



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

EVALUACIÓN DE LA DISPERSIÓN HÍDRICA DE ARSÉNICO EN EL DISTRITO MINERO  
DE SAN ANTONIO-EL TRIUNFO, BAJA CALIFORNIA SUR, MÉXICO.

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**DOCTORA EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

P R E S E N T A

GRISELDA BERENICE HERNÁNDEZ CRUZ

JEAN FRANÇOIS YVES PIERRE PARROT FAURE  
Instituto de Geografía (Tutor)

OFELIA MORTÓN BERMEA  
Instituto de Geofísica, UNAM

FRANCISCO MARTÍN ROMERO  
Instituto de Geología, UNAM

OSCAR ARTURO FUENTES MARILES  
Instituto de Ingeniería, UNAM

PEDRO ANTONIO GUIDO ALDANA  
Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra

México, D.F. a junio 2015



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## CONTENIDO

RESUMEN.....	7
ABSTRACT.....	8
INTRODUCCIÓN.....	10
CAPÍTULO I.....	13
IDENTIFICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS MINEROS.....	13
I.1. Identificación de los residuos mineros.....	13
I.2. Clasificación de los residuos mineros.....	17
I.2.1. Características mineralógicas.....	19
I.3. Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT).....	24
I.3.1. Estudio del Arsénico como Elemento Potencialmente Tóxico en zonas mineras.....	30
CAPÍTULO II.....	36
MODELO DE SIMULACIÓN HÍDRICA.....	36
II.1. Flujos superficiales.....	36
II.2. Modelo matemático aplicado a los flujos superficiales: Modelo <i>Flubidi</i> .....	38
II.3. Datos del modelo de cuenca.....	43
II.4. Modelo meteorológico.....	45
I.5. Características específicas de los datos.....	48
CAPÍTULO III.....	51
CARACTERÍSTICAS DEL DISTRITO MINERO SAN ANTONIO - EL TRIUNFO.....	51
III.1. Características físicas.....	51
III.2. Características meteorológicas.....	55
III.3. Características de los residuos mineros.....	66
III.4. Identificación mineralógica por medio de Percepción Remota.....	68
CAPÍTULO IV.....	77
MARCO METODOLÓGICO.....	77
IV.1. Modelo Digital del Terreno.....	77
IV.2. Simulación de escurrimiento.....	81
IV.3. Características granulométricas.....	82
IV.4. Concentraciones de arsénico.....	85
CAPÍTULO V.....	88
RESULTADOS DE LA DISPERSIÓN DE ARSÉNICO.....	88
V.1. Simulación del flujo superficial.....	88
V.3. Integración de las características físicas y geoquímicas del distrito minero.....	89
CAPÍTULO VI.....	101
DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	101
BIBLIOGRAFÍA.....	109
ANEXOS.....	114
Apartado A.....	114
Resultados de DRX.....	114
Apartado B.....	117
Resultados de FRX.....	117
Apartado C.....	118
Resultados de granulometrías.....	118

## RELACIÓN DE FIGURAS.

Figura II.1. Estructura del flujo vista en perfil. Cada estrato muestra un comportamiento distinto dentro del flujo en un cauce (modificado de Elliott, 2010).....	37
Figura II.2. Diagrama del modelo <i>Flubidi</i> . Se muestran los pasos principales utilizados para la generación de la velocidad del escurrimiento (elaboración propia).....	40
Figura II.3. Esquema para el cálculo de la ecuación de continuidad en dos dimensiones, (modificado de Carrillo, 2000).....	41
Figura II.4. Esquema para el cálculo de la cantidad de movimiento en dos dimensiones, (modificado de Carrillo, 2000).....	42
Figura II.5. Resultados al Número de Curva, para el cálculo del escurrimiento a partir de la precipitación efectiva (NRCS, 1986).....	45
Figura III.1. Localización del área de estudio. Al sur de la Península de Baja California Sur, al SE de la capital, en la Cuenca de San Juan de los Planes, se localizan los Poblados de El Triunfo y San Antonio. La línea anaranjada del recuadro derecho inferior muestra la carretera transpeninsular No. 1 .....	52
Figura III.2. Mapa geológico de las cartas geológico-mineras F12B13 y F12B14 del Servicio Geológico Mexicano, escala 1:50 000 (SGM, 1996).....	54
Figura III.3. Mapa hídrico de la cuenca de San Juan de los planes. El arroyo principal es el San Antonio localizado entre la Sierra Anterior y Sierra Los Chiles, en la porción baja de la cuenca cambia su nombre a arroyo El Carrizal (Instituto Geológico de México, 1992) .....	54
Figura III.4. Lluvia diaria máxima acumulada en cinco días consecutivos para las estaciones meteorológicas que no tuvieron un valor significativo de láminas máximas en 15 días.....	55
Figura III.5. Ubicación de estaciones con registros de precipitación y sus correspondientes polígonos de Thiessen, (Tomado de Servicio Meteorológico Nacional, 2013).....	56
Figura III.6. Hietogramas de la E.C. 3050 para diferentes periodos de retorno.....	58
Figura III.7. Hietogramas de la E.C. 3011, para diferentes periodos de retorno.....	59
Figura III.8. Hietogramas de la E.C. 3037, para diferentes periodos de retorno.....	59
Figura III.9. Hietogramas de la E.C. 3049, para diferentes periodos de retorno.....	59
Figura III.10. Hietogramas de la E.C. 3104, para diferentes periodos de retorno.....	60
Figura III.11. Hietogramas de la E.C. 3143, para diferentes periodos de retorno.....	60
Figura III.12. Distribución de los números de escurrimiento sobre la superficie de estudio .....	64
Figura III.13. Distribución temporal de la lluvia efectiva de un tren de precipitaciones de 5 días, con periodo de retorno de 200 años, para la estación 3050. ....	65
Figura III.14. Localización geográfica de los residuos mineros de San Antonio y El Triunfo. ....	66
Figura III.15. Imagen de satélite Landsat. La imagen de la izquierda muestra una banda sin tratamiento, la imagen de la derecha muestra el resultado al aplicar cociente de banda 3/ banda 1. El cuadro rojo muestra el área identificada con residuos mineros. ....	70
Figura III.16. Aplicación de falso color en el cociente de bandas 3/5. El color rojo representa los materiales hidratados, mientras que el color verde representa los materiales arcillosos, mismos que se presentan en ríos principalmente, pero no en el área de residuos mineros. ....	71
Figura III.17. Firmas espectrales de los jales. En la porción izquierda se muestra el corte de cada cociente en un sitio donde se sabe que existe una zona de jal. El lado derecho muestra los valores del histograma de cada cociente. ....	72
Figura III.18. Segmentación de los cocientes de bandas. El resultado de la segmentación muestra una clara diferenciación de la firma espectral de los terreros (color blanco), del resto de los materiales que se localizan alrededor de la zona de jales (colores rojo y azul). ....	73
Figura III.19. Segmentación de cocientes. Los resultados indican que con una zona más grande hay un número de códigos mayor. Los materiales bien definidos se encuentran en los sedimentos de los arroyos (cuadro rojo), nubes (cuadro amarillo) y en los jales hay al menos tres códigos que los componen. ....	74

Figura III.20. Cruzamientos con los valores de los códigos previamente identificados. No existe una definición clara de la firma espectral de los jales (cuadro negro), por el contrario, continúa la consistencia con la firma espectral de las nubes (cuadro amarillo). .....	75
Figura III.21. Realce del segmento representativo para los jales. EL segmento que en un área menor es representativo para los jales, en mayor escala se encuentra distribuido en diferentes zonas de la imagen de satélite, no siendo representativo de los jales. ....	76
Figuras IV.1. y IV.2. La figura IV.1. (izquierda) Las curvas de nivel en el archivo .RST adquieren una superficie, ésta dentro del algoritmo es dilatada con una conectividad de 4 y 8, con ello se obtiene una dilatación isotrópica. La figura IV.2. (derecha) Los pixeles que conforman a las curvas de nivel se dilatan hasta que se juntan. El proceso se repite hasta que cada pixel tiene un valor de altitud, la interpolación de datos continúa hasta ocupar todo el espacio entre cotas. ....	79
Figura IV.3. La generación del MDE con los datos vectoriales de INEGI, no permiten la generación completa del modelo, por falta de datos, quedando la parte norte de la cuenca sin superficie. ....	79
Figura IV.4. Extracción de curvas de nivel del MDT de ASTER. Los datos altimétricos faltantes se pueden digitalizar y anexar a los datos previamente trabajados (USGS, 2013). ....	80
Figura IV.5 Representación del MDT en la cuenca de San Juan de Los Planes. ....	81
Figura IV.6. Representación esquemática del modelo matemático empleado para el cálculo de la velocidad del escurrimiento. El área (dimensión horizontal), se divide en celdas a lo largo de $\Delta x$ y ancho $\Delta y$ . ..	82
Figura IV.7. Diagrama de Hjulström. En el eje vertical se muestran las distintas velocidades que puede tener un flujo y el eje horizontal se presentan los tamaños de grano. Cuando ambos ejes se relacionan, tenemos el depósito, arrastre o erosión de un cauce. Las líneas grises marcan el umbral entre un evento y otro (Boggs, 2006). ....	83
Figura IV.8. Localización de muestreo. Las muestras se tomaron en los sitios con residuos mineros (terreros) y a lo largo del arroyo San Antonio .....	84
Figura IV.9. Equipo Camsizer®. El equipo mide granulometría y morfometría de sedimentos por métodos ópticos (Lo Castro <i>et al.</i> , 2011). ....	85
Figura IV.10. Concentración de As. Las concentraciones > 1,000 mg/kg de As se encuentran principalmente en la zona de terreros cercanos al poblado de San Anotnio. En la porción baja de la cuenca existen sólo valores de fondo o naturales (<114 mg/kg), mientras que en los cauces de los arroyos es donde se encuentra una mayor heterogeneidad en las concentraciones del As. ....	86
Figura V.1. Simulaciones de la velocidad de flujo en la Cuenca San Juan de los Planes. Las simulaciones se realizaron a periodos de retorno de 2, 5, 10, 100 y 200 años. La representación de los resultados es con base en los valores de frontera que presenta el diagrama de Hjulstrom. Adicionalmente se agregan los eventos que predominan para cada valor de velocidad representado en los mapas. ....	90
Figura V.2. Concentraciones de As en el Distrito Minero. Las concentraciones superiores a las 1,000 ppm (tonos naranja y rojo) en la porción sur del área, son los sitios en donde se ubican los terreros. En color azul se presenta la red hídrica, si se compara la red con la distribución del As se observa una misma configuración del As sobre los cauces de los arroyos. ....	91
Figura V.3. Sitios con residuos mineros. A. Antiguas pilas de lixiviación con residuos tipo jal. B. C. Terreros D. Terrero con presencia de material oxidado. E. Sedimentos sobre el arroyo San Antonio .....	92
Figura V.4. Mapa granulométrico de los terreros de San Antonio. Todos los terreros presentan granulometrías gruesas salvo el jal La Colpa, que se presenta una mayor cantidad de material fino. ....	94
Figura V.5. Granulometrías de los sedimentos. Las granulometrías son heterogéneas incluso en los sedimentos de la porción plana de la cuenca (SED10). Los sedimentos que presentan mayor homogeneidad tienen el número 12 en la figura. ....	95
Figura V.6. Geología y distribución del As. Al relacionar la distribución de As con la geología del área se nota una baja concentración de As justo en el área del conglomerado polimíctico (recuadro azul). La mayor parte de las concentraciones superiores a 114 mg/kg se encuentran en la granodiorita y en la zona con material aluvial. ....	97

Figura V.7. Granulometría y distribución de As. las primeras barras de granulometría (en el recuadro azul) señalan a las partículas gruesas como las principales, pasando dicho punto son ahora las partículas finas las que predominan.....98

Figura V.8. Simulación de escurrimiento con un periodo de retorno a dos años. Los datos de la modelación indican que la velocidad del flujo en el cauce del arroyo San Antonio en la porción alta, tiene una velocidad superior a 1.0 m/s, en la confluencia de los arroyos (SED01) las velocidades son <1.0m/s. ....100

## RELACIÓN DE TABLAS.

Tabla 1. Antecedentes del estudio de residuos mineros con técnicas de laboratorio y percepción remota. .16	
Tabla 2. Principales formas de oxidación de los sulfuros metálicos en las zonas mineras (Lottermoser, 2007). .....	20
Tabla 3. Los elementos traza son transportados por Oxihidróxidos de Fierro, Manganeso y arcillas minerales (Modificado de Sposito, 1983). .....	21
Tabla 4. Principales minerales con capacidad neutralizadora de acidez (Jambor, 1994). .....	22
Tabla 5. Minerales secundarios ricos en sulfuros, comunes en los residuos de jales (Jambor, 1994). .....	23
Tabla 6. Movilización de EPT en los ecosistemas por procesos bioquímicos. ....	25
Tabla 7. Comportamiento de los EPT, en los diferentes componentes del ecosistema .....	26
Tabla 8. Ejemplos de minerales primarios y secundarios que pueden ser localizados en suelos, (Modificado de Casanova, 2005 y Bautista, 1999). .....	27
La tabla 9. Concentraciones de EPT dependiendo las características de Eh (condiciones de óxido-reducción) y (potencial de Hidrógeno) pH. ....	29
Tabla 11. Elementos recurrentes en zonas con actividad minera. La lista incluye 26 EPT divididos por orden de importancia ambiental. En el grupo I están los EPT de mayor relevancia; mientras que el grupo III concentra los EPT ambientalmente menos importantes (Compilado de Swaine, 2000). .....	31
Tabla 12. Láminas de lluvia acumulada en cinco días consecutivos de la estación climatológica 3050, en mm. ....	57
Tabla 13. Láminas de un día de lluvia para un periodo de retorno de 200 años (Estación 3050) .....	57
Tabla 14. Variación de lluvia registrada (EMA Cabo San Lucas) y distribución propuesta por Chen (factor de comportamiento K igual 0.6). .....	62
Tabla 15. Datos de la lluvia total y efectiva con periodo de retorno de 200 años, en mm (estación 3050). ..	65

## RESUMEN.

La investigación que se efectuó en la zona del Distrito Minero de San Antonio-El Triunfo, Baja California Sur, tuvo como objetivo principal relacionar la distribución del arsénico (As) contenido en los residuos mineros que se encuentran en la porción alta del Valle de San Antonio, en la cuenca de San Juan de Los Planes, con la dispersión de partículas con altos contenidos de As que se localizan en la porción media y baja de la cuenca.

La porción alta de la cuenca de San Juan de Los Planes, en el valle de San Antonio, se ha presentado una intensa actividad minera desde el siglo XVI. La actividad minera artesanal y las antiguas pilas de lixiviación que utilizaban cianuro como método de separación del oro, principalmente, han generado una gran cantidad de residuos mineros, que contienen Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT), entre los que destaca el As por su alta peligrosidad a la salud. El material residual, expuesto a la superficie, llega a ser fácilmente dispersado al ambiente, afectando el equilibrio del ecosistema.

La identificación de los residuos mineros con técnicas de percepción remota permitieron tener una firma espectral de los mismos; no obstante, al comparar la firma espectral con los materiales que se encuentran pendiente abajo, ningún material coincidió con la firma espectral de los terreros, lo que supone una mezcla de materiales en los residuos, que varía en proporciones, o bien, que se requieren de imágenes de mayor resolución espectral que permitan una huella espectral de mayor detalle para identificar los residuos mineros.

El análisis de las precipitaciones de la cuenca de San Juan de Los Planes y su posterior simulación matemática, muestran al agente hídrico como un agente propicio para la dispersión de los residuos mineros debido a que de los arroyos principales fluyen por los residuos mineros y las velocidades del escurrimiento son capaces de transportar cualquier tamaño de partícula.

Las técnicas de Fluorescencia de Rayos X y Difracción de Rayos X, se utilizaron para conocer la cantidad de As y para caracterizar a los minerales que se encuentran tanto en la zona de residuos mineros, como en la porción media y baja de la cuenca. Ambos métodos establecen una relación entre

ABSTRACT.

los EPT y los minerales ricos en As que se registran en los residuos mineros, siendo éstos últimos, la fuente de aporte de As que se registran en las porciones de piedemonte y zona baja de la cuenca.

Mediante la relación: velocidad de escurrimiento y transporte de sedimentos propuesto por Hjulström, se plantea que las partículas  $> 2.0$  mm de diámetro son las responsables de movilizar al As fuera de la zona con actividad minera. Asimismo, las características de la precipitación suponen una movilización de sedimentos ricos en As a través de los arroyos San Antonio y Carrizales, hasta la porción baja de la cuenca, sin que estos lleguen a ser transportados hasta el Golfo de California.

Se encontró una relación directa de la distribución del As con la geología, la hidrografía y la granulometría, y de forma indirecta se comprobó que ningún periodo de retorno es capaz de movilizar a las partículas hasta el Golfo de California.

**ABSTRACT.**

In the Mining District of “San Antonio-El Triunfo” a detail physical characterization was conducted base on the granulometric characteristics in the particles of the sediments and soils, relating the distribution of arsenic (As) with the dispersion of particles by water runoff.

Since 1940, five weather stations were used for recorded the annual precipitation in the study area. The effective rainfall and the slope were used in the modelation runoff by Digital Elevation Models. Both the results of runoff simulations (in  $m^3/s$ ) and the Hjultröm diagram were used to determine the particles that were transported (or deposited) and their sizes.

The results showed velocities over  $3.0$  m/s which can move particles of  $0.001$  to  $100$  mm, and velocities below  $2.0$  m/s that do not mobilize particles over  $1.0$  mm. The alternance between those velocities generates deposit of different size particles.

Geochemical measurements in sediments of the area point out that the particles greater than  $2.0$  mm of diameter are associated with high concentrations of As ( $500$ - $1,000$  mg/kg). It was observed

ABSTRACT.

since the runoff rates of 2.0 m/s cannot mobilize these types of particles. Therefore, when there are runoff rates of 2.0 m/s we found deposit with high concentrations of As; conversely, when there are a runoff rate of 3.0 m/s (at least) we observe natural values concentrations of arsenic.

Based on the arsenic distribution in surface soils we can conclude that water is responsible for the particles (>2.0 mm diameter) mobilization, which are associated with high concentrations of arsenic.

Studies of physical characterization as this work there are not common; nevertheless its scientific contribution is necessary, particularly in environmental researches. Therefore the incorporation of physical characterizations, the geochemical measurements and the remediation studies, give an integral view in management of impacted sites by mining waste.

## **INTRODUCCIÓN.**

El desarrollo de la humanidad y las prácticas económicas actuales, han generado una creciente dependencia hacia los recursos minerales, en especial, a la transformación de los minerales en materia prima, útil para casi cualquier actividad cotidiana en la sociedad.

La producción y el incremento en el consumo de metales tienen un crecimiento importante y exponencial durante la segunda mitad del siglo XX. La demanda de los metales a principios de la década de los noventa era de 80 millones de toneladas al año, y en tan sólo 10 años, la demanda se incrementó hasta los 580 millones de toneladas a nivel mundial (Spoel, 1990).

Las concentraciones en materiales metálicos del Distrito Minero de San Antonio-El Triunfo, lo colocaron como uno de los dos yacimientos minerales de mayor importancia desde finales del siglo XVI en la Península de Baja California (COREMI, 1999).

La demanda de materia prima mineral es abastecida por la industria minera, quién ha hecho lo suficiente para que en la actualidad el ser humano no se vea afectado por una escasez en cuanto a procesamiento de minerales. Sin embargo, se han generado problemas en el medioambiente; la industria minera ha crecido tanto y a su vez, tan rápido, que las consecuencias de tal exigencia, por obtener altas cantidades de metales, ha llevado a una degradación acelerada en los ecosistemas.

A nivel mundial, se han establecido políticas públicas para generar metodologías que atiendan el impacto ambiental de las actividades mineras, así como evaluaciones eficientes durante el cierre y abandono de los sitios donde se llevaron a cabo las actividades de extracción. No obstante, dichas políticas son recientes y no han sido establecidas de manera obligatoria para todos los países, siendo los países subdesarrollados los que atienden en menor medida los problemas de contaminación ambiental (Martínez, 2003).

Debido a lo anterior, se tiene una zona minera con un gran potencial extractivo que ha sido explotado desde hace más de cuatrocientos años, si bien ha tenido periodos sin actividad minera, los residuos que se han generado a lo largo de cientos de años, han estado expuestos a la superficie, sin una

regulación política que permita controlar la distribución de los materiales a las partes más bajas de la cuenca.

Dada la dinámica del planeta, los residuos mineros son movilizados mediante, el aire, el suelo o el agua. En la presente investigación, se genera un modelo de simulación hídrica para representar la dispersión del As, mediante el transporte hídrico superficial en un Distrito Minero inactivo, con presencia de residuos mineros.

En el primer capítulo se presentan el marco conceptual de los residuos mineros y las bases técnicas y metodológicas para identificar los minerales que conforman a los residuos mineros por medio de técnicas de percepción remota y de caracterizaciones mineralógicas. Para este caso, las técnicas de percepción remota abarcan el rango del espectro visible e infrarrojo.

En la porción del espectro visible, (0.4-0.8  $\mu\text{m}$ ) se analizan las firmas espectrales de los minerales, con imágenes Spot y Landsat. En el rango del espectro infrarrojo se identifican en particular, los residuos mineros hidratados. En la porción del Infrarrojo (1 $\mu\text{m}$ -20  $\mu\text{m}$ ) se configuran las firmas espectrales con muestras de residuos mineros y se comparan con una librería espectral para identificar los minerales que constituyen a los residuos mineros.

En el segundo capítulo se encuentran las bases teóricas, así como la explicación en el desarrollo del algoritmo que modela las características del escurrimiento. Además, se analizan las características meteorológicas y físicas que determinan la cantidad de lluvia que escurre sobre la cuenca de San Juan de Los Planes.

En el tercer capítulo se examinan los trabajos previos reportados del área de estudio para poder tener un antecedente principalmente de la identificación, clasificación y características de los residuos mineros. Posteriormente, se genera un análisis de las precipitaciones de la lluvia en el distrito minero, y finalmente, se conocen las concentraciones de As. Con los datos previos recopilados, se genera una firma espectral para los residuos mineros y por medio de percepción remota se identifica el área en donde éstos son depositados.

## INTRODUCCIÓN.

En el cuarto capítulo se aplica el apartado metodológico de la presente investigación, se describe la generación del Modelo Digital del Terreno (MDT), útil para la simulación matemática y para la representación de los resultados. De forma particular, se presentan los materiales y métodos utilizados en las características granulométricas y las concentraciones de As.

En el quinto capítulo, se presentan los resultados de la simulación del escurrimiento para diferentes periodos de retorno de lluvia (2, 5, 10, 50, 100 y 200 años). Se relacionan los resultados de la velocidad del flujo con el depósito, erosión o transporte de las partículas, dado su tamaño. Finalmente, se presenta la integración de los datos de velocidad del flujo, movilización de partículas y la relación que éstas guardan con las concentraciones de As.

En el sexto capítulo se presentan las conclusiones y discusión de los resultados obtenidos en la presente investigación. Asimismo, se exponen y comparan los resultados de los trabajos previos en la zona de estudio y los resultados obtenidos para conocer las diferencias entre los resultados previos y el aporte que el presente trabajo aporta al distrito minero de San Antonio – El Triunfo.

## **CAPÍTULO I.** **IDENTIFICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS MINEROS**

Las provincias mineralizadas que se han podido describir en México presentan una compleja historia geológica, por tanto, es difícil establecer las características típicas de los sitios mineros. No obstante, en México se tienen identificados los yacimientos de vetas epitermales de oro (Au) y plata (Ag); yacimientos polimetálicos de plomo (Pb), zinc (Zn) y cobre (Cu) y los de tipo skarn: pórfidos cupríferos y sulfuros masivos polimetálicos, como los principales yacimientos reportados y explotados en el país.

Por lo general, los depósitos minerales contienen combinaciones de óxidos o sulfuros metálicos, silicatos, hidróxidos, fosfatos, haluros y carbonatos (Lottermoser, 2007; Romero *et al.*, 2007; McLemore, 2008).

Dependiendo del tipo de extracción y separación mineral, los depósitos minerales adoptan características específicas. En la actualidad, existe una gran cantidad de residuos mineros históricos en los que no se conoce con detalle el proceso por el cual fueron generados; sin embargo, estudiando las características de los mismos, se puede inferir por el proceso minero por el que pasaron.

En el primer capítulo se describen los métodos y técnicas más comunes para identificar los residuos mineros. Asimismo, se presenta una clasificación general de residuos mineros por actividad minera y por su mineralogía. Finalmente, se detalla el control y la movilización química o física de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT), que se encuentran en los residuos mineros. Dentro de todos los EPT, se destaca al Arsénico (As), como objeto de estudio, debido a la importancia ambiental e histórica que diversos autores le han conferido.

### **I.1. Identificación de los residuos mineros**

Los residuos mineros surgen de los procesos de minado y extracción de yacimientos minerales por la actividad minera. Como característica física, todos presentan la misma tendencia, material heterogéneo de rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias, suelos y sedimentos. Sin embargo, químicamente, los residuos mineros varían de acuerdo al tipo de material y separación minera.

Por lo general, aunado a la extracción física, existe un procesado mineralúrgico y metalúrgico, que separa con mayor eficacia el mineral de valor comercial para obtener un mineral de calidad para su venta. Los métodos de separación minera dependen de las características del yacimiento mineral, su geometría; el tipo de roca y su resistencia mecánica (Canet & Camprubí, 2013).

Los métodos de separación tienen el objetivo de obtener el mineral en su forma más pura, dadas las exigencias del mercado, una vez cumplidos los estándares de calidad, tanto la roca estéril como los residuos obtenidos de la actividad mineralúrgica y metalúrgica, son dispuestos al medioambiente causando problemas al ecosistema por la cantidad de elementos que son incorporados a la superficie terrestre y por los nuevos minerales generados a partir del proceso de beneficio.

Las formas, posición y composición de los nuevos materiales alteran el medio, y estas alteraciones pueden ser vistas e incluso pueden ser cartografiadas a través de distintos métodos de laboratorio y remotos.

Los estudios de identificación mineral con técnicas de laboratorio y métodos remotos han tenido un auge en la industria minera como métodos exploratorios, e incluso como métodos de prospección mineral. Las fases minerales, los cambios mineralógicos y la abundancia relativa de los mismos, son fácilmente estudiados mediante métodos como la Difracción de Rayos X (DRX), Espectroscopía de Infrarrojo Cercano (SWIR). La zonificación de sitios con residuos mineros es posible en algunos sitios, mediante técnicas de Percepción Remota (PR) (Vibhuti et al., 2004).

Una de las principales ventajas de las técnicas de PR, sobre los métodos de laboratorio de DRX y SWIR, es que las técnicas de PR abarcan una mayor escala de trabajo, es decir, cubren una mayor cantidad en área de estudio, no requiere de muestreo previo, debido a que se basa en valores de brillo, producto de la reflectancia de radiación solar que emiten los materiales de la superficie terrestre, y que son obtenidos mediante imágenes de satélite.

Una de las principales desventajas de las técnicas de PR, en los sitios con residuos mineros es la poca claridad con la que se pueden definir los valores de brillo. Dentro de los residuos mineros existe

una gran heterogeneidad en los materiales, de tal forma, que en ocasiones es difícil encontrar la firma espectral que define al material que conforma los residuos mineros.

La tabla 1 muestra algunos trabajos previos que se han realizado por medio de técnicas de DRX, SWIR y PR. Todos los estudios tienen el mismo objetivo, identificar los materiales que constituyen a los residuos mineros.

Tabla 1. Antecedentes del estudio de residuos mineros con técnicas de laboratorio y percepción remota.

TÉCNICA	REFERENCIA	COMENTARIOS
DRX	Melgarejo <i>et. al</i> (2010)	Presenta las técnicas analíticas más utilizadas en la caracterización mineral. Y un ejemplo en la exploración minera
DRX	Rodolfo Fernández-Martínez, <i>et al.</i> (2005)	Se estudian la relación existente con parámetros granulométricos y la composición química y mineralógica de muestras de suelos con altas concentraciones de Hg.
DRX	Queralt I. & Plana F. (1993)	Se genera un estudio con muestras de suelo de una zona minera en Italia, para poder conocer los elementos traza que contienen los suelos. Posterior a la cantidad de elementos traza, se conoce su composición mineralógica y finalmente se obtiene su distribución a través de la granulometría.
SWIR	Carles Canet <i>et al.</i> (2014)	El estudio comprende el análisis de los minerales alterados en un sitio geotérmico y la ubicación sobre la superficie, para identificar las zonas con mayor actividad hidrotermal. Con los datos obtenidos se genera un modelo de la configuración de la caldera de Acoculco.
SWIR	Ferrier <i>et al.</i> (2009)	Se colectaron muestras de sedimentos de un río principal cercano a un sitio con actividad minera para caracterizar la dispersión de los residuos mineros por dispersión hídrica. Se tomaron los espectros mineralógicos <i>in situ</i> y mediante pruebas de laboratorio se comparan las firmas espectrales de los minerales contenidos en las muestras de sedimentos.
SWIR	Velasco Francisco, <i>et al.</i> (2005)	Se generó un análisis de 58 muestras de suelos y sedimentos contaminados por minerales de sulfuros masivos. Los minerales identificados por diversos aparatos espectroscópicos fueron divididos por zonas (proximal, transicional y distal). La división entre los minerales permitió conocer el comportamiento geoquímico que tienen los residuos mineros en un sitio minero de España.
PR	Xiao Huaguo & Ji Wei (2005)	Con el uso de imágenes landsat MSS y TM, se estudió la relación que se tiene con la fuente de contaminantes de un sitio minero en Estados Unidos, y la calidad del agua superficial. Se identificó que los metales pesados contenidos en las muestras de agua, estaban también contenidos en los residuos mineros.
PR	Delendatti (2003)	Se procesó la información espectral de cuatro bandas de las imágenes Landsat con el fin de detectar y caracterizar zonas hidrotermales con mineralización alterada. Dentro de los procesamientos a las imágenes se incluyó cocientes entre bandas, compuestos de color y el método más relevante fue el de componentes principales, con ello se delimitaron y establecieron zonas con minerales que contenían la misma firma espectral.
PR	Ruiz-Armienta & Prol-Ledesma (1998)	Se genera un relace espectral y espacial de las imágenes de satélite landsat, para identificar zonas de alteración hidrotermal. Las zonas identificables como potenciales para la formación de yacimientos minerales fue mapeada y se verificaron en campo los patrones espectrales identificados a través de las imágenes de satélite.

## I.2. Clasificación de los residuos mineros.

La clasificación de los residuos mineros está en función de la etapa minera en la que fueron creados (concentraciones físicas de minerales) y por el tipo de mineralogía que presenten (concentraciones químicas). Del proceso de minado se tienen los tamaños de partículas más grandes, producto de los residuos denominados terreros o tepetates; en el proceso mineralúrgico y metalúrgico se tiene un residuo de granulometrías finas llamado jales y cenizas principalmente para los procesos metalúrgicos.

Por sus características físicas, por proceso extractivos, o bien, por los procesos de beneficio, los residuos mineros pueden clasificarse en:

- Residuos del proceso de minado
  - a) Terreros
  - b) Tepetates
- Residuos del proceso mineralúrgico
  - ✓ Separación física:
    - a) Jales de separación magnética o electrostática
    - b) Jales de separación gravimétrica
  - ✓ Separación fisico-química:
    - a) Jales de separación por flotación
    - b) Residuos de reactivos gastados de la separación por flotación
  - ✓ Separación por procesos bioquímicos:
    - a) Jales de separación por cianuración
    - b) Residuos del desgaste de los sistemas de lixiviación
- Residuos del proceso metalúrgico
  - a) Escorias vetrificadas
  - b) Escorias carbonatadas
  - c) Lodos de limpieza de gases
  - d) Lodos de tratamiento de ácido débil
  - e) Lodos de almacenamiento de ácido sulfúrico

- f) Lodos de la purga de plantas de ácido
- g) Polvo de los hornos de calcinación
- h) Otras partículas y polvos asociados al proceso metalúrgico
- Residuos hidrometalúrgicos
  - a) Yesos producto de la neutralización de purgas ácidas
  - b) Lodos de la precipitación de hierro (goetita, jarosita o hematita)
  - c) Lodos de la lixiviación de tanques
  - d) Lodos del ánodo electrolítico
  - e) Carbón activado gastado
  - f) Lodos de la extracción por disolventes
  - g) Azufre elemental proveniente de la lixiviación de concentrados de zinc
  - h) Otros residuos asociados con los procesos hidrometalúrgicos.

La clasificación anterior de los residuos mineros muestra tres grandes grupo de residuos. Los tepetates y terreros, que son materiales de granulometría gruesa, producto del proceso de minado. Los tepetates, están conformados por el apilamiento del material mineral, sin valor económico. Incluye el material estéril que cubre la estructura mineralizada y que para su minado a cielo abierto se debe desalojar. Mientras que los terreros son los residuos apilados conformados por material mineral de baja ley.

Los jales, generados en las operaciones primarias de separación y concentración de minerales durante los procesos mineralúrgicos, tienen como característica principal, la granulometría fina. Mineralógicamente son ricos en sulfuros metálicos residuales como pirita ( $\text{FeS}_2$ ), pirrotita ( $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$ ), galena ( $\text{PbS}$ ), esfalerita ( $\text{ZnS}$ ), calcopirita ( $\text{FeCuS}_2$ ), y arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ) (Romero *et al.*, 2007).

Las escorias y lodos son generados durante las operaciones metalúrgicas. Generalmente, éstos residuos provienen de las operaciones de fundición por la acción química y la fusión a través de la combinación de fundentes (carbonatos y silicatos) con la ganga o porción sin valor mineral (Diario Oficial de la Federación, 2011).

### **I.2.1. Características mineralógicas**

La clasificación mineralógica de los residuos mineros está en función de los minerales que precipitan. La clasificación más conocida al respecto es la que propone Jambor (1994), quién clasifica a los minerales en primarios y secundarios.

Minerales primarios. Su composición está fuertemente influenciada por el material original. Sus cambios son en gran medida, cambios físicos. Generalmente, son minerales compuestos de sulfuros metálicos, carbonatos, aluminosilicatos, hidróxidos, etc. En la actividad minera, se presentan principalmente, en el proceso de minado. Constituyen gran parte de los minerales que se concentran en los tepetates y terreros.

Dentro de las técnicas de identificación mineral, los minerales primarios son más simples de identificar, debido a que las mezclas minerales no son tan grandes y tienden más a guardar las mismas proporciones minerales.

Minerales secundarios. Estos minerales se concentran principalmente en los procesos mineralúrgicos y metalúrgicos. Los principales cambios que se dan para que existan minerales secundarios es la precipitación de los compuestos de sulfuros metálicos que son característicos en los procesos de minado.

Los minerales secundarios se forman en una fase posterior al depósito de minerales primarios. Presentan alteraciones físicas y químicas, resultado de la precipitación de los sulfuros metálicos que están contenidos en los residuos mineros del proceso de minado y en algunos procesos de beneficio.

Por medio de procesos de oxidación los sulfuros metálicos precipitan y químicamente se convierten en minerales secundarios. Los procesos de oxidación ocurren cuando los minerales primarios (carbonatos, silicatos y aluminosilicatos) sufren alteración físico-química por acción del agua o el aire.

La tabla 2, muestra las formas de oxidación de los minerales metálicos:

Tabla 2. Principales formas de oxidación de los sulfuros metálicos en las zonas mineras (Lottermoser, 2007).

<b>FeS<sub>2</sub></b>	
<b>FeS<sub>2</sub>+3.75 O<sub>2</sub>+3.5 H<sub>2</sub>O</b>	<b>→ Fe(OH)<sub>3</sub>+2SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>+4H<sup>+</sup></b>
<b>Fe<sub>1-x</sub>S</b>	
<b>Fe<sub>1-x</sub>S<sub>2</sub>+(2-x/2)O<sub>2</sub>+xH<sub>2</sub>O</b>	<b>→ (1-x)Fe<sup>2+</sup>+SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>+H<sub>3</sub>AsO<sub>4</sub></b>
<b>FeAsS</b>	
<b>FeAsS+3.25 O<sub>2</sub>+1.5H<sub>2</sub>O</b>	<b>→ Fe<sup>2+</sup>+SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>+H<sub>3</sub>AsO<sub>4</sub></b>
<b>PbS</b>	
<b>PbS+2O<sub>2(aq)</sub></b>	<b>→ PbSO<sub>4</sub></b>
<b>ZnS</b>	
<b>ZnS+2O<sub>2(aq)</sub></b>	<b>→ Zn<sup>2+</sup>+ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>
<b>CuFeS<sub>2</sub></b>	
<b>CuFeS<sub>2</sub>+4O<sub>2(aq)</sub></b>	<b>→ Cu<sup>2+</sup>+Fe<sup>2+</sup>+2SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>

En la oxidación de todos los sulfuros metálicos, la principal fuente liberada al medio ambiente la constituyen los sulfatos, junto con algunos elementos traza que pueden presentarse como inclusiones o impurezas químicas dentro de la forma cristalina. Éstos elementos son más resistentes a la oxidación (Lottermoser, 2007).

