de control en el manejo de desechos mineros, de manera que en la actualidad, existen altas concentraciones de elementos potencialmente tóxicos expuestos en superficie, sujetos a procesos de erosión e intemperismo, que contaminan el aire, el suelo y el agua, poniendo en riesgo la calidad de vida de los pobladores.

Investigaciones en la región (1996-2014), han reportado altas concentraciones de arsénico en el agua de pozos, que rebasan los límites permisibles de acuerdo a la Norma Mexicana (NOM-127-SSA1-1994) y a la Organización Mundial de la Salud. La contaminación de los pozos la atribuyen al contacto del agua de lluvia con minerales de arsénico presentes en rocas locales y desechos mineros, en donde el agua al infiltrarse en el subsuelo contamina el agua subterránea. El agua presenta un mayor riesgo de contaminación por arsénico al contacto con los desechos mineros, ya que el arsénico está en formas químicas más solubles, debido a que en las plantas de fundición mineras, se liberó el arsénico en forma de gas y posteriormente en las cámaras de sublimación fue transformado en óxido de arsénico (Carrillo-Chávez, 1996; Briseño-Arellano, 2014). Por otra parte se ha demostrado que en la cuenca Hidrográfica El Carrizal, los EPT presentes en los desechos mineros, están migrando durante lluvias locales o ciclónicas, a lo largo de los arroyos Hondo-Las-Gallinas-El Carrizal, contaminando los materiales del arroyo y el agua que se infiltra en el subsuelo (Romero-Guadarrama, 2011).

Existe la necesidad de identificar la ubicación y composición de los principales focos de contaminación, que están aportando EPT al suelo, aire y agua, para que las autoridades correspondientes puedan planear y llevar a cabo trabajos de remediación en la zona minera, y con esto reducir el riesgo a la salud de los pobladores. Por otra parte, en un país como México, en el cual los apoyos para desarrollar trabajos de investigación de campo son (y serán) cada vez más limitados. Herramientas y técnicas como la percepción remota, serán cada vez más socorridas y útiles, por la característica de realizar trabajos de exploración mediante procesamiento de imágenes en zonas que pudieran presentar acceso limitado o nulo.

#### **4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Los pobladores del Distrito Minero El Triunfo-San Antonio, están siendo expuestos a elementos tóxicos, de riesgo a la salud, presentes en el suelo, agua y aire de la región, a causa de la erosión e intemperismo de rocas locales y antiguos jales mineros que contienen arsénico. Estos desechos quedaron a la intemperie sin ninguna protección y dispersos en la región, los cuales son fuentes potenciales de contaminación al ambiente. Este trabajo tiene por objeto, identificar la ubicación de los desechos mineros mediante el uso de imágenes de satélite y validar la técnica mediante el análisis geoquímico de los materiales identificados, lo cual permitirá conocer la ubicación de los principales focos de contaminación del ambiente y zonas afectadas por la contaminación de jales mineros.

#### **5. HIPÓTESIS**

El uso de imágenes del satélite Pleiades, procesadas con el programa Geomática, mediante la técnica de clasificación supervisada, evidencia superficies con Jales mineros.

#### **6. OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS PARTICULARES**

##### **6.1. Objetivo general**

Identificar jales mineros antiguos en una porción del Distrito Minero El Triunfo-San Antonio, B.C.S., mediante el procesamiento de imágenes del satélite Pleiades y corroborar su presencia mediante la composición geoquímica de elementos potencialmente tóxicos y composición textural.

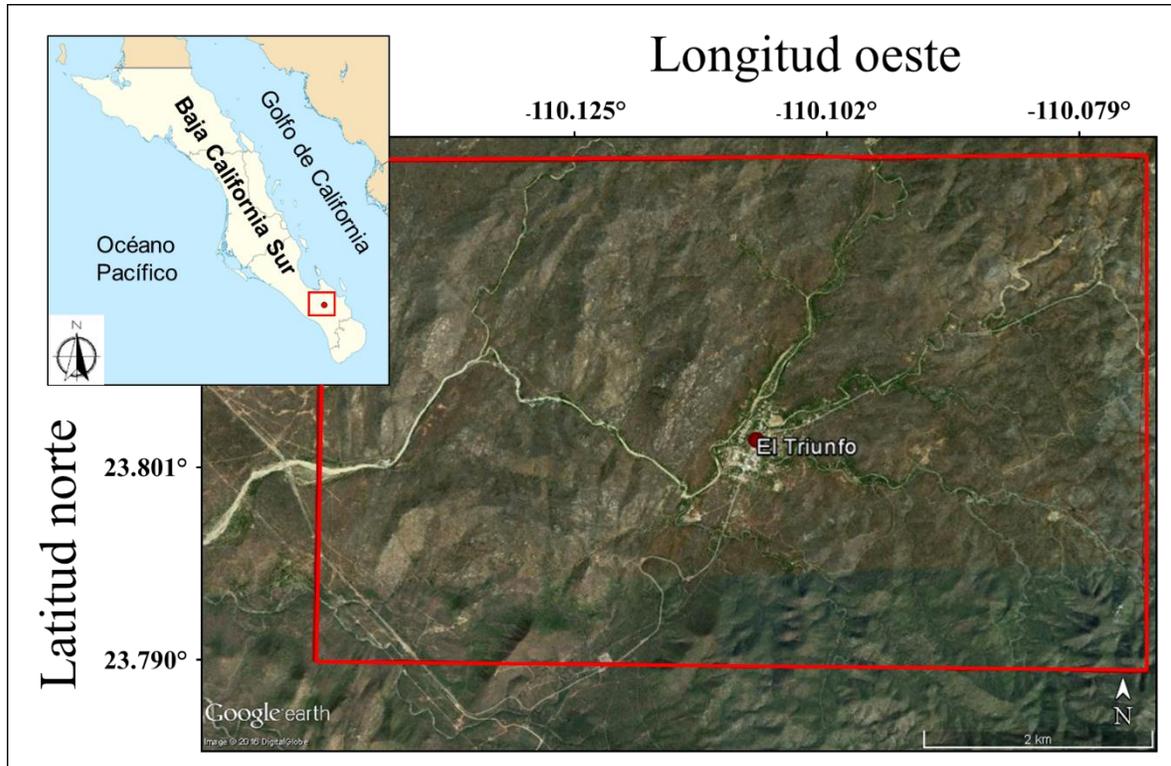
##### **6.2. Objetivos Particulares**

1. Identificar jales mineros mediante el uso de sensores remotos con la técnica de clasificación supervisada usando el programa Geomática.
2. Corroborar la presencia de desechos mineros identificados mediante el uso de sensores remotos, a través de la descripción física del lugar (observación directa).
3. Evaluar la composición textural por las técnicas de difracción láser y determinar el análisis geoquímico de los elementos presentes, por ICP-TD, ICP-MS e INAA.

## 7. AREA DE ESTUDIO

### 7.1. Ubicación del área de estudio

El Área de estudio se encuentra en el Distrito Minero El Triunfo-San Antonio, forma parte del municipio de La Paz, B.C.S., delimitada en un polígono con coordenadas 23°78' a 23°82' latitud norte y de los 110° 07' a 110° 14' longitud oeste, aprox. a 50 km al sureste de la ciudad de La Paz (Figura 2).



**Figura 2.** Zona de estudio: poblado El Triunfo y zonas aledañas, Baja California Sur.

### 7.2. Clima del área de estudio

El clima en el área de estudio se presenta de muy seco semicálido, muy seco cálido y cálido, las condiciones de temperatura varían a lo largo del año al igual que la precipitación.

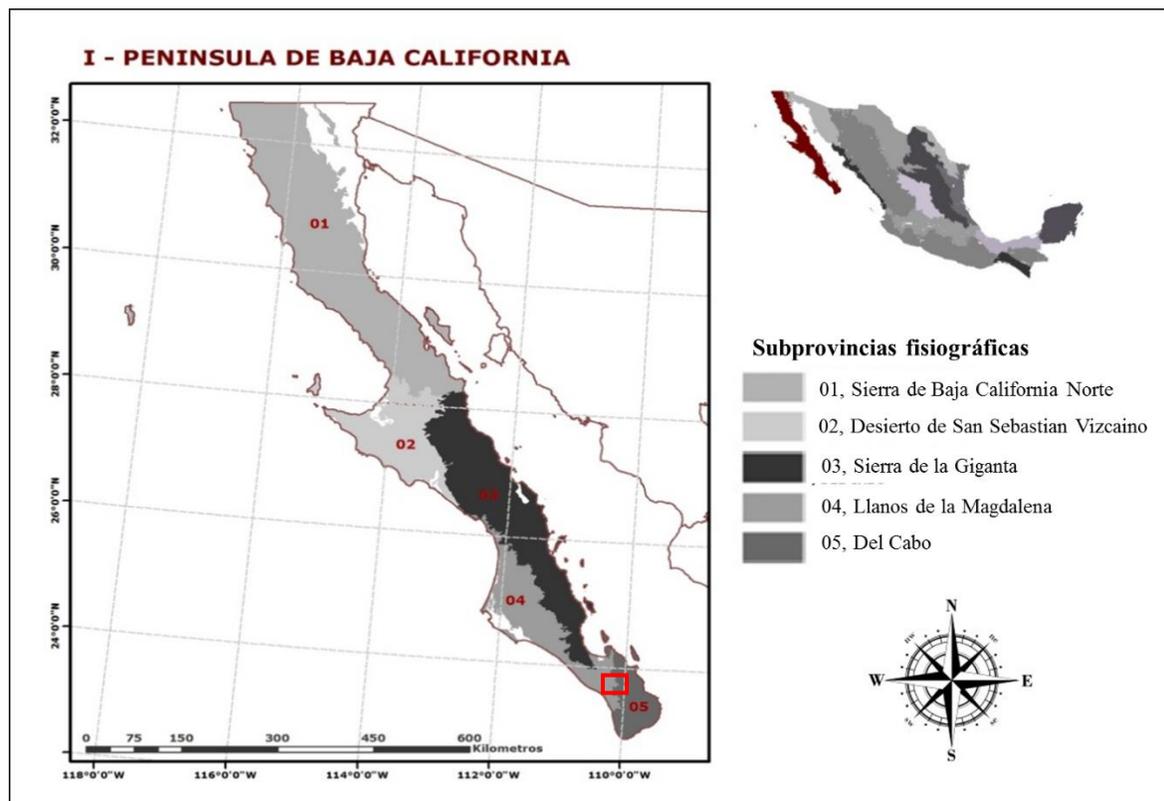
La temperatura promedio en el municipio de La Paz (1984-2014) es de 24.5 °C, en donde los meses que presentan menor temperatura son diciembre y enero, promediando temperaturas de 19 °C y 18°C respectivamente. La temperatura va aumentando paulatinamente llegando a su punto máximo en los meses de julio a

septiembre, presentando temperaturas promedio de 30°C, 31°C y 29°C respectivamente (INEGI, 2015).

El promedio de precipitación anual (1984-2014) es de 173 mm/año, los meses de menor precipitación son en el periodo de marzo-junio, con valores promedio de 0.2-0.7 mm/año, y los meses que presentan mayor precipitación son agosto y septiembre con valores promedio de 41.3 y 67.3 mm/año respectivamente. Se tiene reportado que el año más seco fue 2014 con una precipitación máxima de 15.6 mm para el mes de septiembre y el año más lluvioso 1984 alcanzando para los meses de agosto y septiembre precipitaciones de 159.8 y 126.4 mm respectivamente (INEGI, 2015).

### 7.3. Descripción Fisiográfica del área de estudio

Baja California Sur forma parte de la provincia fisiográfica denominada “Península de Baja California”, que a su vez se divide en 5 subprovincias (Figura 3), en la tabla 3, se muestran los municipios y la subprovincia a la que pertenecen (Secretaría de Economía, 2013).



**Figura 3.** Provincias y subprovincias fisiográficas de México (INEGI).

El Estado presenta rasgos fisiográficos diversos. Al centro de la entidad se revelan fenómenos orográficos conspicuos como sierras y mesetas de gran altura. El carácter volcanoclástico de las rocas que constituyen las serranías, infieren al terreno una topografía caracterizada, hacia su porción central por mesas alargadas con cantiles verticales disectados por la erosión de los arroyos que en ocasiones vierten sus aguas a cuencas endorreicas.

El área de estudio pertenece a la subprovincia “Llanos de la Magdalena”, las topoformas más sobresalientes consisten de llanuras que comúnmente presentan dunas y suelos residuales. El oeste de esta subprovincia consiste de una serie de barras arenosas costeras que encierran las Bahías de Santo Domingo y Magdalena. Hacia el este la topografía aumenta en elevación progresivamente hacia la frontera con la subprovincia de la Sierra La Giganta, predominando, lomeríos, mesetas y bajadas, en una etapa de erosión avanzada, hasta pasar paulatinamente a las sierras con mesas planas características de la Sierra La Giganta. Sus límites hacia el sur, hace frontera con la subprovincia Del Cabo, la cual presenta un conjunto de sierras que se extienden de norte a sur y se caracteriza por sierras y lomeríos con arroyos que vierten hacia el Océano Pacífico (INEGI, 2009).

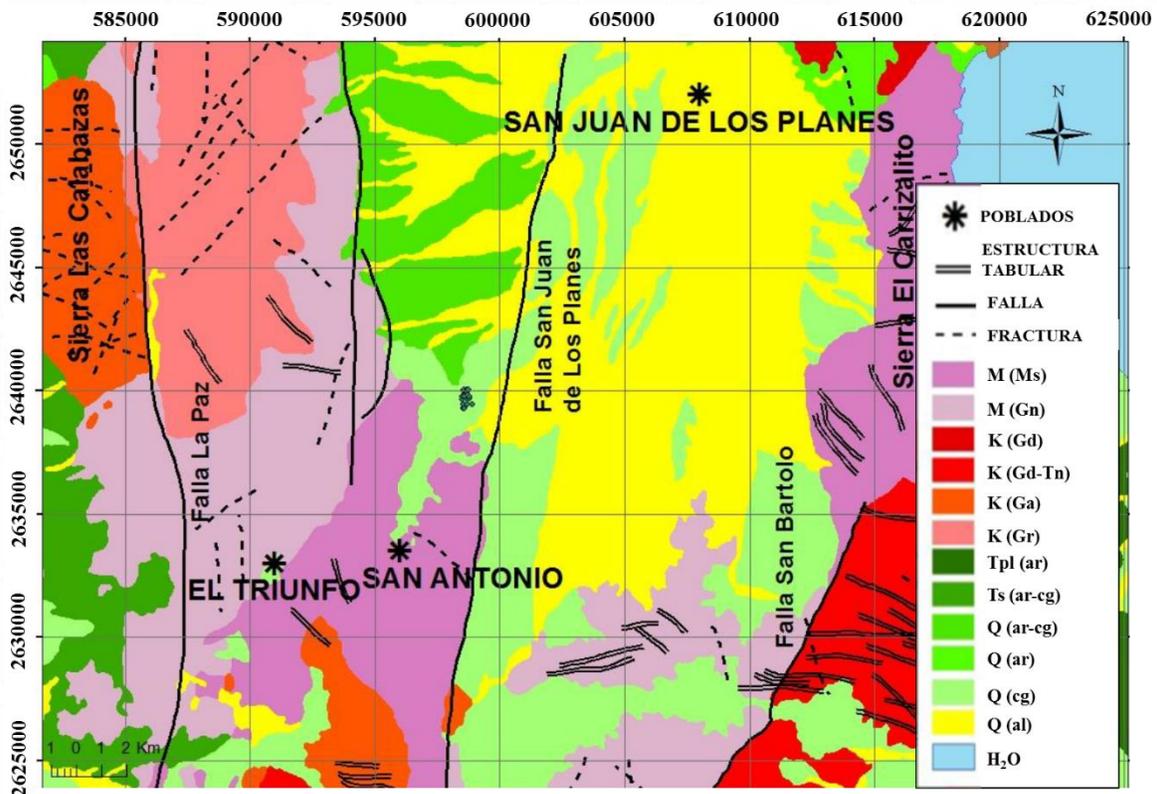
**Tabla 3.** Lista de subprovincias fisiográficas y municipios en BCS.

<b>Subprovincia fisiográfica</b>	<b>Estado</b>	<b>Municipios</b>
<b>1.Sierra de Baja California Norte</b>	Baja California	Ensenada, Mexicali, Playas de Rosarito, Tecate, Tijuana.
<b>2. Desierto de San Sebastián Vizcaíno</b>	Baja California	Ensenada.
	Baja California Sur	Comondú, Mulegé.
<b>3. Sierra de la Giganta</b>	Baja California	Ensenada.
	Baja California Sur	Comondú, La Paz, Loreto, Mulegé.
<b>4. Llanos de la Magdalena</b>	Baja California Sur	Comondú, La Paz.
<b>5. Del Cabo</b>	Baja California Sur	La Paz, Los Cabos

#### 7.4 Descripción Litológica del área de estudio

Los principales yacimientos minerales conocidos en el área son de tipo de relleno de fisura, depósitos de contacto, así como stockwork (relleno de fracturas dicotómicas y ramificadas) y diseminados, asociados a intrusivos de cuarzo-diorita-tonalita. Los de mayor distribución son los de fisuras asociadas a zonas de falla de características regional de rumbo noreste-suroeste, los que contienen mineralización de oro, plata, plomo, zinc, cobre y arsénico (SGM, 1996). En el Distrito Minero ET-SA, el yacimiento mineral se encuentra en vetas epitermales con minerales de sulfuro asociados con Au y Ag como la pirita, arsenopirita, esfalerita y galena (Carrillo, 1996).

La figura 4 muestra la geología del área de estudio y zonas aledañas, incluyendo los poblados que conforman el Distrito Minero El Triunfo-San Antonio.



**Figura 4.** Mapa geológico generalizado de la zona de estudio. Tomado de Espino-Ortega (2014). Era y Periodos: Mesozoico (M), Cretácico (K), Terciario (T), Plioceno (Tpl), Terciario superior (Ts), Cuaternario (Q). Roca o Suelo: Metasedimentarias (Ms), Gneis (Gn), Granodiorita (Gd), Tonalita (Tn), Gabro (Ga), Granito (Gr), arsenisca (ar), conglomerado (cg), aluvión (al). Agua (H<sub>2</sub>O).

Estratigráficamente, en el área de estudio afloran rocas metamórficas del Jurásico, intrusivas del Cretácico superior, intrusivas hipabisales y stocks en donde el rango de edad esta entre Neógeno-Mioceno, presenta además escasos afloramientos de areniscas cuarzosas del Plioceno, y una serie de sedimentos recientes entre los que se encuentran areniscas, limos y una serie de depósitos coluviales no consolidados (SGM, 1996).

Las rocas más antiguas en el área de estudio corresponden a un complejo de rocas metamórficas de diferente origen que desarrollan superficies de esquistosidad bien definida. Estas se presentan como esquistos de biotita, moscovita y cuarzo-feldespáticos, calizas recristalizadas, anfibolitas y gneises. Localmente todas ellas están afectadas por los intrusivos generando rocas de metamorfismo de contacto como hornfels y sckarns de epidota (SGM, 1996).

#### 7.5. Descripción Hidrológica del área de estudio

En el ciclo hidrológico, una proporción importante de la precipitación pluvial regresa a la atmósfera en forma de evaporación y evapotranspiración, mientras que el resto escurre por los ríos y arroyos delimitados por las cuencas, y parte se infiltra en los acuíferos.

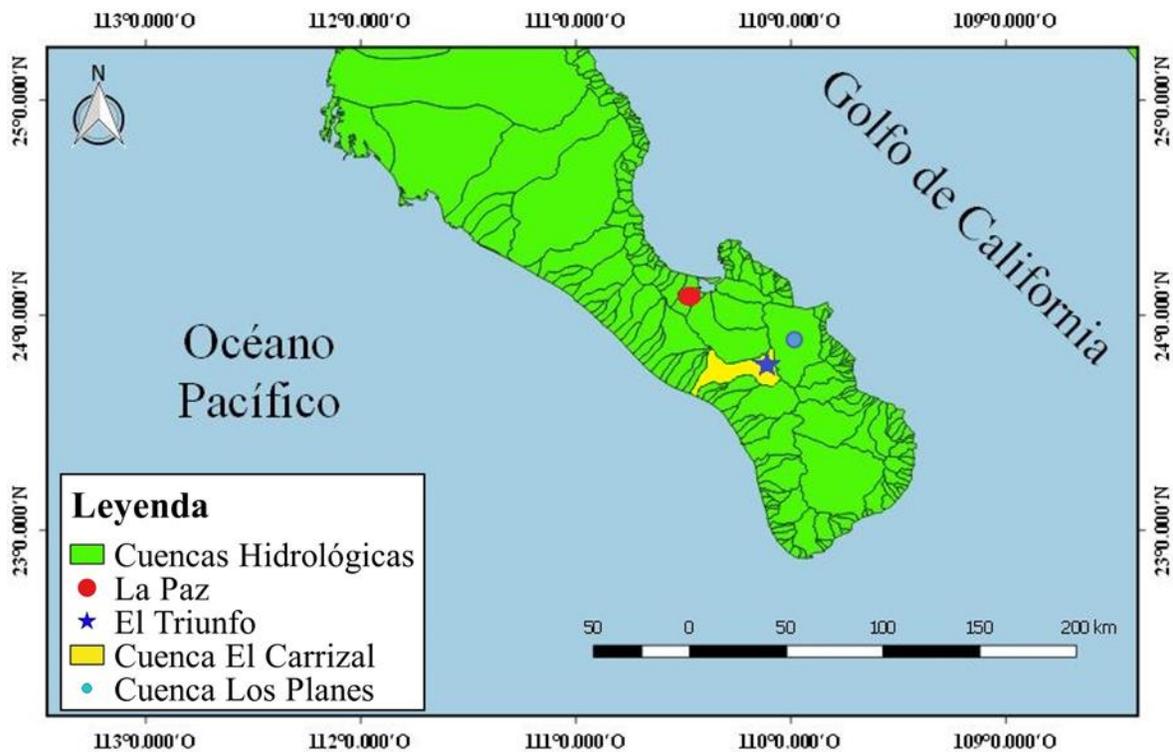
##### 7.5.1. Hidrología superficial

La Región Hidrológico Administrativa I, Península de Baja California (RHA I PBC), comprende la totalidad de los estados de Baja California y Baja California Sur, y el municipio de San Luis Río Colorado de Sonora. La Región cuenta con 3,606 kilómetros de litoral, de los cuales más de la mitad corresponden a las costas del Océano Pacífico y el resto a las costas del Golfo de California; representan aproximadamente 25% del total de litorales del país. La RHA I PBC se ubica en una de las zonas del país con menor precipitación media anual, 77% menor que la media nacional (CONAGUA, 2012).

INEGI (2007) tiene registradas 37 regiones hidrológicas en la República Mexicana. El área de estudio pertenece a la región registrada como B.C. Suroeste, que a su vez, está conformada por 72 cuencas hidrográficas.

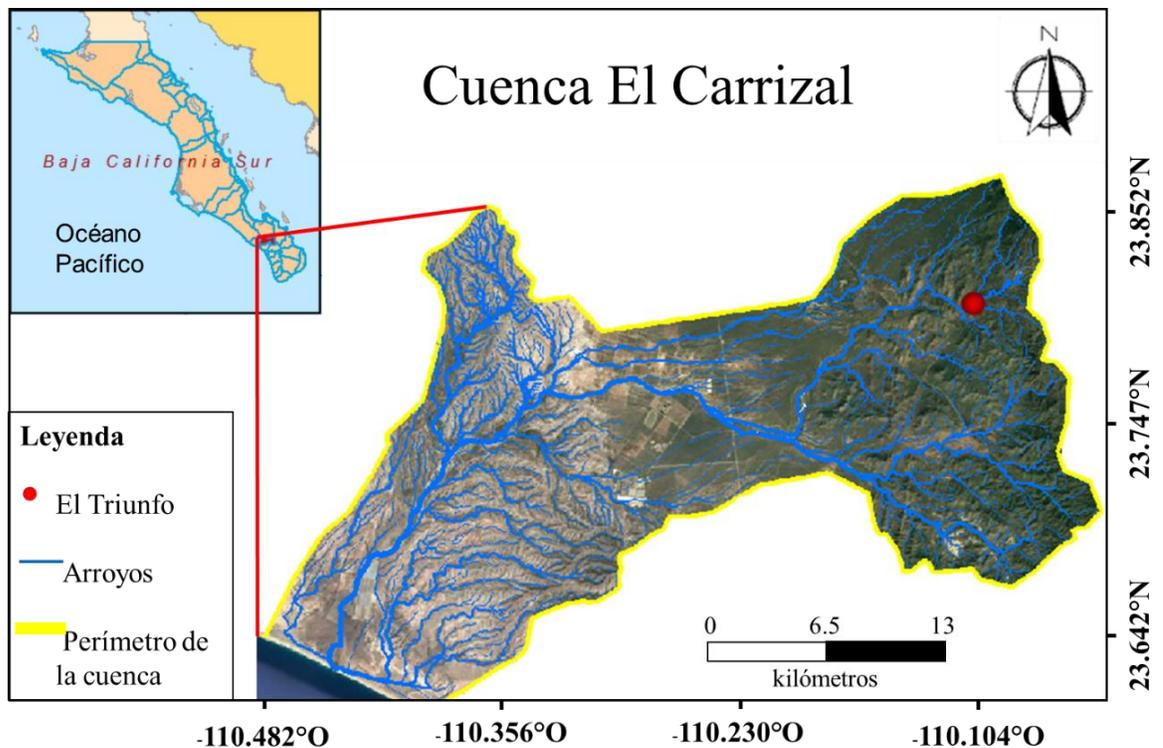
El Distrito minero ET-SA se encuentra en la parte alta de las cuencas hidrológicas El Carrizal y Los Planes (Figura 5). La cuenca El Carrizal cuenta con numerables

arroyos de diferente orden que convergen en el arroyo Hondo-Las Gallinas-El Carrizal, el cual tiene su desembocadura en el Océano Pacífico (Figura 6), presenta una altura máxima de 905 msnm, ocupa un área aproximada de 455.234 km<sup>2</sup> y tiene una disponibilidad media anual de agua superficial (actualización al 29 de diciembre del 2009) de 2.389 millones de metros cúbicos por año (hm<sup>3</sup>/año) (INEGI, 2007; PRONACOSE, 2013). En la cuenca Los Planes, los arroyos se confinan en el valle de San Juan de Los Planes y dan salida por la laguna La Bocana, en bahía La Ventana, en el Golfo de California.



**Figura 5.** Cuenca hidrológica El Carrizal, porción sur del estado de Baja California Sur.

Baja California Sur es el estado más árido de la República Mexicana que solo recibe en promedio una cantidad menor a 200 mm de precipitación, menos de la tercera parte del promedio nacional. En comparación, la evaporación potencial (la cantidad máxima que podría evaporarse) en un año es diez veces mayor a la precipitación. En el Estado de BCS, en promedio solo 5.7 mm de la precipitación anual alcanzan a recargar los acuíferos, el resto (88%) se evapotranspira y escurre en los arroyos hacia el mar (PRONACOSE, 2013).



**Figura 6.** Arroyos en la cuenca hidrológica El Carrizal.

#### 7.5.2. Hidrología subterránea

En lo que se refiere a las aguas subterráneas, el país está dividido en 653 acuíferos, de los cuales 39 pertenecen a Baja California Sur (BCS). Es importante mencionar que de estos 39, 18 están sobreexplotados (El Conejo-Los Viejos, Vizcaíno, San Bruno, San Lucas, Mezquital Seco, Santo Domingo, Melitón Albañez, La Matanza, Todos Santos, Los Planes, La Paz, El Coyote, San José del Cabo, Migriño, Alfredo B. Bonfil, San Juan Bautista-London, San Ignacio, Mulegé y San Marcos Palo Verde) y 10 con intrusión salina (Santo Domingo, Melitón Albañez, Los Planes, La Paz, Alfredo B. Bonfil, Loreto, Mulegé, San Marcos Palo Verde, San Bruno y San Lucas). Esto es importante porque debido a la falta de ríos permanentes en Baja California Sur, el agua se obtiene principalmente de fuentes subterráneas (PRONACOSE, 2013).

El área de estudio se encuentra dentro de los límites del acuífero El Carrizal definido con la clave 0322 (CONAGUA), se localiza en la porción suroeste del estado de BCS y tiene una superficie aproximada de 607 km<sup>2</sup>. Los escurrimientos superficiales únicamente ocurren durante la temporada de lluvias, la corriente principal es el arroyo El Carrizal, el cual descarga hacia el Océano Pacífico. Existen además numerosos

arroyos que bajan de la sierra y se pierden en la planicie, como son los arroyos: El Aguajito, Santa Rita, Hondo, Las Gallinas y El Caracol entre otros (CONAGUA, 2015).

En resultados de estudios técnicos recientes registrados (Diario Oficial de la Federación (DOF)), se concluyó que existe una modificación en la disponibilidad de agua subterránea, debido a cambios en el régimen natural de recarga, volumen concesionado y/o descarga natural comprometida (CONAGUA, 2015). Los resultados del estudio para el acuífero El carrizal se muestran en la tabla 4.

**Tabla 4.** Disponibilidad de agua subterránea en el acuífero El Carrizal, Baja California Sur.

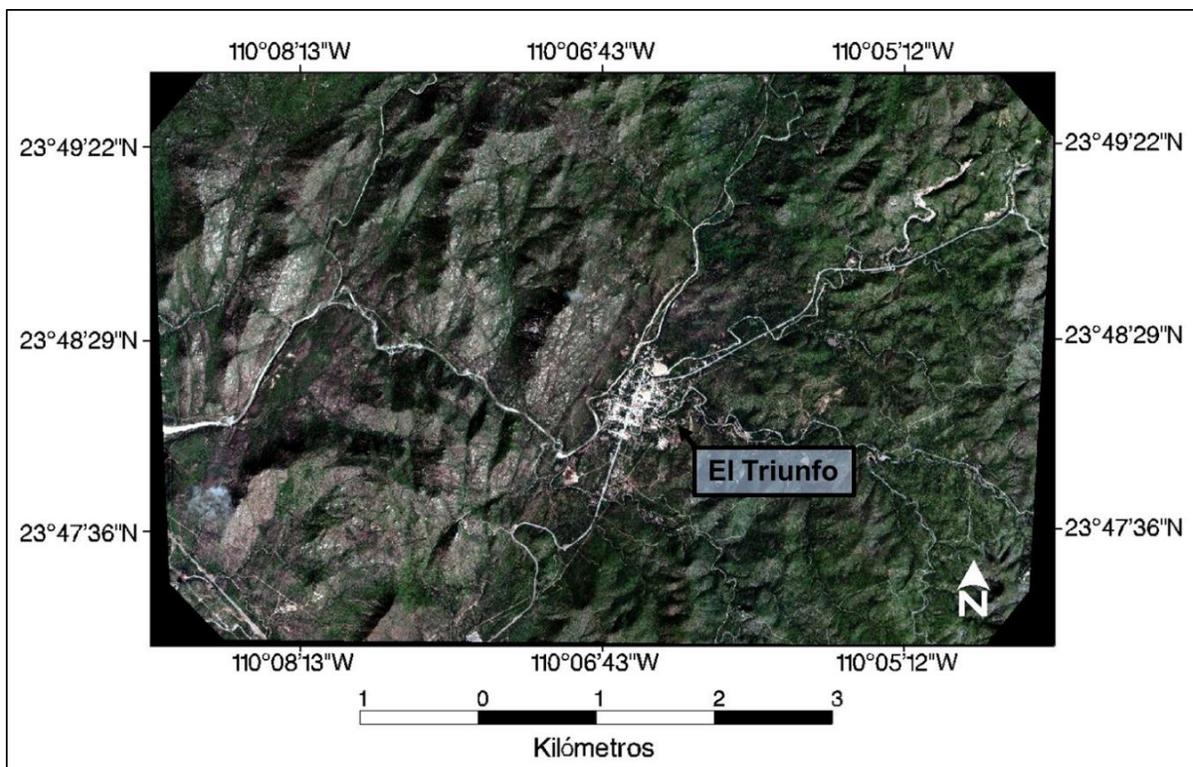
Clave	Acuífero	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
		Cifras en millones de metros cúbicos (hm <sup>3</sup> /año)					
<b>Estado de Baja California Sur</b>							
0322	El Carrizal	14.2	0.0	11.977581	10.5	2.222419	0.0

Nota: Recarga media anual (R), descarga natural comprometida (DNCOM), volumen concesionado de agua subterránea (VCAS), volumen de extracción de agua subterránea consignado en estudios técnicos (VEXTET), disponibilidad media anual de agua subterránea (DAS). Definiciones tomadas de Norma Oficial Mexicana (NOM-011-CONAGUA-2015).

## 8. MATERIALES Y MÉTODOS

### 8.1. Teledetección: Procesamiento de imágenes de satélite

La imagen de satélite que se procesó para la identificación de desechos mineros, fue adquirida a través de la compañía Gtt Imaging, del programa Geo-Intelligence de Airbus Defense and Space ([www.infoterra.es/datos-satelite-pleiades-oferta](http://www.infoterra.es/datos-satelite-pleiades-oferta)). La imagen fue tomada por el satélite Pleiades, el día 28 de Octubre del 2014 y cubre un área de 37 km<sup>2</sup> (Figura 7). Las características espectrales y de resolución de la imagen se muestran en la tabla 5 y sus coordenadas geográficas en la tabla 6.



**Figura 7.** Imagen de satélite Pleiades ([www.infoterra.es](http://www.infoterra.es)).

El procesamiento y análisis de la imagen, se realizó con el programa Geomática 2015. La metodología que se siguió para el procesamiento de la imagen fue en base a lo descrito en el manual de PCI Geomática 10 (Figura 8).