Los resultados de la oxidación y la precipitación de minerales primarios, propicia la precipitación de minerales secundarios, como óxidos, hidróxidos, sulfatos, carbonatos, y arseniatos. Los metales que fueron liberados durante el proceso de oxidación y que al precipitarse juegan un papel importante en el control de la movilidad de los Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) (Romero *et al.*, 2007).

En ambientes sedimentarios, algunos EPT pueden ser movilizados en solución como cationes libres (Cu<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Co<sup>2+</sup>, Hg<sup>2+</sup>) o como complejos iónicos (H<sub>2</sub>AsO<sub>3</sub><sup>-</sup>, H<sub>2</sub>AsO<sub>4</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>2-</sup>, V<sub>4</sub>O<sub>9</sub><sup>2-</sup>, HgCl<sub>4</sub><sup>2-</sup>). Otros minerales que no pertenecen al grupo de los sulfatos y que pueden liberarse en los residuos mineros son los hidróxidos de aluminio y los hidróxidos de Hierro (Fe (OH)) (Siegel, 2002).

La tabla 3, muestra los elementos trazas más comunes encontrados en minerales como sulfatos y minerales secundarios propios de la industria minera.

Tabla 3. Los elementos traza son transportados por Oxihidróxidos de Fierro, Manganeso y arcillas minerales (Modificado de Sposito, 1983).

<b>MINERAL</b>	<b>SORCIÓN O PRECIPITACIÓN DE METALES</b>
<b>Óxidos de Fierro</b>	Mn, Ni, Cu, Zn, Mo, As,
<b>Óxidos de Manganeso</b>	Fe, Co, N, Zn, Pb
<b>Arcillas minerales</b>	
<b>Montmorillonitas</b>	Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Cu, Zn, Pb
<b>Illitas</b>	V, Ni, Co, Cr, Zn, Cu, Pb
<b>Verniculitas</b>	Ti, Mn, Fe

Otro proceso que ocurre en la precipitación minerales primarios y que da pauta al desarrollo de minerales secundarios es el proceso de neutralización. En los residuos mineros los sulfuros son principales responsables de los procesos de oxidación, mientras que carbonatos, hidróxidos y aluminosilicatos neutralizan la reacción entre los protones ( $H^+$ ) generados por la oxidación de sulfuros e hidroxilos ( $OH^-$ ) (Fukushi *et al.*, 2003).

Dentro de los minerales que consumen protones ( $H^+$ ) son los carbonatos los más importantes, entre ellos sobresale la calcita ( $CaCO_3$ ), por su poder neutralizante de soluciones ácidas. Otros minerales de menor poder neutralizante son: aragonita ( $CaCO_3$ ), dolomita [ $CaMg(CO_3)_2$ ] y magnesita ( $MgCO_3$ ) (Heikkinen *et al.*, 2009).

Los minerales no carbonatados que están presentes en los jales y que al disolverse o alterarse consumen protones ( $H^+$ ), debido a su reactividades con los minerales oxidados, se presentan en la tabla 4. Su reactividad es relativamente baja, si son comparados con los carbonatos; sin embargo, también poseen capacidades neutralizadoras.

Tabla 4. Principales minerales con capacidad neutralizadora de acidez (Jambor, 1994).

Minerales típicos	Reactividad relativa
Anortita, nefelita, olivino, granate, jadeíta, leucita, Spodumeno (Kunzita), diopsida, wallastonita.	0.6
Epidota, zoisita, enstatita, hiperstena, augita, hedenbergita, hornblenda, glaucofano, tremolita, actinolita, antofilita, serpentina, crisolita, talco, clorita, biotita.	0.4
Albita, oligoclasa, labradorita, verniculita, montmorillonita, gibbsita, caolinita.	0.02
Feldespató-K, muscovita	0.01
Cuarzo, rutilo, zircón	0.004

Los procesos de oxidación y neutralización que generan la precipitación de nuevos minerales, como óxidos, hidróxidos, sulfatos, carbonatos y arseniatos, toman un papel trascendental para el control y movilidad de EPT (Romero *et al.*, 2007). En otros casos, la precipitación de minerales tales como, anglesita, beudantita y escodorita, son un control importante para la movilidad de los EPT liberados durante la oxidación de sulfuros metálicos (Romero *et al.*, 2008).

Los procesos de sorción o adsorción y co-precipitación de minerales secundarios en las superficies de arcillas, oxihidróxidos de Hierro (Fe), Aluminio (Al), Manganeseo (Mn), y calcita (Ca) son los principales controles de movilidad de metales y metaloides potencialmente tóxicos (Lottermoser, 2007; Romero *et al.*, 2000; Heikkinen *et al.*, 2009)

Los principales minerales secundarios ricos en sulfuros metálicos se presentan en la tabla 5, dichos materiales son parte de los minerales que controlan la movilidad de EPT.

Tabla 5. Minerales secundarios ricos en sulfuros, comunes en los residuos de jales (Jambor, 1994).

Óxidos y oxihidróxidos		Carbonatos	
Goethita	$\alpha$ -FeO(OH)	Cerusita	PbCO <sub>3</sub>
Lepidocrosita	$\gamma$ -FeO(OH)	Azurita	Cu <sub>3</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub>
Akaganeita	$\beta$ -FeO(OH,Cl)	Hidrocincita	Zn <sub>5</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>
Maghemita	$\gamma$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
Hematita	$\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
Ferrihidrita	FeO[O, <sub>x</sub> (OH) <sub>1-x</sub> ] <sub>x</sub>		
Diáspora	AlO(OH)		

Sulfatos			
Basanita	2CaCO <sub>4</sub> •H <sub>2</sub> O	Thenandita	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Yeso	CaSO <sub>4</sub> •2H <sub>2</sub> O	Jarosita	KFe <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>
Goslarita	ZnSO <sub>4</sub> •7H <sub>2</sub> O	Natrojarosita	NaFe <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>
Melanterita	FeSO <sub>4</sub> •7H <sub>2</sub> O	Hidronium jarosita	(H <sub>3</sub> O)Fe <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>
Ferrohexahidrita	FeSO <sub>4</sub> •6H <sub>2</sub> O	Alunita	KAl <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>
Siderotil	FeSO <sub>4</sub> •5H <sub>2</sub> O	Copiapita	Fe <sup>2+</sup> Fe <sup>3+</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> (OH) <sub>2</sub> •20H <sub>2</sub> O
Rozenita	FeSO <sub>4</sub> •4H <sub>2</sub> O	Metahohmannita	Fe <sub>2</sub> <sup>3+</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub> •3H <sub>2</sub> O
Epsomita	MgSO <sub>4</sub> •7H <sub>2</sub> O	Fibroferrita	Fe <sup>3+</sup> (SO <sub>4</sub> )(OH)•5H <sub>2</sub> O
Hexahidrita	MgSO <sub>4</sub> •6H <sub>2</sub> O	Alungen	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> •17H <sub>2</sub> O
Pentahidrita	MgSO <sub>4</sub> •5H <sub>2</sub> O	Hidrobasaluminita	Al <sub>4</sub> (SO <sub>4</sub> )(OH) <sub>10</sub> •nH <sub>2</sub> O
Starkeyita	MgSO <sub>4</sub> •4H <sub>2</sub> O	Halotrichita	Fe <sup>2+</sup> Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>4</sub> •22H <sub>2</sub> O
Anglesita	PbSO <sub>4</sub>	Pickeringerita	MgAl <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>4</sub> •22H <sub>2</sub> O

### I.3. Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT)

De forma general se ha establecido que cualquier elemento que se presente en niveles menores a 0.1% sean denominados elementos traza, y por arriba 0.1% se les considera EPT. La toxicidad es proporcional a la facilidad de ser absorbidos por los seres vivos (Adriano, 2001).

Los elementos metálicos tales como el Fierro (Fe), Magnesio (Mg), Cobre (Cu), Cobalto (Co), Níquel (Ni), y Zinc (Zn), son estructuralmente muy similares. Esta semejanza estructural, origina que ciertos cationes metálicos puedan desplazar a otros con funciones fisiológicas importantes en las células (Nies, 1999).

De acuerdo con Wittmann, 1979, en las zonas mineras, los EPT liberados en mayores concentraciones son: Arsénico (As), Manganeseo (Mn), Zinc (Zn), Cobre (Cu), Cobalto (Co) y Níquel (Ni). En el proceso metalúrgico, el empleo de elementos tóxicos como el cianuro en la actividad de purificación, y el empleo de Mercurio (Hg) en la metalurgia del oro, emiten materiales tóxicos de los hornos de fundición tales como: Arsénico (As), Selenio (Se), Plomo (Pb) y Cadmio (Cd), óxidos y sulfuros.

Otros EPT que están asociados con los procesos de fundición y refinación son: Zinc (Zn), Cobre (Cu), y Plata (Ag). En los cuerpos de agua cercanos a la actividad minera se pueden encontrar grandes cantidades de Fierro (Fe), Manganeseo (Mn), Zinc (Zn), Cobre (Cu), Cobalto (Co) y Níquel (Ni) (Csuros, 2002).

Como se mencionó anteriormente, existen procesos químicos propios de los minerales secundarios, que controlan la movilidad de EPT, no obstante, existen procesos biogeoquímicos en la hidrósfera, litósfera y biósfera, que pueden movilizar a los EPT (Tabla 6). Incluso, existen factores atmosféricos tales como la temperatura, la humedad y el viento que pueden modificar las condiciones de los minerales secundarios y con ellos cambiar las concentraciones de EPT (Cepeda, 2009).

Tabla 6. Movilización de EPT en los ecosistemas por procesos bioquímicos.

<b>Barrera biogeoquímica</b>	<b>Característica física</b>	<b>Característica química</b>	<b>Dispersión o acumulación de elementos</b>
<b>Oxidantes</b>	Cima de la montaña	Condiciones oxidantes	Acumulación de Fe, Mn, Co
<b>Reductoras</b>	Planicie	Condiciones reductoras	Acumulación de V, Fe, Co, Zn, As, Cd
<b>Intermedias</b>	Piedemonte	Condiciones transicionales de óxido-reducción	Dispersión de elementos por escorrentía
<b>Sulfática-carbonatada</b>	Suelos de ambientes áridos	Suelos con altos contenidos de yeso y carbonatos	Acumulación de Sr y Ba debido a que son insolubles como sulfatos y carbonatos.
<b>Alcalina</b>	Suelos ácidos con alternancia de suelos básicos	Cambios en el pH del suelo que va de ácido a básico	Acumulación de Sr, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cd y Pb
<b>Evaporativa</b>	Ambiente de gran insolación	Presencia de sales solubles en la superficie del suelo	Acumulación de metales que forman sales solubles como: Ca, Mg, Na, K, Li, F, Zn, Sr, Mo, I, Cl, Cu y B.
<b>Adsorción</b>	Horizontes del suelo con contenido de humus y arcillas	Acumulación de coloides	Acumulación de V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Rb, Mo, Hg, Ra y U

Otra fuente de movilización de EPT se da mediante el transporte eólico por medio de aerosoles y el transporte hídrico a través de partículas materiales. De acuerdo con Moriarty 1990 el comportamiento de los EPT en los tres componentes, aire, agua, suelo, varía en tiempo, en dispersión y en afectación a los organismos (Tabla 7).

De los tres componentes en los cuales se movilizan los EPT, el suelo es el más susceptible de contenerlos, debido a que la fase sólida del suelo comprende a toda la composición mineralógica,

óxidos, sales y materia orgánica en diferentes etapas de descomposición. Además, comprende iones disueltos, en los que se lleva a cabo, entre otras reacciones, la formación de complejos solubles, óxido-reducción, adsorción y precipitación-disolución.

Tabla 7. Comportamiento de los EPT, en los diferentes componentes del ecosistema

<b>Componente</b>	<b>Tiempo de residencia</b>	<b>Uniformidad de la dispersión</b>	<b>Daño a los organismos</b>
<b>Aire</b>	Bajo	Alta	Bajo a medio
<b>Agua</b>	Medio	Media	Alto
<b>Suelo</b>	Alto	Baja	Medio a alto

Los suelos actúan como un filtro amortiguador natural y controlan el transporte químico de los EPT y sustancias presentes en la atmósfera, hidrósfera y biota. A través de barreras biogeoquímicas se pueden observar las características de acumulación de minerales presentes en el suelo, Tabla 8.

Tabla 8. Ejemplos de minerales primarios y secundarios que pueden ser localizados en suelos, (Modificado de Casanova, 2005 y Bautista, 1999).

<b>MINERALES PRIMARIOS</b>	<b>ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS ASOCIADOS</b>
<b>Galena (PbS)</b>	Ag, Au, As, Ba, Bi, Cr, Hg y Ni
<b>Esfalerita (ZnS)</b>	Sb, Sn, Te, Tl
<b>Calcopirita (CuFeS<sub>2</sub>)</b>	Ag, Co, Ge, In, Mn, Ni, Se y Sn
<b>Pirita (FeS<sub>2</sub>)</b>	Ag, As, Au, Co, Cu, Ni, Pb, Ti y Tl
<b>Arsenopirita</b>	Co, Mn y Ni
<b>MINERALES SECUNDARIOS</b>	<b>ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS ASOCIADOS</b>
<b>Óxidos de hierro</b> <b>Hematita Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> <b>Goethita FeO (OH)</b>	V, Mn, Cu, Zn, Mo
<b>Óxidos de manganeso</b>	Fe, Co, Ni, Zn y Pb
<b>Carbonatos</b> <b>Calcita CaCO<sub>3</sub></b> <b>Magnesita Mg CO<sub>3</sub></b> <b>Dolomita Ca Mg (CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub></b> <b>Siderita Fe CO<sub>3</sub></b>	V, Mn, Fe, Co, Cd y Pb
<b>Esmectitas</b>	Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co y Ni
<b>Vermiculitas</b>	Ti, Mn y Fe
<b>Óxidos de Aluminio</b> <b>Gibbsita Al (OH)<sub>3</sub></b>	
<b>Sulfatos y Sulfuros</b> <b>Yeso CaSO<sub>4</sub> 2 H<sub>2</sub>O</b> <b>Pirita FeS<sub>2</sub></b>	
<b>Fosfatos</b> <b>Apatita Ca<sub>5</sub> (F, Cl, OH)(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub></b>	

El componente más móvil para los EPT por lo general se da través del agua, esta dispersión se debe principalmente a las condiciones de óxido-reducción y al potencial de hidrógeno (pH) presente en

los cuerpos de agua (Bautista, 1999) (Tabla 9). Incluso, el agente hídrico en los sitios con actividad minera puede generar el desarrollo de aguas ácidas (Drenaje Ácido de Minas -DAM-). La presencia de sólidos en suspensión, aumenta la turbidez y disminuyen la luminosidad, afectando a los procesos biológicos de fauna y flora de los medios acuáticos.

El agente hídrico es tal vez el agente al que se debe prestar mayor atención como movilizador de EPT, debido a que en este medio, los EPT son fácilmente ingeridos y concentrados en los organismos. Si la dosis de metales supera los umbrales de concentración en un organismo, que generalmente éstos deben ser a nivel de trazas (menos del 0.1% del total), o se vuelven tóxicos y mortales (Connel D., & Miller G., 1984).

La tabla 9. Concentraciones de EPT dependiendo las características de Eh (condiciones de óxido-reducción) y (potencial de Hidrógeno) pH.

Características del agua	Características del ambiente	Características de los EPT
<b>Aguas oxigenadas</b> Presencia de oxígeno libre	Eh entre +0.4 y +0.15. Medio ácido o alcalino.	Oxidación principalmente del Fe <sup>3+</sup> , Cu <sup>2+</sup> y S <sup>6+</sup> .
<b>Aguas sulfurosas</b> (Presencia de H <sub>2</sub> S y HS)	Eh entre -0.5 y -0.3. Medio reducido.	Se forman sulfatos y sulfuros de baja solubilidad.
<b>Aguas gleyzadas</b> Presencia de H <sub>2</sub> , Fe <sup>2+</sup> , CH <sub>4</sub> y otros compuestos orgánicos	Condiciones reductoras sin la presencia de sulfuros.	Muchos metales se dispersan fácilmente y forman complejos orgánicos.
<b>Aguas fuertemente ácidas</b>	Agua con pH <3.0 Presencia de oxidación de piritita FeS <sub>2</sub> que promueve la formación de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .	Migran fácilmente los metales como el Fe, Cu, Al, Zn, Mn, entre otros.
<b>Aguas débilmente ácidas</b>	Agua con pH 3.0 a 6.5 La acidez es debida a la descomposición de materia orgánica, ácidos orgánicos y disolución de CO <sub>2</sub> .	Los cationes en forma de bicarbonatos y los complejos orgánicos migran fácilmente.
<b>Aguas neutras y débilmente alcalinas</b>	Aguas con pH de 6.5 a 8.5. Propias de ambientes marinos, oceánicos, paisajes áridos y paisajes de karst. Presencia de bicarbonatos de calcio y CO <sub>2</sub> .	La dispersión de metales se restringe debido a la formación de hidróxidos insolubles, carbonatos y otras sales. Los elementos aniogénicos (formadores de aniones) migran fácilmente (Si, Ge, As, V, U, Mo, Se, etc.).
<b>Aguas fuertemente alcalinas</b>	Aguas con pH > 8.5. Presencia de carbonatos y bicarbonatos de sodio.	Migran fácilmente el cuarzo, los humatos, Al y Mo.

### **I.3.1. Estudio del Arsénico como Elemento Potencialmente Tóxico en zonas mineras.**

Los EPT pueden variar en cada proceso minero (exploración, extracción y beneficio). Hay incluso EPT que pueden ser liberados durante todas las etapas mineras y ambientalmente no generan un riesgo para la biota; otros, por el contrario, son liberados en un solo proceso y esto es suficiente para que alguna parte del ecosistema se vea afectada.

En el estudio de Swaine (2000), propone algunos EPT que ambientalmente son de interés, dado que son comúnmente liberados en la actividad minera (Tabla 11).

Continuando con los datos recopilados de Swaine (2000), se observa que en todos los procesos mineros hay un EPT que está presente siempre y el cual está ubicado en primer lugar dentro del grupo I, el As. Además, define a la Piritita como el mineral ambientalmente más interesante, debido a los cambios en el pH de suelos y agua, cuando este se oxida, liberando a su vez los EPT asociados, entre ellos el As.

Finalmente Swaine (2000), señala que aun cuando presente una lista de EPT ambientalmente relevantes, y señale algunos como de mayor importancia que otros, siempre se debe hacer una caracterización del elemento, conocer su especiación química y la biodisponibilidad que presenta en cada ambiente.

La explotación del oro, es una de las principales fuentes de liberación de As y el drenaje superficial es el principal agente de cambio en la química del mismo elemento. En ambientes hídricos ácidos (como el DAM), el As inorgánico predomina como arseniato  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  (carga pentavalente) y en ambientes reductores, o de pH neutros a básicos, el arsenito ( $\text{H}_3\text{AsO}_3$ ) es el predominante.

El agua ya sea superficial o de forma subterránea es el ecosistema que más problemas ha presentado a nivel de toxicidad ambiental generada por las altas concentraciones de As pentavalente o trivalente. En el estudio de William, (2000) se presenta una metodología estandarizada para identificar la especiación química del As en el agua para 34 zonas mineras de tres continentes (África, Europa y Suramérica). Las 34 localidades presentan un clima diferente entre sí; en 25 sitios (Malasia, Tailandia,

Filipinas, Brasil y Ecuador) se presenta un clima húmedo tropical, mientras que en Argentina y Zimbabue, las condiciones son áridas.

Tabla 11. Elementos recurrentes en zonas con actividad minera. La lista incluye 26 EPT divididos por orden de importancia ambiental. En el grupo I están los EPT de mayor relevancia; mientras que el grupo III concentra los EPT ambientalmente menos importantes (Compilado de Swaine, 2000)

<b>GRUPOS</b>		
<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>
As	B	Ba
Cd	Cl	Co
Cr	F	I
Hg	Mn	Ra
Pb	Mo	Sb
Se	Ni	Sn
	Be	Tl
	Cu	
	P	
	Th	
	U	
	V	
	Zn	

Por métodos de laboratorio en el trabajo de Williams, (2000) se analizaron 15 EPT, entre ellos el As. Los resultados mostraron que las concentraciones de As son tóxicas en al menos 13 de los 34 sitios mostrados; en 25 localidades, los valores superan los 400 µg/l y el máximo valor es alcanzado en Zimbabue con 72000 µg/l. de acuerdo con Fergusson (1999), los valores promedio de sitios contaminados están en el orden de 0.1-5.0 µg/l.

El arseniato  $\text{As}^{5+}$  fue la especie de As dominante con más del 50% de la concentración de As total en 29 de los 34 sitios muestreados. En los sitios muestreados para As, también se determinó el pH del agua, los resultados en los valores de pH indican que la movilidad del As, está en función de los valores de pH, valores con pH menor a 4, generan una mayor movilidad en el As (William, 2000).

De acuerdo con Williams, (2000) los cambios en el pH también cambian la especiación del Hierro (Fe), elemento afin al As, que también provoca una movilidad en el As, particularmente en ambientes acuosos ácidos con valores de pH menores a 4.

El agente climático juega un papel relevante en la movilización del As (Williams, 2000), debido a que una de las movilizaciones del As, está dada por la oxidación del Fe, y para que se presente la oxidación del material debe haber un clima húmedo. Por tanto, los sitios con clima tropical son los más propensos a presentar movilizaciones de As asociadas a la oxidación de Fe. No obstante, en el trabajo de Williams, obtiene resultados con mayores movilizaciones de As en las zonas semidesérticas, él sugiere que las precipitaciones eventuales son las más poderosas para movilizar y poner en contacto al As con los elementos o minerales de Fe.

Williams (2000) concluye que los agentes climáticos y geológicos influyen en la presencia del As; pero, es el pH/Eh lo que causa una movilización dentro de los sistemas hídricos. Los flujos superficiales movilizan al As, pero no modifican su especiación, por lo tanto, se puede generar un punto de control para que el radio de influencia se minimice y el daño sea potencialmente más bajo.

La movilización que se presenta por cambios en el pH, o cuando este es de forma natural, ácido (valores menores a 4), adquiere un valor toxicológico más elevado y por lo general se presenta como  $\text{As}^{5+}$ , significativamente más peligroso para la salud.

Para el caso de México y en particular para las zonas semi-áridas, Razo y colaboradores (2003), señalan que las zonas áridas no presentan problemas con el As a corto plazo, pero, a través de los años, la movilización del As va adquiriendo un mayor radio de influencia debido al agente eólico

principalmente y en menor medida hídrico; una lluvia extraordinaria puede desencadenar el inicio de un DAM, mayor al que se contempla en las cuencas con residuos mineros.

Los distritos mineros donde se explotan: Plata (Ag), plomo (Pb), Zinc (Zn), Oro (Au) y cobre (Cu), son localizados comúnmente en las zonas semi-áridas, dichos elementos también están asociados a minerales ricos en sulfuros, compuestos de diversas impurezas de As, que por lo general pasan a ser parte del material residual que se dispone en la superficie terrestre.

En Razo y colaboradores (2003) se estudiaron los residuos mineros depositados por más de 200 años en el distrito minero de Santa María de la Paz, en porción central del país. Con estudios previos, identificaron una etapa de dispersión de contaminantes generada principalmente por el agente hídrico, dado que son los cauces los que tienen mayor concentración de As. En una segunda etapa, el trabajo de Razo, busca identificar a los agentes actuales de la dispersión de As, teniendo presente las relaciones climatológicas con la dispersión de As que presenta la zona.

Razo y colaboradores (2003) desarrollaron un muestreo para sitios donde podía presentarse únicamente dispersión hídrica, y otro muestreo para sitios con presencia únicamente de dispersión eólica. En el muestreo incluyeron sedimentos, agua superficial y subterránea. Todas las muestras fueron analizadas químicamente para caracterizarlas. Posteriormente, las concentraciones las trabajaron con análisis estadísticos y los resultados los presentaron en un mapa temático.

Los resultados que obtuvieron Razo y colaboradores (2003) en las muestras de agua, es que el As lo encontraron como especie disuelta y en valores ligeramente por arriba ( $8-21 \mu\text{g L}^{-1}$ ) de los parámetros promedio ( $1-10 \mu\text{g L}^{-1}$ ). Estos valores los encontraron en muestras de agua que podían ser contaminadas por la dispersión eólica de partículas (alrededor de 2.0 km fuera del área de influencia minera). Las muestras tomadas dentro de la zona minera y las muestras susceptibles de dispersión hídrica, presentan valores más altos ( $59-400 \mu\text{g L}^{-1}$ ).

No encontraron evidencia de DAM, sin embargo, los valores de As y su especiación química, les permite suponer que hay cambios de fases minerales en el agua cercana a la zona de los residuos

mineros, aun cuando el pH se mantiene siempre con valores entre 7 - 10. Los autores señalan que la geología del lugar, en específico, la presencia de rocas carbonatadas está creando una capacidad filtro-amortiguadora que impide el desarrollo de DAM.

En agua subterránea, además de presentarse la lixiviación de los minerales en superficie, los autores encontraron liberación de As natural de las rocas, lo que aumenta la concentración de As en acuíferos y estos a su vez en el agua a la población, si son explotados. Razo (2003) encuentra que, la dispersión del As contenido en agua subterránea se da principalmente por la generación de pozos de extracción de agua para cultivos agrícolas, el agua con altos contenidos en As es regada en la superficie, por lo que, el elemento comienza a ser depositado en suelos, plantas y sedimentos.

Otro aporte importante del trabajo de Razo y colaboradores (2003) es el factor climático. Ellos señalan que al tener un periodo de clima seco tan prolongado, la evaporación provoca que el As no sea movilizado de las zonas de cultivo y esto genere que haya una acumulación cada vez mayor, mientras se continúe con la extracción de agua subterránea.

Los patrones de distribución que encontraron Razo y colaboradores, obedece a una dispersión hídrica más que eólica, este resultado lo comprobaron por la caracterización mineralógica que le hicieron a las muestras de suelos y sedimentos; no obstante, es difícil para ellos determinar si es en el periodo de lluvias cuando se presenta la movilización de As, o bien, es a través de un movimiento físico donde las partículas son arrastradas por zonas cóncavas de mayor facilidad de movimiento.

La dispersión eólica también se presenta y es fácilmente identificable para los autores (Razo *et al.*, 2003) con la caracterización mineralógica. Las partículas que son movilizadas por el viento provienen de la actividad de fundición y de las zonas de beneficio dentro de la minería. No encontraron As proveniente del material residual, por lo que concluyen que el material residual es menos fino y por ende, el viento no puede transportar a dichas partículas.

La liberación de As en residuos mineros es el principal aporte de As antrópico que podemos encontrar en la superficie terrestre, ya que cualquier actividad minera genera la liberación en superficie.

Ya sea por arrastre hídrico, o bien, por movilización eólica, las zonas mineras comienzan a ser la fuente de propagación de As a varios de kilómetros de distancia de los distritos mineros.

Dentro de todos los residuos potencialmente tóxicos que pueden ser liberados en alguna parte del proceso minero, es el As el elemento más común y el de mayor importancia de estudio por los efectos nocivos a la salud. Los estudios acerca del As, deben estar enfocados a cumplir dos aspectos relevantes, conocer el agente de dispersión y su radio de influencia y la especiación química en la que se encuentra.

Para conocer el agente que está dispersando al As, basta con integrar a todos los posibles agentes movilizadores y posteriormente la toma de muestras para conocer las concentraciones. Es importante en este paso, generar una representación gráfica, ya sea con mapas o con gráficas, para que se pueda conocer la pluma de distribución que tiene el As, y así, relacionarlo con algún agente dada la configuración de los valores de concentración.

Al conocer al agente movilizador del As, se pueden tomar medidas de mitigación por medio de barreras que concentren en un solo sitio al As, y con ello, decrecer el radio de influencia del contaminante. El otro aspecto importante a estudiar en la dispersión del As, es la especiación química en la que se encuentra, ya que, las características químicas determinan en gran medida la solubilidad que tiene el As en ambientes acuosos, el grado de lixiviación que tiene en el subsuelo y la afinidad química que presente en la superficie.

Las formas químicas en las que se encuentra el As son: As (V) arseniato y AS (III) arsenito. El arseniato predomina en condiciones de oxidación, con valores bajos de pH es absorbido en óxidos y oxihidróxidos, cuando la carga es positiva. La movilidad y biodisponibilidad depende en gran medida de las condiciones de pH y de las superficies minerales (oxihidróxidos de Fe) y en menor medida de la actividad microbiana.

## **CAPÍTULO II.** **MODELO DE SIMULACIÓN HÍDRICA**

En el capítulo anterior se presentaron las características de los minerales que están contenidos en los residuos mineros y que son susceptibles a generar problemas medioambientales si estos se presentan en concentraciones más allá de su valor natural y además se presenta un agente que movilice esas concentraciones a otros sitios del ecosistema.

Dadas las características granulométricas, el agente eólico es capaz de movilizar a los residuos mineros del tipo jales, escombreras y lodos de lixiviación; mientras que el agente hídrico es más susceptible de movilizar tepetates y terreros. Sin embargo, para que el factor de escurrimiento pueda movilizar partículas con granulometrías gruesas, debe presentar características específicas, tales como, una duración prolongada y una velocidad suficiente para el arrastre del material.

En el presente capítulo se abordan las características de los flujos superficiales y se presenta una de las formas de cómo es posible lograr la simulación matemática de los escurrimientos, conociendo las variables meteorológicas y las particulares topográficas del área de estudio.

### **II.1. Flujos superficiales**

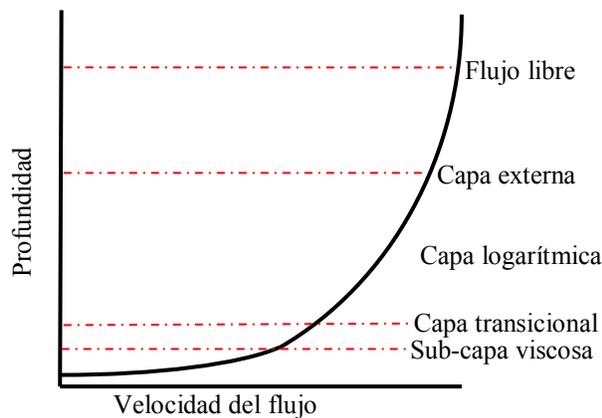
Los flujos superficiales representan el mayor componente dentro del escurrimiento, dichos flujos junto con el flujo subsuperficial y subterráneo conforman los flujos laterales u horizontales que circulan en el planeta.

El movimiento que se produce una vez que el agua de lluvia cae en superficie es generado por tres tipos de fuerzas: fuerza gravitacional, que moviliza el agua; fuerza de inercia, que permiten el movimiento continuo del flujo, fuerza de fricción, generada por el cauce y la viscosidad del fluido. La interacción entre las tres fuerzas dentro del flujo, origina cambios en la velocidad del mismo y genera distintas condiciones hidráulicas que determinarán la erosión y el transporte de sedimentos dentro de un caudal (Elliott, 2010).

La erosión y el transporte de sedimentos son procesos que se desarrollan en un fluido dinámico, ambos se presentan de forma simultánea, aunque puede existir el transporte de sedimentos sin necesidad de que exista la erosión de los mismos. La presencia o ausencia de la erosión se presenta cuando la fuerza gravitacional o la fuerza de inercia predominan una sobre otra. Cuando las partículas que viajan en un fluido tienen movimientos erráticos, turbulentos o no uniformes y la velocidad promedio del flujo disminuye, se advierte un cambio espacial y temporal brusco en el flujo debido a que fuerzas gravitacionales predominan sobre la fuerza de inercia. A este tipo de flujo se le conoce como flujo tranquilo o subcrítico. Este tipo de flujo es el más común en cauces naturales, en donde gran parte de la energía cinética se disipa debido a la fricción entre el cauce y las partículas que viajan dentro del flujo.

Por el contrario, cuando una corriente fluye a gran velocidad, en dirección lineal, sus partículas tienen un movimiento laminar, uniformemente acelerado, la fuerza de inercia es mayor a la fuerza de gravedad; este tipo de flujo suele ser muy erosivo, debido a la distancia que recorre. Este flujo es característico de cauces artificiales, se le conoce como flujo laminar, acelerado o supercrítico.

Las fuerzas gravitacional e inercial pueden ser estudiadas con una vista en planta del flujo, sin embargo, para la tercera fuerza que actúa en un flujo; para la fuerza de fricción, es necesario el estudio del fluido visto en perfil (Fig. II.1).



**Figura II.1. Estructura del flujo vista en perfil. Cada estrato muestra un comportamiento distinto dentro del flujo en un cauce (modificado de Elliott, 2010).**

La tercera fuerza que actúa en el agua es la fuerza de fricción, que frena el movimiento del agua a distintas velocidades, desde las paredes del cauce hacia el centro y desde el fondo del cauce hasta la porción superficial del flujo.

La sub-capa viscosa se encuentra al fondo del flujo y es de apenas unos milímetros de espesor. Aquí las condiciones de velocidad son muy homogéneas, el comportamiento del flujo es prácticamente laminar y no hay arrastre ni transporte de sedimentos en esta porción del flujo.

La capa transicional tiene características de flujo laminar, sin embargo, la homogeneidad del flujo se ve perturbada por escenarios de turbulencia propios de la capa logarítmica. En esta zona no existen características definidas, por tanto el flujo tiende a cambios constantes entre una velocidad laminar y una turbulenta.

La capa logarítmica presenta flujos turbulentos, el fluido transporta, arrastra y sedimenta distintos tamaños de partículas cuando la velocidad cambia. En esta zona se presenta las máximas velocidades que adquiere el flujo.

El flujo libre, es la parte más superficial del fluido, éste no tiene interacción con la fuerza de fricción, y esta capa puede anularse cuando el flujo tiene una profundidad muy corta y la geomorfología del cauce modifica todo el perfil del flujo.

Delimitar las velocidades de un flujo de acuerdo al comportamiento que el flujo adquiere con la fuerza de fricción es difícil, aun en pruebas de laboratorio. Sin embargo, las generalidades permiten identificar los diversos cambios que se encuentran entre las capas base (Sub-capa viscosa, Capa transicional y capa logarítmica) y la capa superficial o libre.

## **II.2. Modelo matemático aplicado a los flujos superficiales: Modelo *Flubidi***

Con el objeto de analizar el fluido y establecer cantidades de movimiento y energía en el mismo, se utilizan los modelos hidrológicos. Éstos se desarrollan a partir de ecuaciones de movimiento

de fluidos, definidos por la geometría, las condiciones del contorno y las leyes mecánicas. (Carrillo, 2000).

Los modelos matemáticos aplicados al área hidrológica tienen la capacidad de integrar los procesos del ciclo hidrológico que ocurren en una cuenca, con diferentes propósitos, como aprovechamiento de recursos hídricos, información de calidad del agua, control de avenidas, estudios ambientales, control del caudal sólido, entre otros.

El modelo *Flubidi* (Fuentes *et al.*, 1981) tiene la característica de ser un modelo paramétrico, el más simple dentro de las modelaciones de los flujos superficiales. La solución que brinda un modelo paramétrico es la de obtener un dato empírico, a través de una o más ecuaciones, cuyos parámetros o variables matemáticas son obtenidos del análisis de otros datos, o bien, de forma empírica. Los modelos paramétricos suelen ser más sencillos de construir, por tanto, de menor precio y más prácticos en cuanto a la cantidad de información que requieren en comparación con los modelos conceptuales, determinísticos o probabilísticos.

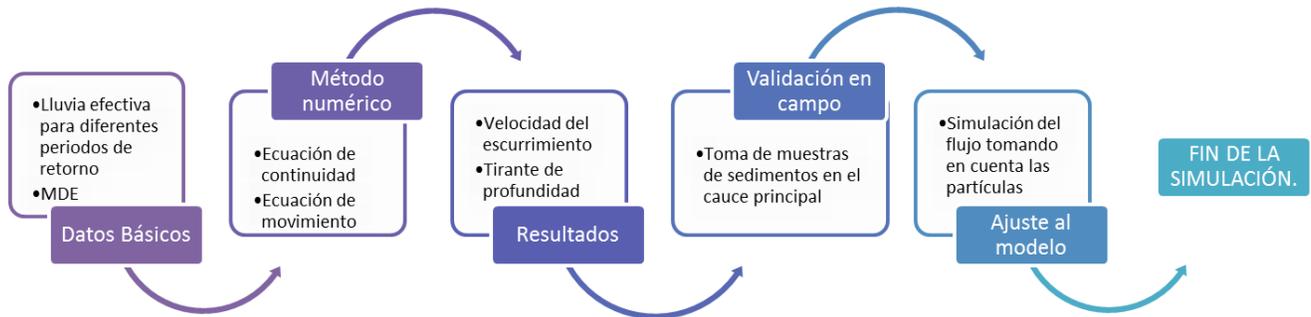
Otra característica importante del modelo *Flubidi* es el trabajo con parámetros distribuidos, esto significa que el modelo permite los cambios de datos en el espacio y tiempo dentro de la cuenca. El cambio de dichos parámetros en la cuenca permite el modelado de los detalles que ocurren no solo en la cuenca sino también a nivel subcuenca.

Las aplicaciones del modelo *Flubidi*, desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, para diversos estudios hidrodinámicos, permiten determinar el patrón de velocidades de un flujo y las elevaciones del tirante de agua. Es importante destacar que el modelo es útil para flujos bidimensionales, es decir, se contempla la dinámica horizontal y vertical del fluido, su aplicación también tiene relación con los estudios de arrastre de sedimentos y calidad del agua (Fig. II.2).

El modelo se basa en algunas leyes físicas, y en varios principios moleculares de los fluidos. Sus ecuaciones principales son dos: a) conservación de la masa (Ecuación de continuidad) y b) conservación de la cantidad de movimiento.

a) La ecuación de continuidad puede definirse como:

$$[\text{Flujo de masa entrante}] - [\text{flujo de masa que sale}] = [\text{Cambio en el almacenamiento de la masa a través del tiempo}]$$



**Figura II.2. Diagrama del modelo *Flubidi*. Se muestran los pasos principales utilizados para la generación de la velocidad del escurrimiento (elaboración propia).**

Para el cálculo de la ecuación de continuidad, se considera que un flujo que entra a un volumen controlado tiene un aporte de flujo en dirección  $x$  y otro en dirección  $y$ , de la misma forma, el flujo que sale, es también en ambas direcciones  $x$  y  $y$  (Fig. II.3).

De la figura II.2 y considerando la definición de la ecuación de continuidad, se puede deducir lo siguiente:

$$\left[ \Delta y \left( h - \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \left( u - \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \right] - \left[ \Delta y \left( h + \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \left( u + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \right] = \left[ \Delta x \Delta y \frac{\partial h}{\partial t} \right]$$

Dónde:

El flujo de masa que entra a un volumen de control en  $x$  es  $\left[ \Delta y \left( h - \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \left( u - \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \right]$  y el flujo de salida será  $\left[ \Delta y \left( h + \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \left( u + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \right]$  El resultado es un cambio en el almacenamiento del flujo  $= \left[ \Delta x \Delta y \frac{\partial h}{\partial t} \right]$

El flujo en dirección  $x$  utiliza los mismos términos en la ecuación.

$$\left[ \Delta x \left( h - \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \left( u - \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \right] \text{ Entrada en dirección } x \text{ y } \left[ \Delta x \left( h + \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \left( u + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \right] \text{ Salida en dirección } x$$

Agrupando los términos de ambas direcciones obtenemos los datos necesarios para la ecuación:

$$\begin{aligned} & \left[ \Delta y \left( h - \frac{\partial h \Delta x}{2} \right) \left( u - \frac{\partial u \Delta x}{2} \right) \right] - \left[ \Delta y \left( h + \frac{\partial h \Delta x}{2} \right) \left( u + \frac{\partial u \Delta x}{2} \right) \right] + \left[ \Delta x \left( h - \frac{\partial h \Delta y}{2} \right) \left( v - \frac{\partial v \Delta y}{2} \right) \right] - \left[ \Delta x \left( h + \frac{\partial h \Delta y}{2} \right) \left( v + \frac{\partial v \Delta y}{2} \right) \right] \\ & = \left[ \Delta x \Delta y \frac{\partial h}{\partial u} \right] \end{aligned}$$

La ecuación indica el cambio del almacenamiento.

Simplificando los términos, obtenemos la ecuación de continuidad para un flujo en dos dimensiones:

$$-h - \frac{\partial u}{\partial x} - u - \frac{\partial h}{\partial x} h \frac{\partial v}{\partial y} - v - \frac{\partial h}{\partial y} = \frac{\partial h}{\partial t}$$

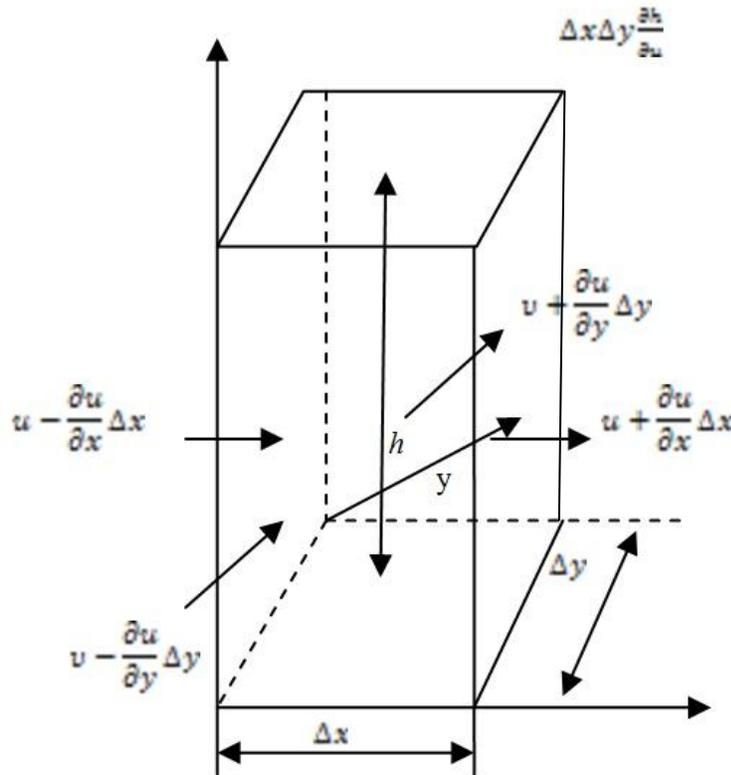


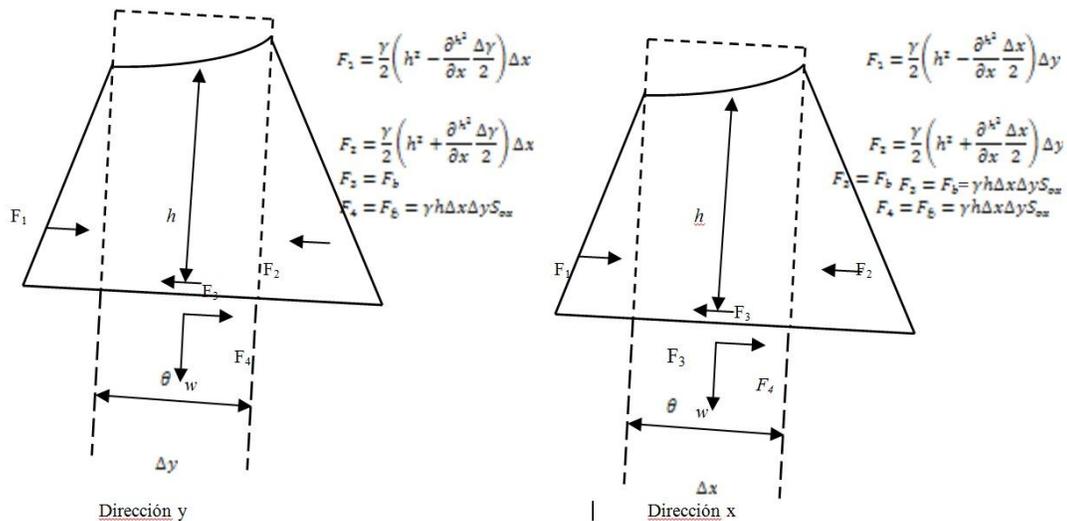
Figura II.3. Esquema para el cálculo de la ecuación de continuidad en dos dimensiones, (modificado de Carrillo, 2000)

b) Conservación de la cantidad de movimiento.

El movimiento en dos dimensiones requiere de la suma de fuerzas externas que actúan en el flujo, y las diferencias entre la cantidad de movimientos que existan dentro del flujo, tanto en su punto inicial como al final del mismo, cuando las fuerzas externas interactuaron con el flujo. La descripción del esquema anterior queda de la siguiente manera:

$$[Cantidad\ de\ movimiento\ que\ entra\ a\ un\ volumen\ conocido] - [cantidad\ de\ movimiento\ que\ sale] + [suma\ de\ fuerzas\ externas\ que\ actúan\ en\ el\ volumen\ conocido] = [cambio\ de\ cantidad\ de\ movimiento\ dentro\ del\ volumen\ conocido].$$

En un flujo dinámico o bidireccional las fuerzas externas que actúan en el volumen de control son: la presión, el peso, y la fricción. La fuerza de presión ocurre sobre las caras del volumen, y ésta incrementa debido al cambio del tirante del flujo (Fig. II.4).



**Figura II.4. Esquema para el cálculo de la cantidad de movimiento en dos dimensiones, (modificado de Carrillo, 2000)**

De la figura II.2, la fuerza de presión está representada por F<sub>1</sub> y F<sub>2</sub>, ambas fuerzas actúan sobre las caras de un volumen, que tiene una fuerza denominada F<sub>3</sub>. Si F<sub>1</sub> y F<sub>2</sub> actúan sobre F<sub>3</sub> hay un cambio en el tirante del flujo, representado por el término F<sub>4</sub>, definido como la fuerza de fricción. F<sub>5</sub>, representa en la figura anterior el peso del volumen.

Por otra parte,  $S_o$ , es la componente de la pendiente, el valor de la pendiente se deduce de la fórmula de Chezy o Manning (útiles para un flujo uniforme), Manning incorpora los efectos de fricción del flujo, tomando en consideración la escorrentía difusa, propia de cauces turbulentos en Chie, 1992.

Los términos de las fuerzas de presión, peso y fricción, así como el flujo de la cantidad de movimiento, deben sustituirse para que la ecuación quede de la siguiente manera:

$$\text{Presión en } x \quad P_{Nx} = -\frac{\gamma \partial h^2}{2 \partial x} \Delta x \Delta y, \quad P_{Ny} = -\frac{\gamma \partial h^2}{2 \partial y} \Delta x \Delta y \text{ en } y$$

$$\text{Peso en } x \quad F_{wx} = \gamma h \Delta x \Delta y S_{wx}, \quad F_{wy} = \gamma h \Delta x \Delta y S_{wy} \text{ en } y$$

$$\text{Fricción en } x \quad F_{fx} = \gamma h \Delta x \Delta y S_{fx}, \quad F_{fy} = \gamma h \Delta x \Delta y S_{fy} \text{ en } y.$$

$$\text{Para la cantidad de movimiento en } x \quad M_{mx} = -\frac{\gamma}{g} \frac{\partial}{\partial x} u(vh) \Delta x \Delta y - \frac{\gamma}{g} \frac{\partial}{\partial y} v(vh) \Delta x \Delta y$$

$$\text{Para el cambio en el movimiento} \quad \frac{\gamma}{g} \frac{\partial}{\partial x} (uh) \Delta x \Delta y - \frac{\gamma}{g} (vh) \Delta x \Delta y$$

Por lo tanto, La ecuación de la cantidad del movimiento es igual al cambio total de cantidad de movimiento más la suma de fuerzas externas que actúan sobre el volumen conocido, por lo que la ecuación de forma simplificada queda de la siguiente manera:

$$\frac{\partial}{\partial t} (uh) + \frac{\partial}{\partial x} u(uh) + \frac{\partial}{\partial y} v(uh) + \frac{g}{2} \frac{\partial h^2}{\partial x} = gh(S_{ox} - S_{fx}) \text{ Para la dirección } x$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (vh) + \frac{\partial}{\partial x} u(vh) + \frac{\partial}{\partial y} v(vh) + \frac{g}{2} \frac{\partial h^2}{\partial x} = gh(S_{oy} - S_{fy}) \text{ Para la dirección } y$$

La ecuación de conservación de cantidad de movimiento, es también conocida como ecuación conservativa, debido a que establece el principio de conservación de la cantidad de movimiento. Además, es importante establecer que una característica de las variables es que son dependientes, continuas y derivables.

### II.3. Datos del modelo de cuenca

Un modelo de cuenca se puede construir a partir de un modelo matemático; el principal objetivo de las simulaciones matemáticas de las cuencas es para conocer el cambio a través del tiempo de la relación precipitación-escorrentía.

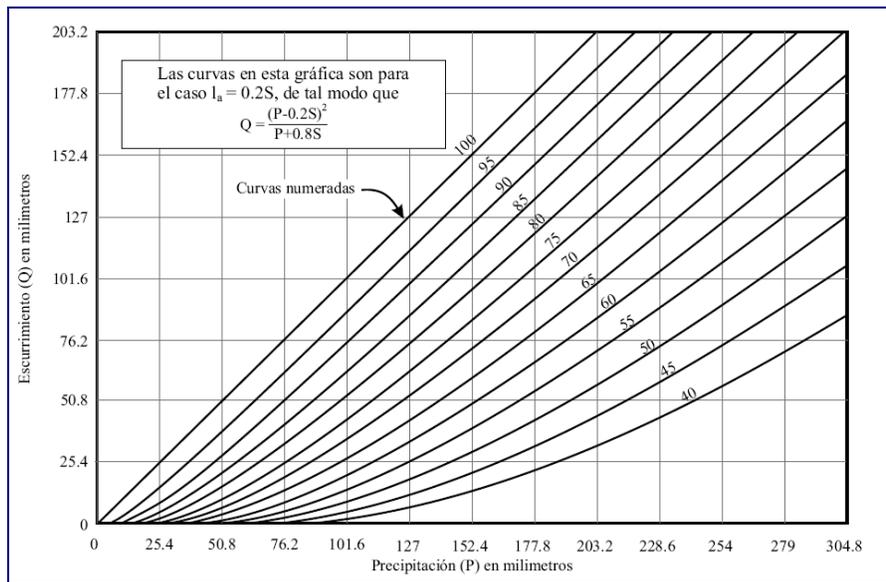
Los datos que componen a un modelo de cuenca son: las características físicas del medio, que determinan la cantidad y el comportamiento del agua dentro de la cuenca. Por lo general, estos datos son obtenidos de los procesos del ciclo hidrológico que actúan para reducir la cantidad de agua total en el escurrimiento, y los datos meteorológicos de entrada y salida del sistema. Estos datos constituyen al aporte de agua que se tiene por precipitación y el excedente de agua que comienza a fluir por escurrimiento, respectivamente.

Los procesos del ciclo hidrológico más importantes que determinan la cantidad y el comportamiento del agua son: infiltración, intercepción por vegetación, almacenamiento por obras de ingeniería civil y cuencas, evaporación y evapotranspiración (Campos, 1987). Dentro de los modelos paramétricos, existen diversos métodos que toman en cuenta dichos procesos para el cálculo de la lluvia efectiva, uno de los más comunes es propuesto por el *Soil Conservation Service* (SCS), conocido después de 1964 como *National Resources Conservation Service* (NRCS, 1986).

El método NRCS es conocido también como el método de Número de Curva, y es útil para la modelación de eventos de precipitación-escurrimiento. Su principal estimación es la infiltración, la cual se calcula a partir de la lluvia efectiva de una precipitación, y descontando la lámina de lluvia que se pierde por infiltración, evapotranspiración, intercepción y almacenamiento superficial. Estos últimos procesos, son agrupados en un parámetro inicial, definido como parámetro de retención potencial máximo.

Además de los parámetros hidrológicos, el método del Número de Curva toma en cuenta las características del suelo y uso del mismo, la cubierta vegetal, la pendiente del terreno y el grupo del suelo. En el método se considera que el suelo tiene cierta cantidad de humedad, y a medida que ésta aumenta, la precipitación efectiva es mayor. Por el contrario, cuando la humedad disminuye, la precipitación efectiva se reduce.

El resultado del método es un número adimensional  $N$ , que va del 1 al 100 (Fig. II.5). La lámina de lluvia efectiva que es nula, tiene un número de curva igual a 1, mientras que un número de curva igual a 100, indica que toda la lámina de lluvia es efectiva, y por lo tanto escurre.



**Figura II.5. Resultados al Número de Curva, para el cálculo del escurrimiento a partir de la precipitación efectiva (NRCS, 1986).**

#### II.4. Modelo meteorológico

El modelo meteorológico aporta los datos de entrada en el modelo matemático. Por lo que, a través de las bases hidrometeorológicas se estudia el comportamiento de la precipitación y se estiman los valores de entrada a la cuenca.

La precipitación es el principal abastecedor de agua dentro del ciclo hidrológico y el principal generador del proceso de escurrimiento en una cuenca. Los factores de la lluvia que van a modificar el comportamiento del agua en un sistema son tres: 1) intensidad, 2) duración, y 3) frecuencia. Adicionalmente, otros factores importantes a considerar dentro de los datos de entrada del modelo matemático son: la topografía y la distribución temporal y espacial.

La intensidad y la duración de la lluvia están relacionadas debido a que son el resultado de la combinación de los factores, temporales y espaciales. El tiempo visto como una duración en la precipitación y el espacio, comprendido como el área que abarca la precipitación. Si la duración de la precipitación es mayor que el área que abarca la misma, la intensidad de la lluvia será menor. Esta condición puede ser descrita como una lluvia ligera, que a través del tiempo genera un escurrimiento por el exceso de agua almacenada en la cuenca.

Si el tiempo de la precipitación es corto y el espacio en el que se presenta la precipitación es también corto, el comportamiento del agua dependerá más de las características físicas de la cuenca para que pueda presentarse un escurrimiento. Por otro lado, si se tiene un tiempo de precipitación largo y el espacio que abarca la cuenca es corto, el escurrimiento se presentará casi de forma inmediata. Este tipo de lluvias, suele tener una intensidad tan alta, que además de provocar un escurrimiento, también provoca erosión.

De manera general, se ha visto que las lluvias de alta intensidad se presentan en corta duración y en áreas relativamente pequeñas, contrario a las lluvias de baja intensidad, que suelen ser de larga duración y abarcan áreas mayores.

La característica general que se puede describir con respecto a la duración, es que la duración de la lluvia determina la condición de equilibrio en el escurrimiento cuando existe una lluvia constante. Típicamente se ha demostrado que las cuencas pequeñas (menores a 50 km<sup>2</sup>) alcanzan condiciones de equilibrio en periodos de tiempo más cortos, en comparación con las cuencas medianas y grandes (> 50 km<sup>2</sup>) (FAO, 2000). Por lo anterior, en cuencas pequeñas se puede asumir que existe un escurrimiento constante, por lo que se puede obtener un valor del escurrimiento, por medio de modelos matemáticos.

Dentro del modelo *Flubidi*, se utiliza el factor de frecuencia como el promedio de tiempo en el que transcurren dos eventos de tormenta o precipitación, cuya característica principal es que, tienen la misma intensidad.

Como datos de entrada más comunes en los modelos matemáticos, para el diseño de las frecuencias de lluvia, se consideran periodos de retorno de 5 a 10 años para precipitaciones de baja intensidad y periodos de 50 a 100 años para precipitaciones de alta intensidad. Sin embargo, es de vital importancia conocer las características físicas de la cuenca, debido a que los periodos de retorno pueden variar, e incluso pueden existir periodos de retorno cuya incidencia sea mayor en el tiempo, y por lo tanto pueda ser más útiles para el modelado de la precipitación-escurrimiento de una cuenca. Una vez hecho el diseño de la Precipitación Máxima Probable (PMP), se integra al dato de entrada del modelo matemático.

## CAPÍTULO II.

La distribución temporal de la lluvia se presenta mediante un hidrograma, y es parte fundamental dentro de los datos del modelado matemático de la precipitación. Las distribuciones temporales típicas de la precipitación son dos: las uniformes, en las que se puede observar un hidrograma con un pico máximo de lluvia relativamente pequeño, sobre un tiempo base de precipitación relativamente largo, y la distribución heterogénea, que se verá en el hidrograma como una precipitación rápida, un pico máximo de lluvia grande, sobre un tiempo de base corto.

La elección correcta de la distribución temporal de la precipitación estará en función de las características físicas de la cuenca. Por ello, previo a la información de la precipitación, se debe contar con un panorama general del área, principalmente los datos de clima, debido a que es el componente que determina la cantidad de humedad y precipitación que se tendrá en un sitio, que bien puede ser de 1 a 3 días, o de forma más general por estación climatológica anual. La temporalidad será determinada por el trabajo que se pretende hacer, y si se requiere destacar entre las distintas intensidades de lluvia para un mismo sitio.

La distribución espacial guarda relación con los tipos de precipitación que se podrían generar en una cuenca. Si se tienen lluvias de tipo convectiva en cuencas grandes, es altamente probable que dicho aporte de lluvia no se vea reflejado en toda la cuenca, ya que las precipitaciones convectivas suelen ser más locales que regionales.

Por el contrario, si se tienen lluvias de tipo ciclónicas la distribución espacial será más homogénea y la lluvia alcanzará a cubrir toda la cuenca sin importar el tamaño que ésta guarde. Por último, las lluvias orográficas, representan una distribución más relacionada con las características del relieve, por lo que será la topografía la que marque los cambios en la distribución espacial de la precipitación.

Como dato de salida del modelo matemático se tiene al proceso del escurrimiento. Por ello, se pueden considerar dos componentes para el escurrimiento a incluir en las modelaciones matemáticas: el escurrimiento que existe dentro de la cuenca, y el escurrimiento que lleva un cauce o canal.

El primer escurrimiento se modela de forma tridimensional, es importante destacar que se considera que todos los escurrimientos dentro de la cuenca conforman un solo punto de salida. En el segundo escurrimiento, el flujo entra a una red de drenaje y se vuelve una corriente que circula por un cauce, esto lo vuelve unidimensional dentro de la modelación matemática, y es útil cuando se requiere conocer la velocidad con la que viaja el flujo en un cauce determinado.

Los datos obtenidos de ambos escurrimientos se pueden trabajar desde una aproximación de parámetros distribuidos o parámetros concentrados. Los parámetros distribuidos están basados en un hidrograma unitario, con datos de lluvia efectiva, mientras que los parámetros concentrados se basan en ecuaciones, que estiman el flujo terrestre.

Los resultados que se obtienen de los parámetros concentrados son más confiables; sin embargo, se requiere de una gran cantidad de variables físicas para su cálculo. Con respecto a los parámetros distribuidos, son sencillos de implementar; no obstante, suelen ser menos precisos y menos confiables que los parámetros concentrados.

Otra forma de modelar matemáticamente el flujo que circula por un cauce, es mediante la distinción de subcuencas y microcuencas, considerando los puntos de inicio (aguas arriba) y fin (aguas abajo), así como las contribuciones de cauces secundarios por cada sección. Con esto se genera una red de canal, mediante el cual, se construye el camino del agua por cada sección de la cuenca.

### **I.5. Características específicas de los datos**

La construcción de un modelo de cuenca sigue un patrón de construcción, que de forma general se establece de la siguiente forma:

1. Selección de un modelo matemático de simulación,
2. Sustento de datos y construcción del modelo,
3. Calibración y pruebas de las simulaciones, y
4. Aplicación de los resultados de la simulación.

La selección de un modelo matemático debe ante todo dar respuesta a los objetivos planteados. Muchos modelos matemáticos fueron diseñados para un fin en específico, o con la combinación de ecuaciones para características muy particulares de una cuenca. Por ello, se debe tener un marco de referencia del modelo, o bien, si los modelos existentes no cumplen con los requisitos de nuestros objetivos, se debe elaborar un nuevo modelo matemático con las especificaciones que requiera el trabajo.

Sin embargo, se debe considerar el tiempo requerido para la formulación de un nuevo modelo matemático. La gran mayoría de las veces, la construcción desde el modelo matemático suele ser compleja y requiere de una gran cantidad de tiempo para su formulación.

Los datos deben ser estudiados y obtenidos de forma particular. Asimismo, cada una de las partes deben integrarse de manera lógica al modelo matemático, además de ser consistentes en la metodología de su adquisición, y lo más importante, deben simular siempre las condiciones naturales del proceso hidrológico.

Las características de la precipitación, o cualquier forma en la que se presente la masa líquida, deben ser consideradas como el punto de partida para la generación del modelo matemático. Por lo general, las formas en la que se presentan los datos de entrada son mediante hidrogramas.

El siguiente punto a desarrollar concierne a las variaciones de la cantidad del agua en función del medio físico. La forma más común de obtener estos resultados, es mediante el método de número de curva.

Los datos de salida, obtenidos por las estimaciones del escurrimiento, dependen del área de la cuenca. Las cuencas pequeñas ( $< 25\text{km}^2$ ), requieren de un hidrograma con datos del orden de minutos, las cuencas medias ( $25\text{-}50\text{ km}^2$ ) deben manejarse con intervalos de datos del orden de horas. Las cuencas grandes ( $> 50\text{km}^2$ ) requieren que los datos estén dados en días o incluso años, dependiendo de la aplicación del modelo.

## CAPÍTULO II.

La construcción del modelo debe tener influencia del objetivo para el cual se plantea la simulación matemática, y principalmente, se debe construir con base en los datos estudiados, recolectados y estimados. Cuando se construye un modelo matemático y se tiene certidumbre de todos los datos necesarios para incluir en el modelo, hay un sólido sustento de los datos y por ende, el paso número dos, cubrió las expectativas del modelo matemático.

La calibración y las simulaciones son representadas mediante los parámetros distribuidos o bien, los parámetros concentrados. Los parámetros tienen contenidos en sí mismos, las cantidades físicas que se encuentran en la cuenca de estudio, es decir, las variables de la cuenca. Por esta razón, los parámetros reflejan el comportamiento hídrico y esto refleja una simulación del medio. Los parámetros concentrados son de tipo conceptual, en otras palabras, simulan procesos hidrológicos de forma simple y práctica.

Los parámetros distribuidos son de tipo empírico, calculados de forma directa, o medidos de indirectamente, o bien, basados en la experiencia. Es común que los modelos de cuenca tengan ambos parámetros en su estructura.

Toda simulación debe ir acompañada de una concordancia entre los flujos simulados y los registrados en la cuenca, dicho de otra forma, deben ser datos calibrados. La concordancia es identificada de forma manual, por prueba y error hasta tener cierto grado de similitud en los datos, o bien, de forma automatizada con técnicas de optimización matemática.

Se debe tener mayor precaución con las calibraciones de los parámetros concentrados, debido a que estos, no se representan datos observados en campo, sino resultados obtenidos por pruebas de laboratorio. Con los parámetros distribuidos, es menor el rigor de la calibración de datos, por su naturaleza predictiva.

Finalmente, los datos obtenidos de las simulaciones deben llevar a un objetivo práctico, dado que la naturaleza de la construcción de modelos matemáticos tiene como fin su aplicación en áreas como la ingeniería hidráulica, los estudios hidrológicos y ambientales.

### **CAPÍTULO III.**

#### **CARACTERÍSTICAS DEL DISTRITO MINERO SAN ANTONIO - EL TRIUNFO**

En el segundo capítulo se revisó el marco conceptual de los flujos superficiales. Además, se presentaron los materiales y métodos que se necesitan para obtener los datos de las variables que integran un modelo de simulación matemática para el escurrimiento. El segundo capítulo tuvo la finalidad de conocer el potencial que tiene el agente hídrico para dispersar las partículas que provienen de los residuos mineros y con ello movilizar a los EPT, particularmente al As.

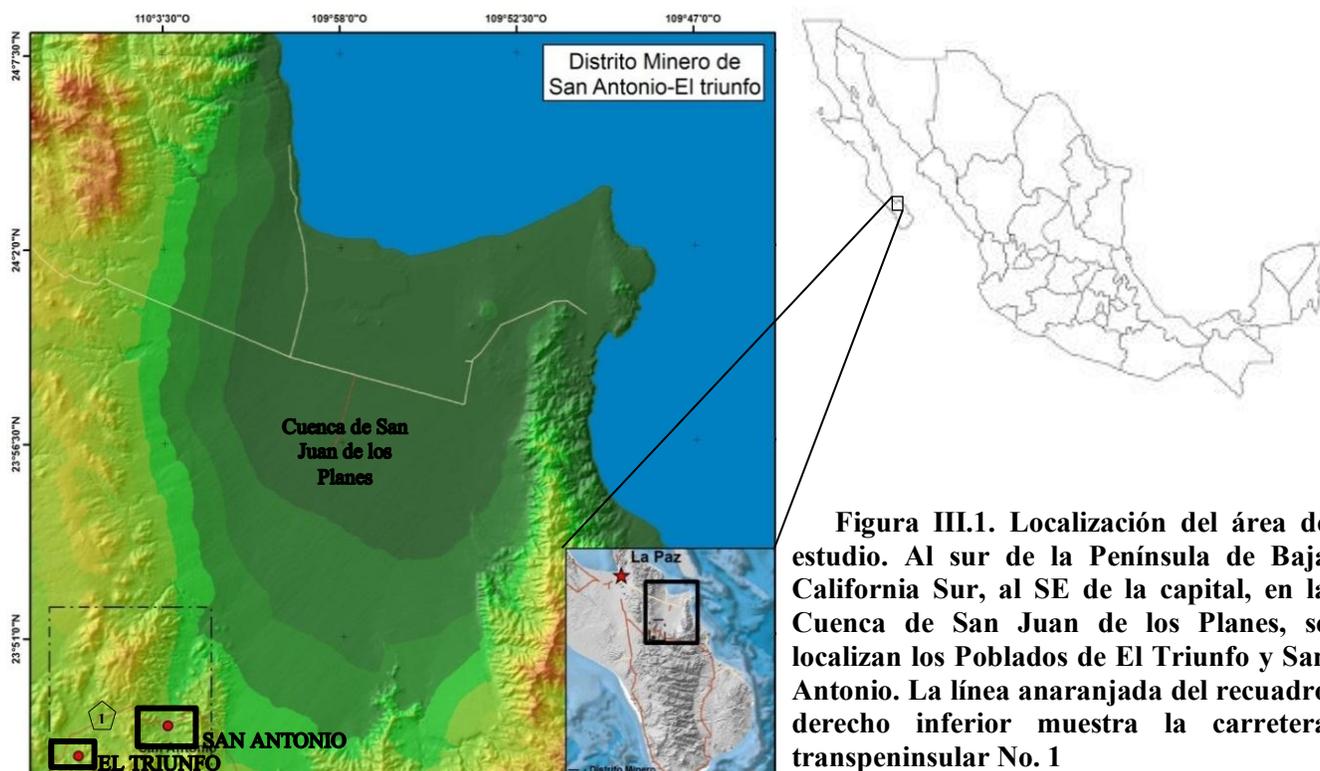
El presente capítulo, se aplica un marco de referencia del Distrito Minero de San Antonio – El Triunfo. De forma general se conocen las características físico-geográficas y meteorológicas de la zona. Las características físicas del lugar son esenciales para que la simulación matemática pueda generar datos acerca de la dispersión hídrica de As.

Posteriormente, se trabaja con la información acerca de los residuos mineros. Los estudios previos permiten definir, clasificar y revisar las concentraciones de As que poseen los residuos mineros. Una vez definidos y clasificados; por medio de la técnica de percepción remota, se identifica la firma espectral que poseen los minerales, para que se pueda diseñar una cartografía de la dispersión de los mismos.

#### **III.1. Características físicas.**

Los poblados que integran al distrito Minero son: San Antonio y El Triunfo, ambos se localizan entre las coordenadas geográficas 23° 48' 13" de latitud Norte y los 10° 57'00" de longitud Oeste. El Triunfo se ubica a una altitud de 515 msnm. El poblado de San Antonio a una distancia de 5.3 kilómetros al NE de El Triunfo, está a una altitud de 435 msnm SGM, 2000 (Fig. III.1).

Las vías de comunicación son excelentes para la exportación de minerales, ya que el distrito minero tiene comunicación con el puerto de La Paz. Entre los poblados de San Antonio y El Triunfo, al NE, la carretera Transpeninsular No.1. Una tercer vialidad, es la que se presenta al SE, la cual atraviesa el poblado de San Antonio y su destino final es el puerto de San José del Cabo.



De acuerdo con el Servicio Geológico de México (1922), la fisiografía que se encuentra en el Distrito Minero forma parte de una pequeña zona montañosa de la Sierra Oriental. Entre las montañas se forman dos valles en los que afloran los yacimientos minerales. En ambos valles están asentados los poblados de San Antonio y El Triunfo.

En el valle El Triunfo es en su gran mayoría un relieve accidentado, dejando una zona mínima de valle con una apertura al SW. Tiene elevaciones que van desde los 600 hasta los 800 msnm. De igual forma, las elevaciones que circundan la zona son elevaciones que no superan los 1000 msnm. En cuanto a las características geológicas, predominan las rocas plutónicas intrusivas. Las rocas y en general, el relieve, presenta un alto grado de alteración y desintegración de roca, el sistema de drenaje está bien desarrollado, por lo que es común ver una gran cantidad de arroyos en el valle, uniéndose pendiente abajo a el arroyo El Triunfo, cauce de mayor importancia por las dimensiones que alcanza (Salazar, 1922).

El valle de San Antonio, está abierto en su porción N, colinda al E por la sierrita de San Antonio, y cerros cuyas alturas no superan los 800 msnm. Entre los valles de San Antonio y El Triunfo,

### CAPITULO III.

se localiza la Sierrita Anterior. Se presenta algunas elevaciones dentro del valle; sin embargo, estos no tienen altitudes más allá de los 400 msnm. Por lo que concierne a la geología del lugar, existen rocas intrusivas, y sitios donde predominan las rocas sedimentarias poco cohesivas, en la parte inferior del valle (Salazar, 1922).

Las rocas que circundan a los valles de San Antonio y El Triunfo se encuentran: depósitos sedimentarios de arrastre de material que conforman a los aluviones. El material acarreado puede provenir de los detritos sueltos, acumulaciones de material con cierto grado de consolidación como los depósitos de brechas y los productos de alteración y desintegración de rocas circundantes que por lo general llegan a los cauces de los arroyos (Pastor, 1922).

Entre las rocas ígneas se pueden encontrar además de las plutónicas, las intrusivas como la diorita y andesita; granito; gabro y peridotita. Las más abundantes en la zona son las metamórficas del tipo gneis, y esquistos cristalinos y en menor medida la caliza cristalina (Fig. III.2) (Pastor, 1922).

Los arroyos principales que se unen directamente al arroyo el Triunfo son: al norte La Pizoseña, La Fortuna, La soledad; al este se localizan los arroyos, La Joya, La Puerta Azul y Troncones de Palma; al oeste, el arroyo Portezuelo y arroyos de menor importancia por su dimensión. El arroyo El Triunfo desemboca al NW del valle y se une en la porción más plana de la cuenca San Juan de los Planes, al arroyo El Carrizal.

En cuanto a la red fluvial, en el valle de San Antonio se localizan una gran cantidad de arroyos con un sistema de drenaje bien desarrollado que corre de norte a sur; el arroyo de mayor dimensión tiene el nombre de San Antonio, este desemboca en la Bahía La Ventana, en el Golfo de California. Los afluentes secundarios que se unen al arroyo San Antonio son: al este, arroyo La Campana; al oeste Picacho, La Trinidad y la Valenciana; y fuera del valle de San Antonio se unen Tecuán y Palo Verde (Fig. III.3) (Instituto Geológico de México, 1922).

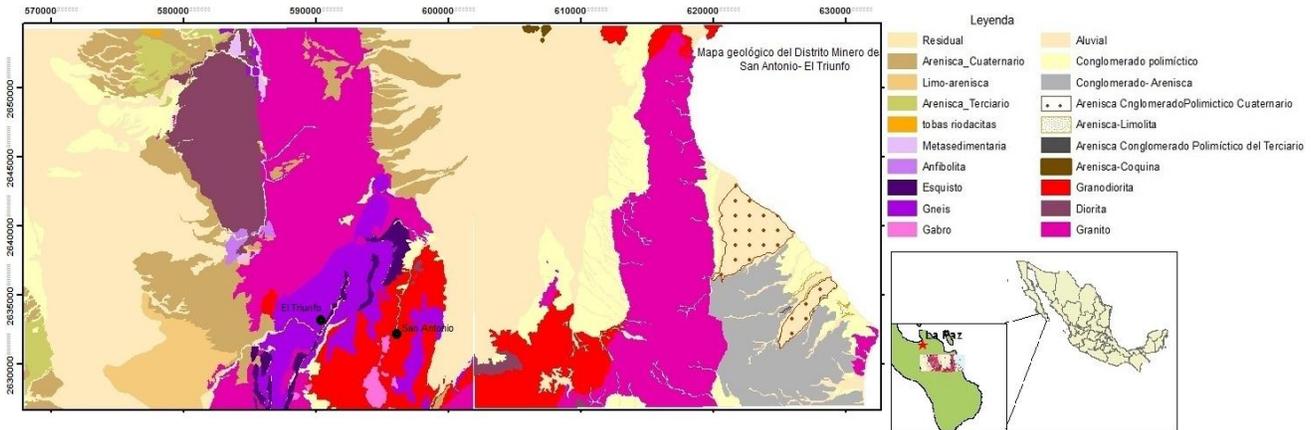


Figura III.2. Mapa geológico de las cartas geológico-mineras F12B13 y F12B14 del Servicio Geológico Mexicano, escala 1:50 000 (SGM, 1996).