**Tabla 5.** Características espectrales y de resolución de la imagen del satélite Pleiades.

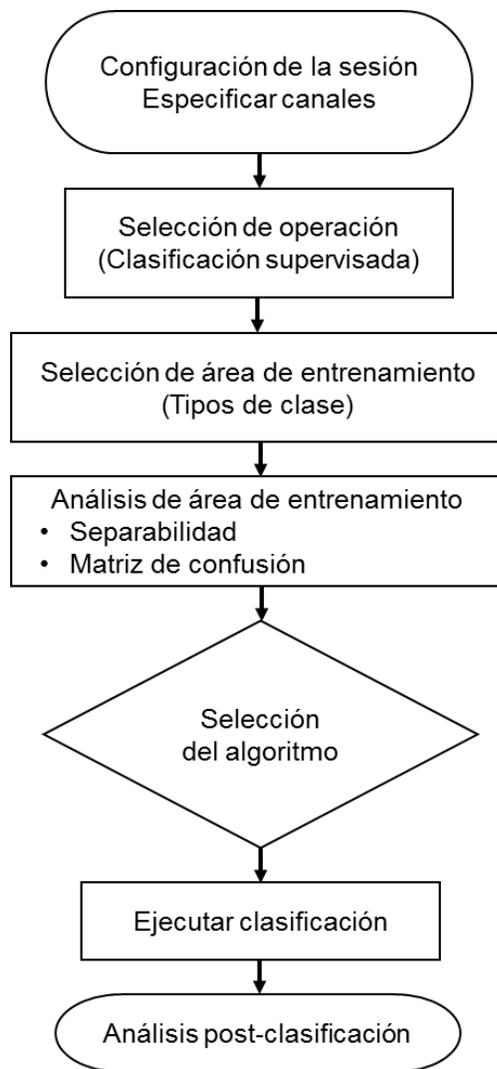
Pancromático (50 cm de resolución)	Multiespectral (2 m de resolución)
1 banda (blanco y negro)	4 bandas (A, V, R, IRC)
	Azul: 430 – 550 nm
	Verde: 500 – 620 nm
Pan: 470 – 830 nm	Rojo: 590 – 620 nm
	Infrarrojo cercano: 740 – 940 nm

**Tabla 6.** Coordenadas geográficas de la imagen de satélite Pleiades

	Latitud Norte	Longitud Oeste
<b>Noroeste</b>	23° 49' 43"	110° 8' 54"
<b>Noreste</b>	23° 49' 41"	110° 4' 25"
<b>Suroeste</b>	23° 47' 6"	110° 8' 55"
<b>Sureste</b>	23° 47' 4"	110° 4' 26"

### 8.1.1. Configuración y especificación de canales de la imagen satelital

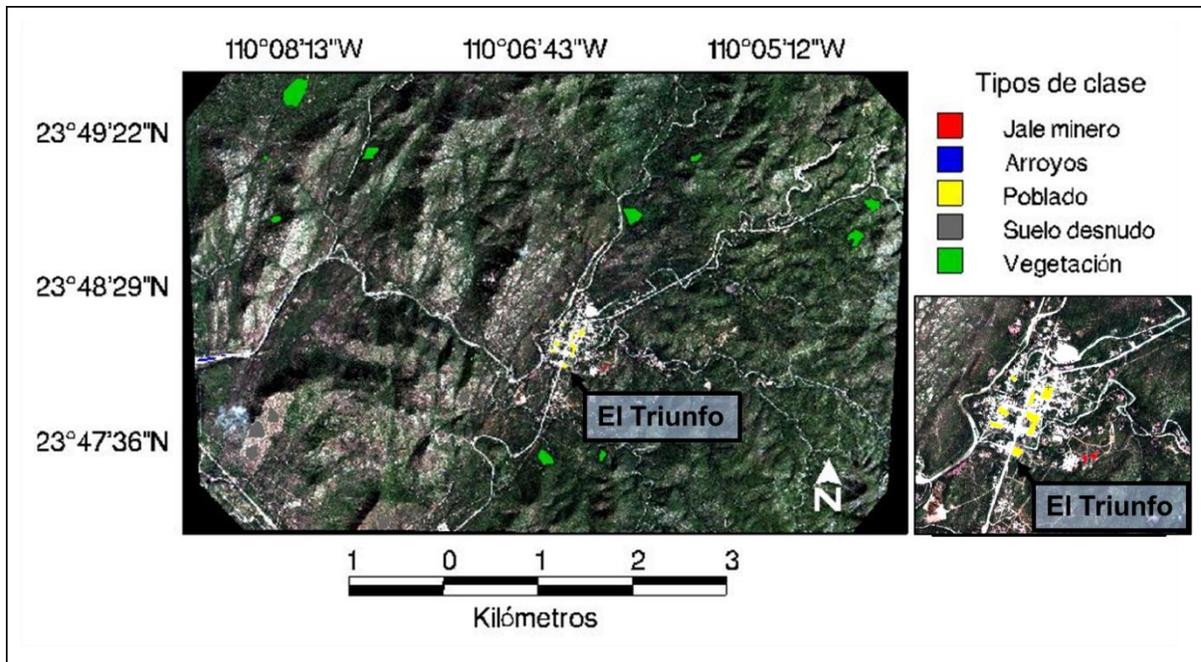
El primer paso a seguir fue transformar el formato original de la imagen (formato TIF), al formato utilizado por el programa para su procesamiento (formato pix), en este paso se seleccionaron las bandas 1, 2 y 3 (bandas azul, verde y rojo), en una combinación de Bandas 3-2-1 (Rojo-Verde-Azul), esta combinación es una imagen de color natural, la cual refleja el área tal como la observa el ojo humano en una fotografía aérea a color. Una vez seleccionada la combinación en el programa Geomática 2015, se especificó que se procesaría la imagen a través de la herramienta de clasificación supervisada.



**Figura 8.** Flujo de tareas en el procesamiento de la imagen con el programa Geomatica 2015.

### 8.1.2. Selección de áreas de entrenamiento

En la clasificación supervisada es de suma importancia hacer la selección de los sitios de entrenamiento. Con el apoyo visual del programa Google Earth Pro (2015) e información en base a salidas de campo, se realizó la selección de clases, ubicando las principales coberturas en el área de estudio. Los tipos de cobertura considerados fueron: *jale minero*, *arroyos*, *poblado*, *suelo desnudo* y *vegetación*. La selección de los píxeles para cada una de las clases se hizo a través de polígonos en la imagen (Figura 9).



**Figura 9.** Polígonos de áreas de entrenamiento correspondientes a tipos de clases previamente conocidas.

### 8.1.3. Análisis de áreas de entrenamiento

#### 8.1.3.1. Medida de separabilidad: Distancia Bhattacharyya

Para la selección de las áreas de entrenamiento, se buscó que los polígonos de referencia contaran con la suficiente similitud para minimizar la confusión en la clasificación. Se consideraron 439 píxeles para la clase jale minero, 2234 de la clase arroyo, 4148 de la clase poblado, 21079 de la clase suelo desnudo y 35728 de la clase vegetación. Para conocer si existían diferencias significativas entre las clases en las áreas de entrenamiento, se calculó el grado de separabilidad entre ellas mediante la herramienta, distancia de Bhattacharyya, calculada como la diferencia estadística entre pares de firmas espectrales. Con esta herramienta, la Divergencia es mostrada como distancia Bhattacharyya y la divergencia transformada, esto con la finalidad de estimar la probabilidad de que existiera algún error en la clasificación por la similitud en la característica de píxeles (número digital) en las clases, donde los valores cercanos a dos, denotan buena separabilidad y los cercanos a cero, una mínima diferencia entre clases, ambas, la distancia Bhattacharyya y la divergencia

transformada, son mostradas como valores reales entre cero y dos, estas medidas están directamente relacionadas con las precisiones de la clasificación.

#### 8.1.3.2. Matriz de confusión

Se realizó la evaluación previa a la clasificación en el programa utilizando una matriz de confusión o error, la cual da en porcentaje el grado de exactitud de la clasificación, haciendo un análisis general entre píxeles y su asignación después de la clasificación supervisada, se obtuvo además la exactitud promedio y la exactitud global. La exactitud promedio es calculada como la media de los porcentajes clasificados correctamente y la exactitud global es calculada con la siguiente fórmula:  $(\text{píxeles clasificados correctamente} / \text{total de píxeles de referencia}) * 100$ . La matriz nos muestra por ejemplo, el porcentaje de píxeles que son jales mineros y fueron asignados a algún otro tipo de cobertura (error de omisión) y viceversa, aquellos píxeles de otra cobertura clasificada como “jale minero” (error de comisión).

#### 8.1.4. Algoritmo de máxima verosimilitud

Una vez evaluadas las áreas de entrenamiento con resultados convenientes para realizar la clasificación, se especifica que la imagen se procesará a través de la herramienta de clasificación supervisada, para este estudio se designó el algoritmo de máxima verosimilitud, para realizar la clasificación, este algoritmo es uno de los más empleados en la clasificación supervisada, utiliza un modelo probabilístico, comúnmente la distribución gaussiana, para formar sus reglas de decisión en la categorización de los píxeles.

#### 8.1.5. Análisis post-clasificación

##### 8.1.5.1. Selección de posibles puntos identificados como jales mineros

Las áreas clasificadas como *jale minero*, obtenidas mediante la clasificación, se observaron principalmente en el poblado de El Triunfo, por lo cual fue necesario hacer un corte a la imagen inicial y enfocarse en esa zona. Posteriormente se hizo una selección de polígonos para ir a visitar y verificar que correspondían efectivamente a jales mineros. Los polígonos se eligieron de acuerdo a las consideraciones siguientes: polígonos con áreas no menores a 25 metros cuadrados, áreas con acceso vehicular, y áreas en donde la topografía pudiera haber influido para elegir zonas en donde

depositar los materiales para procesar o desechar durante los antiguos trabajos mineros. Una vez evaluados los polígonos con los criterios antes mencionados, se realizó una tabla con la ubicación en coordenadas geográficas para realizar posteriormente su verificación. Con el objeto de conocer si los polígonos seleccionados para ser verificados ya habían sido reportados en previos trabajos como jales mineros, se llevó a cabo una revisión bibliográfica, encontrando que algunos de estos polígonos si corresponden a jales mineros (Magdaleno-Rico, 2014; Sánchez-Martínez, 2013).

## 8.2. Verificación en campo de la clase Jale minero

### 8.2.1. Descripción visual del material

En la verificación de las áreas seleccionadas como posibles jales mineros, se usó un equipo de GPS (Sistema de posicionamiento global) para buscar las coordenadas geográficas correspondientes a cada zona considerada como jale minero. La observación estuvo enfocada en identificar características de jales mineros descritas en trabajos previos locales (Carrillo, 1996; Posada Ayala, 2011), y en otras regiones (E. Remon *et al.*, 2005; Gutiérrez-Ruiz *et al.*, 2007). En términos generales, se observó la coloración del material presente, su compactación, textura, y altura de la loma.

### 8.2.2. Muestreo del material

De los 32 polígonos identificados como posibles jales mineros y que fueron verificados en campo, se hizo un muestreo de material en 20 sitios (febrero y marzo de 2016) para llevar a cabo el análisis geoquímico y granulométrico, estos sitios se encuentran ubicados principalmente en el poblado de El Triunfo.

En los 20 sitios que se verificaron, la morfología fue de lomeríos, lo cual permitió que la colecta de los materiales, se pudiera hacer de manera sistemática. Para el muestreo fue necesario usar equipo de seguridad, para prevenir el riesgo de salud al exponerse al contacto con los materiales a muestrear. Se usó una mascarilla para retener polvo, guantes de nitrilo, lentes cerrados, bata de laboratorio y botas de vinil. Con el objeto de obtener una muestra representativa de cada área, se seleccionaron 3 sitios de muestreo, las orillas del área y la parte central, posteriormente se juntaron las muestras, para hacer una sola muestra compuesta de aproximadamente 500 g.

Para obtener cada muestra se hizo una pequeña poza de aproximadamente 20 cm de profundidad, con ayuda de una pala de plástico, a esa profundidad se tomó la muestra. La pala se enjuagó con agua destilada de obtener cada muestra. Las muestras se vaciaron en bolsas de plástico, y se homogenizaron mezclando el material dentro de la bolsa. Se colocó dentro de la bolsa una etiqueta de papel encerado, en la cual se escribió con lápiz el número de la muestra, coordenadas geográficas y fecha de muestreo. Posteriormente las muestras fueron transportadas al laboratorio de Geología Marina, en donde se almacenaron en un refrigerador para su conservación y posterior análisis.

### 8.3. Análisis granulométrico del material

El análisis textural o granulométrico de las muestras colectadas en los 20 sitios verificados, se realizó en el Laboratorio de Geología Marina del CICIMAR-IPN. Las muestras fueron previamente secadas en un horno de madera a una temperatura de 40-50 °C. Las técnicas usadas para este análisis fueron la técnica de tamizado usando un Rotap y tamices marca Tyler y la técnica de difracción láser usando un analizador de partículas marca Beckman Coulter modelo LS13320. Para este análisis se procesaron aproximadamente 15 gramos de muestra, para lo cual la muestra original fue reducida de tamaño en un cuarteador de metal, con objeto de obtener una muestra homogénea y representativa. Este material se vertió a través del tamiz con valor de phi (-0.75) con su respectiva charola en la base mediante el equipo ROTAP por espacio de 10 minutos. El material que quedó retenido en el tamiz y en la charola, se pesó en una báscula y se registró su peso. El material retenido en la charola, con tamaños menores a -0.75 phi (1.68 mm), se colocó en un tubo de plástico para ser analizado por la técnica de difracción láser, vía seca usando el módulo de polvos (Tornado). El programa del equipo fue ajustado para generar datos a intervalos de cuartos de phi entre -1 a 10 phi (2 mm a 1 micra) y reportar los datos en porcentaje. Se colocó el tubo con la muestra en el analizador de partículas y se dio inicio al programa del equipo, en donde la muestra es succionada del tubo hacia el sistema de detección y los datos quedan registrados en una tabla del programa del equipo. Nota, debido a que en la técnica de tamizado, el tamiz que retiene partículas mayores a 1.68 mm puede dejar pasar algunas partículas mayores a 1.68 mm, se puede ver reflejado en los porcentajes

obtenidos en el método de difracción láser y será necesario corregir los porcentajes de ese intervalo. Una vez hecha la corrección, se ajustan con los porcentajes obtenidos por la técnica de difracción para obtener una sola serie de datos por muestra, en donde cada intervalo de tamaño es expresado en porcentaje.

Procesamiento de datos:

Parámetros estadísticos: Para conocer el tamaño medio de las muestras, su grado de selección, y el tamaño dominante con respecto al valor medio, se calcularon los parámetros estadísticos de media, desviación estándar y sesgo respectivamente, de acuerdo a lo propuesto por Folk (1974) y Friedman and Sanders (1978). La clasificación de los tamaños de grano de cada muestra, se hizo de acuerdo a lo propuesto por Krumbein & Pettijohn (1938) y Wentworth (1919).

Histogramas de frecuencia: Con el objeto de conocer la distribución textural de cada muestra, se elaboraron histogramas de frecuencia ( $\phi$  vs % de frecuencia) con los datos obtenidos de análisis de difracción láser.

Diagrama de dispersión: Con los valores de sesgo y desviación estándar se elaboró un diagrama de dispersión, el cual permitió conocer la similitud y diferencias entre muestras.

#### 8.4. Análisis de elementos potencialmente tóxicos del material

##### 8.4.1. Preparación de las muestras

Para el análisis geoquímico de las 20 muestras colectadas en las áreas seleccionadas, las muestras se prepararon en el Laboratorio de Química Inorgánica del CICIMAR-IPN, antes de ser enviadas al laboratorio ActLabs en Canadá. La preparación de la muestra consistió en secarla en un horno de madera a una temperatura de 40-50 °C, y posteriormente homogenizarla en un mortero de ágata, con el objeto de aumentar su superficie de reacción antes de ser analizadas, reduciendo el tamaño de partícula a aproximadamente 100  $\mu$ m de diámetro (arena muy fina). El mortero de ágata se preparó antes de homogenizar cada muestra, para eliminar residuos de muestras procesadas previamente, el cual se lavó con jabón líquido Extran 300 (líquido alcalino cáustico, marca EMD), se enjuagó con agua

desionizada, y se dejó reposando en una solución de HNO<sub>3</sub> al 10%, durante un tiempo mínimo de 4 horas.

#### 8.4.2. Análisis geoquímico de EPT (As, Cd, Cu, Pb, Sb, Zn)

El análisis geoquímico de las 20 muestras colectadas en los sitios seleccionados, consistió en la determinación de las concentraciones de As, Cd, Cu, Pb, Sb y Zn. El análisis se llevó a cabo en el laboratorio ActLabs (Activation Laboratories) en Canadá. Las técnicas que se usaron fueron la de espectrometría de plasma inducido (ICP-TD, del nombre en inglés Inductively Coupled Plasma) en un equipo Agilent 735 y la técnica de activación neutrónica (INAA, del nombre en inglés Instrumental Neutron Activation Analysis). Debido a que las concentraciones para Pb y Sb en su gran mayoría fueron mayores a los límites de detección de las técnicas, 5000 mg kg<sup>-1</sup> y 10000 mg kg<sup>-1</sup> respectivamente, se realizó adicionalmente un análisis para conocer las concentraciones de Pb y Sb en 4 zonas (Z1, Z2, Z8 Y Z16) con la técnica de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP/MS, del nombre en inglés Inductively coupled plasma mass spectrometry) en un equipo Perkin Elmer Sciex ELAN 6000/6100/9000.

Para la técnica de espectrometría de plasma inducido, se pesaron 0.25 g de muestra, se digirió con cuatro ácidos: ácido fluorhídrico (HF), seguido por una mezcla de ácido perclórico (HClO<sub>4</sub>) y ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>), y después la muestra se calentó mediante varios ciclos de calentamiento controlado hasta llegar a su sequedad, una vez obtenida la sequedad, la muestra se puso de nuevo en solución con agua regia (HNO<sub>3</sub> y HCl), una vez preparada la muestra se procedió a analizarla en el equipo.

Para la técnica de activación neutrónica, se pesaron 30 g por muestra y se encapsularon en frascos de polietileno. Cada frasco y un estándar (1 por cada 11 muestras), se sometieron a un flujo de neutrones térmicos de  $7 \times 10^{12} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , usando cables de flujo, durante un período de 7 días, con el objeto de hacer decaer al isótopo radioactivo de sodio (<sup>24</sup>Na). Posteriormente las muestras se midieron en un detector de Germanio (Ge) de alta pureza con una resolución mayor que 1.7 kiloelectronvoltio (KeV) para el fotopico de 1332 KeV con fuente radioactiva de Cobalto-60 (<sup>60</sup>Co). Utilizando los cables de flujo, las actividades de decaimiento corregido se compararon con un método de calibración desarrollado a partir de múltiples materiales de

referencia con certificación internacional, con el objeto de controlar la precisión del equipo.

Para la técnica de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente, se pesaron 0.25 g de muestra, las muestras se fusionan con peróxido de sodio y exponiéndose a una disolución ácida, las muestras son luego analizadas con el equipo Perkin Elmer Sciex ELAN 6000, 6100 o 9000 ICP / MS.

La exactitud de los métodos se evaluó aplicando los estándares de referencia MESS-3 y PACS-2 de sedimentos marinos (NRCC). Los límites de detección para los elementos en cuestión se presentan en la tabla 7.

**Tabla 7.** Elementos y límites de detección (mg kg<sup>-1</sup>) de los equipos INAA, ICP-TD e ICP/MS.

<b>Elemento</b>	<b>Límite de detección</b>	<b>Límite superior</b>	<b>Equipo</b>
<b>As</b>	0.5	100000	INAA
<b>Cd</b>	0.3	2000	ICP
<b>Cu</b>	1	10000	ICP
<b>Hg</b>	1	10000	INAA
<b>Pb</b>	3	5000, > 5000	ICP & ICP/MS
<b>Sb</b>	0.1	10000, > 10000	INAA & ICP/MS
<b>Zn</b>	1	100000	ICP & INAA

#### 8.5. Factor de enriquecimiento normalizado e índice de geoacumulación en muestras del material

El estudio de la acumulación o enriquecimiento de metales pesados en el suelo se basa en técnicas de normalización geoquímica, las cuales permiten conocer los factores de enriquecimiento y los índices de geoacumulación ( $I_{geo}$ ) (Del Águila-Juárez *et al.*, 2005).

##### 8.5.1. Factor de Enriquecimiento Normalizado

Este tipo de análisis nos ayuda a referenciar la fuente de contaminación de un elemento en el suelo, de manera que podamos evaluar el impacto de origen

antropogénico del cual se originó. Se debe realizar antes de llevar a cabo el análisis, una normalización geoquímica de los datos del metal de interés usando un elemento conservativo. Para este trabajo, se utilizó al Aluminio (Al), considerando también los resultados publicados anteriormente para la zona de estudio (Marmolejo-Rodríguez *et al.*, 2011; Sánchez-Martínez, 2013).