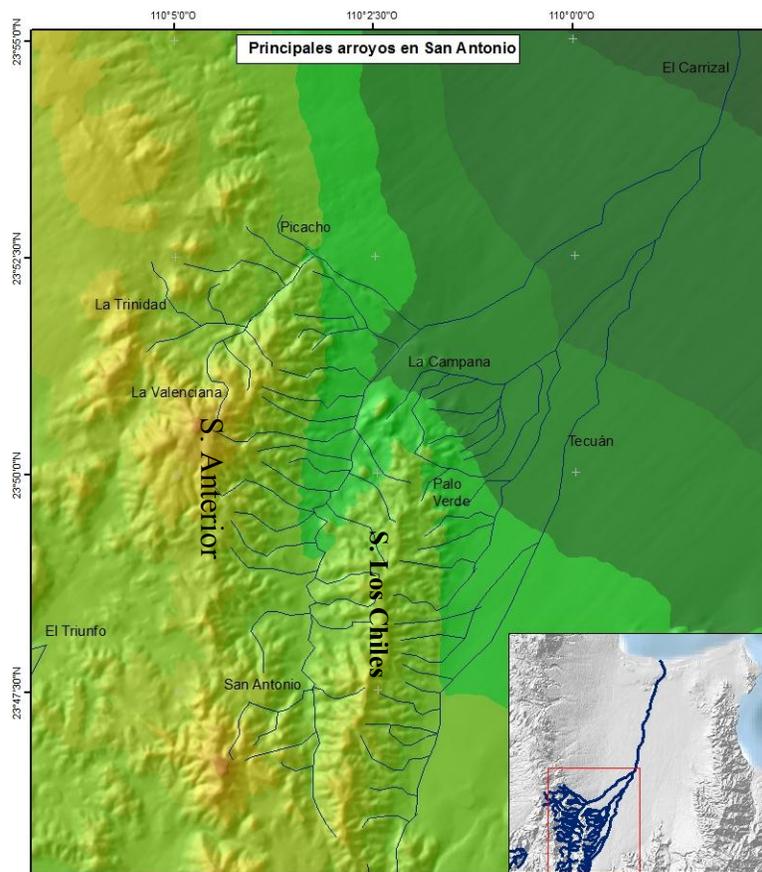


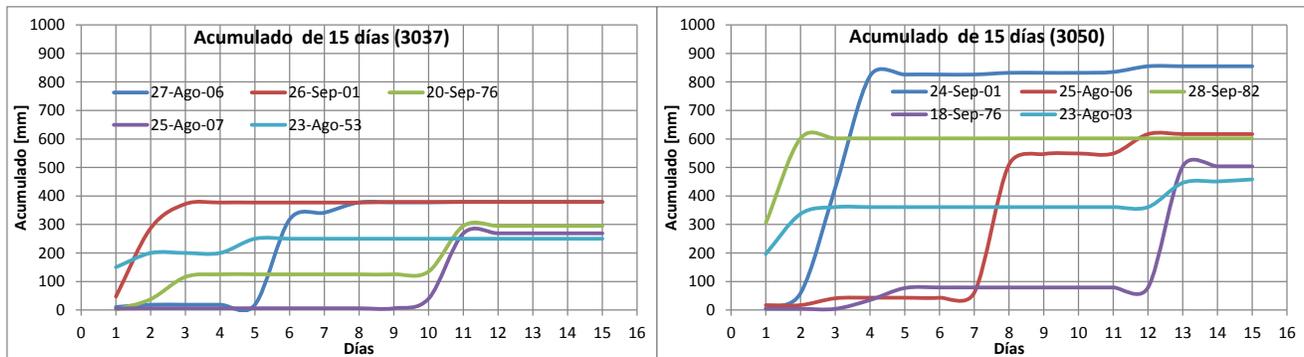
Figura III.3. Mapa hídrico de la cuenca de San Juan de los planes. El arroyo principal es el San Antonio localizado entre la Sierra Anterior y Sierra Los Chiles, en la porción baja de la cuenca cambia su nombre a arroyo El Carrizal (Instituto Geológico de México, 1992)

### III.2. Características meteorológicas

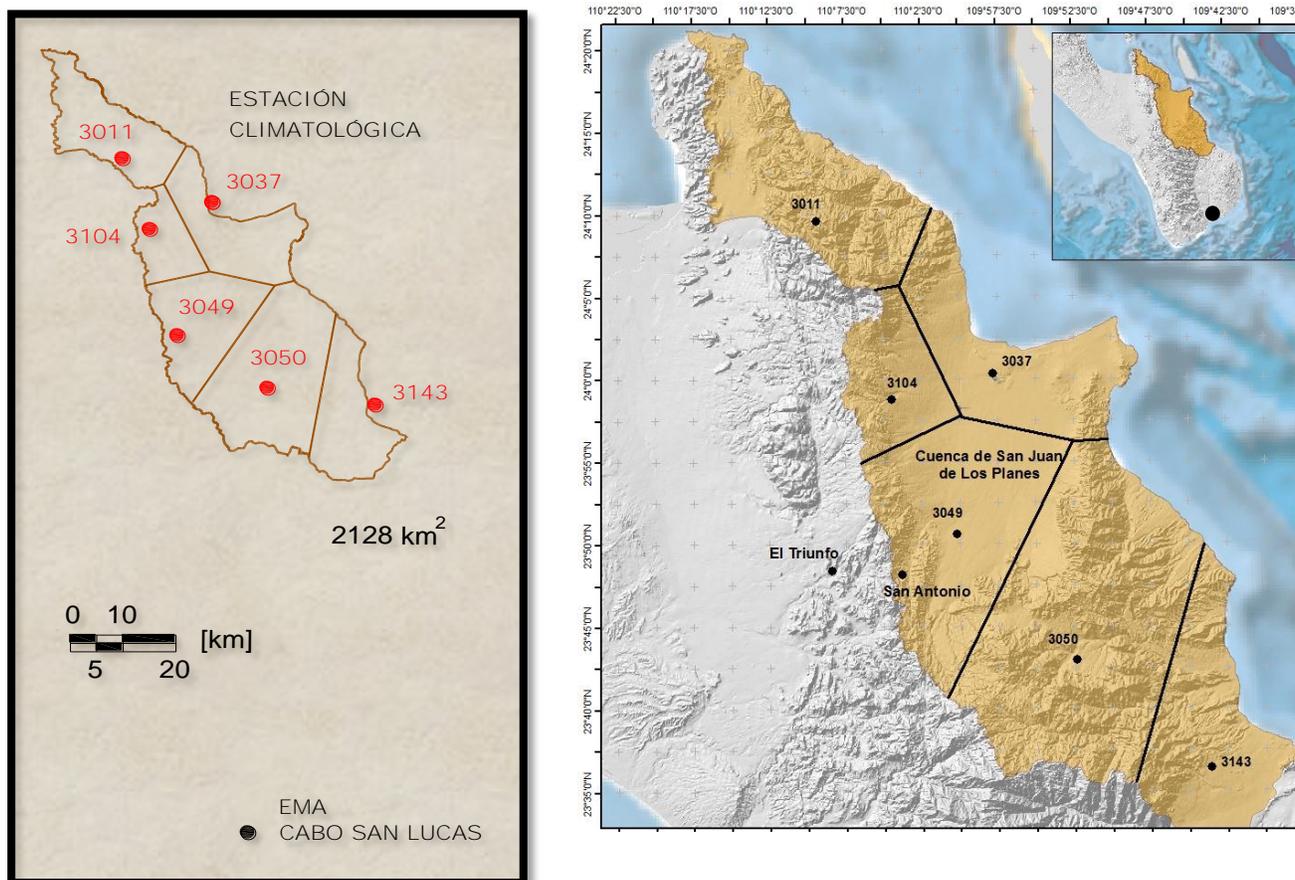
El patrón de las precipitaciones que se presentan en la región de estudio; se obtiene a partir del análisis de los datos de lluvia diaria, particularmente aquellas cuyos registros son más amplios, pues de esta manera es posible tomar en cuenta la simultaneidad de eventos extremos en las diferentes localidades de la región y de mediciones automáticas registradas por estaciones ubicadas dentro o cerca de la Cuenca de San Juan de Los Planes (Fig. III.4)

De los registros del Clima Computarizado del Servicio Meteorológico Nacional (CLICOM) y el registro de la Estación Meteorológica Automática (EMA) Cabo San Lucas se obtuvo la distribución temporal de las precipitaciones diarias. Con los registros de lluvia diaria se estima la duración del periodo dentro del cual es común la ocurrencia de precipitaciones consecutivas o trenes de tormenta más importantes en la región.

La lámina de precipitación máxima se presenta en el día 15, es decir, en el área de estudio hay hasta 15 días consecutivos de lluvia anual, posterior a esa temporalidad, no hay un aumento significativo en la lámina máxima acumulada (Fig. III.5). Sin embargo, el promedio de lámina máxima de lluvia se alcanza en el día cinco.



**Figura III.4. Lluvia diaria máxima acumulada en cinco días consecutivos para las estaciones meteorológicas que no tuvieron un valor significativo de láminas máximas en 15 días.**



ESTACIÓN	NOMBRE	LAT	LON	REGISTRO
3011	EL CAJONCITO, LA PAZ	24°9'	110°9'	1964-2007
3037	LOS PLANES, SAN ANTONIO	24°4'	109°59'	1952-2007
3049	SAN ANTONIO, SAN ANTONIO	23°49'	110°3'	1938-2007
3050	SAN BARTOLO, SAN ANTONIO	23°43'	109°53'	1941-2007
3104	LOS ROBLES, LA PAZ	24°1'	110°6'	1977-2007
3143	LAS PALMAS, LA PAZ	23°41'	109°41'	1978-2007
EMA BCS	CABO SAN LUCAS	22°52'	109°55'	2000-2012

**Figura III.5. Ubicación de estaciones con registros de precipitación y sus correspondientes polígonos de Thiessen, (Tomado de Servicio Meteorológico Nacional, 2013).**

La lámina de máxima precipitación alcanzada al quinto día de lluvia consecutiva se ajusta una función de distribución de probabilidad por medio del programa Ax del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 1997). Con ello se obtienen las láminas de lluvia acumulada por trenes de

tormenta para  $n$  días consecutivos, siendo  $n = 1, 2, \dots, 5$ , para los periodos de retorno ( $Tr$ ) de 2, 5, 10, 20, 50, 100 y 200 años, los que aparecen en la Tabla 12.

Tabla 12. Láminas de lluvia acumulada en cinco días consecutivos de la estación climatológica 3050, en mm.

Tr	Número de días consecutivos de lluvia				
	1	2	3	4	5
2	62.65	78.72	85.33	87.60	89.90
5	143.17	153.61	164.80	167.18	169.97
10	279.94	333.11	341.92	343.10	347.44
20	355.04	458.31	472.20	473.80	480.72
50	440.83	601.35	621.10	623.19	633.01
100	502.27	703.83	727.83	730.22	742.19
200	562.65	804.35	832.37	835.31	849.14

La tabla 12 nos muestra las láminas de lluvia diaria. El primer valor corresponde al del día 1 se considera  $n=1$ . Los valores siguientes se obtienen al restar las láminas acumuladas en  $n$  y  $n-1$  días consecutivos, donde  $n=2,3,\dots,5$ . Por ejemplo, para el periodo de retorno de 200 años de la estación 3050, el primer valor fue  $h_1=562.65$  mm; las láminas de lluvia acumulada de 2 y 1 día son  $h_2=804.35$  mm y  $h_1=562.65$  mm, y la diferencia,  $h_{2-1}=h_2-h_1$ , es igual a 241.7 mm. Las láminas de lluvia acumulada de tres y dos días son  $h_3=832.37$  y  $h_2=804.35$  mm, la diferencia,  $h_{3-2}$ , es igual a 28.02 mm, y así sucesivamente hasta restar las láminas de los días 5 y 4. De este modo se encontraron los valores que aparecen en la segunda columna de la Tabla 13.

Tabla 13. Láminas de un día de lluvia para un periodo de retorno de 200 años (Estación 3050)

Lámina	h [mm]	n
$h_1$	562.65	1
$h_{2-1}$	241.70	2
$h_{3-2}$	28.02	3
$h_{4-3}$	2.94	4
$h_{5-4}$	13.83	5

CAPITULO III.

De la estación automática Cabo San Lucas se obtuvieron los datos de lluvias históricas importantes durante cinco días consecutivos, ya que en este periodo se tiene el registro de máxima intensidad de lluvia de 1 hora y 24 horas. Con el registro de la Estación automática se sabe que la lluvia histórica se desarrolló en septiembre del año 2003. Si los datos de los cinco días consecutivos de lluvia son graficados se observa que el tercer día es el día con la máxima cantidad de lluvia precipitada (Fig. III.5).

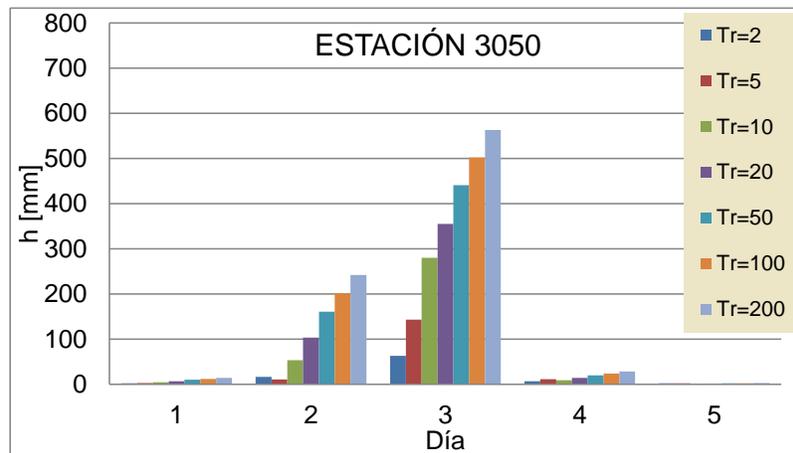


Figura III.5. Hietogramas de la E.C. 3050 para diferentes periodos de retorno

De la misma manera, se definieron los hietogramas relativos a las estaciones climatológicas referidas en la figura III.4. El acomodo de las precipitaciones del tren de lluvias de cinco días para dichas estaciones es el mismo que se considera en la E.C. 3050, porque el evento registrado en el año 2003 tuvo un efecto de acumulación de lluvia en otras regiones de la cuenca en estudio (Figs. III.6 a III.10).

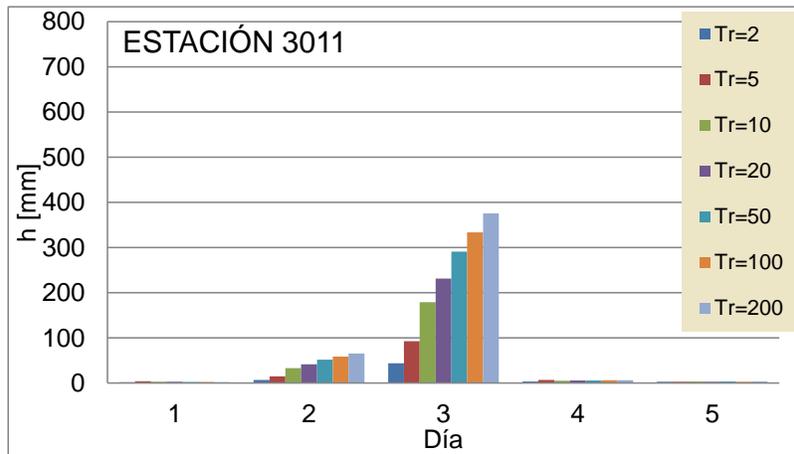


Figura III.6. Hietogramas de la E.C. 3011, para diferentes periodos de retorno

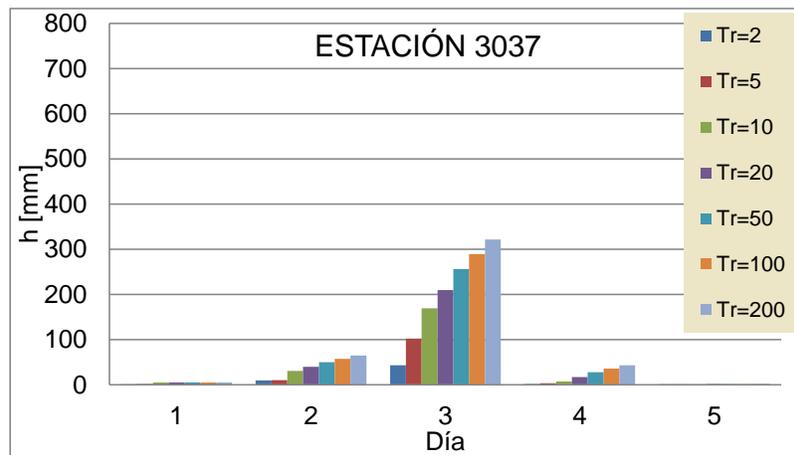


Figura III.7. Hietogramas de la E.C. 3037, para diferentes periodos de retorno

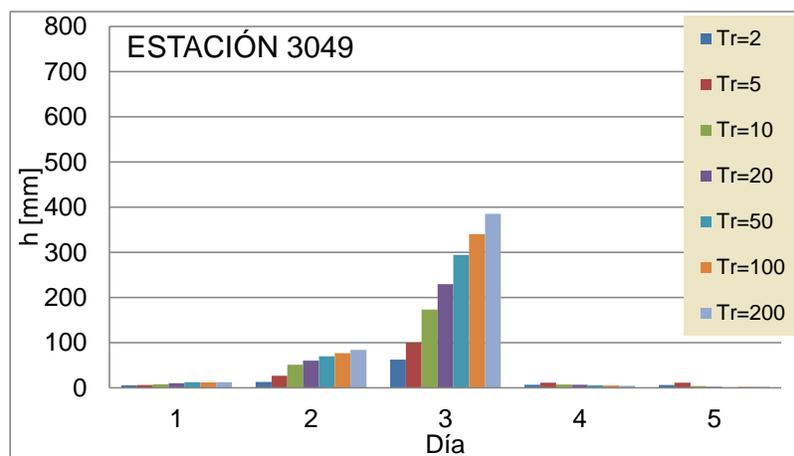


Figura III.8. Hietogramas de la E.C. 3049, para diferentes periodos de retorno

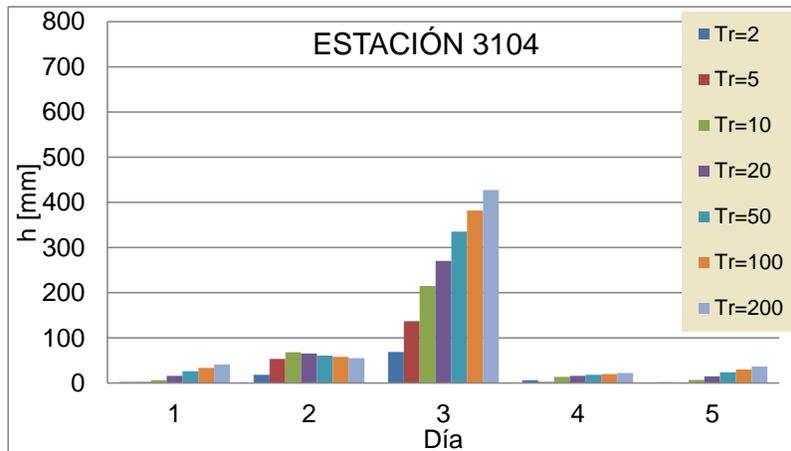


Figura III.9. Hietogramas de la E.C. 3104, para diferentes periodos de retorno

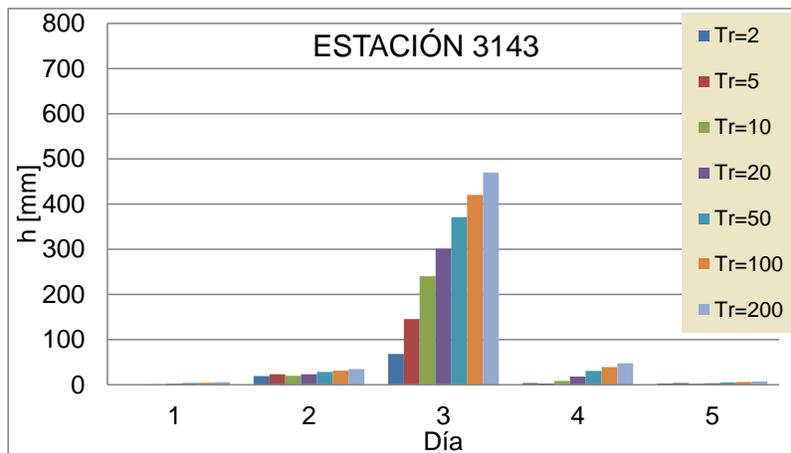


Figura III.10. Hietogramas de la E.C. 3143, para diferentes periodos de retorno

Cada barra de las gráficas de trenes de tormenta de 5 días calculados, corresponde a la lluvia precipitada en un periodo de 24 horas continuas. Sin embargo, en la zona de estudio se ha observado que la duración de las lluvias más intensas es menor, y por ello se procedió a estimar la variación de la lluvia acumulada durante un día, en un intervalo menor.

Se realizó el análisis de la precipitación registrada en intervalos, por la estación meteorológica automática Cabo San Lucas. Se observó que la lluvia más intensa de 1 hora y 24 horas continuas se presentó el 22 de septiembre del 2003 (Fig.III.11).

En la Tabla 17 se muestra la acumulación de lluvia en intervalos de horas en la fecha indicada, así como los porcentajes que dicha acumulación representa respecto a las 24 horas. Se obtiene que la

### CAPITULO III.

intensidad de lluvia máxima es de 92.7 mm/h, y representa el 64.3% de la lluvia de 24 horas; el 88.8% de la lluvia de 24 horas se precipitó aproximadamente después de 8 horas de iniciado el evento, y el 100% de la lluvia registrada en 24 horas (144.16 mm) se acumuló en 20 horas.

De igual manera, la Tabla 17 muestra la distribución de la lluvia de 24 horas propuesta por Chen (1983) y que representa la comparación con los datos de la literatura. De forma particular, Chen estima los coeficientes correspondientes a una precipitación en la cual el 60% de la lluvia de un día se concentra en la hora de mayor intensidad (factor de comportamiento K igual 0.6). Bajo este criterio, durante las 8 horas de lluvia más intensa se precipita el 89.4% del total de la lluvia de un día.

El porcentaje faltante (10.6%) corresponde a la lámina de precipitación que se presentó antes o después de las 8 horas de mayor intensidad. De esta manera, se verificó una semejanza entre ambas distribuciones temporales de la lluvia de 24 horas.

El acomodo es tal, que los intervalos con mayor intensidad de precipitación ocurren en la parte central de la distribución. Este acomodo de las barras del hietograma corresponde con el orden propuesto en el procedimiento del bloque alterno (Chow, 1994).

El último análisis de la lluvia es el de la precipitación efectiva o lluvia en exceso que produce un escurrimiento superficial, se realiza utilizando el método del número de curva, propuesto por el Soil Conservation Service (S.C.S.) de los Estados Unidos de América (Chow, 1994).

CAPITULO III.

Tabla 14. Variación de lluvia registrada (EMA Cabo San Lucas) y distribución propuesta por Chen (factor de comportamiento K igual 0.6)

Horas	mm acumulados	Fracción c/r 24 hrs	Fracción c/r 24 hrs (Chen)
0.17	26.67	0.185	0.282
0.33	49.78	0.345	
0.50	64.26	0.446	0.480
0.67	76.45	0.530	
0.83	87.37	0.606	
1	92.70	0.643	0.600
2	114.54	0.795	0.708
3	121.39	0.842	
4	123.68	0.858	0.804
5	125.70	0.872	
6	126.71	0.879	0.858
7	127.71	0.886	
8	127.96	0.888	0.894
9	138.88	0.963	
10	139.63	0.969	
11	139.88	0.970	
12	141.15	0.979	
13	141.65	0.983	
14	142.66	0.990	
15	143.16	0.993	
16	143.66	0.997	
17	143.91	0.998	
18	143.91	0.998	
19	143.91	0.998	
20	144.16	1.000	
21	144.16	1.000	
22	144.16	1.000	
23	144.16	1.000	
24	144.16	1.000	

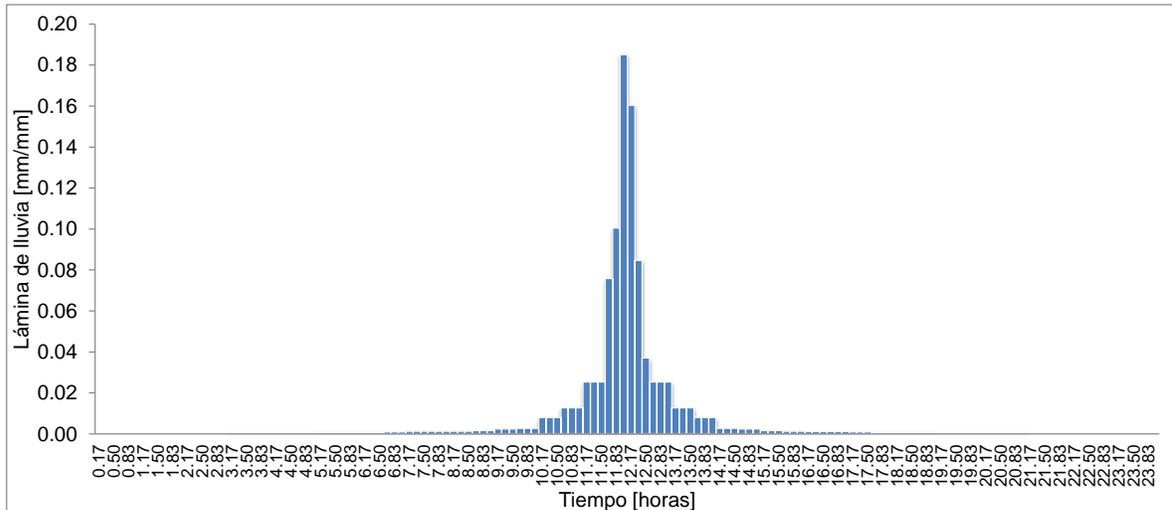


Figura III.11. Distribución de la lluvia de 24 horas en intervalos de 10 minutos

Se han reportado los datos del comportamiento de la precipitación total en el distrito minero. Sin embargo, la simulación matemática utiliza los datos de escurrimiento o la precipitación efectiva para poder conocer el volumen de flujo que circula por los arroyos principales de la cuenca.

A partir de la precipitación total, se descuenta la lámina de lluvia que se pierde por infiltración, evapotranspiración, intercepción y almacenamiento superficial. Se requiere definir el número adimensional de curva N, tomando en cuenta el uso de suelo, tratamiento del terreno, pendiente y tipo de suelo (desde arenoso hasta arcilloso). El número N varía entre 0 y 100, donde N igual a 100 es representativo de superficies impermeables o de agua, y con valores menores las superficies naturales. En la Figura III.12 se presenta la distribución de los números de curva sobre la superficie de la cuenca de estudio.

Para los cálculos de precipitación efectiva por tormentas continuas se considera un valor medio del número de curva, correspondiente a la superficie interna de los polígonos de Thiessen mostrados en la Figura IV.4. Estos polígonos se construyeron con la intención de definir regiones donde las precipitaciones registradas por las estaciones climatológicas tienen una influencia que permita considerar su distribución uniforme sobre dichas superficies. En el polígono correspondiente a la estación 3050, se consideró que N=64.92.

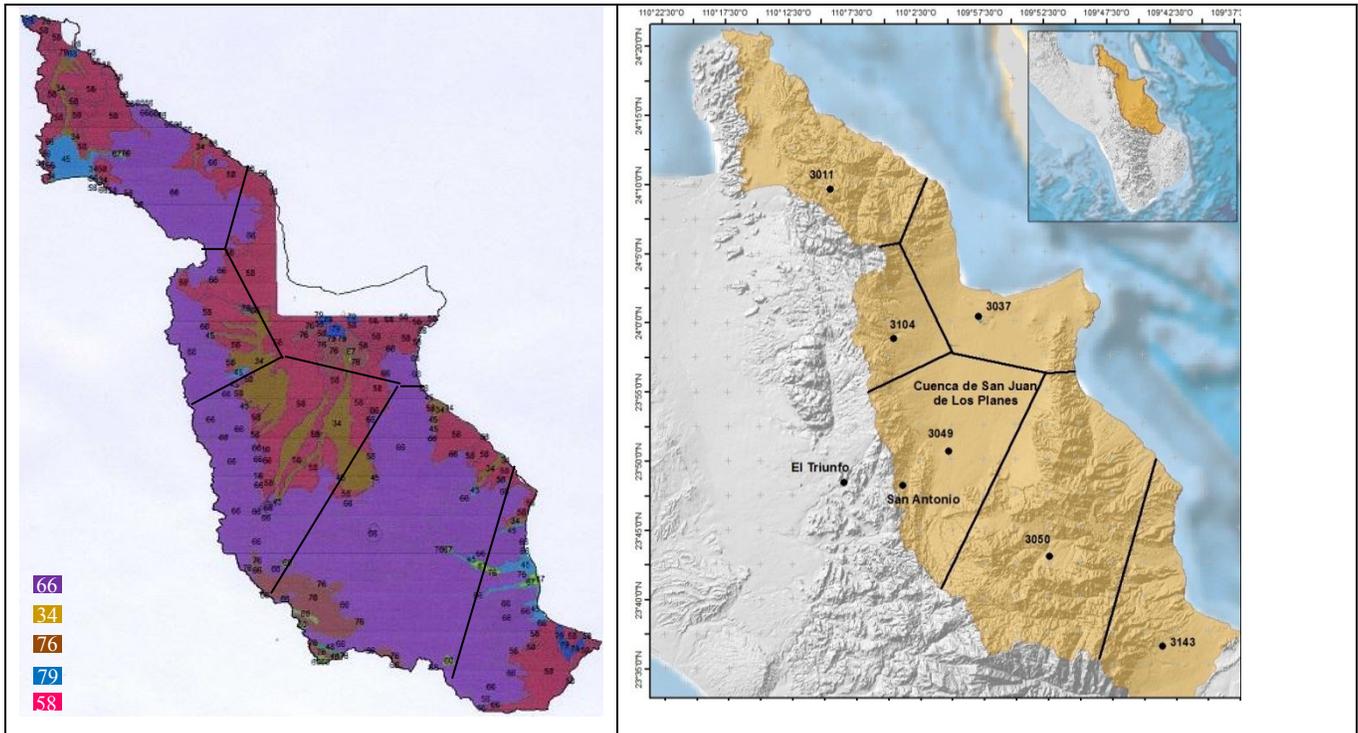


Figura III.12. Distribución de los números de escurrimiento sobre la superficie de estudio

A manera de ejemplo, en la Tabla 18 se consignan las láminas de 5 días de precipitación total y efectiva, con periodo de retorno de 200 años para la E.C. 3050. Se observa que la lluvia efectiva ocurre solamente durante los días 2, 3 y 4 del tren de precipitaciones totales de 5 días calculado (Tabla 18).

La Figura III.13 representa la distribución temporal de la lluvia efectiva, a intervalos de 10 minutos, para el evento de 200 años de periodo de retorno. Se muestran únicamente las lluvias del segundo y tercer día, debido a que la lámina del cuarto día de lluvia es muy pequeña (0.25 mm en 24 horas).

Tabla 15. Datos de la lluvia total y efectiva con periodo de retorno de 200 años, en mm (estación 3050)

Día	1	2	3	4	5
Total	13.83	241.70	562.65	28.02	2.94
Efectiva	0	147.32	478.54	0.25	0

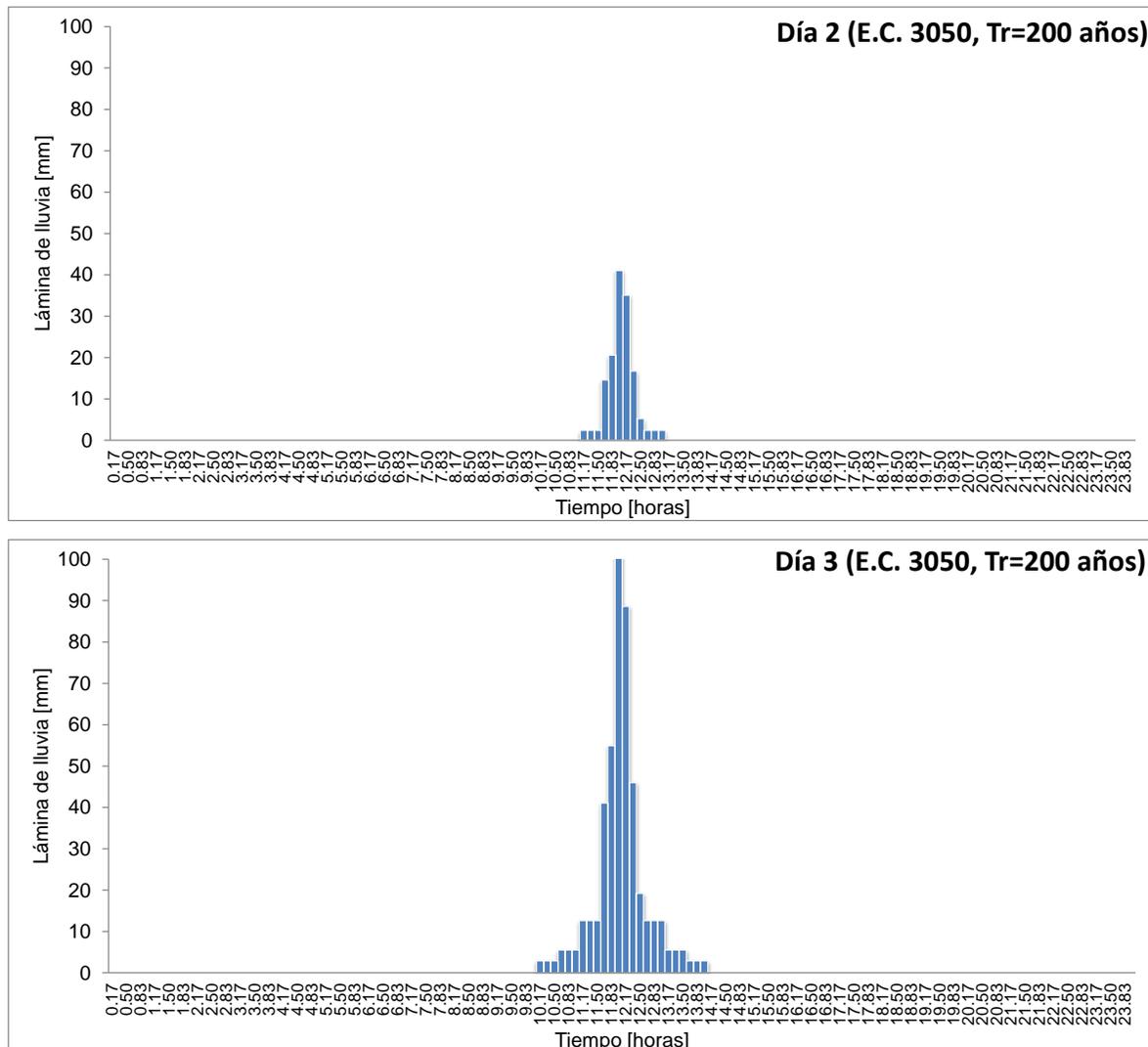


Figura III.13. Distribución temporal de la lluvia efectiva de un tren de precipitaciones de 5 días, con periodo de retorno de 200 años, para la estación 3050.

### III.3. Características de los residuos mineros

El distrito minero abarca un área aproximada de 49 km teniendo como límite los Poblados de San Antonio y El Triunfo. Los residuos mineros se encuentran cercanos a la Sierra Los Chiles, para el caso de San Antonio y para el caso del poblado de El Triunfo, se encuentran en las inmediaciones del poblado (Fig. III.14).

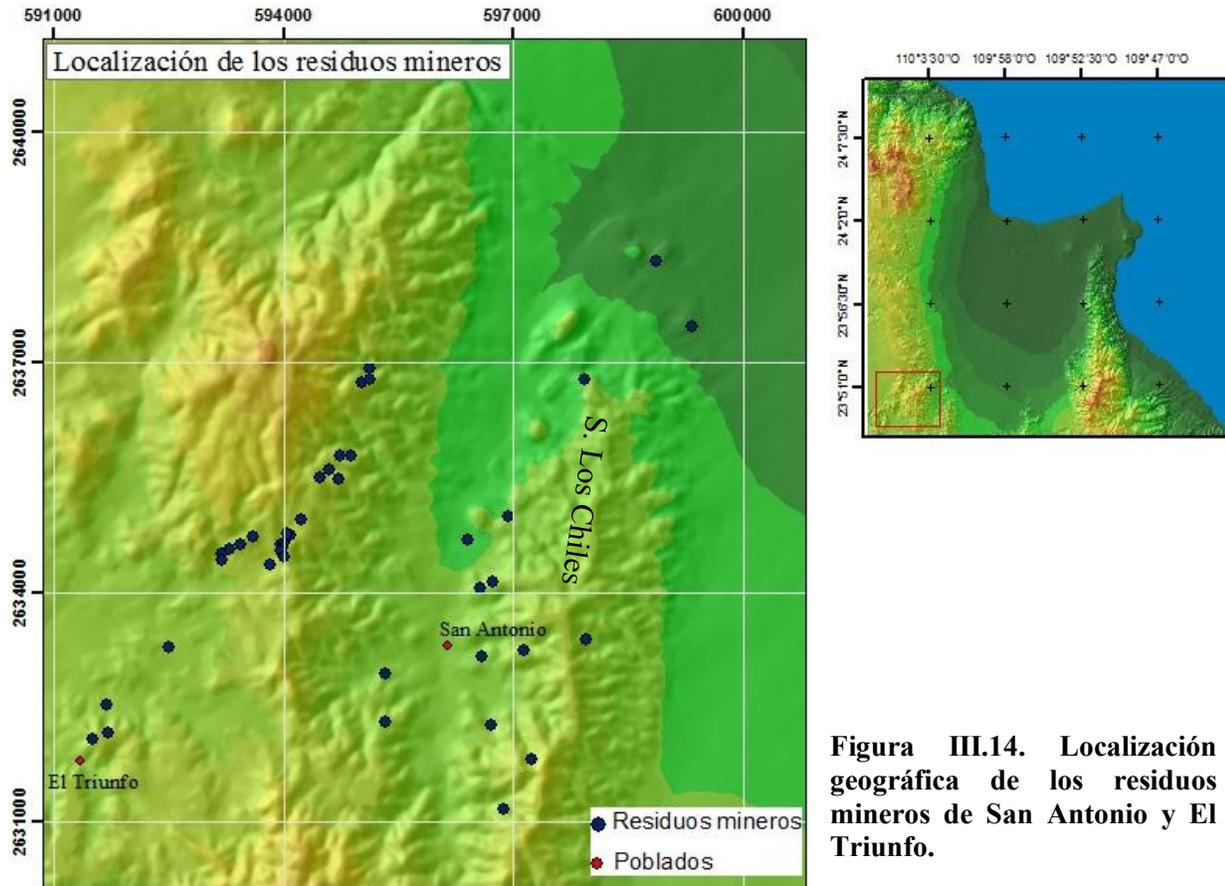


Figura III.14. Localización geográfica de los residuos mineros de San Antonio y El Triunfo.

La actividad minera del área de estudio comienza a principios del año 1700, y son los jesuitas quienes denominan el centro de explotación minera como, Real de San Antonio. Las minas fueron trabajadas hasta la mitad del siglo XVIII, siendo el oro y la plata los principales yacimientos minerales. En el poblado, El Triunfo, de forma artesanal se abrieron dos zonas mineras (San Nicolás y San Pedro). Sin embargo, la riqueza de filones metalíferos siempre destacó en el área de San Antonio (Instituto Geológico de México, 1922).

### CAPITULO III.

Después de casi cien años de inactividad minera, a principios del siglo XX hubo una nueva exploración en toda la península, y los resultados de dicha exploración, mostraron el alto potencial que presenta la zona de San Antonio. Con un total de 1,396 hectáreas, la conformación del Distrito Minero de San Antonio-El Triunfo, tuvo otro periodo de actividad minera de por lo menos 25 años más, teniendo inversión de capital extranjero y nacional (Instituto Geológico de México, 1922).

A finales del siglo XX del área de El Triunfo se extraían alrededor de 50 a 60 toneladas diarias de mineral mediante un sistema de cianuración y lixiviación combinado, útil para minerales sulfurosos. En San Antonio, aproximadamente de 200 hectáreas, se extraían de 15 a 20 toneladas de mineral, mediante el sistema de cianuración por percolación (Anales de Ministerio de Fomento, 1887 en Instituto Geológico de México, 1922).

Durante el siglo XXI no se tiene actividad minera activa y sólo quedan, en su gran mayoría, terreros con fragmentos de las mineralizaciones trituradas que se han depositado como material de ganga. De acuerdo con los datos reportados por el Grupo Minera Pitalla (2011), para el periodo 1879-1912, se dio el mayor auge en los trabajos de explotación minera, (anualmente se extrajo cerca de 8,000 onzas de oro) aunado a la riqueza mineral extraída se tiene también para el mismo periodo la mayor cantidad de depósitos de terreros en la región.

Existen algunos sitios que debido a los métodos de cianuración y lixiviación combinado que se utilizaron en los trabajos de beneficio, pueden presentar características de jales, escombreras o lodos (Gálvez, 1922). Incluso, se tiene documentado que en el período de 1911 a 1914 la Compañía Metalúrgica de Baja California, S.A. de C.V. trabajó con el mineral procedente de los terreros oxidados y jales del Poblado de El Triunfo en la hacienda Columbinas (Instituto Geológico de México, 1922).

En 1950, se instaló infraestructura para la separación y beneficio del plomo. Una planta de medio pesado, una planta de flotación; un horno de calcinación y uno más de fundición trataron terreros principalmente del poblado de El Triunfo para la elaboración de barras de plomo (Minera Pitalla, 2011)

### CAPITULO III.

Datos más recientes en el trabajo de Magdaleno (2014) reporta la existencia de terreros en al menos un 86% del muestreo que realizó, 11% de sitios con residuos son de tipo escorias y tan sólo 3% del material residual pertenece al tipo de jal. En la mineralogía de los residuos mineros predomina el cuarzo  $\text{SiO}_2$ , Jarosita  $[\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6]$  y filosilicatos.

En cuanto a las concentraciones de EPT, específicamente concentraciones de As, en 1997 Carrillo & Drever, reportan que en la zona existen un total de 800 000 toneladas de residuos con cerca del 4% de óxido de As y aproximadamente 600 000 toneladas de arsenolita.

En el reporte del Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental, (2003) las concentraciones de As para jales y cenizas llegan a ser de aproximadamente 34 500 mg/kg, incluso, en dicho trabajo reportan altas concentraciones de As en sedimentos cuyos valores deberían estar entre los 100-114 mg/kg (valores naturales de As para la zona). Es importante destacar que además de las concentraciones de As, en el reporte, destacan la presencia de As en las partículas cuyas granulometrías son  $< 35\mu\text{m}$ .

El trabajo de Magdaleno (2014) para la concentración de As, registró concentraciones entre 415, 130 – 480, 093 mg/kg de As para el muestreo que realizó en cenizas. Las concentraciones de As en terreros y jales oscilan entre 3,366 – 96, 829 mg/kg. El límite máximo permisible para As, de acuerdo a la NOM-157-SEMARNAT-2009, es de 100 mg/kg (DOF, 2009).

El trabajo de Espino (2014), generó un muestreo de posibles zonas afectadas con la dispersión del As proveniente de los residuos mineros. Sus resultados muestran que en sedimentos y suelos cercanos a los residuos mineros tienen concentraciones de As desde las no detectadas, hasta 3, 790 mg/kg.

#### **III.4. Identificación mineralógica por medio de Percepción Remota**

Con los antecedentes del área de estudio, se identificaron las firmas espectrales de los minerales característicos de los terreros y jales en el área de estudio, con el objetivo de identificar otros sitios con residuos mineros no identificados en estudios previos dentro del área.

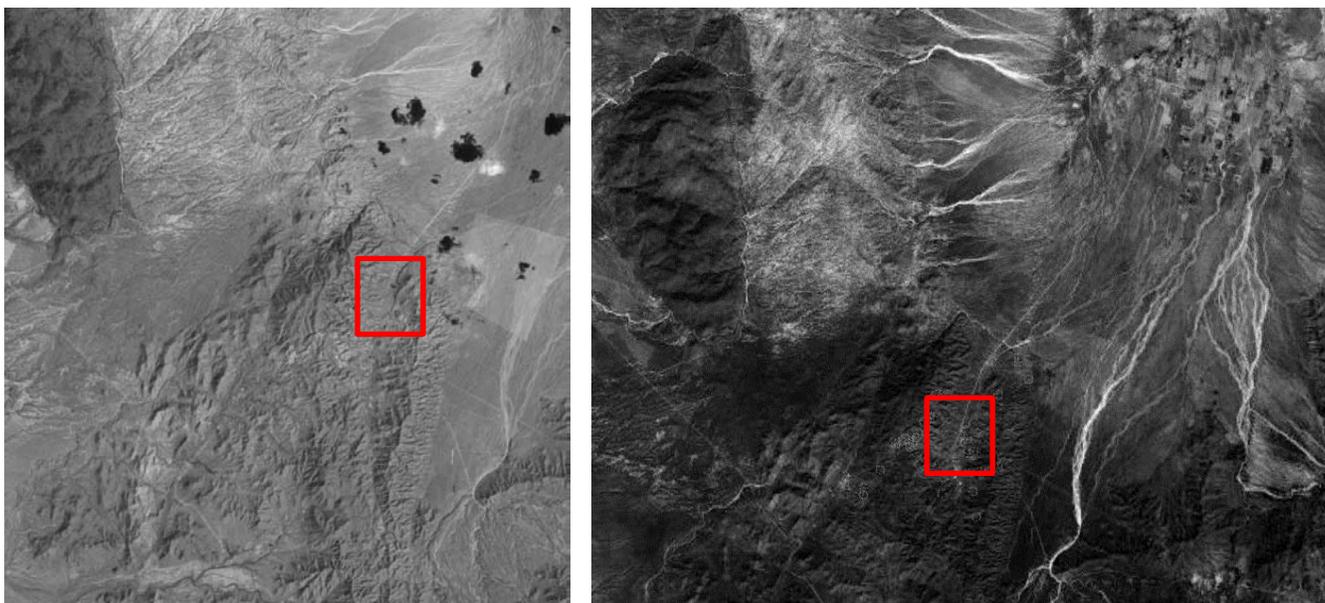
### CAPITULO III.

Las imágenes que se utilizaron son de tipo multiespectral de la plataforma Landsat de distintos años. Se diseñó un algoritmo en lenguaje C++ llamado “*jales*”, para sistematizar los cocientes de las bandas Landsat 3 (zona del espectro rojo, longitud de onda 0.63-0.69  $\mu\text{m}$ ) sobre banda 1 (zona del espectro azul, longitud de onda 0.45-0.52  $\mu\text{m}$ ); para identificar las zonas con terreros previamente identificadas por diversos autores.

Los resultados de cocientes de bandas 3/ banda 1 no permiten la identificación de terreros en el área de estudio, hay al menos cuatro tipos de materiales más (los ríos, algunas zonas de cultivos, la zona urbana y algunos caminos y carreteras). Los valores de brillo que presentan las imágenes, en tono blanco son los valores de brillo cercanos a los 255 que deben tener los residuos mineros, como resultado del cociente de bandas (Fig.III.15).

El cociente de banda 3/banda 1, identifica materiales ricos en Fe, debido a que no existe un realce de dicho material en el resultado de cocientes se descartan a los minerales ricos en Fe, como los predominantes en los terreros, o bien, se busca la firma espectral de los minerales ricos en hierro (Fe) en su fase oxidada, esto es, mediante el cociente banda 3/ banda 5 y banda 5/ banda 7, debido a que en éstas bandas hay una absorción de agua.

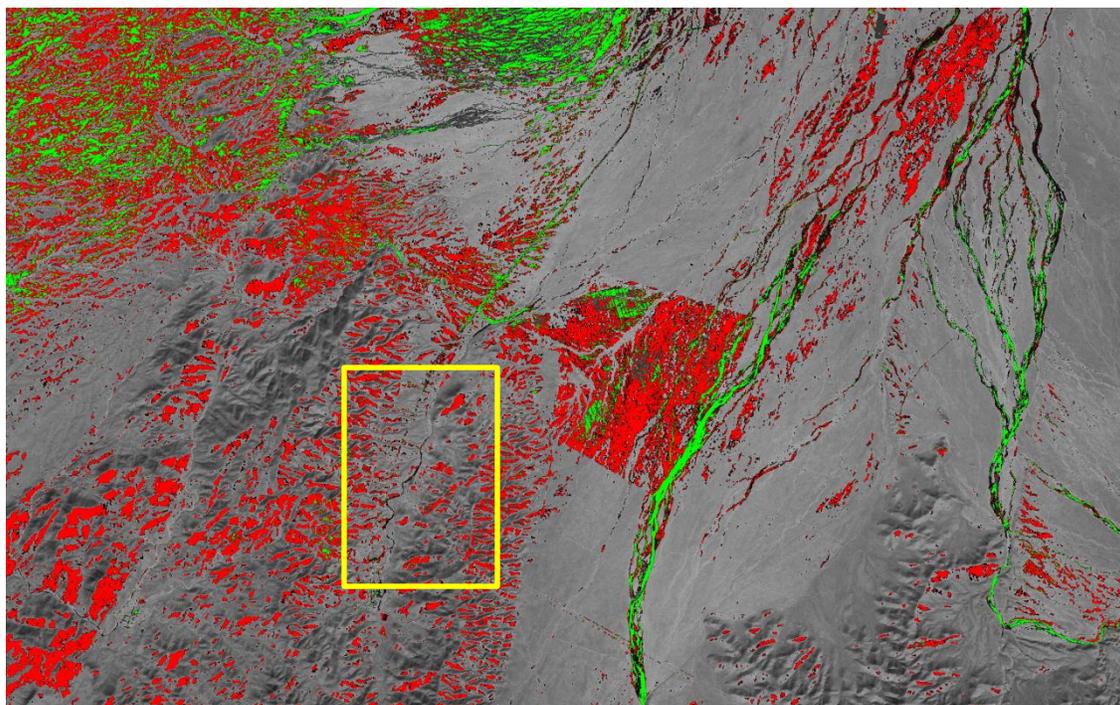
El cociente de banda 3/5 de la imagen Landsat (la banda 5 está en la zona del espectro infrarrojo medio, longitud de onda 1.55-1.75  $\mu\text{m}$ ) y el cociente 7/5 (la banda 7 está en el infrarrojo medio) permiten identificar los materiales ferrosos hidratados y minerales arcillosos, respectivamente. Se introdujeron al módulo “*jales*” dichos cocientes, esperando que los materiales ferrosos del área tengan una hidratación y por ende muestren una clara firma espectral.



**Figura III.15. Imagen de satélite Landsat. La imagen de la izquierda muestra una banda sin tratamiento, la imagen de la derecha muestra el resultado al aplicar cociente de banda 3/ banda 1. El cuadro rojo muestra el área identificada con residuos mineros.**

De los resultados al aplicar los cocientes de bandas para materiales ferrosos hidratados, y minerales arcillosos tampoco se tuvo una respuesta espectral clara para identificar sitios con residuos mineros. Las imágenes nuevamente muestran una mezcla de materiales que no son únicamente identificados como terreros.

Para analizar mejor los resultados del cociente de bandas 3/5 y 5/7 se aplicó un falso color a la imagen resultante dándole color a al valor de brillo 255, al aplicar color, se pudieron distinguir zonas con minerales ferrosos hidratados y minerales arcillosos, pero ninguno de estos dos se encontró sólo en los residuos mineros (Fig. III.16).



**Figura III.16. Aplicación de falso color en el cociente de bandas 3/5. El color rojo representa los materiales hidratados, mientras que el color verde representa los materiales arcillosos, mismos que se presentan en ríos principalmente, pero no en el área de residuos mineros.**

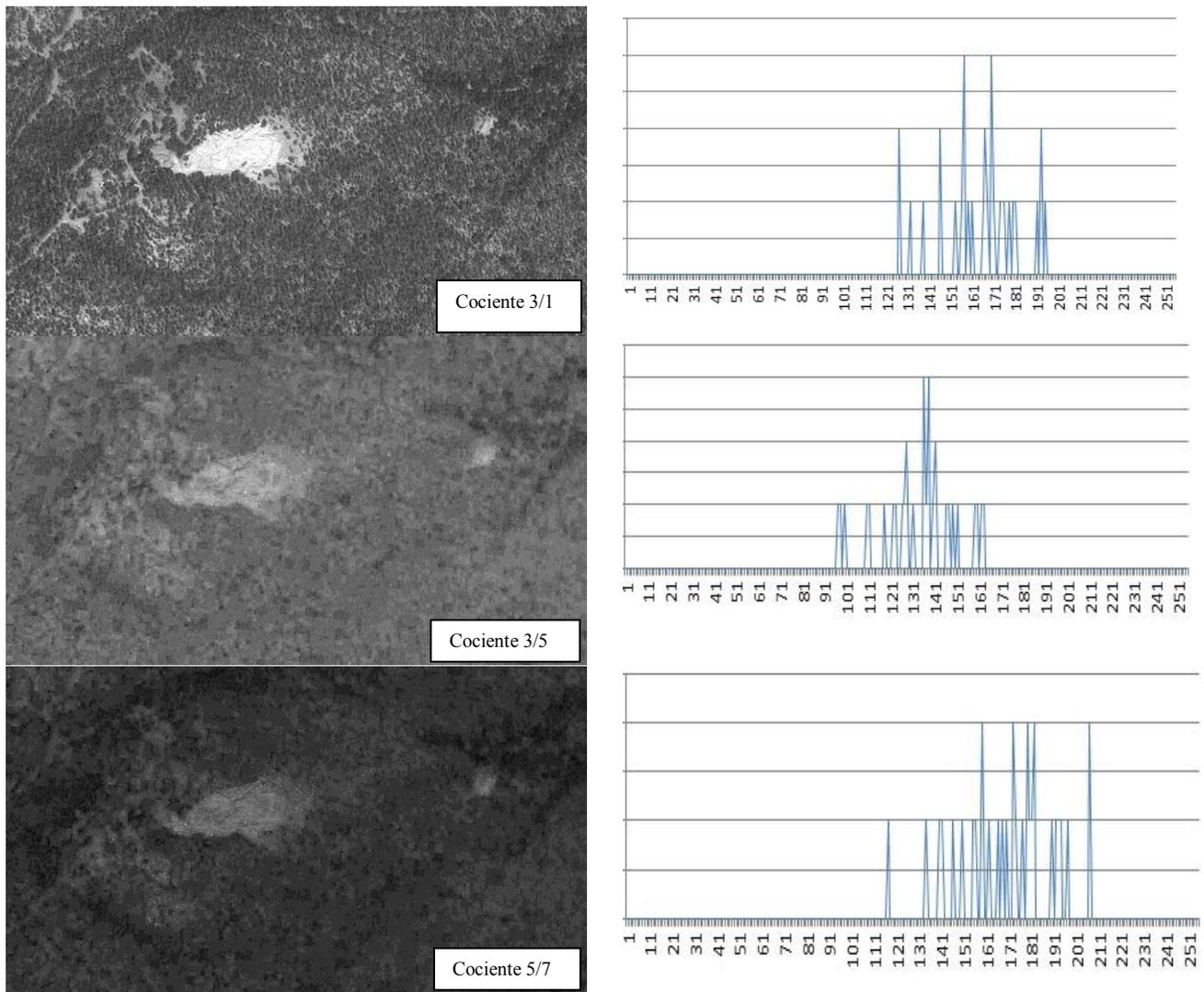
Al generar una imagen con falso color no se obtienen resultados favorables para la identificación de los minerales que se encuentran en los terreros, esta representación permitió concluir que no son los máximos valores de brillo los que realmente realzan a los materiales que se encuentran en la zona minera.

Al no identificar los minerales en los terreros, se continuó con los minerales característicos de los jales. Se hizo una extracción de la imagen de satélite en una zona en donde se sabe que la mayor parte del material pertenece a un jal, y se extrajeron los valores de brillo. La extracción de los máximos valores de brillo en los jales permite saber realmente el valor que tiene el material que compone a los jales y no se da por sentado que es el valor 255 (el máximo valor).

Con el módulo *multidim\_V2* Parrot (2003) en Instituto de Geografía, (2014), se realizó un análisis de la respuesta espectral de los cocientes que se describieron en páginas anteriores y que de acuerdo con los trabajos previos citados en el primer capítulo, son las bandas que dan mejores

CAPITULO III.

resultados para localizar residuos mineros (Fig. III.17). El módulo genera una segmentación previa de cada banda con los valores de brillo que se desean utilizar como componentes de la respuesta espectral del material. Una vez obtenida la segmentación de los valores de brillo, se genera un cruzamiento de la información por cada una de las bandas, y con ello se obtiene la firma espectral del material diferenciado del resto de los materiales en una imagen.



**Figura III.17. Firmas espectrales de los jales. En la porción izquierda se muestra el corte de cada cociente en un sitio donde se sabe que existe una zona de jal. El lado derecho muestra los valores del histograma de cada cociente.**

### CAPITULO III.

Los resultados de la segmentación generan distintos códigos con el número total de píxeles que componen cada código (para la imagen analizada sólo se diferenciaron tres códigos). El material que compone a los terreros se encuentra casi en su totalidad en el código número 1. El código 1 muestra un color casi único para la zona donde se localizan los terreros (Fig. III.18.), por lo que se puede intuir que la segmentación es capaz de diferenciar la firma espectral de los jales, así que, realizó la segmentación para un área mayor.



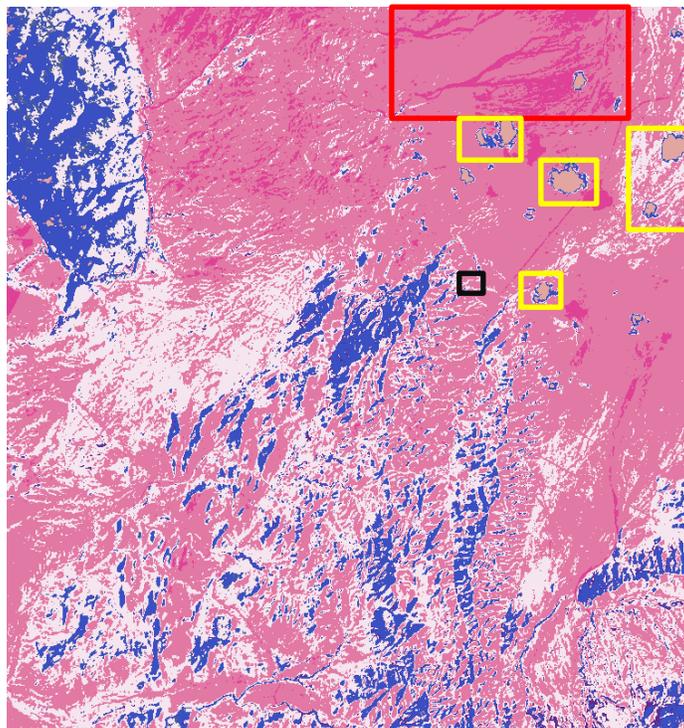
**Figura III.18. Segmentación de los cocientes de bandas. El resultado de la segmentación muestra una clara diferenciación de la firma espectral de los terreros (color blanco), del resto de los materiales que se localizan alrededor de la zona de jales (colores rojo y azul).**

En la segmentación anterior, con la zona que únicamente abarcaba los jales y con la imagen ampliada se utilizaron tres segmentaciones. El primer segmento discriminaba todos los valores que estuviesen antes del valor mínimo para los jales; el segmento número dos es el que contiene los valores mínimo y máximo de los terreros y el último segmento es el que contiene los valores que están después del valor de brillo máximo de los terreros.

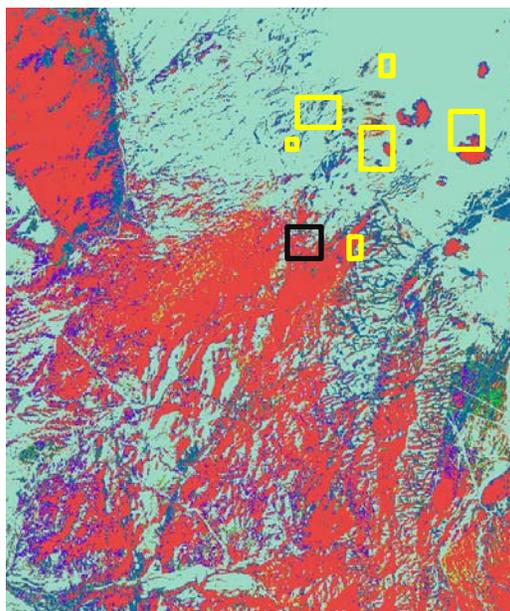
Los resultados de la segmentación utilizando una mayor área de las imágenes Landsat, genera un mayor número de códigos, sin diferenciarse la zona con actividad minera, en la cual aparecen al menos, tres códigos. Los materiales que llegan a diferenciarse con mayor facilidad son aquellos que componen a los causes de los arroyos y las nubes y sus sombras. (Fig.III.19).

CAPITULO III.

Al aplicar la función *treatment* del sub-menú *classification* que realiza el “cruzamiento” de todos los códigos que se obtuvieron en la función *Segmentation Stricto Sensu*, se contabilizaron menos de 250 tipos de cruzamientos, por lo que el módulo propuso tres tipos de tratamientos secundarios. Se seleccionó el número total de códigos, como el mejor tratamiento para los datos, los resultados se muestran en una imagen con una paleta de color para cada uno de los cruzamientos realizados (Fig.III.20).



**Figura III.19. Segmentación de cocientes. Los resultados indican que con una zona más grande hay un número de códigos mayor. Los materiales bien definidos se encuentran en los sedimentos de los arroyos (cuadro rojo), nubes (cuadro amarillo) y en los jales hay al menos tres códigos que los componen.**

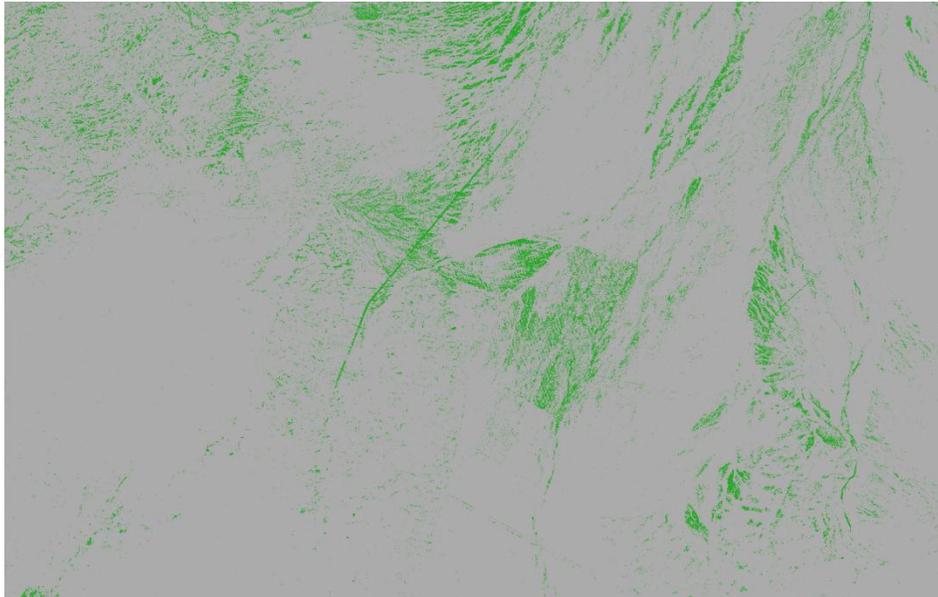


**Figura III.20.** Cruzamientos con los valores de los códigos previamente identificados. No existe una definición clara de la firma espectral de los jales (cuadro negro), por el contrario, continúa la consistencia con la firma espectral de las nubes (cuadro amarillo).

Los resultados al aplicar las funciones *Segmentation Stricto Sensu* y *Classification* del módulo *multidim\_V2*, muestran que no es posible reconocer una firma espectral única para los terreros ni para los jales.

Se puede comprobar que el módulo es útil para el reconocimiento de firmas espectrales por la respuesta espectral constante en los valores de brillo que conforman las nubes y las sombras de éstas. Sin embargo, en los residuos mineros no se obtuvo el mismo éxito espectral y éstos materiales perdieron su respuesta espectral cuando la función *Segmentation Stricto Sensu* se aplicó a una zona mayor de las bandas y ningún “cruzamiento” permitió la separación de las firmas espectrales de los terreros y jales del resto de materiales que constituían la escena.

La última identificación de las firmas espectrales de los jales fue asignándole un color únicamente al segmento que se creía que era único para los residuos. La respuesta fue la misma que con los cocientes y la segmentación de cocientes, una mezcla de material que no necesariamente identifica residuos mineros (Fig.III.21).



**Figura III.21. Realce del segmento representativo para los jales. EL segmento que en un área menor es representativo para los jales, en mayor escala se encuentra distribuido en diferentes zonas de la imagen de satélite, no siendo representativo de los jales.**

Los resultados de los tratamientos a las imágenes de satélite, no son útiles para identificar sitios con residuos mineros. Incluso, no permitieron la verificación de los sitios ya reportados como terreros o jales.

Por lo anterior, los datos que se tienen acerca de los residuos mineros son únicamente aquellos reportados en artículos, informes técnicos y tesis. Aun conociendo los minerales reportados, no es posible identificar más residuos con técnicas de percepción remota.

## **CAPÍTULO IV.** **MARCO METODOLÓGICO**

En el capítulo previo se describieron las características físicas, geográficas y geoquímicas del distrito minero y particularmente de los residuos mineros que componen a los terreros y en menor medida, jales y cenizas.

En el presente capítulo se toman las bases de todos los capítulos anteriores para establecer la metodología de la investigación. Se hace un mayor énfasis en aquellos datos que son fundamentales para la evaluación de la dispersión hídrica de As.

### **IV.1. Modelo Digital del Terreno**

Para evaluar la dispersión hídrica de As, es necesaria la simulación de flujos superficiales que transporten al As. Para cumplir con tal objetivo se utiliza el modelo *Flubidi*, del cual se trató con detalle en el capítulo II. Las variables fundamentales para que el modelo pueda generar un modelo de simulación son: datos de lluvia efectiva (escurrimiento), obtenida del análisis de los valores de las estaciones meteorológicas, vistas con detalle en el capítulo III, y los datos de relieve representados en un Modelo Digital del Terreno.

Para representar el relieve en un modelo tridimensional se generó un Modelo Digital del Terreno (MDT) en formato raster, que utiliza datos altimétricos. La representación del formato raster se da mediante imágenes con representaciones de la superficie de forma bidimensional (Jean-François Parrot & Carolina Ramírez Núñez, 2014). Para la generación del MDT se utilizaron módulos y software desarrollados en el Instituto de Geografía de la UNAM. La explicación de la construcción de algoritmos para los módulos *Brod4\_mx* y *Dilat\_curves*, se encuentran anexos en la publicación: Parrot J.-F. & Ochoa Tejeda V., (2005).

El primer paso para la generación del MDE fue la adquisición de las curvas de nivel en formato: *Drawing Exchange Format* (DXF) (INEGI, 2014). Una vez obtenidos los archivos en formato .DXF, se hace una transformación a formato: *Jean François Parrot* (JFP), con el módulo *Transf\_dxf\_jfp*, con ello se eliminan todos los datos innecesarios en las curvas de nivel (Instituto de Geografía, 2014).

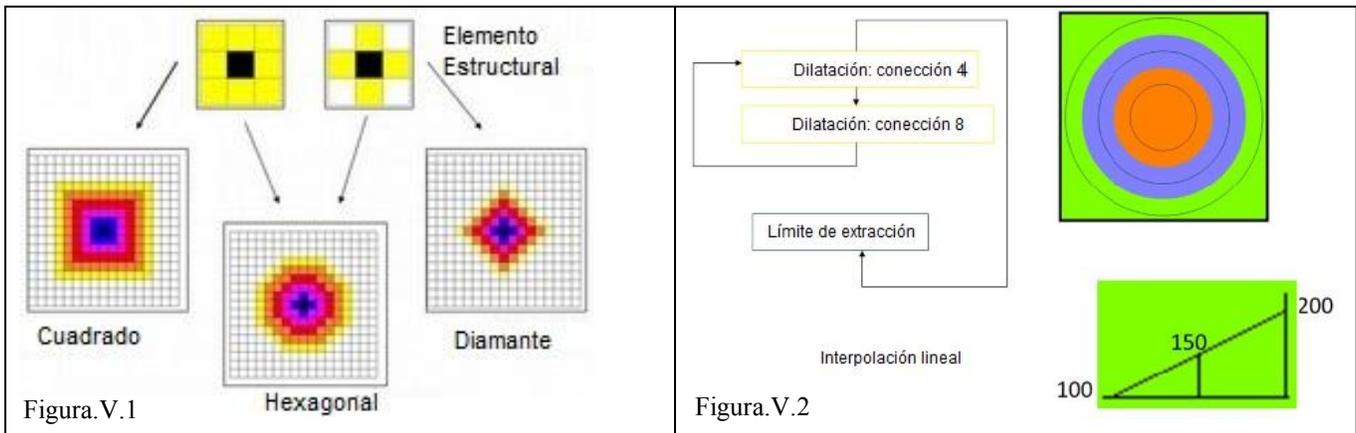
## CAPÍTULO IV

El siguiente paso consiste en convertir las curvas de nivel a formato de imagen raster (.RST), con el módulo *Transf\_jfp\_raster*, en esta conversión se pueden visualizar las curvas de nivel en un Sistema de Información Geográfica (SIG) o en cualquier visualizador de imágenes. Además de la generación del archivo .RST, el módulo genera un archivo de texto (.TXT) en el que se especifican los valores de altitud para cada una de las líneas representadas en el archivo .RST. El intervalo altimétrico debe ser el mismo que previamente tenían las curvas de nivel, en los archivos .DXF (Jean-François Parrot & Carolina Ramírez Núñez, 2014).

Al hacer un cambio de archivos vectoriales a archivos .RST la información pierde cierta precisión, por lo que es necesario hacer uso del módulo *net\_curv*, dicho módulo hace una lectura entre las curvas de nivel que se crearon y elimina aquellos pixeles sobrantes entre cotas. Aunado a los pixeles sobrantes, se genera un marco en el límite de la imagen, mismo que puede ser eliminado con el *minisoft extract\_V2*, como su nombre lo indica, este *minisoft* elimina las filas y columnas no deseadas en la imagen .RST (Parrot J.-F. & Ochoa Tejeda V., 2005).

El siguiente paso es fusionar los datos generados como archivo .TXT y las curvas de nivel en formato .RST, con la unión de ambos archivos obtenemos curvas de nivel con sus respectivos valores entre cotas. La herramienta para generar dicho vínculo es mediante el módulo *brod4\_mx\_V2* (Parrot J.-F. & Ochoa Tejeda V., 2005).

Una vez que se realiza la fusión de la información de las cotas de nivel con la imagen .RST, se obtiene un primer MDT. Finalmente se genera una “suavización de curvas” mediante el módulo *Dilat\_curve*, el algoritmo trabaja con el método de dilatación, (Fig.IV.1) interpolando matemáticamente las morfologías de los elementos estructurales (Taud *et al.*, 1999) (Fig.IV.2).



Figuras IV.1. y IV.2. La figura IV.1. (izquierda) Las curvas de nivel en el archivo .RST adquieren una superficie, ésta dentro del algoritmo es dilatada con una conectividad de 4 y 8, con ello se obtiene una dilatación isotrópica. La figura IV.2. (derecha) Los pixeles que conforman a las curvas de nivel se dilatan hasta que se juntan. El proceso se repite hasta que cada pixel tiene un valor de altitud, la interpolación de datos continúa hasta ocupar todo el espacio entre cotas.