Los factores de enriquecimiento normalizado (FEN) fueron calculados para As, Cd, Cu, Hg, Pb, Sb y Zn, donde se utilizaron las concentraciones promedio para la corteza superior reportadas por Wedepohl (1995). La fórmula utilizada para obtener los FEN para cada uno de los elementos de los puntos muestreados es la siguiente:

$$\text{FEN} = (X_{\text{sed}}/Al_{\text{sed}})/(X_{\text{cor}}/Al_{\text{cor}})$$

Donde:

FEN = Factor de Enriquecimiento Normalizado.

$(X_{\text{sed}}/Al_{\text{sed}})$  = Relación entre la concentración del elemento y la concentración del aluminio, en la muestra.

$(X_{\text{cor}}/Al_{\text{cor}})$  = Relación entre la concentración promedio de elemento y la concentración promedio del aluminio, en la corteza continental superior.

Para interpretar los resultados obtenidos de FEN para cada elemento, se utilizó la siguiente escala de valores (Marmolejo-Rodríguez *et al.*, 2011; Sánchez-Martínez *et al.*, 2013):

FEN = 1-3 Enriquecimiento nulo o bajo

FEN = 3-10 Enriquecimiento moderado

FEN = 10-25 Enriquecimiento severo

FEN = 25-50 Enriquecimiento muy severo

FEN > 50 Enriquecimiento extremadamente severo

#### 8.5.2. Índice de geoacumulación

Para conocer el grado de contaminación de los materiales en los sitios muestreados, se calculó el índice de geoacumulación ( $I_{\text{geo}}$ ) empleando la ecuación de Müller (1979):

$$I_{\text{geo}} = \log_2\left(\frac{C_n}{1.5 * B_n}\right)$$

Donde  $C_n$  es la concentración del elemento,  $B_n$  es el promedio de la concentración del elemento en la corteza terrestre superior propuesto por Wedephol (1995), y 1.5 es un factor de corrección del elemento relacionado a variaciones litológicas. Los resultados fueron interpretados a partir de la escala de valores propuesta por Müller en 1979 (Tabla 8):

**Tabla 8.** Clases de índice de geoacumulación y grado de contaminación.

<b>Clase</b>	<b>Valor índice</b>	<b>Categoría</b>
<b>1</b>	$I_{geo} < 0$	No contaminado
<b>2</b>	$0 < I_{geo} < 1$	No contaminado a moderadamente contaminado
<b>3</b>	$1 < I_{geo} < 2$	Moderadamente contaminado
<b>4</b>	$2 < I_{geo} < 3$	Moderadamente a fuertemente contaminado
<b>5</b>	$3 < I_{geo} < 4$	Fuertemente contaminado
<b>6</b>	$4 < I_{geo} < 5$	Fuertemente a muy fuertemente contaminado
<b>7</b>	$I_{geo} > 5$	Extremadamente contaminado

## 9. RESULTADOS

### 9.1. Procesamiento de imagen Pleiades, identificación de jales mineros

#### 9.1.1. Clasificación supervisada

Con el objeto de conocer el grado de similitud o diferencias entre clases (*jales mineros, arroyos, vegetación, poblados, suelo desnudo*), la tabla 9 muestra los resultados de la separabilidad entre clases, calculada a través del uso de la distancia de Bhattacharyya, la cual sirve para estimar la probabilidad de que pueda existir algún error previo a la clasificación supervisada, por la similitud en las características de píxeles (número digital) entre clases, en donde los valores cercanos a 2 denotan una gran diferencia entre clases (buena separabilidad) y los valores cercanos a cero denotan entonces una mínima diferencia entre clases.

**Tabla 9.** Distancia de Bhattacharyya: medida de separabilidad entre clases.

<b>Nombre</b>	<b>Jale minero</b>	<b>Arroyos</b>	<b>Vegetación</b>	<b>Poblado</b>
<b>Arroyos</b>	1.993			
<b>Vegetación</b>	1.990	2.000		
<b>Poblado</b>	1.750	1.504	1.945	
<b>Suelo desnudo</b>	1.260*	1.899	1.821	1.648

Nota: El asterisco indica la menor separabilidad en relación a la clase jale minero

Se observa en la tabla que la medida de separabilidad es muy buena en la mayoría de las clases en donde los valores son muy cercano a 2, e incluso con un valor de 2 para el caso de la separabilidad entre vegetación y arroyos, la relación que presentó una menor separabilidad fue la de *jale minero* y *suelo desnudo* con 1.260, aunque fue la menor, no se consideró lo suficientemente baja como para generar un problema significativo en la clasificación, pero sí para tomarse en cuenta al momento de evaluar la imagen ya clasificada y determinar la ubicación de los puntos identificados como posibles jales mineros.

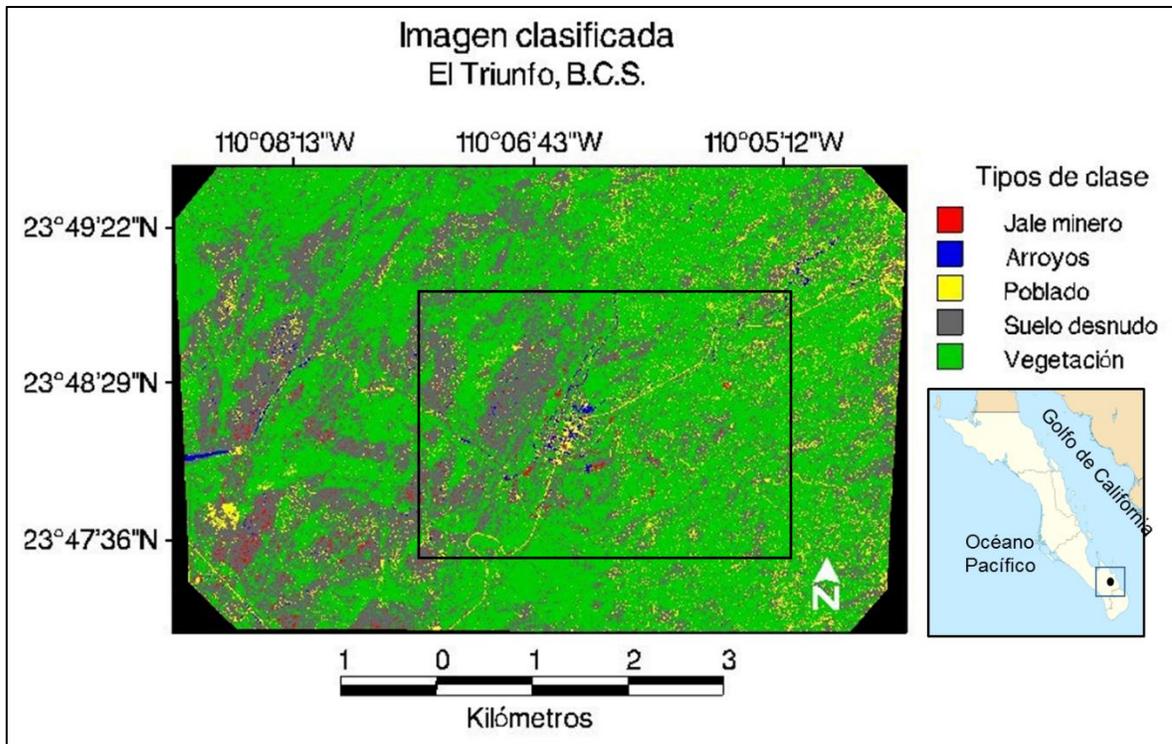
Con el objeto de conocer el grado de exactitud o error de la clasificación de las clases (*jale minero, arroyo, vegetación, poblado, suelo desnudo*), se utilizó la herramienta “matriz de confusión”. Los resultados de la matriz de confusión se dan en

porcentaje y se muestran en la tabla 10. Los porcentaje más altos representan una mayor exactitud de la clasificación (o un menor error en la clasificación) y los valores menores representan una menor exactitud de la clasificación. De acuerdo a la tabla de resultados (Tabla 10), la clase *Vegetación* es la que presenta la mayor exactitud en la clasificación (96.10 %) y la clase *Poblado* presenta la menor exactitud en la clasificación (59.52 %). En cuanto a la clase de mayor interés (*jale minero*), resultó con una buena exactitud en la clasificación (91.80%). La exactitud global de la clasificación fue buena (90.08 %), teniendo que de los 63628 pixeles que se tenían de referencia, 57313 fueron clasificados correctamente. En cuanto a la exactitud promedio de la clasificación presentó una moderada exactitud en la clasificación (85.10 %).

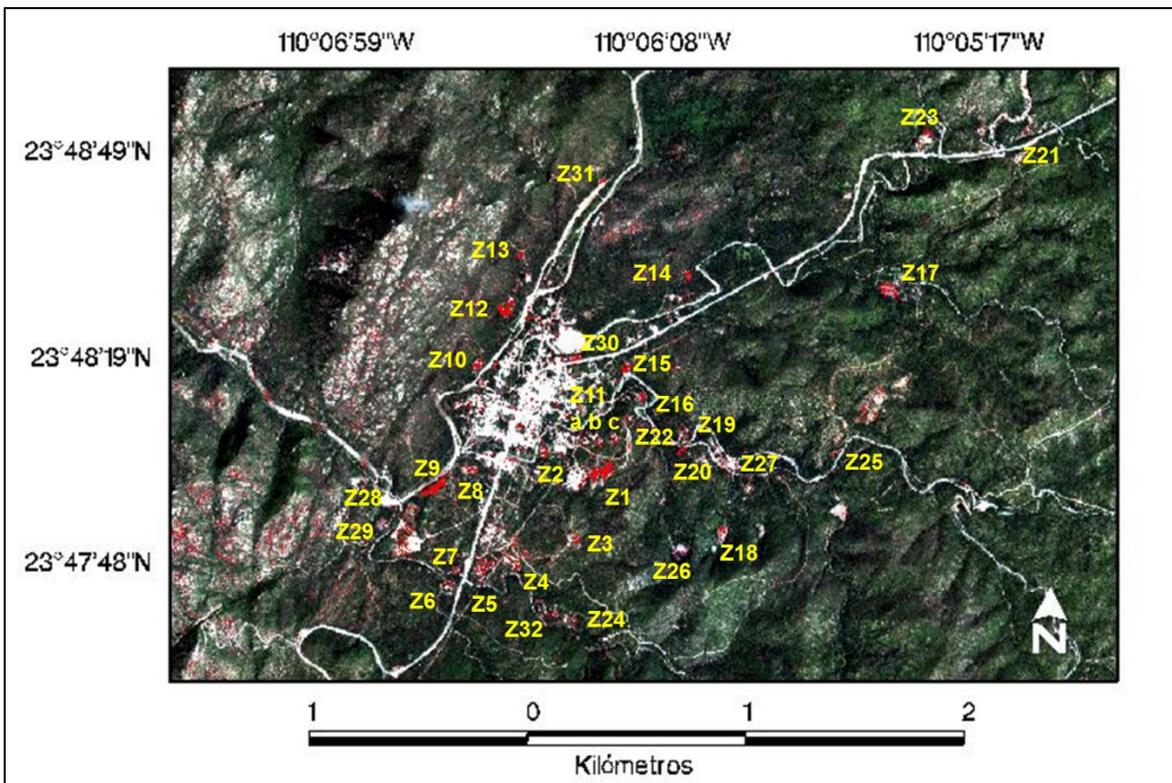
**Tabla 10.** Matriz de confusión (%).

<b>Nombre</b>	<b>Pixel</b>	<b>JM</b>	<b>A</b>	<b>V</b>	<b>P</b>	<b>SD</b>
<b>Jale minero (JM)</b>	439	91.80	0.00	0.23	1.59	6.38
<b>Arroyo (A)</b>	2234	0.00	92.48	0.00	5.55	1.97
<b>Vegetación (V)</b>	35728	0.00	0.00	96.10	2.70	1.20
<b>Poblado (P)</b>	4148	1.83	23.41	0.02	59.52	9.28
<b>Suelo desnudo (SD)</b>	21079	9.86	1.84	0.38	2.33	85.59
<b>Exactitud promedio de clases = 85.10 %</b>						
<b>Exactitud global de pixeles = 90.08 %</b>						

Una vez realizada la evaluación de las características de cada pixel, los resultados del procesamiento de la imagen Pleiades, mediante clasificación supervisada, utilizando el algoritmo de máxima verosimilitud, se definieron en toda la imagen las áreas para cada clase (*jale minero, arroyos, vegetación, poblado, suelo desnudo*), la imagen clasificada se muestran en la figura 10. A partir de esta imagen se hizo la selección de un área más reducida (Figura 11), con el objeto de llevar a cabo la verificación en campo de la clase de interés (*jale minero*). Para la selección del área reducida se consideró la zona que presentó un mayor número de pixeles con la clase *jale minero*, además de considerar aspectos como la presencia o ausencia de vegetación, rasgos topográficos y rutas de acceso, los cuales se obtuvieron mediante la observación de imágenes del programa Google Earth Pro.



**Figura 10.** Clasificación supervisada (Algoritmo "Máxima verosimilitud").



**Figura 11.** Recorte de la imagen clasificada con la presencia de los sitios clasificados como jale minero (12 km<sup>2</sup>).

Se registró cada una de las zonas identificadas como jale minero en coordenadas geográficas (Tabla 11).

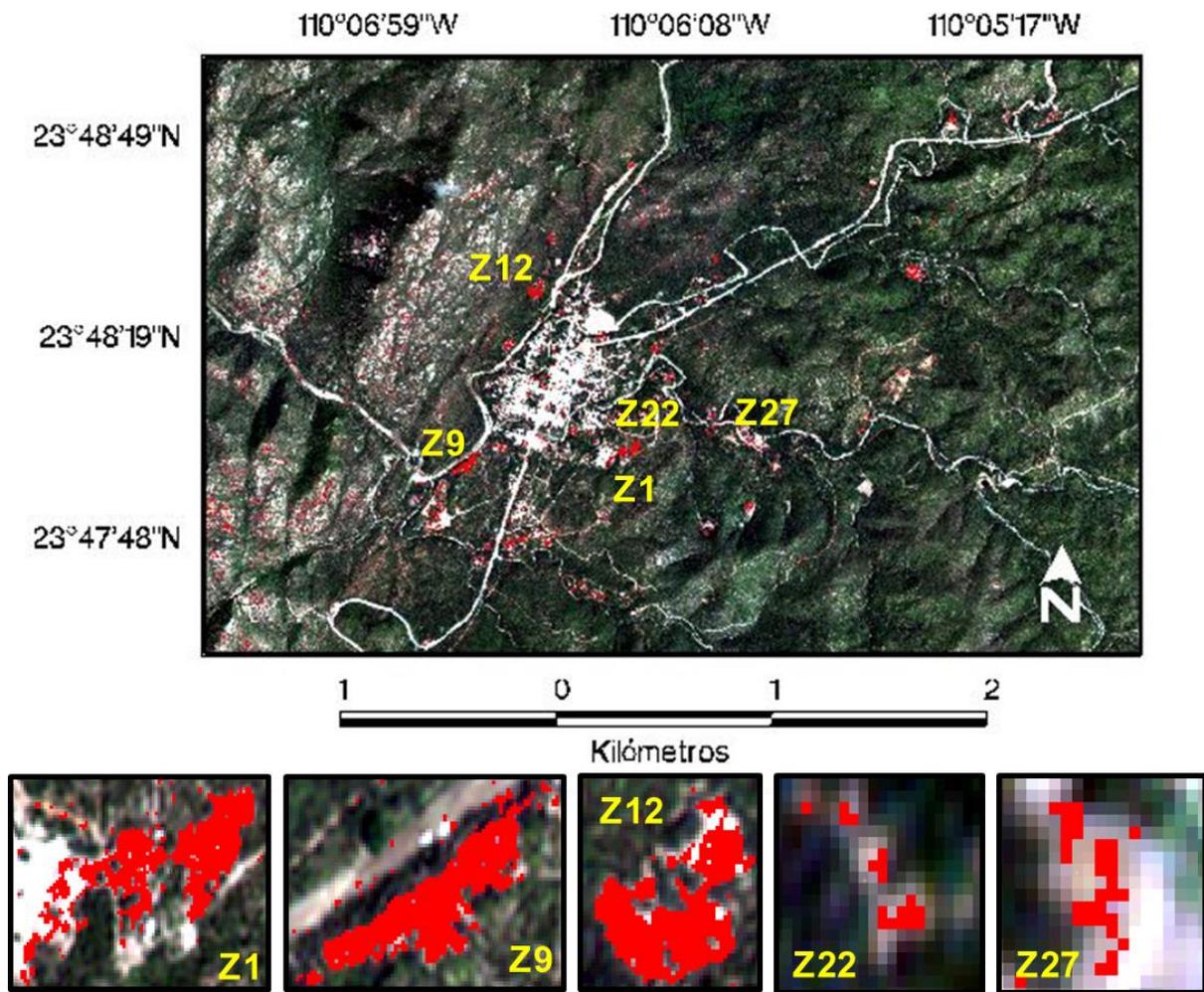
**Tabla 11.** Coordenadas geográficas de las zonas identificadas con la clase *jale minero*.