El MDT que resulta de la fuente de INEGI, (2013) y el procesamiento con los módulos y minisoftware es el siguiente (Fig. IV.3):

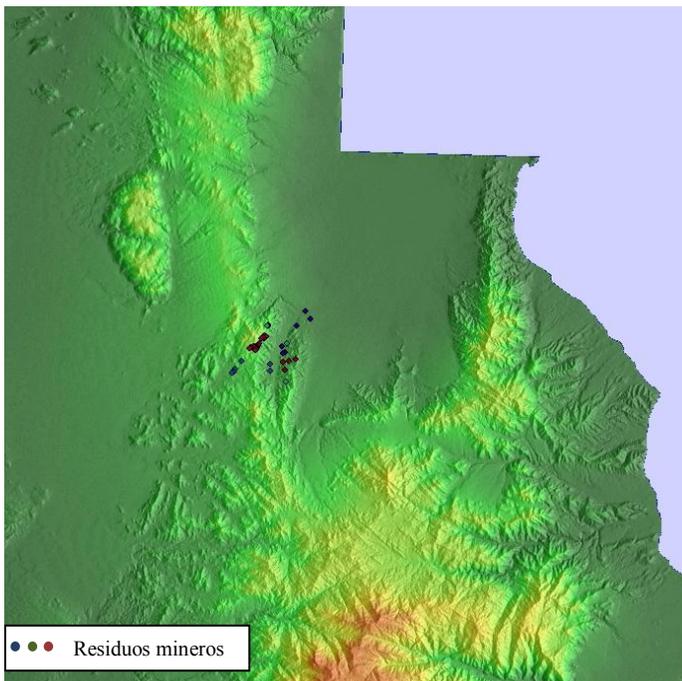


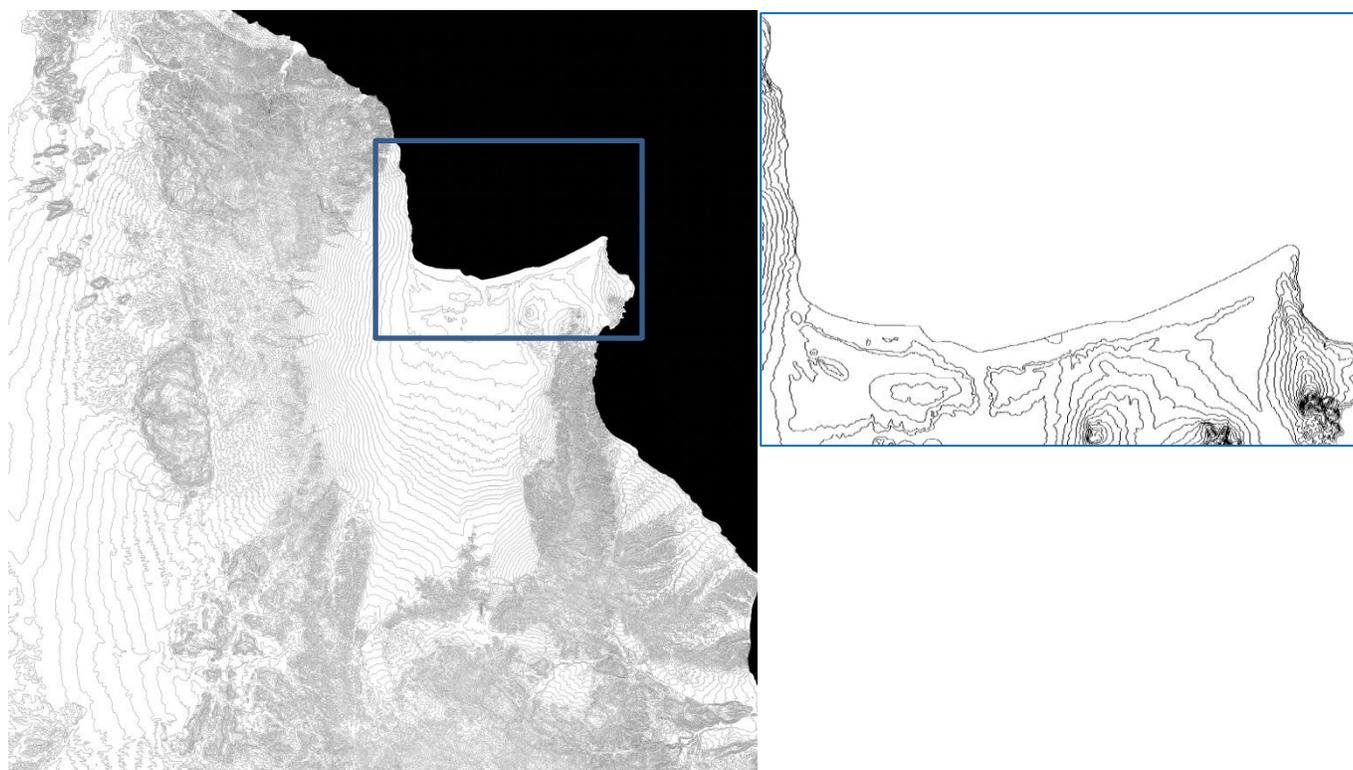
Figura IV.3. La generación del MDE con los datos vectoriales de INEGI, no permiten la generación completa del modelo, por falta de datos, quedando la parte norte de la cuenca sin superficie.

Dado que el MDT tiene el fin de mostrar una representación cartográfica de la cuenca de San Juan de Los Planes, y que los datos vectoriales de la fuente original tienen un sesgo en la porción norte de dicha cuenca, se procedió a generar la parte norte mediante la digitalización de las curvas de nivel

#### CAPÍTULO IV

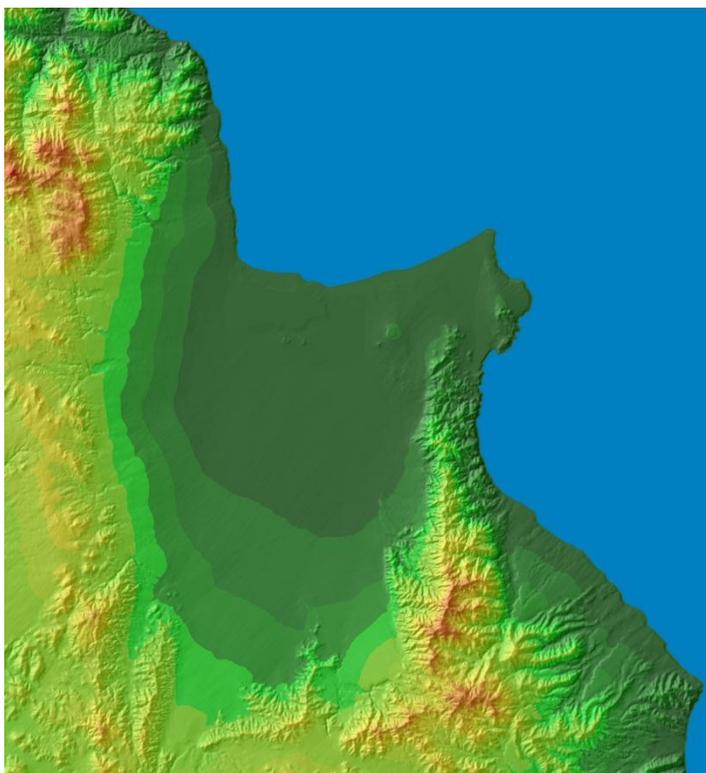
de dicha zona. El primer paso fue la búsqueda de otro MDT que tuviera los datos que hacen falta al MDT realizado en el presente trabajo. El MDT del cual se extrajeron los datos fue del RSTM de ASTER (USGS, 2013).

La extracción de datos se obtuvo del submenú “*contour line extraction*” dentro del software Tlaloc (Instituto de Geografía, 2013). El software permite la extracción de las curvas de nivel, con esto, es posible calcular la parte faltante del MDT creado por primera vez (Fig. IV.4).



**Figura IV.4. Extracción de curvas de nivel del MDT de ASTER. Los datos altimétricos faltantes se pueden digitalizar y anexar a los datos previamente trabajados (USGS, 2013).**

Una vez obtenidas las curvas faltantes de la porción norte, se procedió a generar la metodología anterior, para poder obtener un MDT completo de la cuenca de San Juan de Los Planes. El resultado de anexar la porción norte a los datos raster anteriormente trabajados se muestra en la fig. IV.5.

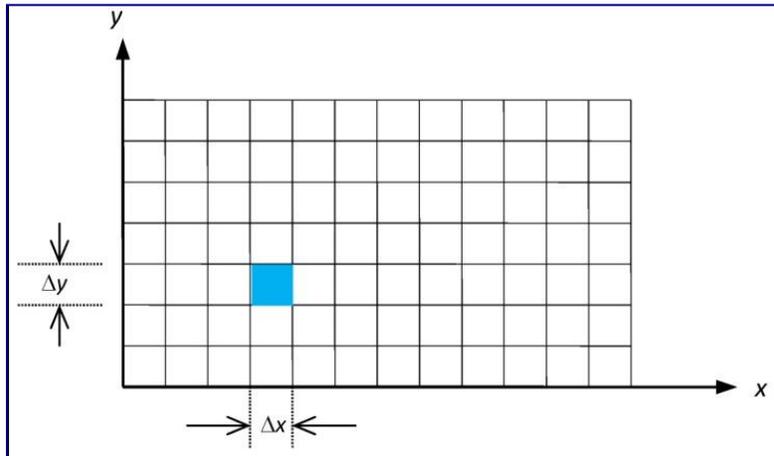


**Figura IV.5 Representación del MDT en la cuenca de San Juan de Los Planes.**

#### **IV.2. Simulación de escurrimiento.**

El modelo matemático utilizado para la simulación del escurrimiento, tiene la característica de ser bidimensional. El escurrimiento se calcula por medio de parámetros distribuidos. La distribución de parámetros se construye sobre un Modelo Digital de Elevación (DEM). La descripción de magnitudes evaluadas se presenta a cada instante (flujo de agua en superficie, volumen de lluvia, pendiente de fricción y lluvia efectiva) y en cada punto del espacio. Los cambios en las variables descritas, son resueltos mediante ecuaciones diferenciales de movimiento descritas y desarrolladas en el capítulo II.

Las fórmulas desarrolladas en el capítulo II son calculadas sobre un sistema de rejillas (Fig.IV.6). La combinación de continuidad e impulso se utiliza para un flujo uniforme e inestable que viaja a través de la superficie, y para efectos de estancamiento debido a la disminución de la pendiente del terreno (Beven, 1985).



**Figura IV.6. Representación esquemática del modelo matemático empleado para el cálculo de la velocidad del escurrimiento. El área (dimensión horizontal), se divide en celdas a lo largo de  $\Delta x$  y ancho  $\Delta y$ .**

Los balances de fuerzas en el flujo del agua (cambio en la profundidad del agua) sobre cada una de las rejillas que componen al DEM (cambio de pendiente en el terreno). El cálculo de las pendientes de fricción en una superficie irregular se define mediante el uso de la fórmula de Manning, descrita con detalle en el capítulo II del presente trabajo.

La simulación del escurrimiento fue hecha para distintos periodos de retorno y para el evento histórico calculado en el capítulo III del apartado de características meteorológicas. De los datos que son obtenidos con el modelo matemático *flubidi*, la variable que representa un interés en la dispersión de As es, la velocidad del flujo

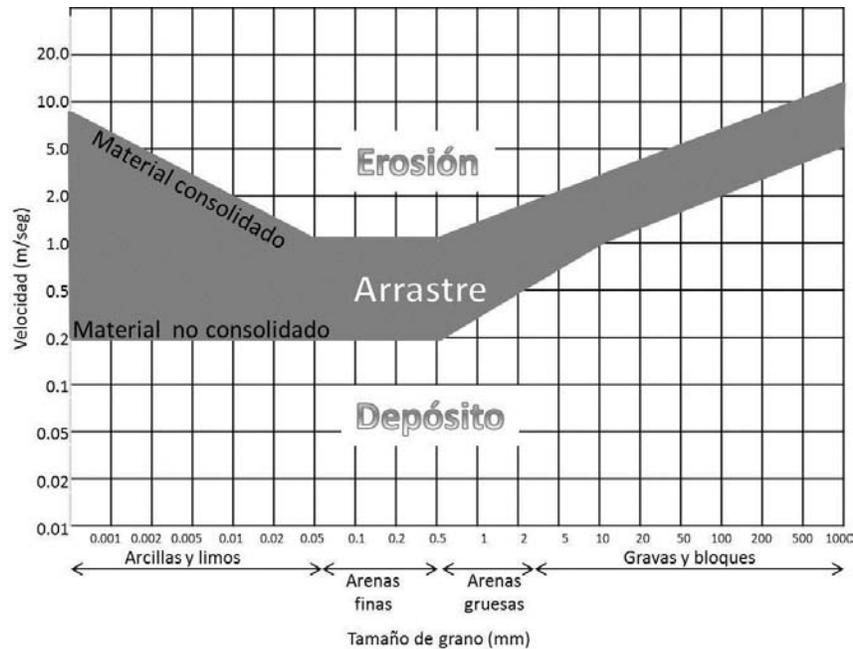
### **IV.3. Características granulométricas.**

El siguiente paso en la evaluación de la dispersión hídrica es el reconocimiento de las granulometrías en las que se están movilizanddo el As. Para ello, es necesario el resultado de velocidad del flujo de la simulación matemática y la relación granulométrica que se presenta en el diagrama de Hjülstrom.

Para conocer la relación que existe entre el flujo que moviliza a las partículas, el desgaste o el depósito de los sedimentos; se ha planteado un modelo experimental, representado en forma de

#### CAPÍTULO IV

diagrama, (Diagrama de Hjulström). En el diagrama de Hjulström, (Fig. IV.7) los incrementos en las velocidades del flujo y el diámetro de las partículas determinan el evento que ocurrirá entre ambos; sedimentación, transporte o erosión. Los valores y los límites entre los eventos, fueron establecidos de manera experimental con partículas de cuarzo en un flujo con 1 metro de profundidad (Boggs, 2006).



**Figura IV.7. Diagrama de Hjulström. En el eje vertical se muestran las distintas velocidades que puede tener un flujo y el eje horizontal se presentan los tamaños de grano. Cuando ambos ejes se relacionan, tenemos el depósito, arrastre o erosión de un cauce. Las líneas grises marcan el umbral entre un evento y otro (Boggs, 2006).**

Una vez obtenidos los sitios con depósito de partículas, de acuerdo con el Diagrama de Hjulström, se verifica en campo la correspondencia de las granulometrías con los resultados granulométricos teóricos. Posteriormente, se colectaron 9 muestras de los terreros y 14 muestras de sedimentos del cauce principal de los arroyos San Antonio y el Carrizal para verificar en laboratorio las granulometrías y sus porcentajes en los puntos de depósito (Fig. IV.8).

Las muestras fueron llevadas al laboratorio de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM; se pesaron 100 gramos de cada muestra y una por una fue vertida al embudo del equipo CAMSIZER® propiedad del mismo laboratorio (Fig. IV.9); con el fin de obtener las curvas granulométricas de las muestras. Es importante señalar que en ocasiones el equipo no es capaz de

#### CAPÍTULO IV

retener el 100% del material que entra al embudo, por tanto, las partículas en ocasiones no suman el 100%. Las curvas granulométricas que se obtienen del software de CAMSIZER® se encuentran en el apartado A, de la sección de anexos de la presente investigación.

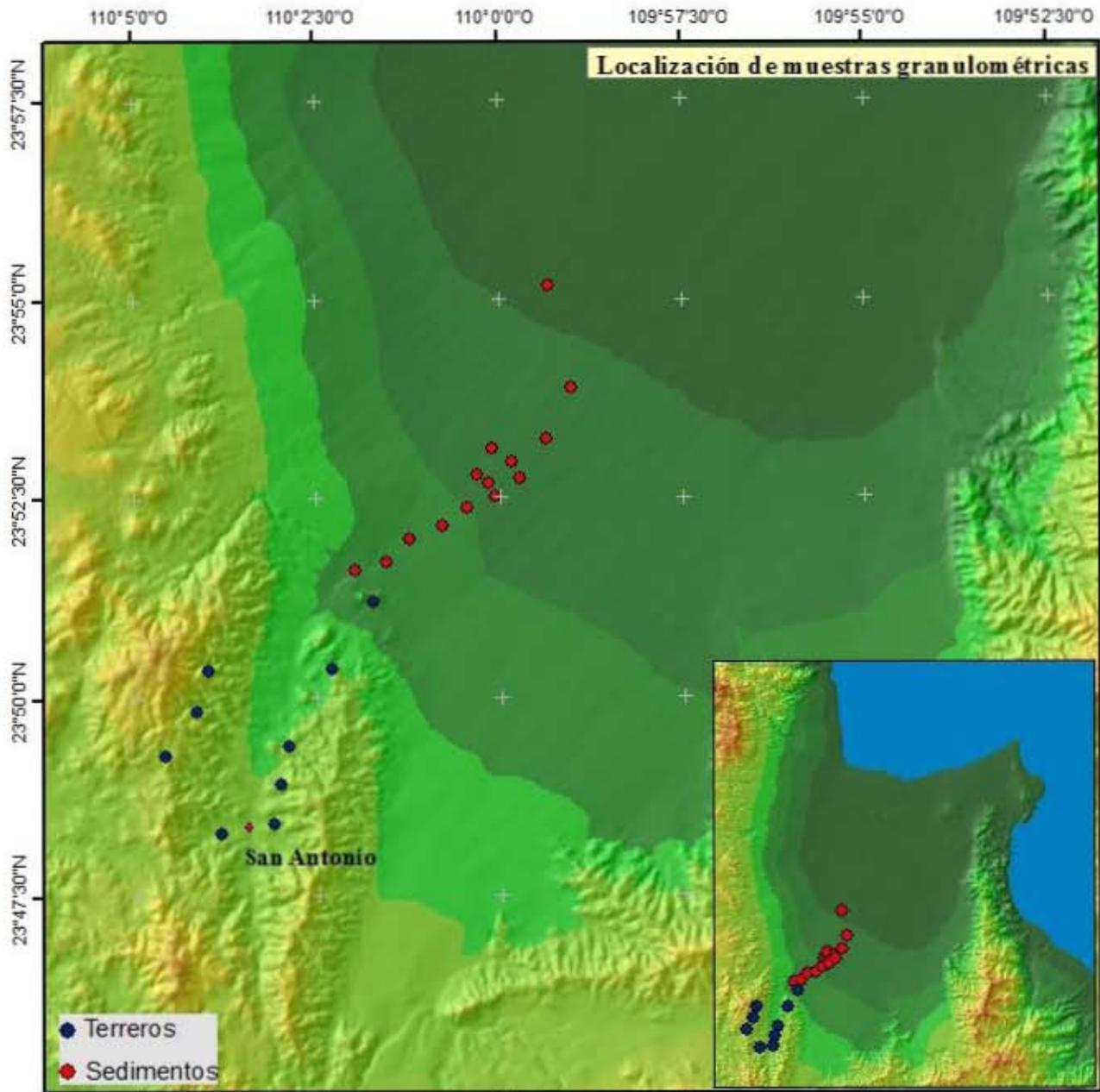


Figura IV.8. Localización de muestreo. Las muestras se tomaron en los sitios con residuos mineros (terreros) y a lo largo del arroyo San Antonio



**Figura IV.9. Equipo Camsizer®. El equipo mide granulometría y morfometría de sedimentos por métodos ópticos (Lo Castro *et al.*, 2011).**

Una vez colocados los sedimentos en el embudo, (parte superior izquierda) la lámina vibratoria mueve a las partículas hasta una cámara y fuente de iluminación. La cámara tiene un sistema lineal para la toma de imágenes de las partículas que van cayendo de la lámina vibratoria; la fuente de iluminación utiliza haces de luz direccionales (colimatados) proporcionando una gran nitidez en los contornos de las partículas (Lo Castro *et al.*, 2011).

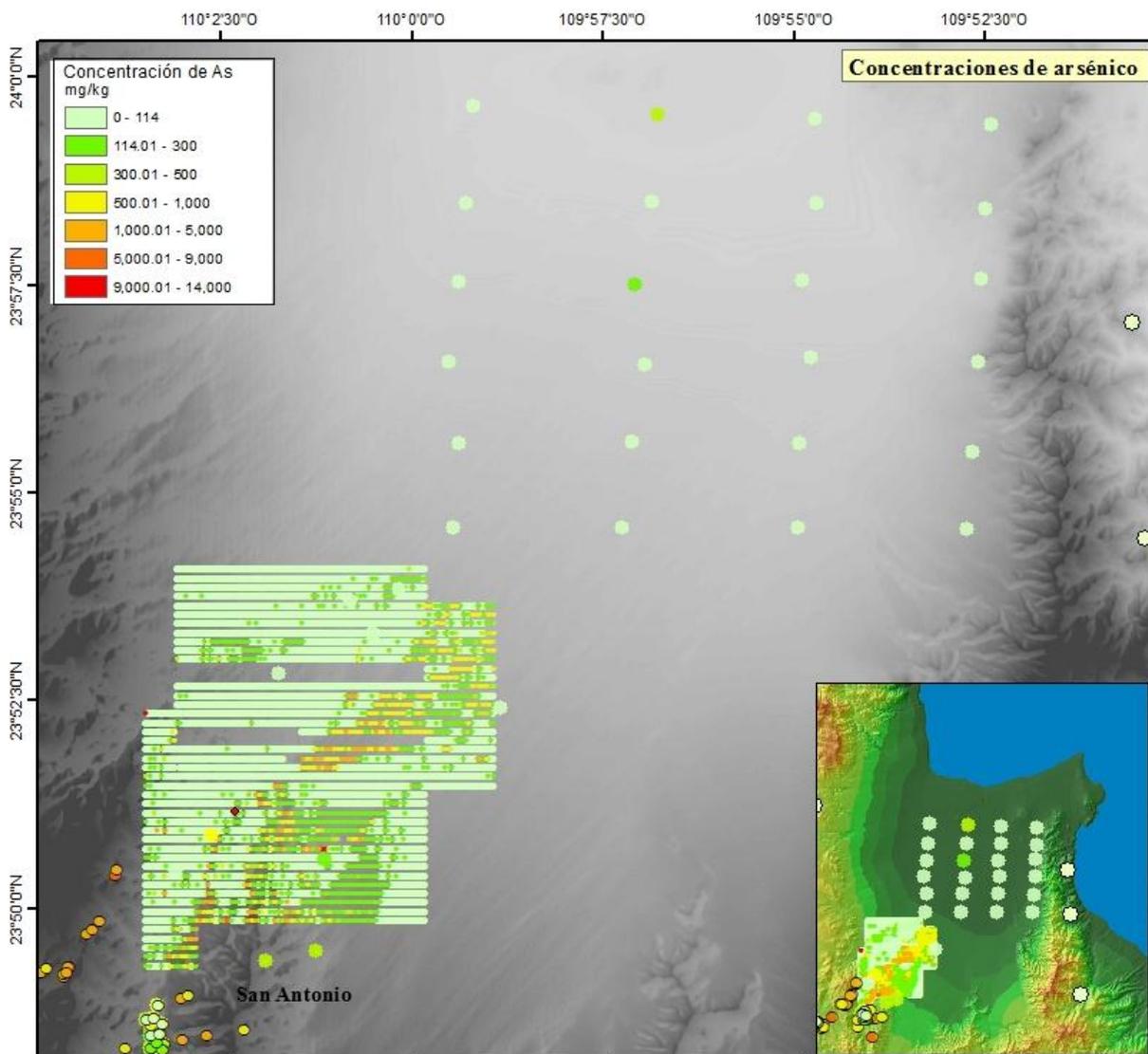
#### **IV.4. Concentraciones de arsénico.**

Otro aspecto importante para la evaluación de la dispersión de As, es conocer las concentraciones de As que existen en la cuenca. Para obtener los valores de As, se conjuntaron los datos de concentraciones de As reportados en diversos trabajos, (Minera Pitalla, 2011; Magdaleno, 2014; Espino, 2014) posteriormente se realizó un recorrido principalmente a los afloramientos de los distintos tipos de rocas, con el fin de obtener el valor natural de As (Fig. IV.10).

Adicionalmente, las muestras de sedimentos que se colectaron a lo largo del cauce para las pruebas granulométricas también fueron analizadas por Fluorescencia de Rayos X (FRX), para corroborar los datos de concentración de As publicados en trabajos previos.

## CAPÍTULO IV

Los datos que presentan un muestreo representativo por la cantidad de muestras tomadas son las reportadas por Minera Pitalla (2011). Además de ser un muestreo representativo, los resultados de las concentraciones de As son las más heterogéneas, siendo las más altas, las que muestran la misma configuración que la de los arroyos del área de estudio. Para simplificar los resultados del muestreo de Minera Pitalla, se realizó una interpolación de las concentraciones.



**Figura IV.10. Concentración de As. Las concentraciones > 1,000 mg/kg de As se encuentran principalmente en la zona de terreros cercanos al poblado de San Anotnio. En la porción baja de la cuenca existen sólo valores de fondo o naturales (<114 mg/kg), mientras que en los cauces de los arroyos es donde se encuentra una mayor heterogeneidad en las concentraciones del As.**

#### CAPÍTULO IV

Los resultados tanto de las granulometrías como de las concentraciones de As son evaluados para saber si existe una relación entre los tamaños de partículas depositadas por diferentes escurrimientos y las altas concentraciones de As que se presentan a lo largo del arroyo San Antonio – El Carrizal.

## **CAPÍTULO V.** **RESULTADOS DE LA DISPERSIÓN DE ARSÉNICO**

En el capítulo anterior se presentó la metodología que se utilizó para la evaluación de la dispersión hídrica de As. La evaluación de la dispersión de As permite valorar los cambios geológicos, granulométricos y la velocidad del flujo que influyen en la pluma de distribución del As, de la cuenca de San Juan de los Planes. Los cambios en las propiedades físicas del sistema pueden atenuar la movilidad del As, o por el contrario, pueden favorecer su movilización.

Por lo anterior, es de vital importancia generar una representación gráfica para cada una de las variables y posteriormente integrar los resultados de la evaluación a una sola representación cartográfica.

### **V.1.Simulación del flujo superficial**

Las velocidades del flujo entre 0.01-0.2m/s, no generan una movilidad en las partículas, por lo que el evento predominante es el depósito; las velocidades de 0.2-1.0m/s generan un arrastre en algunos tamaños de partículas del tamaño de limos, arcillas y algunas arenas finas; los valores que son mayores a 1.0 m/s generan una erosión de algunos materiales consolidados con tamaños de partículas que van desde arcillas hasta algunas partículas de arenas gruesas.

Los resultados muestran distintos comportamientos tanto de la velocidad del flujo como de la movilidad de las partículas. En el periodo de retorno a 2 años, predominan las velocidades de hasta 0.2 m/s; dichas velocidades no generan movilidad en la mayoría de las partículas, por lo que el evento que predomina es el de depósito.

En el periodo de retorno a 5 años, predominan las velocidades de 0.2-1.0 m/s; esto significa que el evento que va a predominar en las partículas es el arrastre; los sitios que superan las velocidades a 1.0 m/s son los cauces de los arroyos secundarios; los cauces de los arroyos primarios como el de San Antonio o El Carrizal no presentan velocidades que superen el 1.0m/s.

## CAPÍTULO V

El periodo de retorno a 10 años, presenta un patrón de comportamiento distinto al anterior. En este periodo de retorno predominan las velocidades de 0.01-0.2 m/s; hay algunas zonas, sobre todo en el piedemonte, en donde hay velocidades de 0.2-1.0 m/s, y lo más interesante es, que las velocidades superiores a 1.0 m/s se localizan en los cauces de los arroyos principales, contrario a lo que se presentaba en el periodo de retorno a 5 años. Además de encontrarse en los cauces principales, las velocidades máximas se desarrollan por una mayor longitud, lo que se traduce en una mayor erosión a lo largo de los arroyos principales.

Los periodos de retorno a 100 y 200 años son muy similares, la tendencia en las velocidades superiores a 1.0 m/s se alcanzan sobre todo en los cauces de los arroyos, tanto primarios como secundarios y en ambos casos estas velocidades llegan hasta la porción plana de la cuenca. Los eventos de depósito o velocidades inferiores a 0.2 m/s se presentan en algunas pequeñas porciones de la zona plana de la cuenca (Fig.V.1).

A partir del periodo de retorno a 5 años, la movilización de las partículas que integran a los residuos mineros son susceptibles de ser movilizadas, y es en los cauces o las zonas cercanas a los cauces en donde se tendrá una movilización de las partículas del tamaño de arenas gruesas o bloques, ya que las velocidades superiores a 1.0 m/s son únicamente las que pueden movilizar ese tamaño de partículas, de las que están constituidas en un porcentaje mayor los terreros.

### V.3. Integración de las características físicas y geoquímicas del distrito minero

Los datos de las características físicas y geoquímicas de los residuos mineros establecieron la relación más importante entre la dispersión hídrica y las altas concentraciones de As. Al interpolar los datos de concentraciones de As en un área de aproximadamente 60 km<sup>2</sup> de la cuenca, se obtiene una configuración similar a la que presenta el cauce del arroyo San Antonio (Fig. V.2).

Los valores > 1,000 mg/kg se localizan en los sitios donde se encuentran depositados los terreros. Inclusive, el valor > 9,000 mg/kg, se reporta en las antiguas pilas de lixiviación que se reportan en el distrito minero (Figura V.3)

Simulaciones de lluvia para distintos periodos de retorno

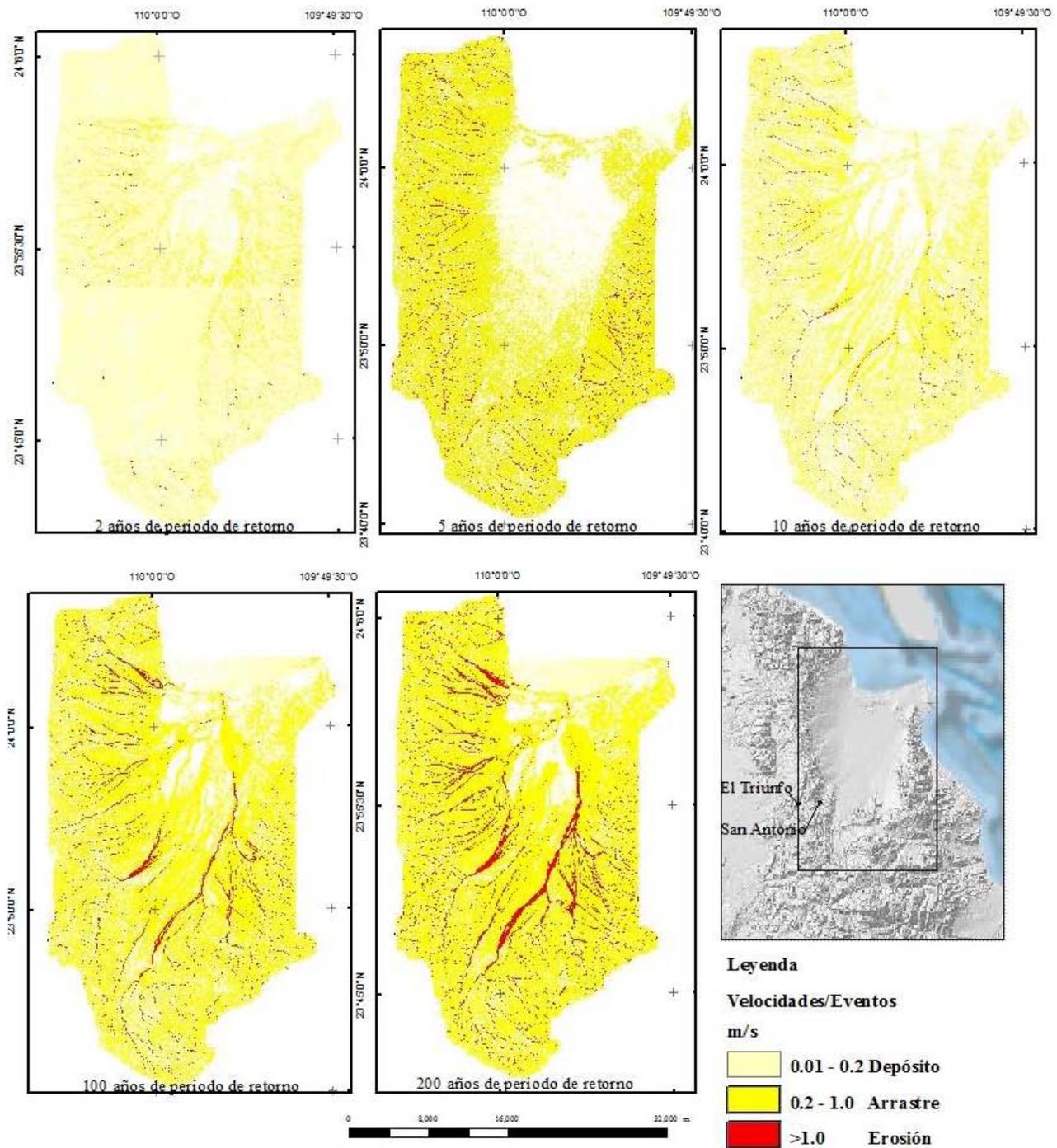
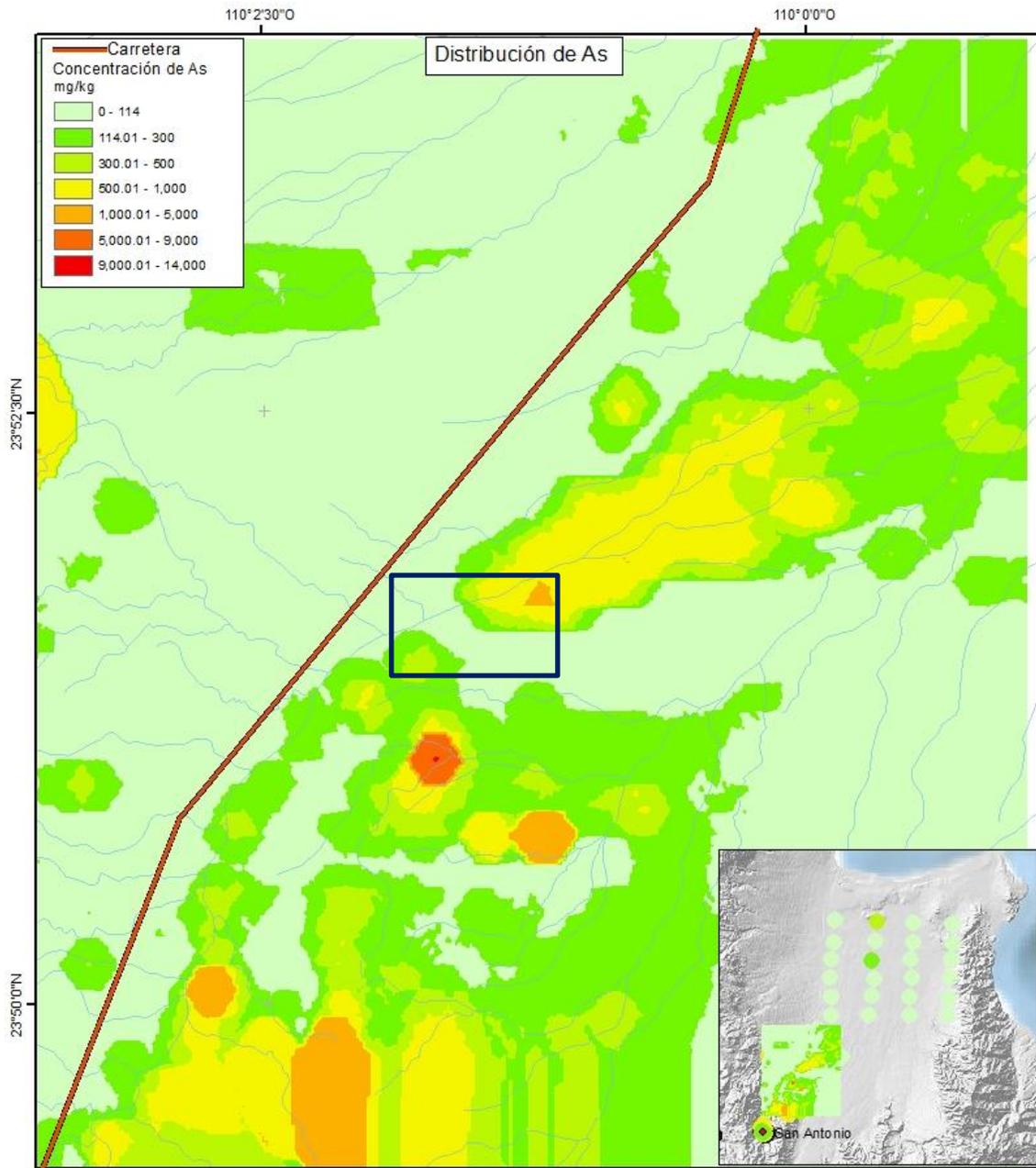


Figura V.1. Simulaciones de la velocidad de flujo en la Cuenca San Juan de los Planes. Las simulaciones se realizaron a periodos de retorno de 2, 5, 10, 100 y 200 años. La representación de los resultados es con base en los valores de frontera que presenta el diagrama de Hjulstrom. Adicionalmente se agregan los eventos que predominan para cada valor de velocidad representado en los mapas.



**Figura V.2. Concentraciones de As en el Distrito Minero. Las concentraciones superiores a las 1,000 ppm (tonos naranja y rojo) en la porción sur del área, son los sitios en donde se ubican los terreros. En color azul se presenta la red hídrica, si se compara la red con la distribución del As se observa una misma configuración del As sobre los cauces de los arroyos.**

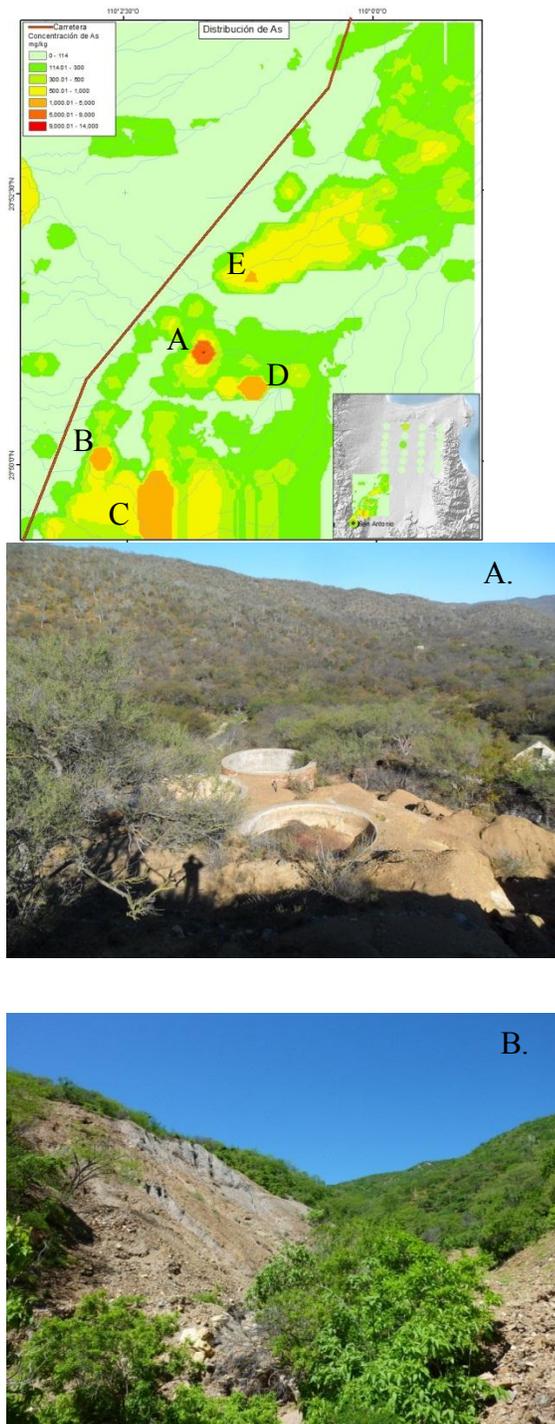


Figura V.3. Sitios con residuos mineros. A. Antiguas pilas de lixiviación con residuos tipo jal. B. C. Terreros D. Terrero con presencia de material oxidado. E. Sedimentos sobre el arroyo San Antonio

## CAPÍTULO V

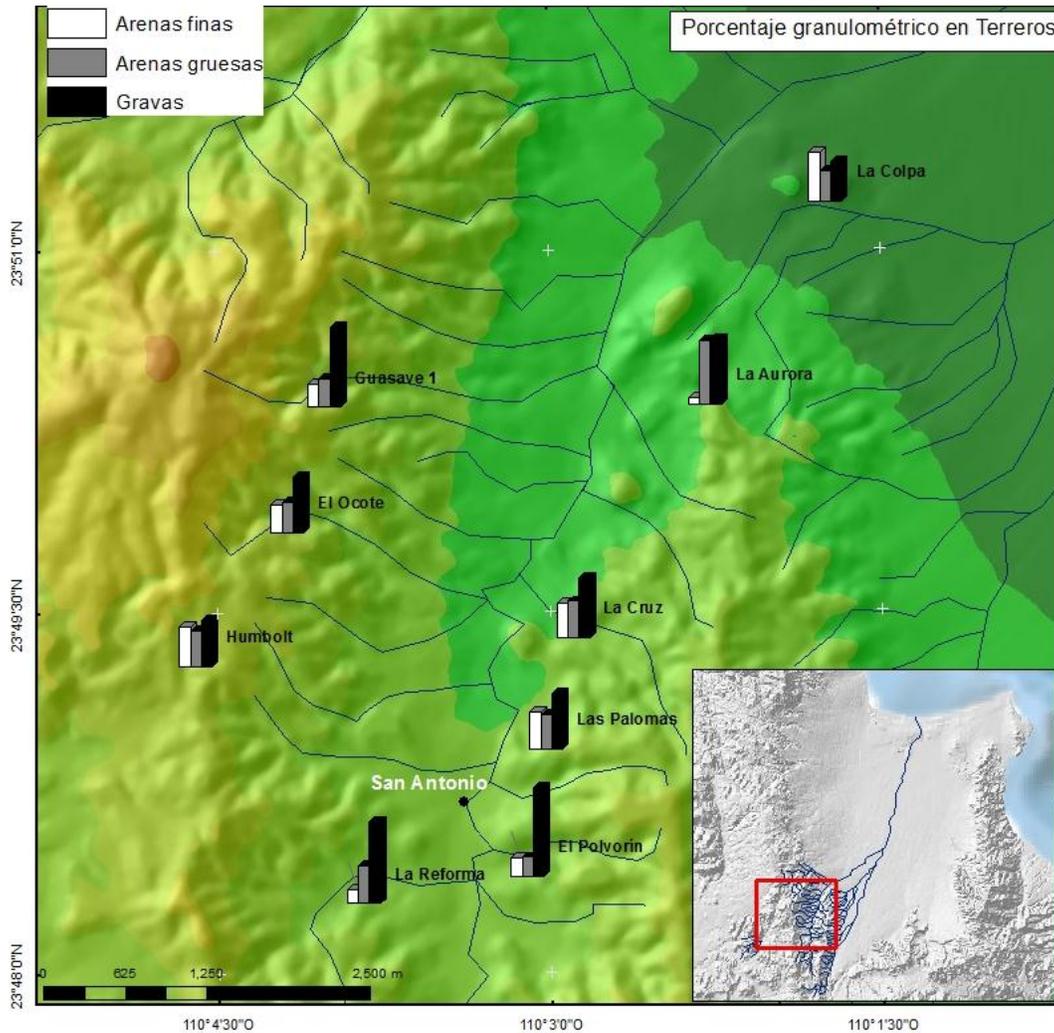
Los sitios con mayores concentraciones de As, presentaron en su mayoría granulometrías gruesas, propias de material disgregado, característica común de los terreros. En la figura V.3, el punto con la letra A. presenta granulometrías muy finas del tipo de limos y arenas finas, incluso, en la foto se puede observar la presencia de las pilas de lixiviación. Este residuo es el que mayor concentración de As reporta, y por sus características se define como un jal.

Las partículas de los terreros tienen un tamaño mínimo de 0.2 mm, de acuerdo al diagrama de Hjulström; ese tamaño de partícula corresponde a arenas finas. El tamaño máximo es de 16 mm; sin embargo, la cantidad de partículas que contiene ese tamaño es menos del 1% al igual que los tamaños inferiores a 0.05 mm. El mayor porcentaje de las partículas se concentra entre 2.0 y 6.0 mm que corresponden a arenas gruesas y gravas.

Para conocer qué porcentaje predomina de cada tamaño de partícula, se dividieron los tamaños de grano siguiendo el diagrama de Hjulström. Los tamaños de 0.0001-0.05 son limos y arcillas; de 0.05-0.5 mm son arenas finas; 0.51-2.0 arenas gruesas y >2.0 mm gravas. En los terreros existe una heterogeneidad en los tamaños. En el terrero de La Colpa predominan las arenas finas en un 36.42%, seguido de las gravas con un 29.47% y las arenas gruesas tienen un 21.99% de presencia en el terrero.

Los tamaños de partículas en La Cruz y La Aurora, tienen una tendencia marcada hacia las gravas con 43.53 y 47.60% respectivamente. La Aurora presenta menor porcentaje de arenas finas con sólo un 4.98%, mientras que, La cruz presenta casi en igualdad arenas finas 25.12% y arenas gruesas 26.69%. En el jal de La Colpa predominan las arenas finas en un 36.42%, seguido de las gravas con un 29.47% y las arenas gruesas tienen un 21.99% de presencia en el terrero.

Las muestras de los terreros de mayor dimensión y las muestras cercanas a los arroyos tienen una marcada prevalencia por los porcentajes altos en los granos del tamaño de gravas. Los porcentajes van del 40.93% en El Ocote, hasta un 65.29% en El Polvorín. Las arenas gruesas ocupan el segundo lugar en cuanto a porcentajes, con un rango entre 14.11% en El Polvorín, hasta un 28.18% en La Reforma. Las arenas finas tienen un porcentaje 0.34% en Humboldt hasta un 27.3% en Las Palomas (Fig. V.4).



**Figura V.4. Mapa granulométrico de los terreros de San Antonio. Todos los terreros presentan granulometrías gruesas salvo el jal La Colpa, que se presenta una mayor cantidad de material fino.**

Los resultados de granulometría en los terreros muestran que son las partículas de tamaño grueso superior a 2.0 mm, las que predominan en los residuos mineros. Por tanto, las velocidades de un escurrimiento para que estas puedan movilizarse deben ser superiores a 0.5 m/s, y para que exista una erosión del material consolidado debe haber una velocidad de flujo superior a 1.8 m/s.

Los resultados de las partículas dentro de los sedimentos son muy heterogéneos; se esperaba que las partículas de grano grueso,  $>2.0$  mm fueran las que predominaran en las primeras muestras y que éstas fueran descendiendo conforme más lejos se estuviera del piedemonte; hasta que en la planicie

## CAPÍTULO V

de la cuenca predominaran los tamaños de partículas finas, eso bajo la lógica de que los materiales al ir descendiendo, se van erosionando (Fig.V.5).



**Figura V.5. Granulometrías de los sedimentos. Las granulometrías son heterogéneas incluso en los sedimentos de la porción plana de la cuenca (SED10). Los sedimentos que presentan mayor homogeneidad tienen el número 12 en la figura.**

Contrario a lo anterior, son las arenas gruesas (0.5-2.0 mm) las que predominan en casi todos los puntos de los sedimentos. Esto es lógico si se observa el patrón de drenaje, hay al menos cuatro cauces secundarios de corta longitud que vierten el material de arrastre hacia el arroyo principal. Los cauces al ser de corta longitud, pueden arrastrar materiales más gruesos y depositarlos en el arroyo, El

## CAPÍTULO V

Carrizal. Incluso, en el trabajo de campo se observan fragmentos de roca angulosa y mal clasificada, lo que supone que el arrastre de dicho material es de un sitio cercano al depósito del mismo (Fig. V.5).

La muestra SED01, que se localiza en la parte más alta del piedemonte, predominan las arenas gruesas en un 43.7%, las partículas mayores a 2 mm se concentran en un 30.14% y las partículas finas representan sólo el 21.33%. El punto SED02 localizado a tan sólo 800 m de distancia del punto SED01 las partículas gruesas disminuyen drásticamente hasta encontrarse en un 6.84%, las arenas gruesas también disminuyen, hasta un 39.13%, las partículas finas incrementan a 53.74% y hay presencia de tamaño de limos en 0.27%.

De lo anterior, puede suponerse que entre los puntos SED01 y SED02, la velocidad del escurrimiento disminuye, a tal grado, que el flujo ya no es capaz de movilizar a las partículas mayores de 2.0 mm y por tanto, los materiales gruesos, se quedan en su mayoría, depositados en dicha parte del arroyo, de ser así, las concentraciones de As deben aumentar en esta porción del arroyo.

El registro con mayor porcentaje de sedimentos gruesos lo tiene el punto SED04, localizado a dos kilómetros del punto SED01. El porcentaje de partículas mayores a 2 mm es de 48.33%. Este punto se encuentran dentro del arroyo El Carrizal, por lo que el incremento en partículas gruesas, suponen el aporte de ríos secundarios que no provienen de la parte alta donde están los terreros.

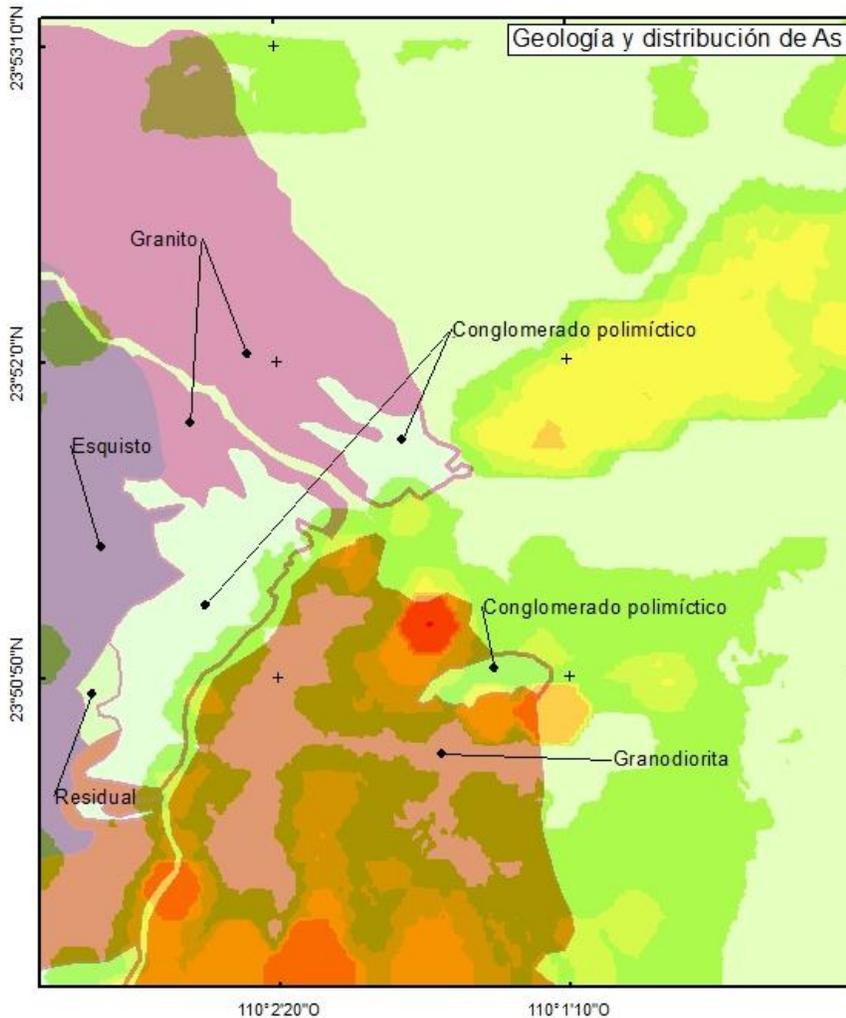
Si se observa la pluma de distribución del As en la figura V.2, existe un patrón similar a la configuración del arroyo principal, es decir, las concentraciones de As por arriba del valor natural se encuentran sobre los cauces. Sin embargo, en la misma figura se encuentra una zona (recuadro azul) que hace referencia a un sitio en donde las concentraciones de As cambian tan drásticamente que parece que no existe concentración del mismo; más adelante, (aproximadamente a 500 m) los valores vuelven a tener la misma tendencia en cuanto a concentración y la configuración.

Se planteó la posibilidad de que el cambio de concentración de As se debía a datos mal registrados por parte de quienes los procesaron en laboratorio, y por tanto, la representación de las concentraciones en ese espacio debían tomarse nuevamente para después interpolarse con los otros

## CAPÍTULO V

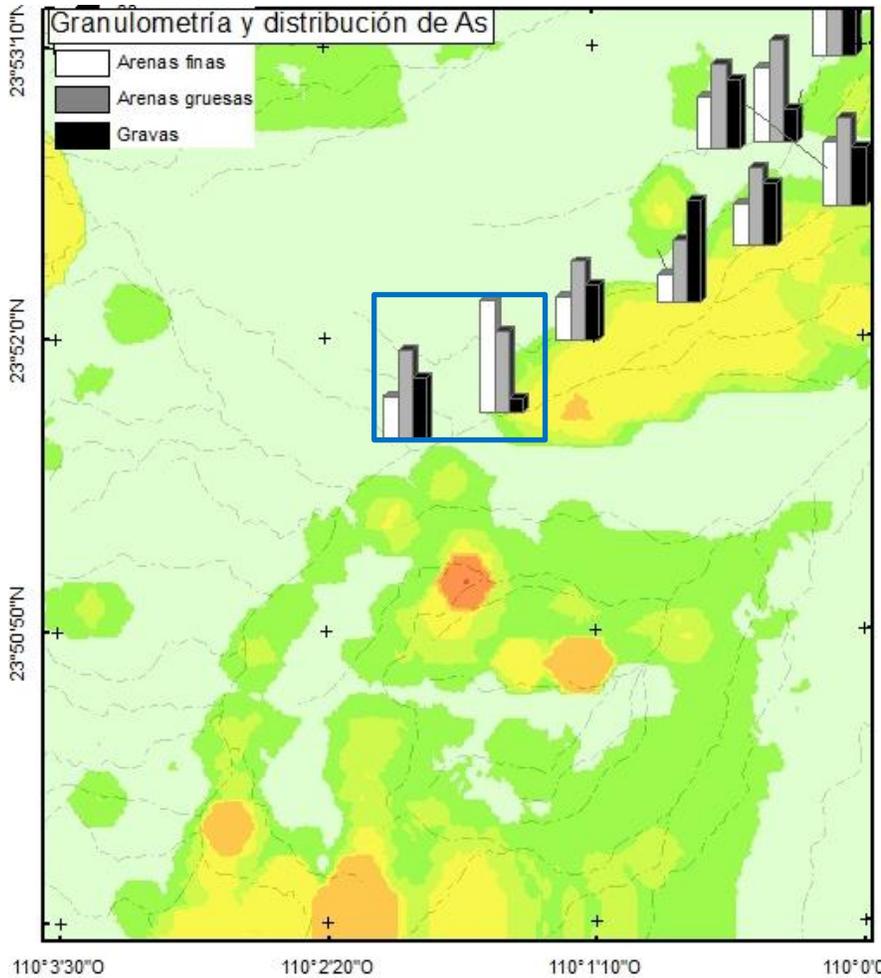
resultados; no obstante, al integrar los datos de la concentración de As, con la geología del área de estudio (Fig. V.6) y con la granulometría de los sedimentos, también se encuentran cambios importantes.

En la figura V.6, la concentración de As con valores entre 114-500 mg/kg baja a concentraciones inferiores a los 114 mg/kg, justo en el cambio del material aluvial al conglomerado polimíctico (recuadro azul). El cambio en la concentración puede deberse a que el material de la superficie correspondía a sedimentos que conforma al conglomerado y que por procesos erosivos este comienza a desprenderse de la roca, el cual no tiene concentraciones elevadas de As sino valores de fondo (<114 mg/kg). También existe la posibilidad de que se tenga una mezcla de los sedimentos, y que esa combinación tenga una mayor cantidad de partículas provenientes de otro arroyo



**Figura V.6. Geología y distribución del As.** Al relacionar la distribución de As con la geología del área se nota una baja concentración de As justo en el área del conglomerado polimíctico (recuadro azul). La mayor parte de las concentraciones superiores a 114 mg/kg se encuentran en la granodiorita y en la zona con material aluvial.

En lo que respecta a la granulometría, para la misma zona con cambios en la concentración de As y geológicos; las partículas de tamaño de gravas bajan drásticamente, entre ambas tomas de muestra, en una distancia de 500 m, el mismo lugar donde cambia la geología y bajan las concentraciones de As (Fig. V.7).



**Figura V.7. Granulometría y distribución de As.** las primeras barras de granulometría (en el recuadro azul) señalan a las partículas gruesas como las principales, pasando dicho punto son ahora las partículas finas las que predominan.

El estudio granulométrico demostró que los terreros tienen porcentajes mayores de partículas de gravas en comparación con las partículas de arenas gruesas y finas, lo que supone que la fuente de dispersión de As está contenida en las partículas mayores a 2.0 mm de diámetro.

En la primer gráfica de la figura V.7, existe predominio por partículas de arenas gruesas y gravas, y es el límite donde la concentración de As supera el valor natural de 114 mg/kg, la siguiente

## CAPÍTULO V

gráfica muestra un predominio por las partículas finas; puede ser que la velocidad del flujo haya cambiado drásticamente en este sitio, de tal manera que, la erosión que se ha presentado en las partículas de gravas y arenas gruesas las ha reducido en diámetro hasta volverse arenas finas; o bien, que la misma velocidad del escurrimiento propicie que el depósito de material grueso.

Para un periodo de retorno de 2 años, cuando la distribución de As es  $> 114$  ppm, la velocidad del flujo no es capaz de transportar o erosionar partículas superiores al tamaño de gravas ( $>2.0$ ), al no poder movilizarse, estas son depositadas antes del sitio donde los valores de As cambian drásticamente de 300 a 114 ppm (Fig. V.8).

La figura V.8, muestra la simulación del escurrimiento con un periodo de retorno de dos años. En el recuadro rojo se muestra que antes de la muestra SED01 las velocidades son superiores a 1.0 m/s eso implica la movilización de partículas desde arcillas hasta gravas de 5.0 mm, posterior a dicho punto, los valores de la velocidad del flujo son  $< 1.0$  m/s con ello se depositan las arenas gruesas y gravas, mientras que los sedimentos finos siguen movilizándose.

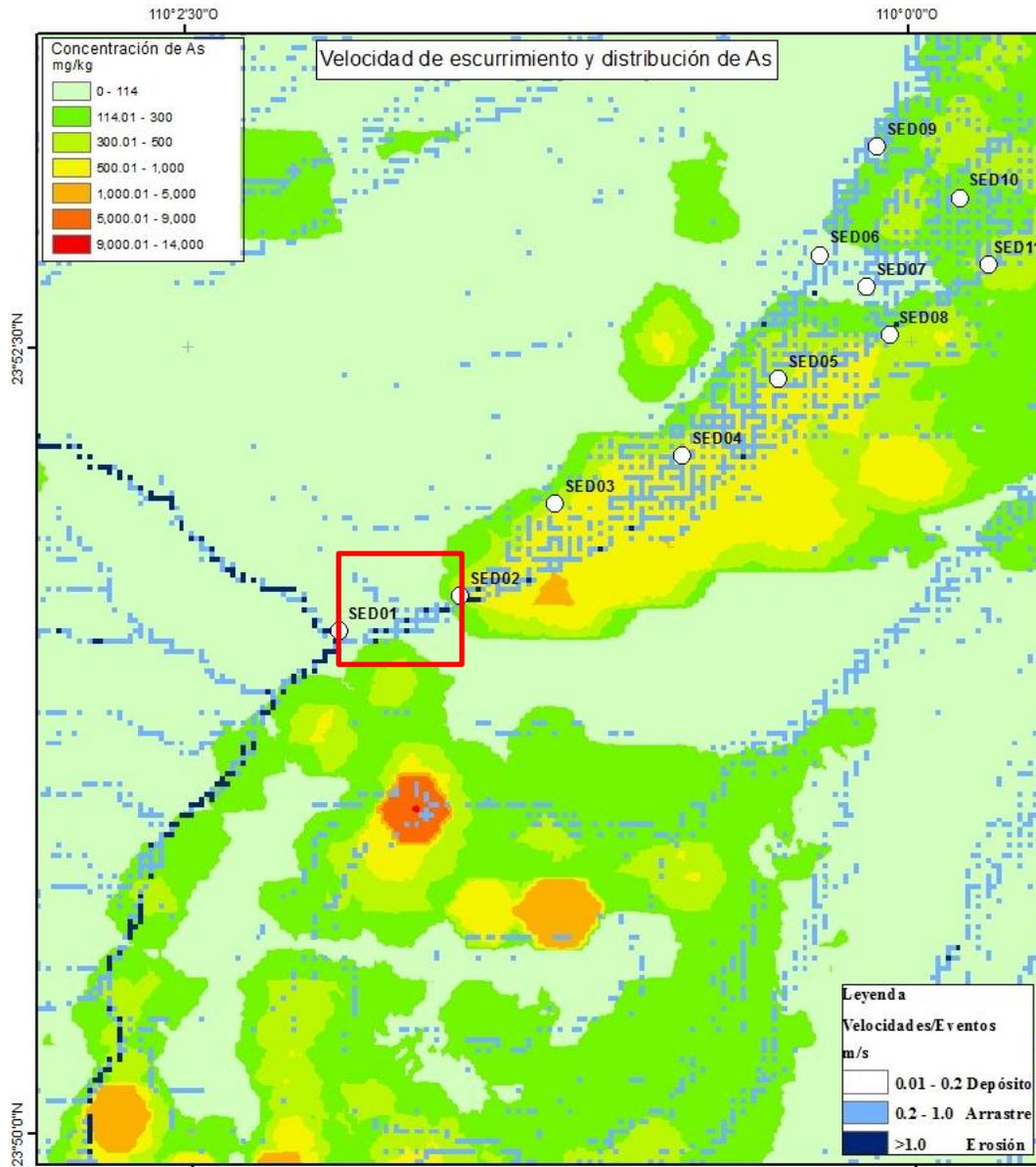


Figura V.8. Simulación de escurrimiento con un periodo de retorno a dos años. Los datos de la modelación indican que la velocidad del flujo en el cauce del arroyo San Antonio en la porción alta, tiene una velocidad superior a 1.0 m/s, en la confluencia de los arroyos (SED01) las velocidades son <1.0m/s.

## **CAPÍTULO VI.** **DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES**

Los residuos en su mayoría corresponden al tipo de terreros, material disgregado que forma parte de los trabajos de minado, son residuos de baja ley que contienen minerales primarios. Existe un solo punto de residuo mineral con características de jal e incluso en el trabajo de campo se observaron antiguas pilas de lixiviación.

A pesar de tener caracterizaciones físicas detalladas de los residuos mineros por medio de los trabajos previos (Magdaleno, 2014; Espino 2014) no fue posible una identificación por medio de sensores remotos. Mientras que la revisión bibliográfica mostró casos de éxito aplicando técnicas de percepción remota, al aplicar la metodología de cocientes al área de estudio, no se obtuvo una respuesta espectral única para los residuos mineros. La aplicación de cocientes de bandas con éxito en Sabins (1999) para el distrito minero, la única firma que prevalecía y se mostraba como única para los materiales fue para las nubes y sus respectivas sombras.

Al utilizar las mismas imágenes de satélite y reproducir las metodologías previamente establecidas en la literatura, se concluye que los terreros, son residuos muy parecidos, al menos espectralmente, al material que los circunda, por tanto, es imposible encontrar en un pixel de las imágenes Landsat que abarcan  $900 \text{ m}^2$ , las diferencias entre el material parental, las rocas y los residuos mineros denominados terreros.

Fue posible identificar la firma espectral del jal generando una nueva metodología (ver identificación de residuos mineros en el capítulo III) y aplicándola únicamente a una parte de la imagen donde se sabía claramente que los pixeles que se encontraban en dicho corte de la imagen, pertenecían sólo al jal; sin embargo, cuando esa metodología se aplicaba a una zona mayor, la respuesta espectral era similar a una gran variedad de materiales que componían a la imagen, y que claramente se observó que no se trataba sólo de la respuesta espectral del jal.

Las herramientas de percepción remota son muy útiles porque abarcan zonas de estudio a nivel regional. No obstante, una de las principales limitantes que poseen algunos de los sensores remotos,

## CAPÍTULO VI

son las resoluciones espectrales y espaciales. La mayoría de las imágenes gratuitas y de bajo costo, son imágenes multiespectrales que tienen una cantidad pequeña de bandas (siete para el caso de Landsat y cuatro para imágenes spot), los que genera que la identificación de los distintos materiales que componen la superficie terrestre se vuelva muy general y no se tenga, por ende, una gran cantidad de identificación de las firmas espectrales de los materiales.

El uso de imágenes de satélite para la identificación mineralógica, mostró ciertos problemas, principalmente porque la mezcla de los materiales que componen el suelo, las carreteras y las zonas urbanas, muestran los mismos valores de brillo que las firmas espectrales de los terreros y los jales; esto impide que se pueda tener una separación de materiales e imposibilita identificar las zonas con residuos mineros y su posible dispersión.

En cuanto a la caracterización de minerales, la Difracción de Rayos X (DRX) permitió conocer los minerales que se encuentran asociados al As, fuente EPT. Se hizo una caracterización mineralógica en las partículas finas (menores a 45  $\mu\text{m}$ ) y en las partículas gruesas (tamiz malla 30  $\mu\text{m}$ ). Este conocimiento es importante porque uno de los objetivos de la investigación fue, averiguar en qué tamaños de partículas se encontraba el As.

Los resultados de DRX (Anexo A), en la fracción fina, y en la fracción gruesa fueron similares. La mayor proporción de minerales reportados son: cuarzo, sílice, feldespatos, plagioclasas y anfíboles. La neofomación de minerales, sólo se encontró en los residuos denominados *jales*; en los terreros y en los sedimentos del cauce, no hubo presencia de minerales secundarios, al menos no fueron percibidos por medio de la técnica de DRX. El único mineral secundario que se reportó fue la escorodita ( $\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), mineral secundario característico por controlar la movilización del As.

En estudios previos (Magdaleno, 2014; Espino, 2014; Grupo de Bioquímica Ambiental, 2013; Minera Pitalla, 2011) no reportan la presencia de escorodita para la misma zona, dichos estudios reportan la presencia de arsenopirita y jarosita como los minerales secundarios presentes en las pilas de lixiviación.

## CAPÍTULO VI

La arsenopirita se oxida directamente en escorodita por lo que existe una asociación entre la arsenopirita y la escorodita en los residuos mineros. La escorodita es metaestable por arriba de un pH 2.0, por debajo de dicho pH tiende a disolverse, formando oxihidróxidos de Hierro (Fe), liberando arseniato acuoso. En México es común encontrar As asociado a sulfuros de plata, plomo y zinc y existen cantidades importantes de minerales de As como arsenopirita, escorodita, mimetita, adamita y tenantita (Bundschuh et al., 2008).

De los resultados de DRX se concluye que los terreros son un tipo de residuos menos móviles en el ecosistema, y su forma de dispersión se vuelve más limitada, principalmente porque sus partículas presentan granulometrías  $>$  a 2.0 mm. El sitio con residuos tipo jal sólo presenta un mineral secundario (escorodita) que es muy estable a pH mayor a 2.0 y tiene la característica de retener al As.

Las características hidrográficas entre los poblados de San Antonio y El Triunfo que componen al distrito minero que lleva sus nombres, son muy distintas entre sí. La red de drenaje de El Triunfo presenta un drenaje bien erosionado, mientras que la hidrografía de San Antonio es más regular y menos erosionada, presenta un cauce uniforme y de poca pendiente. Por tanto, la movilidad de As que se presentan San Antonio alcanzará una mayor área de influencia que los arroyos del poblado El Triunfo, no obstante, la poca pendiente que existe, principalmente en la zona plana limitará la movilidad del As.

La Sierrita localizada al oeste del poblado San Antonio, que separa a ambos valles de San Antonio y El Triunfo; forma un parteaguas para ambas costas de la península, teniendo la vertiente del lado este al arroyo de San Antonio cuya desembocadura es hacia el Golfo de California, y la vertiente W, del lado de El Triunfo, cuyo drenaje es hacia el Océano Pacífico.

De acuerdo con Razo y colaboradores (2003), las zonas semi-árida, con una mayor evaporación en comparación con la precipitación, genera cambios a nivel químico en el suelo, lo que potencializa la toxicidad de los minerales que conforman a los residuos mineros, e incluso llegan a cambiar la especiación química de los elementos, cuando éstos entran en contacto con otros minerales con los que guardan ciertas afinidades químicas. Sin embargo, las pruebas de DRX no mostraron neoformación de

## CAPÍTULO VI

minerales, por lo que se presupone existe cierta estabilidad química en el área de estudio, aun cuando climatológicamente este catalogada como zona semi-árida.

Por otra parte, las características meteorológicas del área de estudio señalan que las lluvias que se presentan a partir de periodos de retorno de 5 años y hasta 200 años, desarrollan escurrimientos capaces de arrastrar partículas que van desde un tamaño de arcillas de 0.02 mm, hasta bloques de alrededor de 10 mm, estos últimos solo pueden ser movilizados por escurrimientos mayores a 1.0 m/s, por lo que, algunas de estas partículas son depositadas en la porción media de la cuenca.

Los escurrimientos son desarrollados en cauces bien definidos. Dentro del área de estudio, el cauce con mayores dimensiones es el arroyo San Antonio y se localiza justo en la zona donde se encuentran los terreros, así que cualquier corriente secundaria que se desarrolla o pasa por la zona de los residuos mineros va a la corriente principal y esta los transporta hacia la porción media y baja de la cuenca.

La presencia de al menos una lluvia extraordinaria por año, se debe al paso de huracanes, esta desarrolla un proceso de erosión anual en la cuenca, dado que la característica principal de dichas lluvias extraordinarias es que son de corta duración y gran intensidad, lo que genera el proceso de escurrimiento sin pasar por el proceso de infiltración dentro del ciclo hidrológico, de ahí deriva su capacidad erosiva.

Los escurrimientos que se dan en el área de estudio, adquieren una velocidad suficiente para arrastrar partículas casi de forma inmediata al presentarse una lluvia. En los periodos de retorno de 100 y 200 años, las velocidades fueron superiores a 5.0 m/s, de acuerdo con el diagrama de Hjulstrom, estas velocidades ya son capaces de erosionar cualquier partícula este consolidada o disgregada.

Las velocidades mayores a 5.0 m/s se alcanzan en la porción alta de la cuenca, donde están depositados los terreros y el jal. El mayor porcentaje de partículas que compone a los terreros son las gravas y bloques de entre 2-0 y 10 mm, estas partículas pueden ser fácilmente transportadas con las velocidades que se presentan en la porción alta de la cuenca. Ya en la porción media y baja de la

## CAPÍTULO VI

cuenca, los porcentajes mayores de los tamaños de sedimento que predominan son del tamaño de arenas gruesas de 0.5-2.0 mm.

Al predominar las partículas gruesas o mayores a 0.5 mm (Datos en Anexo, apartado C) en todas las porciones de la cuenca, se concluye que el As va contenido en partículas con un tamaño mínimo de 0.5 mm, lo que hace evidente que no es el agente eólico el que transporta a las partículas que componen a los terreros hacia las zonas más bajas de la cuenca. Incluso, por ello se puede afirmar que las concentraciones altas de As no llegan hasta el Mar de Cortés, debido a que la velocidad del flujo ya no es capaz de movilizar a las partículas mayores a 0.5 mm, y estas son depositadas en la cuenca de San Juan de Los Planes.

La prueba decisiva para optar por el agente hídrico como el principal responsable de la dispersión de As fue la representación cartográfica de los resultados de FRX, al generar un mapa temático de la pluma de distribución de As, se confirmó que la distribución del elemento comenzaba en las porciones altas, dónde se localizan los terreros éstas concentraciones disminuían conforme se llegaba a la porción media y baja de la cuenca y lo más importante, la pluma de distribución tuvo la misma configuración que la del arroyo San Antonio.

Hay un sitio en donde las condiciones geológicas cambian, y este cambio en la litología genera también un cambio en la concentración del As. El As está presente en altas concentraciones (300-500 mg/kg) cuando se encuentra sobre el aluvión, que tiene como característica principal contener material disgregado; cuando el aluvión cambia a un conglomerado polimíctico, las concentraciones de As disminuyen a menos de 114 mg/kg, el valor natural.

De las observaciones que se hicieron a la geología, aunado con la integración de los datos del As, se concluye que las concentraciones de As que superan los valores de 114 mg/kg, son de origen antrópico y que provienen de la superficie terrestre, y su fuente principal son los terreros. Además, la movilidad del As es reciente, dado que se encuentra en mayores concentraciones sobre el aluvión que es material no consolidado y fácilmente transportado, y no sobre el conglomerado polimíctico, que

## CAPÍTULO VI

entre otras características, es que está compuesto por distintas variedades de roca que son depositadas en el sitio de su consolidación.

Si las concentraciones bajan en el conglomerado, significa que éste se consolidó antes de que se depositaran las partículas de los terreros sobre esta zona, y que el material que lo constituye son rocas con un contenido de As natural.

Los datos meteorológicos son imprescindibles para el modelo matemático que simula los escurrimientos de la zona de estudio. Sin una buena base meteorológica, la relación de las variables velocidad del flujo y tamaño de partícula, con la distribución del As sería casi imposible. Si los datos meteorológicos están incompletos, se propicia que los resultados de la modelación matemática no tengan congruencia, y esto deriva en poca certidumbre de los resultados de las simulaciones de escurrimiento. Los resultados meteorológicos analizados en la investigación, fueron datos completos que presentaron congruencia y una buena relación con la distribución del As.

Por lo anterior, se concluye que el modelo matemático *Flubidi* es capaz de reproducir los flujos superficiales de forma satisfactoria, y que en gran medida el éxito del modelo se obtiene de un buen análisis de los datos meteorológicos. Además, dicho modelo ha sido utilizado en otras áreas principalmente hidráulicas (Carrillo, 2000) y planes y programas gubernamentales como el caso del Atlas de Riesgo por Inundaciones presentado por CONAGUA en 2014 (CONAGUA, 2014).

En cuanto a la última fase del estudio, la evaluación de la dispersión hídrica de As, al relacionar las velocidades del escurrimiento en diferentes periodos de retorno, junto con la granulometría de los sedimentos, tal como lo genera Hjülstrom, en su método experimental (ver capítulo IV); se confirmó que si existe relación de la movilización del As en un tamaño de partícula de 2.0 - 8.0 mm para la composición de los terreros y de 0.5 - 2.0 mm, para la porción media y baja de la cuenca.

Por los resultados de la caracterización elemental en partículas finas FRX (Ver anexos, apartado B) y por los resultados de las curvas granulométricas (Ver anexos, apartado C) en los terreros y sedimentos del cauce principal que movilizan al As, se concluye que el As está contenido en partículas

## CAPÍTULO VI

> 0.05 mm y este tamaño de partícula sólo puede ser movilizado por el agente hídrico. Las partículas de limos y arcillas de acuerdo con el diagrama de Hjulstrom ( $< 0.05$  mm), cuando se encontraron en las muestras, éstas representaron menos del 1% de la muestra. Al tamizar los 100 gr de muestra para medirla por el equipo de FRX era tan pequeña la cantidad de limos y arcillas que fue imposible separarla del material de arenas finas, por lo que se decidió incluir a esas partículas en el tamizado de las arenas finas ( $> 0.05-2.0$  mm).

Las relaciones entre las variables físicas del área de estudio y la distribución del As permitieron primeramente identificar el origen de las altas concentraciones de As, también se pudo identificar al agente que moviliza y genera la pluma de distribución del elemento y el tamaño de partículas en las que frecuentemente este se transporta.

La modelación de la velocidad de los escurrimientos permitió establecer un radio de influencia para la movilidad del As. La relación con el proceso de erosión, transporte y depósito de acuerdo con los tamaños de partículas, en diferentes periodos de retorno de las lluvias, permite establecer escenarios de movilización de As a corto, mediano y largo plazo, así como las zonas más afectadas por la movilidad hídrica.