Zona	Latitud Norte	Longitud Oeste	Zona	Latitud Norte	Longitud Oeste	
Z1*	23°48'1.87"	110° 6'17.92"	Z16*	23°48'12.67"	110° 6'14.98"	
Z2*	23°48'4.50"	110° 6'28.08"	Z17	23°48'28.23"	110° 5'31.94"	
Z3*	23°47'51.56"	110° 6'22.48"	Z18	23°47'53.02"	110° 5'59.46"	
Z4	a*	23°47'47.84"	110° 6'32.36"	Z19	23°48'6.90"	110° 6'5.34"
	b*	23°47'49.03"	110° 6'34.30"	Z20*	23°48'4.99"	110° 6'5.60"
Z5*	23°47'46.84"	110° 6'38.69"	Z21*	23°48'52.20"	110° 5'9.38"	
Z6*	23°47'45.28"	110° 6'43.79"	Z22*	23°48'10.66"	110° 6'10.30"	
Z7*	23°47'47.31"	110° 6'42.12"	Z23	23°48'51.54"	110° 5'25.42"	
Z8*	23°48'2.13"	110° 6'39.83"	Z24*	23°47'39.74"	110° 6'24.96"	
Z9*	23°47'59.43"	110° 6'45.78"	Z25	23°48'4.22"	110° 5'40.90"	
Z10*	23°48'17.63"	110° 6'38.66"	Z26	23°47'50.00"	110° 6'6.73"	
Z11*	a	23°48'6.80"	110° 6'16.01"	Z27	23°48'4.53"	110° 6'0.37"
	b	23°48'6.07"	110° 6'18.88"	Z28	23°47'56.77"	110° 6'53.15"
	c	23°48'6.21"	110° 6'20.96"	Z29	23°47'54.28"	110° 6'54.40"
Z12*	23°48'25.70"	110° 6'33.66"	Z30	23°48'18.58"	110° 6'22.50"	
Z13*	23°48'33.68"	110° 6'31.59"	Z31	23°48'44.63"	110° 6'18.33"	
Z14	23°48'30.31"	110° 6'4.26"	Z32	23°47'40.57"	110° 6'28.35"	
Z15*	23°48'16.97"	110° 6'14.35"	-	-	-	

Nota: El asterisco indica zonas muestreadas para análisis geoquímico y textural.

Las zonas que presentaron mayor área en cuanto a los pixeles clasificados (pixel 2x2 metros) en la clase *jale minero*, fueron Z1, Z9 y Z12, abarcando áreas aproximadas de 4105, 3412 y 2781 m<sup>2</sup> respectivamente. Mientras que las zonas con menor área fueron Z22 y Z27 con un área aproximada de 40 m<sup>2</sup> y 120 m<sup>2</sup> respectivamente (Figura 12).

Es importante mencionar que la gran mayoría de las áreas definidas con la clase *jale minero*, se presentaron en el poblado El Triunfo y zonas aledañas. Estas zonas fueron verificadas con la visita en campo, de las cuales 20 fueron muestreadas para conocer su composición geoquímica (Tabla 11).



**Figura 12.** Polígonos de la clase *jale minero* que mostraron mayor y menor área: Z1= 4105 m<sup>2</sup>, Z9= 3412 m<sup>2</sup>, Z12= 2781 m<sup>2</sup>, Z22= 40 m<sup>2</sup> y Z27= 120 m<sup>2</sup>.

## 9.2. Verificación en campo de la clase *jale minero* y muestreo del material

### 9.2.1. Características físicas de los sitios y sus materiales

Cabe destacar que de los 32 sitios visitados, la gran mayoría presentó características muy similares, en donde la morfología es de lomeríos con alturas aproximadas entre 5 a 20 metros, la parte más alta de las lomas era plana y la pendiente muy pronunciada, de aproximadamente 35-50°. La mayoría de estos sitios se encontraron muy cercanos o justo al lado de los arroyos y rodeados de cerros rocosos (ígneas, metasedimentarias). El material presente en la mayoría de los sitios, no está consolidado, es de tamaño muy fino y de coloración rojiza, con apariencia de ser un depósito de cenizas, que al caminar sobre la pendiente el material se deslizaba

y se esparcía en el aire, en cuanto a la parte más alta, era plana y presentaba cierto grado de compactación. En cuanto a la vegetación, era de escasa a nula, sin embargo algunos sitios se presentaban parcialmente vegetados. La figura 13 muestra fotografías de algunos de estos sitios.



**Figura 13.** Sitios de verificación de la clase jale minero en el área del poblado El Triunfo y zonas aledañas.

Un factor en común en casi el 100% de los sitios visitados, fue que contaban con pilas construidas de concreto y ladrillos, denominadas pilas de lixiviación, usadas durante la actividad minera en la extracción de oro y otros metales de interés económico. En algunos otros sitios se encontraron equipos y construcciones en ruinas de plantas de fundición y molienda de la antigua actividad minera (Figuras 14).



**Figura 14.** Pilas de lixiviación y ruinas de plantas de fundición minera en sitios de verificación de la clase *jale minero* en el poblado El Triunfo y zonas aledañas.

Una vez verificadas las zonas consideradas como jale minero, fueron descritas por sus características a manera de corroborar, si en efecto se trataban de desechos de la antigua minería o algún otro tipo de suelo. De los 32 sitios clasificados como jale minero, en 3 de ellos no hubo acceso, en un sitio se encontró un meandro, 23 sitios correspondieron a desechos mineros (21 depósitos de jales y 2 terreros) y 5 sitios más se corroboraron como jale minero de acuerdo a la literatura. En el sitio que se encontró un meandro, se infiere que este punto está influenciado por el acarreo de desechos mineros a lo largo del arroyo de un jale minero ubicado aproximadamente a 150 m del meandro. Estos resultados muestran que la técnica de teledetección reprodujo lo observado en campo en cuanto a la identificación de desechos mineros en la zona de estudio (Tabla 12).

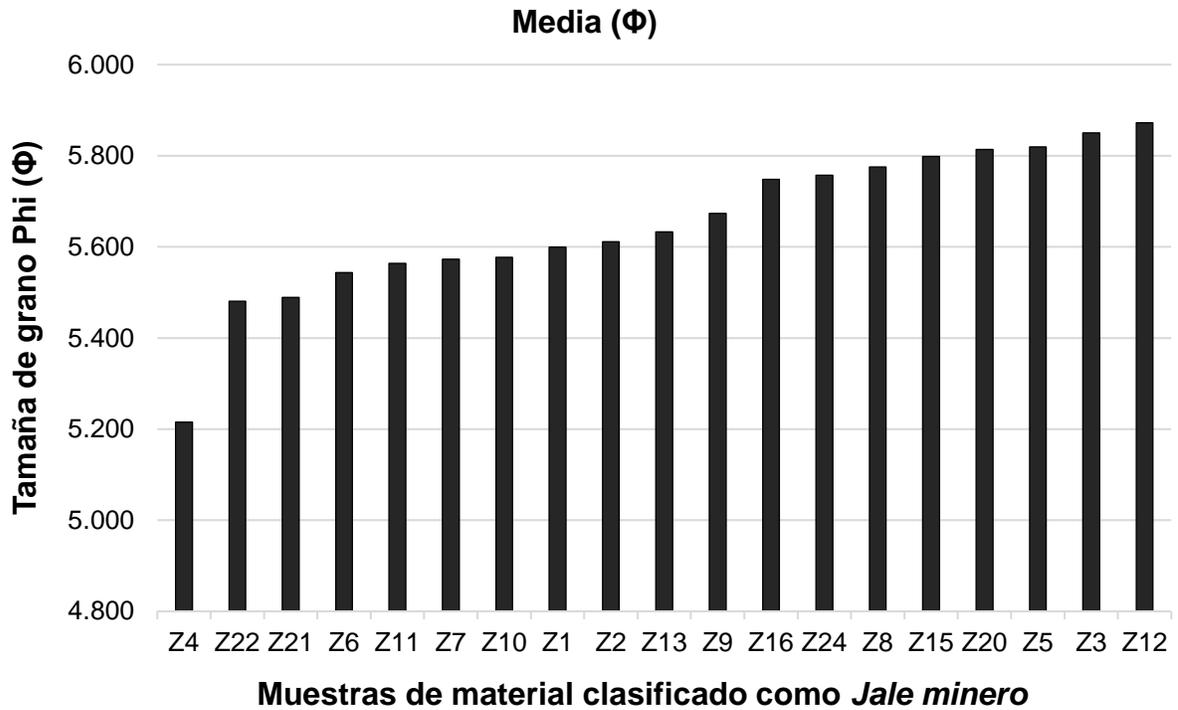
**Tabla 12.** Descripción de los sitios clasificados en la clase *jale minero*.

Zona	Descripción	Observación
Z1:Z14, Z16, Z20:Z22, Z24, Z30, Z32	Jale minero	Este trabajo
Z25, Z29	Terrero minero	Este trabajo
Z28	Meandro	Este trabajo
Z19, Z23, Z31	Sin acceso	Este trabajo
Z15	Jale minero	Sánchez-Martínez, 2013
Z17, Z18, Z26, Z27	Jale minero	Magdaleno-Rico, 2014

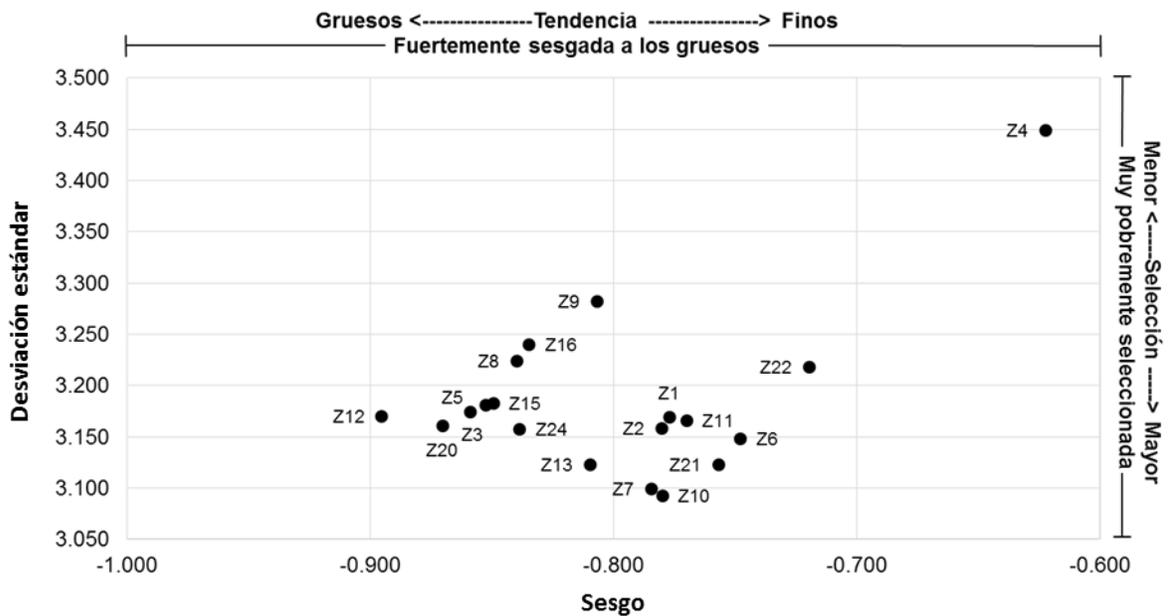
### 9.3. Características granulométricas de los materiales

Al realizar los análisis estadísticos por zona, los resultados arrojan que los tamaños medios de grano, no tienen mucha diferencia entre sí, el tamaño que predomina es de limo medio (5 a 6  $\Phi$ , 0.031 a 0.015 mm) (Figura 15), presentan un sesgo muy fuerte hacia los tamaños gruesos y las muestras a partir de su desviación estándar arrojan una muy pobre selección (Figura 16).

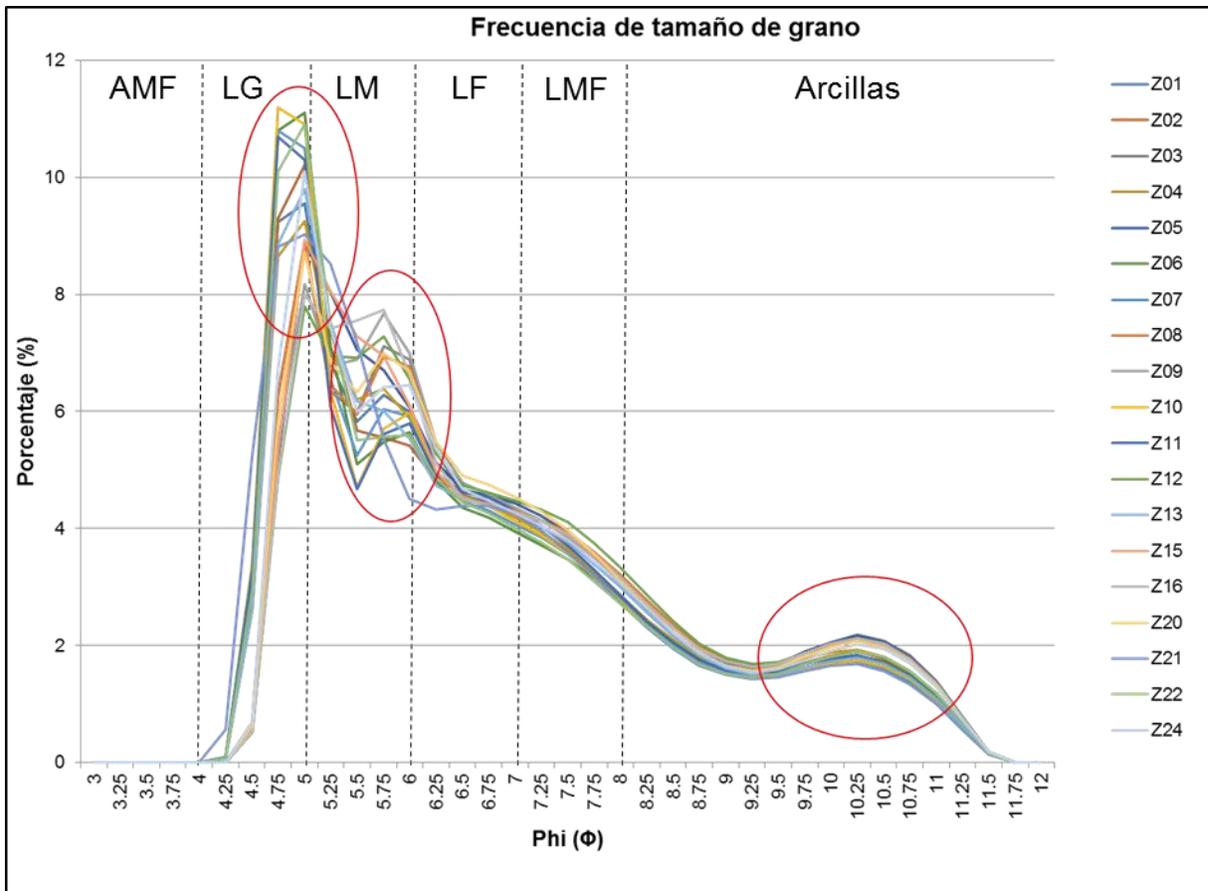
Para conocer el comportamiento del tamaño de grano para cada muestra con respecto a los valores de phi ( $\Phi$ ), se realizó una gráfica de frecuencias (Figura 17).



**Figura 15.** Tamaño medio de grano de los materiales clasificados como jales mineros.



**Figura 16.** Diagrama de dispersión de la Desviación Estándar y Sesgo de los tamaños de grano de los materiales clasificados como jales mineros.



Nota: Arena muy fina (AMF), Limo grueso (LG), Limo medio (LM), Limo fino (LF), Limo muy fino (LMF).

**Figura 17.** Tamaño de partículas en materiales de la clase *jale minero*.

En el análisis de tamizado, los granos por encima de la malla de  $-1 \Phi$  (2 mm) representaron en promedio el 6 % del peso total de las muestras. La fracción mayor a  $-1 \Phi$ , la cual fue procesada por la técnica de difracción laser, mostró que no hay presencia de tamaños entre  $-1 \Phi$  y  $3.75 \Phi$  (2 a 0.074 mm), presentando tamaños entre  $3.75$  a  $11.5 \Phi$  (0.074 a 0.0003 mm), los cuales muestran tres picos de frecuencia (modas) que sobresalen,  $4.5 - 5 \Phi$  (0.044 a 0.031 mm), en el cual se presentan la mayor parte de la muestra y en donde se observa el valor medio de tamaño de grano en todas las muestras, en el segundo pico se encuentran tamaños en el rango de  $5.5 - 6 \Phi$  (0.020 a 0.0156 mm) y el tercero pico con tamaños de grano muy finos, entre los  $9.75 - 11 \Phi$  (0.002 a 0.00049 mm). En la figura 16 se observa como el punto Z4 presenta un tamaño distinto a los demás (punto aislado), tiene una tendencia mayor hacia los tamaños finos y un menor grado de selección.

## 9.4. Análisis geoquímico

### 9.4.1. Validación del método geoquímico

Los métodos para el análisis de composición geoquímica, fueron validados utilizando estándares certificados de referencia MESS-3 y PACS-2. En la Tabla 13 se muestran las concentraciones certificadas de los elementos, y las obtenidas a partir del análisis de los estándares MESS-3 y PACS-2 enviadas al laboratorio.

**Tabla 13.** Porcentajes de Recuperación (PR) de EPT en estándares certificados.

Elemento y técnica	MESS-3			PACS-2		
	(mg kg <sup>-1</sup> )	PR		(mg kg <sup>-1</sup> )	PR	
	Valor certificado	Valor medido	%	Valor certificado	Valor medido	%
<b>As - INAA</b>	21.2 ± 1.1	31.4	141	26.2 ± 1.5	38	145
<b>Cd – ICP/TD</b>	0.24 ± 0.01	0.5	208	2.11 ± 0.15	2.8	132
<b>Cu – ICP/TD</b>	33.9 ± 1.6	33	97	310 ± 12	312	100
<b>Pb – ICP/TD</b>	21.1 ± 0.7	19	90	183 ± 8	10	5
<b>Pb – ICP/MS</b>	21.1 ± 0.7	< LD	< LD	183 ± 8	200	109
<b>Sb – INAA</b>	1.02 ± 0.09	1.7	166	11.3 ± 2.6	13	115
<b>Zn – ICP/TD</b>	159 ± 8	8	5	364 ± 23	53	2
<b>Al (%) - ICP</b>	8.59 ± 0.23	7.31	85	6.62 ± 0.32	5.9	89

Nota: LD= 100 mg kg<sup>-1</sup>

El porcentaje de recuperación en relación a los resultados de laboratorio y los valores certificados para Zn fueron muy bajos, 5% para MESS-3 y 2% para PACS-2, por lo que no se consideraron los resultados de este elemento para su discusión en relación al factor de enriquecimiento e índice de geoacumulación.

### 9.4.2. Concentraciones de Elementos Potencialmente Tóxicos

Los resultados de laboratorio de los EPT de interés en las muestras de jales mineros, fueron comparados con los valores de la corteza terrestre superior (CTS) (Wedepohl, 1995) y con las concentraciones establecidas por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, la cual está determinada por concentraciones marcadas como máximas permisibles para considerarse como suelo contaminado y

considerando los límites máximos permisibles de As, Cd, Pb, Sb en jales mineros de acuerdo a la NOM-157-SEMARNAT-2009, todos los valores de As, Cd, Pb, Sb, rebasan la norma (Cu y Zn no están normados). Debido a que estos desechos no están confinados es una condición de mayor riesgo para la población. Los resultados del análisis de laboratorio se muestran en la tabla 14.

**Tabla 14.** Concentración de EPT en material de las muestras de la clase *jale minero* de El Triunfo y zonas aledañas.

	<b>As</b> <b>(mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Cd</b> <b>(mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Cu</b> <b>(mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Pb</b> <b>(mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Sb</b> <b>(mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Zn</b> <b>(mg kg<sup>-1</sup>)</b>
<b>Z1</b>	15000	96	875	<u>40500</u>	7290	19800
<b>Z2</b>	6080	327	758	<u>29800</u>	7010	19600
<b>Z3</b>	13000	130	1020	> LMD	9130	26200
<b>Z4a</b>	12400	169	1110	> LMD	> LMD	27700
<b>Z4b</b>	10800	25	181	> LMD	1780	2490
<b>Z5</b>	12700	180	1000	> LMD	9710	28400
<b>Z6</b>	9470	210	1130	> LMD	> LMD	29700
<b>Z7</b>	13800	151	1020	> LMD	> LMD	25900
<b>Z8</b>	10600	229	1610	<u>88900</u>	<u>20200</u>	44100
<b>Z9</b>	8890	181	1450	> LMD	> LMD	30500
<b>Z10</b>	13300	147	1120	> LMD	8610	22000
<b>Z11</b>	9400	108	965	> LMD	7030	21900
<b>Z12</b>	10600	166	1240	> LMD	> LMD	31700
<b>Z13</b>	10400	214	1500	> LMD	> LMD	46800
<b>Z15</b>	9360	206	1500	> LMD	> LMD	42200
<b>Z16</b>	10500	318	1920	<u>86500</u>	<u>19300</u>	52200
<b>Z20</b>	12000	74	872	> LMD	6440	19300
<b>Z21</b>	11800	222	1250	> LMD	> LMD	41200
<b>Z22</b>	10400	110	1040	> LMD	8580	24200
<b>Z24</b>	11300	217	1390	> LMD	> LMD	35500
<b>NOM-147- SEMARNAT /SSA1-2004</b>	22	37	*	400	*	*
<b>NOM-157- SEMARNAT- 2009</b>	100	20	*	100	10.6	*
<b>CTS</b>	2.0	0.102	14.3	17	0.31	52

Nota. El asterisco indica los elementos que no están incluidos en la NOM-147. Muestras con valores subrayados, fueron analizadas por ICP-MS. Límite Máximo de Detección (LMD) para ICP: Pb (>5000 mg kg<sup>-1</sup>) y Sb (>10,000 mg kg<sup>-1</sup>).

Es muy importante hacer mención que los elementos Cu y Zn, no se encuentran normados en México para ningún tipo de suelo, por lo que sus valores fueron comparados con el valor promedio de la CTS (Wedepohl, 1995). Para el caso de los elementos Pb y Sb, algunos valores fueron superiores a los límites máximos de detección para sus respectivas técnicas.

Los resultados muestran que en todos los jales mineros analizados, los EPT sobrepasan tanto los límites permisibles de la norma nacional, como los valores establecidos por Wedepohl, sobre la concentración promedio presente en la CTS. La zona que presentó la concentración más alta de As fue Z1 con  $15000 \text{ mg kg}^{-1}$ , 681 veces más, de lo que establece la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 ( $22 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y 750 veces por arriba de promedio de la CTS ( $2.0 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Para el caso de Cd, Sb y Zn, la norma mexicana no establece ningún valor como referencia en cuanto a suelos contaminados, sin embargo, considerando los valores establecido por Wedepohl para la CTS los valores sobrepasan en gran medida. En el caso particular del Pb, todas las muestras fueron mayores a las concentraciones máximas detectables por el equipo de medición (ICP,  $>5000 \text{ mg kg}^{-1}$ ), las concentraciones además sobrepasan los límites permisibles de la norma nacional y las concentraciones establecidas por Wedepohl para CTS.

#### 9.4.3. Factor de Enriquecimiento Normalizado

En la tabla 15 se muestran los valores de FEN para As, Cd, Cu, Pb, Sb y Zn, para cada una de las zonas muestreadas. La clasificación de FEN se realizó a partir de lo descrito en la sección 8.5.1. Los resultados muestran que todos los elementos se encuentran con un  $\text{FEN} > 50$ , lo cual nos indica un enriquecimiento extremadamente severo de los EPT. Debido a que la mayoría de las muestras presentaron un enriquecimiento extremadamente severo y no se observó alguna tendencia o agrupamiento entre sitios de muestreo, no se presenta un mapa de distribución espacial.

En la tabla 16 se muestran los valores promedio, desviación estándar, mínimos y máximos de los factores de enriquecimiento normalizado (FEN) para As, Cd, Cu, Pb, Sb y Zn calculados para las zonas muestreadas.

**Tabla 15.** Factores de enriquecimiento normalizado en EPT en material de la clase *jale minero* en el poblado de El Triunfo y zonas aledañas.

<b>FEN</b>	<b>As</b>	<b>Cd</b>	<b>Cu</b>	<b>Pb</b>	<b>Sb</b>	<b>Zn</b>
<b>Z1</b>	22000	2755	180	6988	68981	1117
<b>Z2</b>	4476	4719	78	2581	33292	555
<b>Z3</b>	21885	4291	240	990*	99162	1696
<b>Z4a</b>	23769	6352	298	1128*	123667*	2042
<b>Z4b</b>	8622	393	20	470*	9168	76
<b>Z5</b>	23416	6507	258	1085*	115506	2014
<b>Z6</b>	13431	5840	224	834*	91504*	1620
<b>Z7</b>	25086	5382	259	1069*	117280*	1811
<b>Z8</b>	22186	9398	471	21890	272762	3550
<b>Z9</b>	20248	8083	462	1340*	146945*	2672
<b>Z10</b>	21280	4611	251	941*	88877	1354
<b>Z11</b>	13480	3036	194	844*	65042	1208
<b>Z12</b>	21831	6703	357	1212*	132876*	2511
<b>Z13</b>	23143	9337	467	1309*	143567*	4006
<b>Z15</b>	17942	7742	402	1128*	123667*	3111
<b>Z16</b>	25410	15089	650	24627	301329	4859
<b>Z20</b>	19121	2324	194	937*	66204	1183
<b>Z21</b>	24564	9061	364	1225*	134305*	3299
<b>Z22</b>	21083	4372	295	1192*	112217	1887
<b>Z24</b>	24443	9203	421	1272*	139557*	2954

Nota. Los valores con asterisco, fueron calculados con las concentraciones máximas detectadas por el equipo Pb ( $>5000 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y Sb ( $>10,000 \text{ mg kg}^{-1}$ ), por lo que no son representativos.

**Tabla 16.** FEN: Valores mínimos y máximos, promedio y desviación estándar, de EPT en material de la clase *jale minero* en el poblado de El Triunfo y zonas aledañas.

<b>FEN</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación estándar</b>
<b>As</b>	4476	25410	19870.88	5669.93
<b>Cd</b>	393	15089	6260.31	3289.85
<b>Cu</b>	20	650	304.19	148.24
<b>Pb</b>	2581	24627	3653.06	6855.72
<b>Sb</b>	9168	301329	119295.28	68398.98
<b>Zn</b>	76	4859	2176.19	11993.98

#### 9.4.4. Índice de geoacumulación

En la tabla 17 se muestran los índices de geoacumulación (Igeo) para As, Cd, Cu, Pb, Sb y Zn, para cada una de las zonas muestreadas. Los valores de Igeo fueron clasificados a partir de la tabla 9 en la sección 8.5.2.

De acuerdo a las concentraciones de EPT en las muestras de material en las zonas clasificadas como *jale minero*, las muestras entran dentro de la categoría de Extremadamente contaminados para la mayoría de los elementos. Los valores de Igeo para As, Cd, Pb, Sb y Zn, son mayores a 5 (extremadamente contaminado), a excepción de la muestra Z4b que presenta un valor de Igeo = 4.99 para Zn, considerado fuertemente a muy fuertemente contaminado. En el caso del Cu la mayoría de las zonas se encuentran en las categorías de Muy fuertemente contaminado y Extremadamente contaminado con 13 y 6 zonas respectivamente, solamente Z4b presentó una Igeo = 3.07, lo que la clasifica como Fuertemente contaminada.

**Tabla 17.** Índice de geoacumulación de EPT en material de la clase *jale minero*.

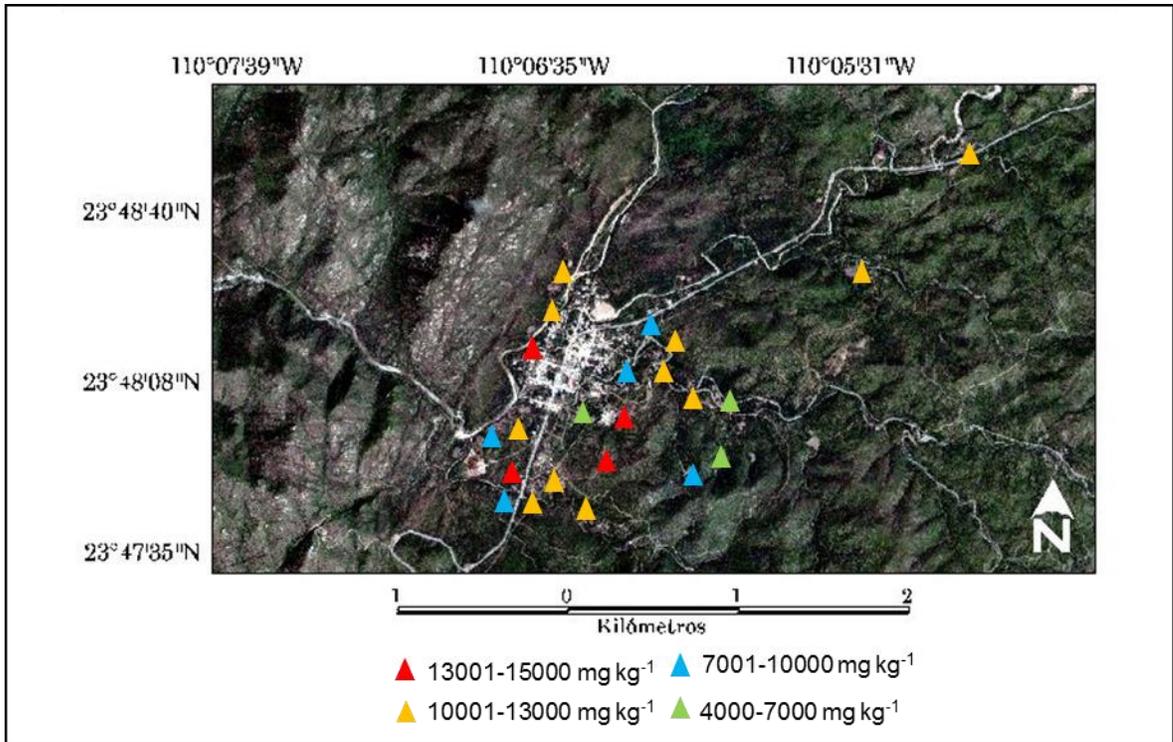
<b>Igeo</b>	<b>As</b>	<b>Cd</b>	<b>Cu</b>	<b>Pb</b>	<b>Sb</b>	<b>Zn</b>
<b>Z1</b>	12.28	9.29	5.35	10.63	13.93	7.98
<b>Z2</b>	10.98	11.06	5.14	10.19	13.87	7.97
<b>Z3</b>	12.08	9.73	5.57	7.61*	14.26	8.39
<b>Z4a</b>	12.01	10.10	5.69	7.61*	14.39*	8.47
<b>Z4b</b>	11.81	7.35	3.07	7.61*	11.90	4.99
<b>Z5</b>	12.04	10.20	5.54	7.61*	14.34	8.50
<b>Z6</b>	11.62	10.42	5.71	7.61*	14.39*	8.57
<b>Z7</b>	12.16	9.94	5.57	7.61*	14.39*	8.37
<b>Z8</b>	11.78	10.54	6.22	11.76	15.40	9.14
<b>Z9</b>	11.53	10.20	6.07	7.61*	14.39*	8.61
<b>Z10</b>	12.11	9.90	5.70	7.61*	14.17	8.13
<b>Z11</b>	11.61	9.46	5.49	7.61*	13.88	8.13
<b>Z12</b>	11.78	10.08	5.85	7.61*	14.39*	8.66
<b>Z13</b>	11.75	10.44	6.12	7.61*	14.39*	9.22
<b>Z15</b>	11.60	10.39	6.12	7.61*	14.39*	9.07
<b>Z16</b>	11.77	11.02	6.48	11.72	15.34	9.38
<b>Z20</b>	11.96	8.92	5.34	7.61*	13.75	7.95
<b>Z21</b>	11.94	10.50	5.86	7.61*	14.39*	9.04
<b>Z22</b>	11.75	9.48	5.59	7.61*	14.17	8.27
<b>Z24</b>	11.87	10.46	6.01	7.61*	14.39*	8.83

Nota. Los valores con asterisco, fueron calculados con las concentraciones máximas detectadas por el equipo, Pb ( $>5000 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y Sb ( $>10,000 \text{ mg kg}^{-1}$ ), por lo que no son representativos

#### 9.4.5. Distribución y concentración de arsénico en los jales muestreados en el poblado El Triunfo y zonas aledañas

En el poblado de El Triunfo, las concentraciones de As, no presentaron un patrón o tendencia de distribución espacial (Figura 18).

Es importante mencionar que la mayoría de los jales identificados y que presentaron mayor concentración de Arsénico, están justo en los límites a la zona residencial, inclusive entre las casas habitadas de los pobladores de El Triunfo.



**Nota:** Límite máximo permisible en jales: 100 mg kg<sup>-1</sup> (NOM157-SEMARNAT-2009).

**Figura 18.** Distribución y concentración de As en el poblado de El Triunfo y zonas aledañas.

## 10. DISCUSIÓN

### 10.1. Teledetección: Identificación de jales mineros mediante clasificación supervisada

El análisis de exactitud promedio y global en el procesamiento de imágenes satelitales a través de clasificación supervisada, es muy importante para determinar la existencia de posibles errores en la selección de áreas de entrenamiento, lo cual llevaría a resultados de clasificación poco aceptable o de muy baja precisión. Para el presente trabajo, la matriz de confusión generada a partir de la imagen clasificada, mediante el algoritmo de máxima verosimilitud, presentó una exactitud promedio y global de 85.10 y 90.08 % respectivamente. Se utilizaron 5 distintas clases (*jale minero, arroyo, poblado, suelo desnudo y vegetación*). Los resultados comparados con estudios recientes (Schmid *et al.*, 2013; Townsend *et al.*, 2009; Pantoja-Espinoza, 2010) y la verificación visual que se hizo en campo, sugieren una clasificación aceptable, en donde los resultados superan los obtenidos por Schmid *et al.*, (2013), en el Distrito minero Almadén al suroeste de España, en donde mediante una matriz de confusión y verificación en campo, reportaron exactitudes globales de 69, 74 y 82 %, en la clasificación, para su área de estudio, trabajaron con 11 clases: zona minera, terreno rocoso, suelo desnudo, tierras de cultivo, pastos, arbustos, dehesa, bosques, suelo urbano, zona con pino y agua. Townsend *et al.*, (2009), reportaron una precisión superior al 85% en la clasificación de minas activas y zonas regeneradas en zonas aledañas en la región central de las montañas Apalaches en los Estados Unidos, el estudio fue realizado en un periodo de tiempo que consideró imágenes de los años 1976, 1987, 1999 y 2006, utilizando como referencia, datos disponibles con respecto al uso de suelo del área de estudio. Estos resultados son muy similares a los obtenidos en el presente estudio con un valor de exactitud global del 90%.

Por otra parte, Pantoja Espinoza (2010) reportó un error global para la identificación de jales mineros mediante clasificación supervisada de 52.95%, donde la mayor cantidad de los sitios identificados como jales (3320 pixeles) correspondían a pastizales que representaban el 63%, seguido de matorrales y zonas agrícolas que juntos sumaban 1264 pixeles equivalentes al 24%. Por lo antes mencionado, es importante tener en cuenta que para el presente trabajo se utilizaron imágenes del satélite Pleiades con resolución multiespectral de 2 metros y las utilizadas por Schmid

*et al.*, 2013, fueron de 30 metros, al igual que las utilizadas por Pantoja y Townsend *et al.*, 2009, las cuales corresponden al satélite Landsat en cada caso. De esta manera la exactitud de la clasificación pudiera tener diferencias dependiendo de factores como las propiedades espaciales y espectrales en las características del objetivo, los datos de entrenamiento disponible (clases) y los atributos de las imágenes utilizadas (Pantoja-Espinoza, 2010; Klerk *et al.*, 2016).

## 10.2. Granulometría: dispersión de los materiales de los jales mineros

El tamaño de grano predominante en las muestras superficiales de jales mineros fue de limos medio (5 a 6  $\Phi$ , 0.031 a 0.015 mm). La relación entre los EPT y el tamaño de grano en zonas contaminadas, es que los EPT tienden a quedar atrapados en fracciones finas (limo-arcillas) debido a que cada especie mineral tiene determinados valores en función de su superficie específica y su descompensación eléctrica, siendo estas características las responsables del poder de adsorción de estos minerales (Galán y Romero, 2008). La predominancia de tamaño de grano obtenidas en el presente estudio concuerdan con los reportados por Sánchez-Martínez (2013) en una terraza aluvial antigua (TEA) aproximadamente a 12 metros de distancia de un jale en el distrito minero ET-SA, donde hace mención a que los porcentajes máximos para la zona eran de limo-arcillas (4.25 - 14  $\Phi$ ), describiendo además el área con predominancia en material fino y de color rojizo. Estos resultados concuerdan además con los reportados por Marmolejo-Rodríguez *et al.*, (2011), reportando fracciones más finas a 4  $\Phi$ , en jales mineros y cenizas, y los reportados por Volke-Sepulveda *et al.*, (2003), donde mencionan que en los residuos de El Triunfo-San Antonio, la fracción predominante fue mayor a 4.75  $\Phi$ . En algunas minas alrededor del mundo se reportan asociaciones de partículas finas (limo-arcillas) con los jales mineros, además de identificarlos como focos de contaminación por los aportes de EPT al medio ambiente a través del viento (Meza-Figueroa *et al.*, 2009; Csavina *et al.*, 2011; Csavina *et al.*, 2012). El conocimiento del tamaño de grano presente en los jales es muy importante para determinar posibles afectaciones por movilidad de EPT por acción de viento o escorrentía. En estudios previos en jales mineros (Carrillo y Drever, 1998) reportan para el Distrito Minero ET-SA, el potencial de lixiviación o geodisponibilidad con un promedio de 0.01 mg L<sup>-1</sup> para As y hasta 3.14 mg L<sup>-1</sup> para cenizas en la planta de

fundición de El Triunfo. Magdaleno-Rico (2014), reportó también para este distrito, concentraciones biodisponibles en jales de  $1.8 \text{ mg L}^{-1}$  de As,  $0.027 \text{ mg L}^{-1}$  de Sb y en cenizas,  $668 \text{ mg L}^{-1}$  de As,  $4.8 \text{ mg L}^{-1}$  de Sb y  $6.2 \text{ mg L}^{-1}$  de Cd. De acuerdo a la NOM-157-SEMARNAT-2009, las cenizas superan los límites máximos permisibles para As, Cd y Sb.

La organización mundial de la salud (OMS, 2016) reportó que las partículas más perjudiciales para la salud son las de  $0.01 \text{ mm}$  o menos ( $\leq \text{PM}_{10}$ ), que pueden penetrar y alojarse en el interior profundo de los pulmones. La exposición crónica a las partículas, agrava el riesgo de desarrollar cardiopatías y neumopatías, así como cáncer de pulmón. Las fracciones presentes en este estudio van de  $0.053$  a  $0.00036 \text{ mm}$  ( $4.25$  a  $11.5 \Phi$ ).

### 10.3. Geoquímica: EPT en jales mineros y su comparación con jales reportados en otros trabajos

De acuerdo a los resultados de las concentraciones dadas para As, Cd, Cu, Pb y Sb en el presente trabajo y las reportadas por otros autores en el área de estudio (Carrillo, 1996; Volke-Sepúlveda *et al.*, 2003; Romero-Guadarrama, 2011; Sánchez-Martínez *et al.*, 2013; Magdaleno-Rico, 2014; Posada-Ayala *et al.*, 2016), las concentraciones en los sedimentos de los desechos mineros son muy altas, superando los límites máximos permisibles establecidos por la Norma Oficial Mexicana (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004) y los valores obtenidos por Wedepohl (1995), este último, en relación a las concentraciones de la corteza terrestre superior. Además, las concentraciones de los EPT reportadas en este estudio son mucho mayores y comparables a las encontradas en zona de jales de las minas Ag-Au-Cu-Pb y Zn en Zimapán, Hidalgo (Armienta *et al.*, 2012), jales mineros de las minas de Cu-Ag-Au-Mo-Zn en Nacozari, Sonora (Meza-Figueroa *et al.*, 2009), los jales de las minas de Ag-Au-Cu-Pb-Zn en Santa Bárbara, Chihuahua (Gutiérrez-Ruiz *et al.*, 2007) y los suelos de la mina de Zn-Pb Irankuh en Iran (Forghani *et al.*, 2015).

En cuanto a los valores de FEN y los Igeo, la mayoría de las zonas presentan un  $\text{FEN} > 50$ , clasificado como extremadamente severo, y extremadamente contaminado en cuanto a la clasificación del índice de geoacumulación ( $\text{Igeo} > 5$ ).

La comparación de concentración total de los EPT encontrados en este trabajo y los reportados por otros estudios se muestran en la tabla 18, los resultados fueron comparados además con los calculados por Wedepohl (1995) para las concentraciones de los elementos en cuestión en la corteza terrestre superior y los límites máximos permisibles establecidos por la Norma Oficial Mexicana (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004).

**Tabla 18.** Comparación del promedio de las concentraciones de EPT en jales mineros identificados en este trabajo con otros lugares. (a) zonas reportadas (Tabla 11).

Área	(mg kg <sup>-1</sup> )					Referencia
	As	Cd	Cu	Pb	Sb	
Jales minero	11090	174	1147	>5000	8779	Presente estudio
Desechos mineros El Triunfo	7687	74	-	3979	2712	Magdaleno-Rico (2014)-(a)
Jales El Triunfo	8890	-	-	92700	-	Romero-Guadarrama (2011)
Zona de jales Zimapán Hidalgo	9720	36	808	2984	192	Armienta <i>et al.</i> , (2012)
Jales mineros Nacozari Sonora	29	<40	400	39	-	Meza-Figueroa <i>et al.</i> , (2009)
Jales mineros Santa Bárbara Chihuahua	1402	67	860	3634	-	Gutiérrez-Ruiz <i>et al.</i> , (2007)
Suelo de mina Irankuh, Irán	71	16	33	1801	-	Forghani <i>et al.</i> , (2015)
CTS	2.0	0.102	14.3	17	0.31	Wedepohl (1995)
NOM-147	22	37	*	400	*	NOM-147-SEMARNAT /SSA1-2004
NOM-157	100	20	*	100	10.6	NOM-157-SEMARNAT-2009

Nota: El asterisco indica los elementos que no están incluidos en las normas.

## 10.4. FEN e Igeo: niveles de enriquecimiento de EPT y nivel de afectación en el ambiente

### 10.4.1. Arsénico

Las concentraciones de As en los jales mineros analizados, están entre los 6080-15000 mg kg<sup>-1</sup>, muy por encima del valor promedio de la CTS (2.0 mg kg<sup>-1</sup>), y los establecidos por la NOM-147 (22 mg kg<sup>-1</sup>) y NOM-157 (100 mg kg<sup>-1</sup>). Estas concentraciones son comparables con las obtenidas por Magdaleno-Rico (2014) en el Distrito minero El Triunfo-San Antonio (ET-SA) de 3360-17738 mg kg<sup>-1</sup> de As y los reportados por Sánchez-Martínez (2013) en una terraza aluvial antigua (aprox. 12 m de distancia de un jale) en El Triunfo, con concentraciones en muestras superficiales (0.5-30 cm) de 6940-8690 mg kg<sup>-1</sup> de As. En comparación con otras zonas del país, los jales de las minas de Ag-Au-Cu-Pb-Zn en Santa Bárbara, Chihuahua (Gutiérrez-Ruiz et al., 2007), las concentraciones reportadas están entre los 410-3281 mg kg<sup>-1</sup> de As, muy por debajo de los reportados en el presente estudio, por otra parte, las concentraciones reportadas en las minas Ag-Au-Cu-Pb y Zn en Zimapán, Hidalgo (Armienta *et al.*, 2012), las concentraciones de As están entre los 4470-15300 mg kg<sup>-1</sup>, similares a las del presente estudio.

El factor de enriquecimiento normalizado para este elemento es extremadamente severo (FEN > 50), aunado a los valores de índice de geoacumulación que clasifican a la zona como extremadamente contaminado (Igeo > 5). Los resultados son comparables con los obtenidos por estudios realizados por Sánchez-Martínez (2013), y Romero-Guadarrama (2011) en el poblado de El Triunfo, clasificando al As como extremadamente enriquecido. Por otro lado en el poblado de San Antonio (zona que presenta características similares a las del presente estudio), el FEN reportado por Posada-Ayala (2011) para As, también se presentan como extremadamente enriquecido. Para los resultados de Igeo, reporta que la zona se encuentra extremadamente contaminada con As, lo cual indica una clara aportación antropogénica de este elemento al ambiente por acción de los trabajos de minería.

Las concentraciones del presente estudio además, superan las reportadas por Espino-Ortega (2014), donde el análisis consistió en la recolección de 12 muestras de suelos no afectados de manera antropogénica y contiguos a la zona donde se ubica el

Distrito minero ET-SA. Las concentraciones fueron analizadas por Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X (FRX), las concentraciones variaron en un amplio intervalo: menores al límite de detección del equipo ( $14.5 \text{ mg kg}^{-1}$ ) en 8 de los puntos, y con concentraciones de 16, 41, 60 y  $113 \text{ mg kg}^{-1}$  para los otros 4.

Para este elemento es importante mencionar que estudios realizados por Carrillo y Drever (1998) en el área de estudio, indican una relación directa entre el contenido de arsénico en los jales y el agua subterránea, en donde por lo menos de  $0.5$  a  $2.0 \text{ mg L}^{-1}$  de As pueden estar contaminando anualmente el agua subterránea de la región.

#### 10.4.2. Cadmio

Las concentraciones de Cd en los jales mineros analizados ( $25 - 327 \text{ mg kg}^{-1}$ ), están muy por encima del valor promedio de la CTS ( $0.102 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y la NOM-157 ( $20 \text{ mg kg}^{-1}$ ), y en la mayoría de las zonas, por encima de los límites establecidos por la NOM-147 ( $37 \text{ mg kg}^{-1}$ ), las concentraciones están entre los  $25$  a  $318 \text{ mg kg}^{-1}$  de Cd. Estas concentraciones son comparables con las obtenidas por Magdaleno-Rico (2014) en el Distrito minero ET-SA ( $20.80-124.63 \text{ mg kg}^{-1}$  de Cd) y los reportados por Sánchez-Martínez (2013) en una TEA (aprox.  $12 \text{ m}$  de distancia de un jale) en El Triunfo, con concentraciones en muestras superficiales ( $0.5-30 \text{ cm}$ ) de  $143-226 \text{ mg kg}^{-1}$  de Cd. En comparación con los jales de las minas de Ag-Au-Cu-Pb-Zn en Santa Bárbara, Chihuahua (Gutiérrez-Ruiz et al., 2007), las concentraciones reportadas están entre los  $10-239 \text{ mg kg}^{-1}$  de Cd, similares a los reportados en el presente estudio. Caso contrario para las concentraciones reportadas en las minas Ag-Au-Cu-Pb y Zn en Zimapán, Hidalgo (Armienta et al., 2012), en donde las concentraciones de Cd están entre los  $6-84 \text{ mg kg}^{-1}$ , muy por debajo a las del presente estudio.

El factor de enriquecimiento normalizado para este elemento es extremadamente severo ( $\text{FEN} > 50$ ), aunado a los valores de índice de geoacumulación que clasifican a la zona como extremadamente contaminado ( $\text{Igeo} > 5$ ). Los resultados son comparables con los obtenidos por estudios realizados por Sánchez-Martínez (2013) en el poblado de El Triunfo, clasificando al Cd como extremadamente enriquecido. Por otro lado en el poblado de San Antonio (zona que presenta características similares a las del presente estudio), el FEN reportado por Posada-Ayala (2011) para Cd, también se presentan con un enriquecimiento significativo.

#### 10.4.3. Cobre

Las concentraciones de Cu en los jales mineros analizados, están entre los 181-1920 mg kg<sup>-1</sup>, muy por encima del valor promedio de la CTS (14.3 mg kg<sup>-1</sup>). Estas concentraciones son comparables con los resultados obtenidos por Sánchez-Martínez (2013) en una terraza aluvial (aprox. 12 m de distancia de un jale) en El Triunfo, con concentraciones en muestras superficiales (0.5-30 cm) de 1160-1510 mg kg<sup>-1</sup>. En comparación con los jales de las minas de Ag-Au-Cu-Pb-Zn en Santa Bárbara, Chihuahua (Gutiérrez-Ruiz et al., 2007), las concentraciones reportadas están entre los 472-2415 mg kg<sup>-1</sup> de Cu, similares e inclusive mayores a los reportados en el presente estudio para algunas zonas. Por otra parte, las concentraciones reportadas en las minas Ag-Au-Cu-Pb y Zn en Zimapán, Hidalgo (Armienta *et al.*, 2012), son muy similares a las del presente estudio, en donde las concentraciones de Cu están entre los 435-1470 mg kg<sup>-1</sup>. Caso contrario para las concentraciones reportadas en jales mineros de las minas de Cu-Ag-Au-Mo-Zn en Nacozari, Sonora (Meza-Figueroa *et al.* 2009), que presentan concentraciones promedio de 400.5 ± 15.8 mg kg<sup>-1</sup> de Cu.

El FEN para este elemento es extremadamente severo (FEN > 50), en cuanto a los valores de Igeo clasifican a la zona como extremadamente contaminada (Igeo >5). Los resultados son comparables con los obtenidos por Posada-Ayala (2011), en muestras de sedimento de la cuenca de Los Planes, clasificando a la zona con un enriquecimiento significativo de Cu, y de moderada a fuertemente contaminada a partir de los valores de Igeo para Cu. Los resultados de FEN también son comparables con los obtenidos para jales mineros de las minas de Cu-Ag-Au-Mo-Zn en Nacozari (Meza-Figueroa *et al.*, 2009), reportando que el Cu se encuentra fuertemente enriquecido (20 < FE < 40). Los resultados antes mencionados indican una clara aportación antropogénica de este elemento al ambiente por acción de los trabajos de minería.

Las concentraciones del presente estudio además, superan las reportadas por Espino-Ortega (2014) para concentraciones en suelos no afectados de manera antropogénica y contiguos a la zona donde se ubica el Distrito minero ET-SA. Las concentraciones de Cu fueron menores a 42.7 mg kg<sup>-1</sup>, en 9 de los 12 puntos analizados por Espino, mientras que los otros 3 presentaron concentraciones de 51, 55 y 96 mg kg<sup>-1</sup>.

#### 10.4.4. Plomo

Las concentraciones de Pb en los jales mineros analizados, están muy por encima del valor promedio de CTS ( $17 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y los establecidos por la NOM-147 ( $400 \text{ mg kg}^{-1}$ ), concentraciones hasta de  $88900 \text{ mg kg}^{-1}$ , todas las zonas muestreadas son mayores a  $5000 \text{ mg kg}^{-1}$  de Pb (Límite máximo de detección por ICP-TD). Las concentraciones son comparables con las obtenidas por Magdaleno-Rico (2014) en el Distrito minero ET-SA, que reporta un promedio de  $4223.36 \text{ mg kg}^{-1}$  de Pb. Las concentraciones del presente estudio también superan las reportadas por Posada-Ayala (2011), con promedio de  $2653 \text{ mg kg}^{-1}$ . Por otra parte, las concentraciones reportadas para jales mineros de las minas de Cu-Ag-Au-Mo-Zn en Nacozari, Sonora (Meza-Figueroa *et al.*, 2009), presentan concentraciones promedio de  $39 \pm 4.2 \text{ mg kg}^{-1}$  de Pb, muy por debajo de las encontradas en el presente estudio.

El FEN para este elemento es extremadamente severo ( $\text{FEN} > 50$ ), con un índice de geoacumulación que clasifica a la zona como extremadamente contaminada ( $\text{Igeo} > 5$ ). Los resultados son comparables con los obtenidos por Posada-Ayala (2011), clasificando a la zona con un enriquecimiento extremadamente alto de Pb, describiendo además en cuanto al Igeo, que la zona se encuentra de moderada a fuertemente contaminada. Los resultados de FEN también son comparables con los obtenidos por Sánchez-Martínez (2013), en el cual el Pb se encuentra extremadamente enriquecido. Los resultados antes mencionados indican una clara aportación antropogénica de este elemento al ambiente por acción de los trabajos de minería.

Las concentraciones del presente estudio además, superan las reportadas por Espino-Ortega (2014), para suelos no afectados de manera antropogénica y que son contiguos a la zona donde se ubica el Distrito minero ET-SA. En donde las concentraciones variaron desde menores a  $3.7 \text{ mg kg}^{-1}$  para 4 puntos de los 12 analizados y el resto presentando concentraciones entre los  $17\text{-}34 \text{ mg kg}^{-1}$ .

#### 10.4.5. Antimonio

Las concentraciones de Sb en los jales mineros analizados en este estudio, están muy por encima del valor promedio de la CTS ( $0.31 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y la NOM-157 ( $10.6 \text{ mg kg}^{-1}$ ), concentraciones desde los 1780 hasta los  $20200 \text{ mg kg}^{-1}$  de Sb, comparables

con las concentraciones obtenidas por Sánchez-Martínez (2013) en una TEA (aprox. 12 m de distancia de un jale) en El Triunfo, con concentraciones en muestras superficiales (0.5-30 cm) de 12300-17400 mg kg<sup>-1</sup> de Sb. Las concentraciones fueron superiores a las reportadas por Posada-Ayala (2011), donde reporta concentraciones promedio para desechos de minería y fundición de 1194 mg kg<sup>-1</sup> de Sb. Por otra parte, las concentraciones reportadas en las minas Ag-Au-Cu-Pb y Zn en Zimapán, Hidalgo (Armienta *et al.*, 2012), están entre 87-418 mg kg<sup>-1</sup> de Sb, muy por debajo de las reportadas en el presente estudio.

El FEN para Sb es extremadamente severo (FEN > 50), con un índice de geoacumulación que clasifica a la zona como extremadamente contaminada (Igeo > 5). Los resultados son comparables con los obtenidos por Posada-Ayala (2011), clasificando a la zona con un enriquecimiento de significativo a extremadamente alto de Sb. Los resultados de FEN también son comparables con los obtenidos por Sánchez-Martínez (2013), en el cual el Sb se encuentra con un enriquecimiento extremadamente severo. Los resultados antes mencionados indican una clara aportación antropogénica de este elemento al ambiente por acción de los trabajos de minería.

## 11. CONCLUSIÓN

- El uso de la técnica de clasificación supervisada, a través del algoritmo de máxima verosimilitud, mediante el programa Geomática 2015, permitió la identificación de jales mineros en el Distrito minero El Triunfo-San Antonio. Lo que demostró que la utilización de percepción remota como herramienta de apoyo es útil y funcional.
- La exactitud global, o el número de píxeles clasificados correctamente de las clases consideradas en este trabajo fue muy alta (90%).
- El porcentaje de validación de la verificación visual en campo de las 32 zonas clasificadas como *jale minero*, fue alto (81.25%). En donde 26 fueron jales mineros (81.25%), 2 zonas fueron terreros (6.25%), 1 zona se clasificó como meandro con posible influencia de jale minero ubicado aproximadamente a 150 metros (3.125%) y en 3 de las zonas no se pudo acceder (9.375%).
- Las 26 áreas verificadas como Jales Mineros, son importantes focos de contaminación de EPT al ambiente y de riesgo a la salud, debido a la alta inestabilidad de las pendientes en los desechos, al alto grado de toxicidad de los elementos presente y al predominio de los tamaños finos que pueden ser fácilmente transportados por el agua y por el aire, ocasionando desde problemas respiratorios hasta enfermedades más severas.
- Las concentraciones de As, Cd, Cu, Pb y Sb en los sedimentos superficiales de los jales mineros superan las reportadas para la CTS, en donde los resultados de FEN clasifican a estos elementos como extremadamente enriquecidos.
- El índice de geacumulación indica para las zonas muestreadas (jales mineros), que están extremadamente contaminadas de As, Cd, Pb y Sb, y muy fuertemente contaminadas de Cu. De esta manera podemos observar una clara aportación antropogénica de estos elementos al ambiente por acción de los trabajos de minería para el área de estudio.

## 12. RECOMENDACIONES

- Realizar el procesamiento de imágenes de satélite a partir de algún otro tipo de software como MATLAB, ERDAS o ENVI, con la finalidad de comparar los resultados en cuanto a la exactitud del método con los obtenidos con los de este trabajo.
- Utilizar la herramienta de clasificación supervisada para localizar jales mineros en zonas aledañas al área estudiada (Valle perdido, El Rosario, San Antonio).
- Respecto a los resultados granulométricos de los jales mineros, es recomendable estabilizar las zonas para evitar la dispersión de los EPT a zonas aledañas por factores físicos como lluvias a través de sus arroyos y vientos.
- Delimitar los jales mineros evitando el paso de personas y vehículos por la inestabilidad de los lomeríos y los riesgos de salud por exposición.
- Realizar pruebas de biodisponibilidad en las zonas clasificadas como jale minero.
- Las concentraciones presentes de EPT en los jales mineros analizados sugieren una pronta solución en cuanto a la estabilización y rehabilitación de los suelos en el distrito minero ET-SA, por su alto grado de toxicidad y repercusiones a la salud de los pobladores, contaminación de los acuíferos, así como afectaciones a la flora y fauna del lugar.

### 13. BIBLIOGRAFÍA

- ACGIH, American Conference of Governmental Industrial Hygienists. 2010. Threshold limit values (TLVs) for chemical substances and physical agents and biological exposure indices (BEIs) 210 p.
- Altamirano, A., Miranda, A., Jiménez, C. 2012. Incertidumbre de los índices de paisaje en el análisis de la estructura espacial. *Bosque*, 33(2): 171-181.
- Armendáriz-Villegas, E.J., Covarrubias-García, M.A., Troyo-Diéguez, E., Lagunes, E., Arreola-Lizárraga, A., Nieto-Garibay, A., Beltran-Morales, L.F., Ortega-Rubio, A. 2015. Metal mining and natural protected areas in México: Geographic overlaps and environmental implications. *Environmental Science Policy*, 48: 9-19.
- Armienta, M.A., Villaseñor, G., Cruz, O., Ceniceros, N., Aguayo, A., Morton, O. 2012. Geochemical processes and mobilization of toxic metals and metalloids in an As-rich base metal waste pile in Zimapán, Central México. *Applied Geochemistry*, 27: 2225-2237.
- Briseño-Arellano, A.D. 2014. Evaluación de la evolución hidrogeoquímica del agua subterránea en la cuenca San Juan de los Planes, Baja California Sur. Tesis de Licenciatura, UNAM. 90 p.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2003. Estudio de caracterización de la intrusión salina en el Acuífero de Los Planes, BCS. Comisión Nacional del Agua. Gerencia regional de la península de Baja California. Gerencia Estatal en Baja California Sur, 525 p.
- CONAGUA, 2012. Programa Hídrico Regional Visión 2030. Región Hidrológico-Administrativa I, Península de Baja California. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 126 p.
- CONAGUA, 2015. Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero El Carrizal (0322), Estado de Baja California Sur. Diario Oficial de la Federación. 34 p.

- Carrillo-Chávez, A., 1996. Environmental geochemistry of the San Antonio-El Triunfo mining area, southernmost Baja California Península México. Ph. D. Thesis. Department of Geology and Geophysics, University of Wyoming, Laramie, Wyoming, USA, 130 p.
- Carrillo-Chávez, A., J.I. Drever and M. Martinez, 2000. Arsenic content and groundwater geochemistry of the San Antonio-El Triunfo, Carrizal and Los Planes aquifers in southernmost Baja California, Mexico. *Environmental Geology*, 39 (11):1295-1303.
- Carrillo, A. & J.I. Drever, 1998. Environmental assessment of the potential for arsenic leaching into groundwater from mine wastes in Baja California Sur, México. *Geofísica Internacional*, 37(1): 35-39.
- Cho, Y. M., Seo, S. C., Choi, S. H., Lee, S. K., Kim, K. H., Kim, H. J., Choi, J. W., 2013. Association of arsenic levels in soils and water with urinary arsenic concentrations of residents in vicinity of closed metal mines. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 216: 255–262.
- Chuvienco, S.E. 1995. Fundamentos de teledetección espacial. Ediciones Rialp, 2da edición. Madrid, España.
- Chuvienco, S.E. 2010. Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio. Editorial Ariel Ciencia. Nueva edición actualizada.
- Csavina, J., Field, J., Taylor, M.P., Gao, S., Landázuri, A., Betterton, E.A., Sáez, A.E. 2012. A review on the importance of metals and metalloids in atmospheric dust and aerosol from mining operations. *Science of the Total Environment*, 433: 58-73.
- Csavina, J., Landázuri, A., Wonaschütz, A., Rine, K., Rheinheimer, P., Barbaris, B., Conant, W., Sáez, A.E., Betterton, E.A. 2011. Metal and Metalloid Contaminants in Atmospheric Aerosols from Mining Operations. *Water Air Soil Pollut*, 221: 145-157.
- De Klerrk, H.M., Gilbertson, J., Lück-Vogel, M., Kemp, J. 2016. Using remote sensing in support of environmental management: A framework for selecting products, algorithms and methods. *Journal of Environmental Management*, 182: 564-573.

- Del Águila-Juárez, P., Lugo-De la Fuente, J., Vaca-Paulín, R. 2005. Determinación de factores de enriquecimiento y geoacumulación de Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn en suelos de la cuenca alta del río Lerma. *Ciencia Ergo Sum*, 12 (2): 155-161.
- Duarte-Zaragoza, V.M. 2013. Origen y distribución espacial de metales pesados en suelos de Zimapán, Hidalgo. Tesis de doctorado. Instituto de Enseñanzas e Investigación de Ciencias Agrícolas. 120 p.
- Emen, J., Plisinski, J., Rogan, J. 2014. Monitoring geomorphic and hydrologic change at mine sites using satellite imagery: The Geita Gold Mine in Tanzania. *Applied Geography*, 54: 243-249.
- Espinoza-Ortega, V. 2014. Afectación de suelos y sedimentos por la dispersión de los residuos mineros históricos del distrito minero San Antonio-El Triunfo, B.C.S. Tesis de licenciatura, UNAM.
- Folk, R. L., 1954. The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary rock nomenclature: *Jour. Geology*, v. 62. Fig. 1a, p.346, and 1b, p. 349. Reprinted permission of University of Chicago Press. Robinson, G.W., 1949, soils, their origin, constitution and classification, 3<sup>rd</sup> ed.: Murby, London).
- Forghani, G., Reza-Mokhtari, A., Abbas-Kazemi, G., Davoodi-Fard, M. 2015. Total concentration, speciation and mobility of potentially toxic elements in soils around a mining area in central Iran. *Chemie der Erde*, 75: 323-334.
- Fu, Z., Wu, F., Mo, C., Deng, Q, Meng, W, Giesy, J. P. 2016. Comparison of arsenic and antimony biogeochemical behavior in water, soil and tailing from Xikuangshan, China. *Science of the Total Environment*, 539: 97-104.
- Fundación MAPFRE, 1994. Manual de contaminación ambiental. Editorial MAPFRE, D.L. Madrid, España. 578 p.
- Galán-Huertos, E., Romero-Baena, A. 2008. Contaminación de suelos por metales pesados. *Macla*, 10: 48-60.
- Geo Soluciones, 2016. Manual de PCI Geomática 10. Fecha de consulta: 04 de Enero del 2016.
- [www.geosoluciones.cl/documentos/PCI-Geomatica/Manual\\_PCI\\_Geomatica10.pdf](http://www.geosoluciones.cl/documentos/PCI-Geomatica/Manual_PCI_Geomatica10.pdf)

- Gutiérrez-Ruiz, M., Romero, M., González-Hernández, G. 2007. Suelos y sedimentos afectados por la dispersión de jales inactivos de sulfuros metálicos en la zona minera de Santa Bárbara, Chihuahua, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 2: 170-184.
- Hernández J. y Montaner D., 2009. Patrones de respuesta espectral. Lab. Geomática y Ecología del Paisaje (GEP)-Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2009. Prontuarios de información geográfica municipal, Baja California Sur. Formato electrónico. Fecha de consulta: 22 de septiembre de 2016.  
<http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825292898>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2015. Anuario estadístico y geográfico de Baja California Sur. 385 p.
- Infoterra, 2016. Fecha de consulta: 24 de Julio del 2016.  
<http://www.infoterra.es/datos-satelite-pleiades-oferta>
- Kabata-Pendias, A., 2011. Trace Elements in Soils and Plants, 4th ed. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 505
- Li, X., Lee, S.I., Wong, S., Shi, W., Thornton, I. 2004. The study of metal contamination in urban soil of Hong Kong using a GIS-based approach. *Environmental Pollution*, 129: 113-124.
- Luo, N., An, L., Nara, A., Yan, X., Zhao, W. 2016. GIS-based multielement source of dustfall in Beijing: A study of 40 major and trace elements. *Chemosphere*, 152: 123-131.
- Magdaleno-Rico, C.A., 2014. Peligrosidad de los residuos mineros históricos del distrito minero San Antonio-El Triunfo en La Paz Baja California Sur y evaluación de generación de drenaje ácido a través de pruebas estáticas. Tesis de Licenciatura. UNAM.

- Marmolejo-Rodríguez, A. J., Sánchez-Martínez, M. A., Romero-Guadarrama, J.A., Sánchez-González, A., Magallanes-Ordóñez, V.R. 2011. Migration of As, Hg, Pb, and Zn in arroyo sediments from a semiarid costal system influenced by the abandoned gold mining district at El Triunfo, Baja California Sur. Mexico. *Journal of Environmental Monitoring*, 13: 2182-2189.
- Meza-Figueroa, D., Maier, R.M., de la O-Villanueva, M., Gómez-Alvarez, A., Moreno-Zazueta, A., Rivera, J., Campillo, A., Grandlic, C.J., Anaya, R., Palafox-Reyes, J. 2009. The impact of unconfined mine tailings in residential areas from a mining town in a semi-arid environment: Nacozari, Sonora, México. *Chemosphere*, 77: 140–147.
- Müller, G. 1979. Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins-Veränderungen seit 1979. *Umschau*, 24: 778-783.
- Niparajá A.C., CONAGUA. 2004-2005. Diagnóstico de la calidad de agua en Baja California Sur.
- Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización.
- 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, proyecto, construcción, operación y post operación de presas de jales.
- Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.
- Norma Oficial Mexicana NOM-157-SEMARNAT-2009, Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros.
- Osher, L.J., Leclerc, L., Wiersma, G.B., Hess, C.T., Guiseppe, V.E. 2006. Heavy metal contamination from historic mining in upland soil and estuarine of Egypt Bay, Maine, USA, 70: 169-179.

- Organización Mundial de la Salud, 2016. Calidad de aire ambiente (exterior) y salud.  
Fecha de consulta: 23 de Octubre del 2016.  
<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>
- Pantoja-Espinoza, J.C., 2010. Análisis de imágenes de satélite Landsat para la identificación de jales mineros y la relación de las reflectancias con la concentración de metales pesados. Tesis de Maestría. CIIDIR-Unidad Durango.
- Posada-Ayala, I.H., 2011. Geoquímica Ambiental del Distrito Minero San Antonio, Sedimentos de Los Arroyos de La Cuenca de San Juan de Los Planes y Plataforma Continental de Bahía La Ventana, BCS, México. Tesis de Maestría, CICIMAR-IPN.
- Posada-Ayala I.H., Murillo-Jiménez, J.M., Shumilin, E., Marmolejo-Rodríguez, A.J., Nava-Sánchez, E.H. 2016. Arsenic from gold mining in marine and stream sediments in Baja California Sur, Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 75:1-16.
- Programa Nacional Contra la Sequía (PRONACOSE), 2013. Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía. Consejo de cuenca Baja California Sur. México. 246 p.
- Rangel, M.A.C., Baptista-Neto, J.A., Fonseca, E.M., McAlister, J., Smith, B. J. 2011. Study of heavy metal concentration and partitioning in the Estrela River: implications for the pollution in Guanabara Bay- SE Brazil. *An Acad Bras*, 83 (3): 801-815.
- Remon, E., Bouchardon, J.L., Cornier, B., Guy, B., Leclerc, J.C., Faure, O. 2005. Soil characteristics, heavy metal availability and vegetation recovery at a former metallurgical landfill: Implications in risk assessment and site restoration. *Environmental Pollution*, 137: 316-323.
- Romero-Guadarrama J.A., 2011 "Geoquímica de As, Hg, Pb y Zn y mineralogía en sedimentos superficiales de la cuenca de drenaje del distrito minero el Triunfo, BCS México". Tesis de Maestría. CICIMAR-IPN.
- Sacristán-Romero, F. 2006, La teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental. *Quivera*, 8 (1):315-356. Fecha de consulta: 19 de septiembre de 2016.  
Disponible en:<<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40180114>> ISSN 1405-8626

- Sánchez-Martínez M.A., 2013. Variación vertical del contenido de elementos potencialmente tóxicos en la zona minera El Triunfo (B.C.S.) y en la desembocadura de su arroyo principal en el Océano Pacífico. Tesis de Doctorado, CICIMAR-IPN.
- Sánchez-Martínez, M.A., Marmolejo-Rodríguez, A.J., Millán-Gómez, R., Sánchez-González A., Magallanes-Ordóñez V.R., Romero-Guadarrama J.A., Murillo-Jiménez J.M., 2013b Sediment accumulation of Ag, Cu, and Ni through a semi-arid basin as a by-product of the El Triunfo gold mine, Baja California Sur, Mexico. *Journal of Iberian Geology*, 39 (1): 97-110.
- Schmid, T., Rico, C., Rodríguez-Rastrero, M., Sierra, M.J., Días-Puente, F.J., Pelayo, M., Millán, R. 2013. Monitoring of the mercury mining site Almadén implementing remote sensing technologies. *Environmental Research*, 125: 92-102.
- SEMARNAT-CENICA-INE, 2003. Remediación de sitios contaminados por metales provenientes de jales mineros en los distritos de El Triunfo-San Antonio y Santa Rosalía. Informe Final. Responsable del Proyecto: Dra. Tania Volke Sepúlveda. <http://www2.inecc.gob.mx/dgcenica/descargas/remediacion2003.pdf>
- SE, 2016. Secretaría de Economía. Fecha de consulta: 02 de septiembre de 2016. <http://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/mineria>
- Secretaria de Economía *et al*, 2013. Proyecto de Norma Mexicana, Establecimiento de unidades productoras y manejo de germoplasma forestal-especificaciones técnicas. México, 122 p.
- Servicio Geológico Mexicano, 2015. Panorama Minero del Estado de Baja California Sur. Fecha de consulta: 29 de Agosto de 2016. [http://www.sgm.gob.mx/pdfs/BAJA\\_CALIFORNIA\\_SUR.pdf](http://www.sgm.gob.mx/pdfs/BAJA_CALIFORNIA_SUR.pdf)
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 1996. Carta Geológico-Minero, San Antonio F12-B13, Baja California Sur. Pachuca, Hidalgo, 1ra. Edición.
- Soto-Jiménez, M.F., Flegal, A.R. 2011. Metal-contaminated indoor and outdoor housedust from a neighborhood Smelter área in Torreón, México. *Procedia Environmental Sciences*, 4: 134-137.
- Sposito, V.G. 1989. *The Chemistry of Soils*. Oxford University Press. 277 pp.

- Swayze, G.A., Smith, K.S., Clark, R.N., Sutley, S.J., Pearson, R.M., Vance, J.S., Hageman, Ph.L., Briggs, P.H., Meier, A.L., Singleton, M.J., and Roth, S. 2000. Using imaging spectroscopy to map acidic mine waste. *Environmental Science and Technology*, 34: 47-54.
- Townsend, P.A., Helmers, D.P., Kingdon, C.C., McNeil, B.E., De Beurs, K.M., Eshleman, K.N. 2009. Changes in the extend of surface mining and reclamation in the Central Appalachians detected using a 1976-2006 Landsat time series. *Remote Sensing of Environment*, 113: 62-72.
- Volke-Sepúlveda, T., Solórzano, G., Rosas, A., Izumikawa, C., Aguilar, G., Velasco, J., Flores, S. 2003. Remediación de sitios contaminados por metales provenientes de jales mineros en los distritos de El Triunfo-San Antonio y Santa Rosalía, Baja California Sur. Reporte técnico del Centro Nacional de Investigación y Capacitación ambiental CENICA. México, 37 pp.
- Volke-Sepúlveda, T., Velasco-Trejo, J.A., de la Rosa-Pérez, D. A. 2005. Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. México. 141 pp.
- Wedepohl, K.H. 1995. The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 1217-1232.
- Wentworth, C.K., 1992. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *J. Geology*, 30:377-392.
- Wurl, J., Mendez-Rodriguez, L., Acosta-Vargas, B. 2014. Arsenic content in groundwater from the southern part of the San Antonio-El Triunfo mining district, Baja California Sur, Mexico. *Journal of Hydrology*, 518: 447-459
- Zhiyou, F., Fengchang, W., Changli, M., Qiuqing, D., Wei, M., John, P.G. 2016. Comparison of arsenic and antimony biogeochemical behavior in water, soil and tailings from Xikuangshan, China. *Science of the Total Environment*. 539: 97-104.
- Ziegler-Rivera, F.R.A., 2014. Ocurrencia natural del arsénico en el distrito minero San Antonio-El Triunfo, Baja California Sur. Tesis de Licenciatura. UNAM.