La representación cartográfica y la elaboración de un mapa base (MDE), así como los mapas temáticos, permiten tener un panorama más claro, y permiten un mejor análisis de las variables físicas y la distribución del As. La relación e integración de los mapas temáticos, facilita la evaluación de la dispersión del As y pone en evidencia las zonas donde se debe prestar un mayor interés, así como los sitios donde ambientalmente se debe dar paso a una evaluación más profunda, o utilizando otro tipo de variables como la geoquímica.

La evaluación de la dispersión hídrica de As es un elemento fundamental si se requiere hacer un estudio ambiental en zonas mineras. Esta evaluación es el paso previo a los estudios geoquímicos y estudios de geodisponibilidad de los EPT, dado que se identifican los patrones de distribución, las zonas de atenuación y las zonas de mayor concentración. También se conocen los agentes que movilizan a los EPT, para su posterior prueba de calidad ambiental.

## CAPÍTULO VI

La fusión de las evaluaciones físicas y geoquímicas de zonas mineras da como resultado una evaluación ambiental de las características físicas del ecosistema y las características químicas de los contaminantes que permiten reconocer el nivel de toxicidad en la que se encuentra un EPT, y dan apertura a los estudios de administración de riesgos a la salud y remediación de sitios contaminados por la por la presencia de EPT en zonas mineras.

**BIBLIOGRAFÍA.**

- Adriano, D. (2001). *Trace Elements in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, Bioavailability and Risk of Metals*. New York: Springer.
- Albert, L. (2012). *Curso básico de toxicología ambiental*. México: Limusa.
- AMEC. (2011). *San Antonio-El Triunfo Gold Project, Baja California Sur, Mexico. NI 43-101 Technical Report*. La Paz: Amec.
- Bautista, F. (1999). *Introducción al estudio de la contaminación del suelo por metales pesados*. México: Universidad Autónoma de Yucatán.
- Behak, L., & Peres Núñez, W. (2008). Caracterización de un material compuesto por suelo arenoso, ceniza de cáscara de arroz y cal potencialmente útil para suelo de pavimentación. 34-41.
- Benavides, L., & Risso, W. (1991). Gestión de residuos peligrosos y el programa regional del CEPIS. *Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente*, 1-8.
- Bidudhendra, S. (2002). *Heavy Metals in the Environment*. New York: Marcel Dekker.
- Boggs, S. (2006). *Principles of Sedimentology and Stratigraphy*. United States of America: Pearson Prentice Hall.
- Bryan, G. (1976). *Heavy Metals Contamination in the sea*. London: Academic Press.
- Bundschuh, J., Pérez Carrera, A., & Litter, M. (2008). *Distribución de arsénico en las regiones Ibérica e Iberoamericana*. España: Cyted.
- Campbell, J. B., & Randolph Wynne, H. (2011). *Introduction to Remote Sensing*. New York: Guilford Press.
- Campos A. (1987). *Procesos del Ciclo Hidrológico*. México D.F.: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Canet Miquel, C., & Camrubí i Cano, A. (2013). *Yacimientos minerales. Los tesoros de la tierra*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Canet, C., Hernández-Cruz, B., Jiménez-Franco, A., Pi, T., Peláez, B., Villanueva-Estrada, R., y otros. (2015). Combining ammonium mapping and short-wave infrared (SWIR) reflectance spectroscopy to constrain a model hydrothermal alteration for the Acozulco geothermal zone, Eastern Mexico, Geothermics. *Geothermics*, 154-165 .
- Capó Martí, M. (2007). *Principios de ecotoxicología*. Madrid: Tébar.
- Carrillo Sosa, J. (2000). Modelo matemático para el cálculo de la hidrodinámica de cuerpos de agua (Flujo bidimensional). *Tesis para obtener el grado de maestro en Ingeniería*. México.
- Carrillo, A., & Drever, J. (1998). Environmental assessment of potential for arsenic leaching into groundwater from mine wastes in Baja California Sur, Mexico. *Geofísica Internacional*, 1-8.
- Carrillo, S. J. (2000). Modelo matemático para el cálculo de la hidrodinámica de cuerpos de agua (Flujo Bidimensional). *Tesis de Maestría en Ingeniería (Hidráulica)*. México.
- Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental, C. (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*. México D.F.: Instituto Nacional de Ecología.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres, C. (1997). Programa para ajuste de funciones de probabilidad univariada AX.EXE, versión 1.0. *Sistema Nacional de Protección Civil*. México.
- Cepeda, J. M. (2009). *Química de suelos*. México: Trillas.
- Cervantes, C., & Moreno, R. (1999). *Contaminación ambiental por metales pesados: Impacto en los seres vivos*. México: A.G.T.
- Chen, C. L. (1983). Rainfall Intensity-Duration-Frequency Formulas. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1603-1621.
- Chow, V. T. (1994). *Hidrología Aplicada*. Colombia: McGraw-Hill.
- Cohrssen, J. a. (1989). *Risk Analysis: A guide to principles and methods for analyzing Health and Environment Risk*. Washington: National Technical Information Service, U. S.
- Compañía Minera Pitalla, S. (2011). *Proyecto minero San Antonio*. La Paz: Minera Pitalla.
- Connel, D., & Miller, G. (1984). *Chemistry and Ecotoxicology of pollution*. Canadá: John Wiley and Sons.

- Cruz Páez, E. (2008). *Espectrometría de reflectancia (SWIR), aplicada para el mapeo de alteración*. Distrito Minero Mulatos: Proyecto La India.
- Csuros, M., & Csuros, C. (2002). *Environmental Sampling and analysis for metals*. New York: Lewis Publishers.
- Delendatti, G. (2003). Caracterización de zonas de alteración hidrotermal en las imágenes del río Castaño, provincia de San Juan, mediante procesamiento digital de imágenes TM. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 97-108 .
- Depledge, M., Weeks, J., & Bjerregaard, P. (1998). *Heavy Metals in: Handbook of Ecotoxicology*. England: Blackwell.
- Diario Oficial de la Federación, D. (15 de enero de 2009). Norma Oficial Mexicana NOM-157-SEMARNAT-2009. *Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros*. Ciudad de México, México: Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Diario Oficial de la Federación, D. (30 de 08 de 2011). *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado el 15 de 03 de 2014, de SEGOB: [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5206928&fecha=30/08/2011](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5206928&fecha=30/08/2011)
- Diario Oficial, N. (15 de julio de 1991). *Directiva 91/414/CEE del Consejo*. Recuperado el 2014 de agosto de 15, de [www.magrama.gob.es/es/agricultura/legislación/directiva-91-414-cee\\_tmc7-139842.pdf](http://www.magrama.gob.es/es/agricultura/legislación/directiva-91-414-cee_tmc7-139842.pdf)
- Diez, J., Kidd, P., & Monterroso, C. (2002). Biodisponibilidad de metales en suelos y acumulación en plantas en el área de tras-os-montes (NE Portugal): influencia del material original. *Edafología*, 313-328.
- Doyle, F. J. (1978). Digital terrain models: an overview. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 184-1485.
- Dudley, H. (1976). *Spectroscopy* (Vol. 13). United States: Academic Press.
- Elliott Munro, S. (2010). *El río y la forma. Introducción a la Geomorfología*. Santiago de Chile: RIL.
- Espino Ortega, V. (01 de 01 de 2009). *Biblioteca Central*. Recuperado el 15 de noviembre de 2014, de <http://132.248.9.195/ptd2014/febrero/304695335/Index.html>
- Fergusson, J. (1990). The heavy elements: chemistry environmental impact and health effects. *Pergamon Press*, 50-62.
- Fernández-Martínez, R., Loredo, J., Ordóñez, A., & Rucandio, M. (2005). Physicochemical characterization and mercury speciation of particle-size soil fractions from an abandoned mining area in Mieres . *Environmental Pollution*, 2, 217-226.
- Ferrier, G., Hudson-Edwards, K. A., & Pope, R. J. (2008). Characterization of the environmental impact of the Rodalquilar mine, Spain by ground-based reflectance spectroscopy. *100*, 11-19.
- Fjeld, A., Eisenberg, A., & Compton, L. (2007). *Quantitative Environmental Risk: analysis for human health*. New Jersey: Wiley-Interscience.
- Food and Agriculture Organization, F. (2000). *Relaciones tierra-agua en cuencas hidrográficas rurales: actas del taller electrónico organizado por la Dirección del Fomento de Tierras y Aguas de la FAO*. Jequetepeque, Perú: FAO.
- Fuentes, O., Dominguez, R., & Franco, V. (1981). Relación entre la precipitación y Escurrimiento. *Manual de Diseño de Obras Civiles, Sección Hidrotécnica, C.F.E.*, 66.
- Fukushi, K., Saak, M., Sato, T., Yanase, N., & Amano, H. (2003). A natural attenuation of arsenic in drainage from an abandoned arsenic mine dump. *Appl. Geochem.*, 1267-1278.
- Gálvez, V. (1922). Exploración en la Península de Baja California. *Instituto Geológico de México*, 1-25.
- García, M. A., Cabeza, A., & De la Torre, A. (2006). Fundamentos del método Rietveld. En V. Esteve, *El método de Rietveld* (Vol. 9, págs. 67-104 ). España: Universitat Jaume I.
- Gesellschaft Für Technische Zusammenarbeit, G. (2004). *El análisis del riesgo, una base para la gestión del riesgo de desastres naturales*. GTZ.
- Gieré, R., & Sidenko, N. V. (2003). The role of secondary minerals in controlling the migration of arsenic and metals from high-sulfide wastes (Berikul gold mine, Siberia). *Applied Geochemistry*, 18, 1347-1359 .
- Hauff, P. L. (1993). *Mineral Identification System and Spectral Library*. Arvada, Colorado: SpectralInternational Inc.

## BIBLIOGRAFÍA

- Heikkinen, P. M., Räisänen, M. L., & Johnson, R. H. (2009). Geochemical Characterisation of Seepage and Drainage Water Quality from Two Sluphide Mine Tailings Impoundments: Acid Mine Drainage versus Neutral Mine Drainage. *Mine Water Environ*, 30-49.
- Herdrick, M., & Giroux, H. (2009). *Technical Report and Resource Update, San Antonio Gold Project*. Baja California Sur: amec.
- Holguín Quiñones, S., Estrada Guerrero, D. J., & Chávez Martínez, M. (2000). *Métodos de separación de elementos metálicos*. Distrito Federal: UAM, Azcapotzalco.
- Hooda, P. (2010). *Trace Element in Soils*. United Kingdom: Wiley & Sons.
- Instituto Geológico de México. (1922). Exploración en la Península de Baja California. 1-108.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, I. (15 de junio de 2013). Curvas topográficas del área de San Antonio G12F12. Aguascalientes, Ags., México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, I. (15 de junio de 2013). Conjunto topográfico claves: F12B13,F12B14,F12B23,F12B24. Aguascalientes, México.
- Jambor, J. L. (2000). The relationship of mineralogy to acid and neutralization-potential values in ARD. En J. D. Cotter-Howells, L. S. Campbell, E. Valsami-Jones, & M. Batchelder, *Environmental Mineralogy: Microbial interactions, Anthropogenic Influences, Contaminated Land and Waste Management* (págs. 141-159). London: Mineral Society.
- Joly, F. (1988). *La cartografía*. Barcelona: Oikos-Tau.
- Lo Castro, D. M., Andronico, D., Cassisi, C., & Montalto, P. (2011). Implementazione di una nuova procedura per caratterizzare la forma di particelle mediante misure al CAMSIZER e algoritmi di clustering. 1-17.
- Lottermoser, B. (2007). *Mine Wastes, Characterization, Treatment, Environmental impacts*. Ney York: Springer.
- Magdaleno Rico, C. (01 de 01 de 2009). *Biblioteca Central*. Recuperado el 15 de noviembre de 2014, de Universidad Nacional Autónoma de México: <http://132.248.9.195/ptd2014/enero/0708057/Index.html>
- McLemore, V. (2008). *Basic of metal mining influenced water, Society for mining, metallurgy, and Exploration*. USA.
- Mejía , J., Carrizales, L., Rodríguez, V. M., Jiménez-Capdeville, M. E., & Díaz-Barriga, F. (1999). Un método para la evaluación de riesgos para la salud en zonas mineras. *Salud Pública Méx.*, 132-140.
- Melgarejo, C. J., Proenza, J. J., Galí, S., & Llovet, X. (2010). Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 32, 1-23.
- Molina, A. (2012). *Contaminantes atmosféricos primarios*. México: Limusa.
- Morin, K. A., & Hutt, N. M. (2001). Prediction of water chemistry in mine lakes: The minewall technique. *Ecological Engineering*, 125-132.
- National Research Council, N. (1983). *Issues in risk assessment*. Washington: National Academic Press.
- Nieboer, E., & Richardson, D. (1980). The replacement of the nondescript term "heavy metals" by biologically and chemically significant classification of metal ion. *Environmental pollution (SERIE B)*, 3-26.
- Nies, H. (1999). Microbian heavy metal resistance. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 730-750.
- Parrot, J. F. (30 de Junio de 2013). *Instituto de Geografía*. Recuperado el 5 de septiembre de 2013, de <http://www.igeograf.unam.mx/departamentos/LAGE/manuales/html>
- Parrot, J. F., & Ochoa Tejada, V. (2005). Generación de Modelos Digitales de Terreno raster. Método de digitalización. En T. Universitarios, *Geografía para el siglo XXI* (pág. 31). México: Instituto de Geografía, UNAM.
- Parrot, J. F., & Ramírez Núñez, C. (27 de septiembre de 2014). Modelos Digitales del Terreno. *X Diplomado en Geomática*. Ciudad Universitaria, Instituto de Geografía.
- Pastor Giraud, A. (1922). *Exploración geológica en la región de La Purisima*. México: Talleres gráficos de México.
- Pertierra, P., García-Granada, P., & Salvadó, M. S. (2006). Fuentes de información en difracción de polvo. Bibliotecas de programas y estructuras. En V. Esteve, *El método de Rietveld* (Vol. 9, págs. 155-172). España: Universitat Jaume I.

## BIBLIOGRAFÍA

- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, P., & Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo, T. (2007). *Global Environmental Facility, Manual de Evaluación y Gestión del Riesgo asociado a los COP*. Bogotá: Dirección de Desarrollo Sectorial Sostenible.
- Queralt, I., & Plana, F. (1993). Partitioning of heavy metals in particle-size fractions: a tool to predict metal mobility and distribution in the environment. *Soil & Environment, 1*, 276-278.
- Razo, I., Carrizales, L., Castro, J., Díaz-Barriga, F., & Monroy, M. (2003). Arsenic and heavy metal pollution of soil, water and sediments in semi-arid climate mining area in Mexico. *Water, Air and Soil Pollution, 129*-152.
- Rencz, A., & Ryerson, R. (1999). *Manual of Remote Sensing, Remote Sensing for the Earth Sciences* (Vol. 3). John Wiley & Sons.
- Rognerud, S., & Fjeld, E. (2001). Trace Element Contamination of Norwegian Lake Sediment, *AMBIO. Journal of the Human Environment, 11*-19.
- Romero, F. M., Armienta, M. A., & González, G. H. (2007). Solid- phase control on the mobility of potentially toxic elements in an abandoned lead/zinc mine tailings impoundment, Taxco Mexico. *Applied Geochemistry, 22*, 109-127.
- Romero, F. M., Armienta, M. A., Gutiérrez, M. E., & Villaseñor, G. (2008). Factores geológicos y climáticos que determinan la peligrosidad y el impacto ambiental de jales mineros. *Rev. Int. Contam. Ambient., 43*-54.
- Ruiz-Armienta, J. R., & Prol-Ledesma, R. M. (1998). Techniques for enhancing the spectral response of hydrothermal alteration minerals in Thematic Mapper images of Central Mexico. *INT. J. Remote Sensing, 19*, 1981-2000.
- Salazar Salinas, L. (1922). *Peninsula de Baja California*. México: Talleres gráficos de la nación.
- Secretaría del Medio Ambiente, S., & Instituto Nacional de Ecología, I. (2012). *Evaluación del Impacto Ambiental*. México: INE-SEMARNAT.
- Servicio Geológico Mexicano, S. (1996). Carta Geológico-Minera. *San Juan de los Planes F12B14*. Pachuca, Hidalgo, México: Secretaría de Economía.
- Servicio Geológico Mexicano, S. (1996). Carta Geológico-Minera. *San Antonio F12B13*. Pachuca, Hidalgo, México: Secretaría de Economía.
- Servicio Geológico Mexicano, S. (1996). Carta Geológico-Minera San Antonio F12B13. Pachuca, Hidalgo, México: SGM.
- Servicio Meteorológico Nacional, S. (15 de agosto de 2010). *Comisión Nacional del Agua*. Recuperado el 15 de agosto de 2013, de Servicio Meteorológico Nacional: [http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=42&Itemid=75](http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=75)
- Siegel, F. (2002). *Environmental Geochemistry of Potentially Toxic Metals*. Germany: Springer.
- Suryantini, E., Ruitenbeek, F., & Van Der Meer, F. (2008). The effect of weathering on reflectance spectra of hydrothermal white micas and chlorites: Implications for alteration mapping. En M. Jingwen, & F. Bierlein, *Proceedings of the Eighth Biennial Sga Meeting, Beijing, China* (págs. 6-27). Beijing.
- Swaine, D. J. (2000). Why trace element are important. *Fuel Processing Technology, 21*-33.
- Taud, H., Parrot, J. F., & Álvarez, R. (1999). DTM generation by contour line dilation. *Computer and Geoscience, 775*-783.
- U. S. Geological Survey. (2014 de 03 de 11). *Earth explorer*. Recuperado el 20 de 05 de 2013, de <http://earthexplorer.usgs.gov/>
- U. S. Geological Survey, U. (30 de octubre de 2010). *Risk-based applications of geoenvironmental mineral deposit models in mineral exploration*,. Recuperado el 10 de agosto de 2013, de mine planning, operations, closure, and remediation: [http://crustal.usgs.gov/projects/gem\\_applications/index.html](http://crustal.usgs.gov/projects/gem_applications/index.html)
- Velasco, F., Saioa, S. A., Herrero, J. M., & Yusta, I. (2005). Mapping Fe-bearing hydrated sulphate minerals with short wave infrared (SWIR) Spectral Analysis at San Miguel mine environment, Iberian Pyrite Belt (SW Spain). *Geochemical Exploration, 87*, 45-72.
- Vernet, J. (1991). *Heavy Metals in Environment*. Amsterdam: Elsevier Science.

## BIBLIOGRAFÍA

- Vibhuti, N., Misra, P. S., Reddy, R. K., & Mohapatra, K. (2004). *Mineral Characterisation and Processing*. Allied Publishers.
- Williams, M. (2000). Arsenic in mine waters: an international study. 267-278.
- Wormald, J. (1979). *Diffraction Methods*. Oxford: Clarendon Press.
- Zegarra Macchisvello, D., & Frías Martinelli, Ó. (2003). Toxicología ambiental en minería: Herramientas para la evaluación del impacto. *Esan-cuadernos de difusión*, 39-47.

**ANEXOS.**

**Apartado A.  
Resultados de DRX**

Los difractogramas se obtuvieron en un difractómetro Shimadzu XRD-6000 equipado con un filtro de Ni, tubo de cobre y micromador, del Laboratorio de DRX del Instituto de Geología de la UNAM.

De las 14 muestras tomadas en campo se analizaron únicamente las representativas por cambios granulométricos en sedimentos, la muestra con los valores más altos de arsénico y la muestra con granulometrías mayores de los terreros.

Muestra	ID	Peso del material (gr./100gr.)	
		Grueso	Fino
M14_ La Aurora (terrero)	1089	85.07	16.6
M21_ La Colpa (jal)	1085	66.38	35.32
SED05 (sedimento)	1101	78.75	23.84
SED12 (sedimento)	1091	86.84	15.67
SED07 (sedimento)	1103	81.96	19.09
SED02 (sedimento)	1099	51.44	50.92

Evaluación de la dispersión hídrica de Arsénico en el Distrito Minero de San Antonio- El triunfo, Baja California Sur.

ANEXOS

Nº	MUESTRA	FASES IDENTIFICADAS	Fichas PFD	Cr	Observaciones
1	M21Malla30 121831(1085)	Scorodita: FeAsO <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O Cuarzo: SiO <sub>2</sub> Yeso: CaSO <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O)  Filosilicatos a ~12Å y ~10Å	[18-654] [46-1045] [33-311]	49	
2	M21 125530(1085)	Scorodita: FeAsO <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O Cuarzo: SiO <sub>2</sub> Yeso: CaSO <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O)  Filosilicatos a ~12Å y ~10Å	[18-654] [46-1045] [33-311]	48	Muy similar a la muestra fina
3	Sed14 100313(1089)	Cuarzo: SiO <sub>2</sub> Clinocloro: (Mg,Al,Fe) <sub>6</sub> ((SiAl) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub> Talcó: (Mg) <sub>10</sub> (Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> Mica tipo Moscovita (K,Ca,Na) (Al,Mg,Fe) <sub>2</sub> (SiAl) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) Anfibol tipo magnesioarfvedsonita: NaK <sub>3</sub> (FeMgAl) <sub>5</sub> Si <sub>8</sub> O <sub>22</sub> (F,OH) <sub>2</sub>	[46-1045] [7-165] [13-558 ] [25-0649] [23-0495]	35	Para la identificación detallada de los filosilicatos se sugiere separación de la fracción arcilla (<2micras).
4	Sed14 Malla30 103647(1089)	Cuarzo: SiO <sub>2</sub> Clinocloro: (Mg,Al,Fe) <sub>6</sub> ((SiAl) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub> Talcó: (Mg) <sub>10</sub> (Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> Mica tipo Moscovita (K,Ca,Na) (Al,Mg,Fe) <sub>2</sub> (SiAl) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) Anfibol tipo ferropargasita o similar: NaCa <sub>2</sub> Fe <sub>4</sub> AlSi <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>	[46-1045] [7-165] [13-558 ] [25-0649] [26-1372]	35	Para la identificación detallada de los filosilicatos se sugiere separación de la fracción arcilla (<2micras). Muy similar a la muestra fina.

Nº	MUESTRA	FASES IDENTIFICADAS	Fichas PFD	Cr	Observaciones
5	Sed12 111057(1091)	Cuarzo: SiO <sub>2</sub> Plagioclasa Intermedia: (CaNa)(SiAl) <sub>4</sub> O <sub>8</sub> Anfibol tipo ferropargasita o similar: NaCa <sub>2</sub> Fe <sub>4</sub> AlSi <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>  Filosilicatos a ~12Å , ~10Å y ~7Å	[46-1045] [18-1202] [26-1372]	50	Para la identificación detallada de los filosilicatos se sugiere separación de la fracción arcilla (<2micras).
6	Sed12 Malla30 114732(1091)	Cuarzo: SiO <sub>2</sub> Plagioclasa Intermedia: (CaNa)(SiAl) <sub>4</sub> O <sub>8</sub> Anfibol tipo ferropargasita o similar: NaCa <sub>2</sub> Fe <sub>4</sub> AlSi <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>  Filosilicatos a ~12Å , ~10Å y ~7Å	[46-1045] [18-1202] [26-1372]	50	Mayor proporción de arcilla que en la fracción más gruesa.
7	Sed07Malla30 114304	Cuarzo: SiO <sub>2</sub> Plagioclasa Intermedia: (CaNa)(SiAl) <sub>4</sub> O <sub>8</sub> Anfibol tipo ferropargasita o similar: NaCa <sub>2</sub> Fe <sub>4</sub> AlSi <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub> Feldespató Potásico tipo anortoclasa(Na,K)(Si <sub>3</sub> Al)O <sub>8</sub>  Filosilicatos a ~12Å , ~10Å y ~7Å	[46-1045] [18-1202] [26-1372] [9-478]	50	Mayor proporción de arcilla que en la fracción más gruesa.
8	Sed07 121639(1103)	Cuarzo: SiO <sub>2</sub> Plagioclasa Intermedia: (CaNa)(SiAl) <sub>4</sub> O <sub>8</sub> Anfibol tipo ferropargasita o similar: NaCa <sub>2</sub> Fe <sub>4</sub> AlSi <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub> Feldespató Potásico tipo anortoclasa(Na,K)(Si <sub>3</sub> Al)O <sub>8</sub>  Filosilicatos a ~10Å y ~7Å	[46-1045] [18-1202] [26-1372] [9-478]	55	Para la identificación detallada de los filosilicatos se sugiere separación de la fracción arcilla (<2micras).

Evaluación de la dispersión hídrica de Arsénico en el Distrito Minero de San Antonio- El triunfo, Baja California Sur.

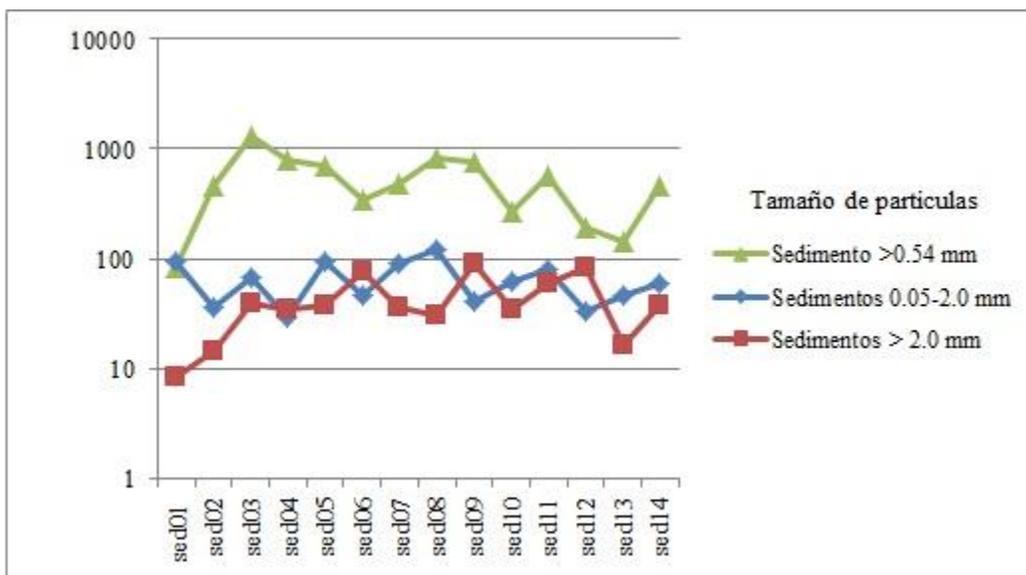
ANEXOS

Nº	MUESTRA	FASES IDENTIFICADAS	Fichas PFD	Cr	Observaciones
9	Sed05Malla30 152552	Cuarzo: SiO <sub>2</sub> Plagioclasa Intermedia: (CaNa)(SiAl) <sub>4</sub> O <sub>8</sub> Anfibol tipo ferropargasita o similar: NaCa <sub>2</sub> Fe <sub>4</sub> AlSi <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub> Feldespató Potásico tipo anortoclasa(Na,K)(Si <sub>3</sub> Al)O <sub>8</sub>  Filosilicatos a ~12Å , ~10Å y ~7Å	[46-1045] [18-1202] [26-1372] [9-478]	48	
10	Sed05155927( 1101)	Cuarzo: SiO <sub>2</sub> Plagioclasa Intermedia: (CaNa)(SiAl) <sub>4</sub> O <sub>8</sub> Anfibol tipo ferropargasita o similar: NaCa <sub>2</sub> Fe <sub>4</sub> AlSi <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub> Feldespató Potásico tipo anortoclasa(Na,K)(Si <sub>3</sub> Al)O <sub>8</sub>  Filosilicatos a ~12Å , ~10Å y ~7Å	[46-1045] [18-1202] [26-1372] [9-478]	55	
11	Sed02Malla30	Cuarzo: SiO <sub>2</sub> Plagioclasa Intermedia: (CaNa)(SiAl) <sub>4</sub> O <sub>8</sub> Anfibol tipo ferropargasita o similar: NaCa <sub>2</sub> Fe <sub>4</sub> AlSi <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>  Filosilicatos a ~12Å , ~10Å y ~7Å	[46-1045] [18-1202] [26-1372]	50	Escasa proporción de arcilla
12	Sed02132407	Cuarzo: SiO <sub>2</sub> Plagioclasa Intermedia: (CaNa)(SiAl) <sub>4</sub> O <sub>8</sub> Anfibol tipo ferropargasita o similar: NaCa <sub>2</sub> Fe <sub>4</sub> AlSi <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>  Filosilicatos a ~12Å , ~10Å y ~7Å	[46-1045] [18-1202] [26-1372]	55	Escasa proporción de arcilla

**Apartado B.  
Resultados de FRX**

Los datos de Fluorescencia de Rayos X fueron analizados con el equipo portátil de tercera generación NITON XL3t, analizador útil para la determinación de la composición elemental de residuos mineros.

Sedimentos 0.5-2.0 mm	As (mg/kg)	Sedimentos < 2.0 mm	As (mg/kg)	Sedimentos >0.05 mm	As (mg/kg)
sed01	93.88	sed01	8.23	sed01	84.63
sed02	36.14	sed02	14.16	sed02	468.12
sed03	67.15	sed03	38.9	sed03	1314.98
sed04	28.86	sed04	34.65	sed04	799.95
sed05	93.26	sed05	38.2	sed05	699.86
sed06	47.34	sed06	77.66	sed06	346.02
sed07	92.5	sed07	36.09	sed07	474.48
sed08	122.79	sed08	31.22	sed08	822.51
sed09	40.19	sed09	88.77	sed09	765.07
sed10	62.11	sed10	34.59	sed10	264.09
sed11	80.52	sed11	60.78	sed11	561.22
sed12	33.86	sed12	81.86	sed12	190.58
sed13	46.58	sed13	16.67	sed13	142.43
sed14	59.56	sed14	38.2	sed14	467.3



**Apartado C.**  
**Resultados de granulometrías**

Los análisis de los resultados se obtuvieron por medio del equipo Camsizer®. El equipo mide granulometría y morfometría de sedimentos por métodos ópticos.

Estación	Granulometría [%] y contenido de As [ppm]								As [ppm]
	Arcilla y Limo	As	Ar_Fina	As	Ar_Gruesa	As	Grava	As	
SED-01	-	-	21.33	84.63	43.70	80.52	30.14	8.23	173.38
SED-02	0.27	-	53.74	468.12	39.13	36.14	6.84	14.16	518.42
SED-03	-	-	20.15	1,314.98	37.37	67.15	26.20	38.90	1,421.03
SED-04	-	-	13.11	799.95	29.75	28.86	48.33	34.65	863.46
SED-05	-	-	20.04	699.86	37.22	93.26	29.85	38.20	831.32
SED-08	0.15	-	30.05	822.51	41.76	122.79	28.03	31.22	976.52
SED-06	0.12	-	35.61	346.02	48.56	47.34	15.61	77.66	471.02
SED-07	0.22	-	25.01	474.48	41.09	92.50	33.67	36.09	603.07
SED-11	0.23	-	39.29	561.22	35.62	93.88	24.85	60.78	715.88
SED-09	-	-	32.81	765.07	32.26	40.19	28.32	88.77	894.03
SED-10	0.15	-	32.11	264.09	44.85	62.11	22.87	34.59	360.79
SED-14	0.13	-	19.43	467.30	55.16	59.56	25.27	38.20	565.06
SED-13	0.19	-	53.64	142.43	42.12	46.58	3.95	16.67	205.68
SED-12	0.14	-	18.69	190.58	49.36	33.86	31.80	81.86	306.30
El Polvorín	-	-	13.32	54,809.14	14.11	9,711.68	65.29	10,374.28	74,895.10
La Cruz	-	-	25.12	24,196.84	26.69	16,979.35	43.53	3,030.49	44,206.68
Humboldt	0.34	-	35.02	30,605.22	21.28	4,484.69	43.33	1,018.53	36,108.44
Paloma	-	-	27.30	33,928.18	25.02	5,336.18	40.48	1,263.43	40,527.79
Ocote	-	-	20.38	34,210.39	22.48	11,369.62	40.93	3,735.16	49,315.17
Guasave	-	-	16.79	45,610.56	21.11	13,529.75	59.16	3,810.63	62,950.94
Colpa	-	-	36.42	281,745.47	21.99	106,831.58	29.47	144,100.56	532,677.61
Aurora	-	-	4.98	21,706.23	46.34	6,249.87	47.60	21,152.14	49,108.24
La Reforma	-	-	10.41	22,265.54	28.18	4,775.13	60.17	6,094.11	33,134.78



**INSTITUTO  
DE INGENIERÍA  
UNAM**

**CAM SIZER<sup>®</sup>**



**ANALISIS DE ARENA DE COSTAS MEXICANAS**

Company:	ISNTTUTO DE INGENIERIA UNAM
User:	GBHC
Result file:	C:\CAM SIZER\CAMDAT\ISED_07\SED_07_x_area_20140905_154053_001.rtf
Task file:	C:\CAM SIZER\CAMSYS\ISED_07.atg
Time:	05.09.2014 , 15:40 , duration 5 min 18 s at 1.0 % covered area, Image rate 1:1 and 60 mm feeder
Particle model:	Spheres
No. of particles:	CCD-B - 3300605 , CCD-Z - 277213
Fitting:	no
Material:	SEDIMENTOS DE LA CUENCA MEDIA, LA PAZ
Comment:	01 MAYO 2014

Size class	[mm]	ASTM(+)	No(-)	Retenido [%]	SPHT3	b/3	PDN
0.000 -	0.026	PAN	0.00104*	100.00	0.908	0.819	32548
0.026 -	0.032	0.00104*	#450	100.00	0.908	0.819	8346
0.032 -	0.038	#450	#400	100.00	0.908	0.819	13165
0.038 -	0.045	#400	#325	99.98	0.910	0.859	51306
0.045 -	0.053	#325	#270	99.95	0.910	0.859	218151
0.053 -	0.063	#270	#230	99.91	0.910	0.859	534195
0.063 -	0.075	#230	#200	99.82	0.895	0.809	510548
0.075 -	0.090	#200	#170	99.67	0.872	0.761	546709
0.090 -	0.106	#170	#140	99.44	0.843	0.719	433379
0.106 -	0.125	#140	#120	99.10	0.814	0.690	402611
0.125 -	0.150	#120	#100	98.51	0.784	0.669	404689
0.150 -	0.180	#100	#80	97.63	0.762	0.659	354380
0.180 -	0.212	#80	#70	96.44	0.748	0.653	262492
0.212 -	0.250	#70	#60	94.83	0.741	0.654	234825
0.250 -	0.300	#60	#50	92.60	0.737	0.654	192070
0.300 -	0.355	#50	#45	90.12	0.740	0.657	125224
0.355 -	0.425	#45	#40	87.07	0.757	0.665	90402
0.425 -	0.500	#40	#35	83.69	0.774	0.673	58751
0.500 -	0.600	#35	#30	79.24	0.777	0.670	46124
0.600 -	0.710	#30	#25	74.55	0.785	0.678	28330
0.710 -	0.850	#25	#20	69.06	0.802	0.691	19609
0.850 -	1.000	#20	#18	63.84	0.831	0.715	11483
1.000 -	1.180	#18	#16	58.57	0.831	0.714	7033
1.180 -	1.400	#16	#14	53.23	0.849	0.721	4433
1.400 -	1.700	#14	#12	47.67	0.853	0.718	2787
1.700 -	2.000	#12	#10	43.19	0.845	0.708	1308
2.000 -	2.360	#10	#8	38.80	0.844	0.706	769
2.360 -	2.800	#8	#7	34.41	0.828	0.692	464
2.800 -	3.350	#7	#6	29.69	0.829	0.691	293
3.350 -	4.000	#6	#5	25.37	0.820	0.687	158
4.000 -	4.750	#5	#4	21.40	0.822	0.703	82
4.750 -	5.600	#4	#3.5	18.05	0.782	0.672	44
5.600 -	6.700	#3.5	0.265*	15.14	0.744	0.600	22
6.700 -	8.000	0.265*	0.3125*	12.92	0.752	0.603	10
8.000 -	9.500	0.3125*	0.375*	6.66	0.790	0.668	15
9.500 -	11.200	0.375*	0.4375*	1.89	0.570	0.639	7
> 11.200		> 0.4375*		0.00	0.516	0.651	2



ANALISIS DE ARENA DE COSTAS MEXICANAS

Company:	INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM
User:	GBHC
Result file:	C:\CAMSIZER\CAMDAT\Humbolt\Humbolt_x_area_20140826_171530_001.rdf
Task file:	C:\CAMSIZER\CAMSYS\Humbolt.afg
Time:	26.08.2014 , 17:15 , duration 8 min 30 s at 1.0 % covered area, Image rate 1:1 and 60 mm feeder
Particle model:	Spheres
No. of particles:	CCD-B - 5984087 , CCD-Z - 517073
Fitting:	no
Material:	HUMBOLT(PARTE ALTA DE LA CUENCA)
Comment:	MUESTRA 1 DE MAYO DE 2014

Size class	[mm]	ASTM(+)	No(-)	Retenido [%]	SPHT3	b/3	PDN
0.000 -	0.026	PAN	0.00104*	99.98	0.916	0.873	104704
0.026 -	0.032	0.00104*	#450	99.98	0.916	0.873	24200
0.032 -	0.038	#450	#400	99.97	0.916	0.873	38417
0.038 -	0.045	#400	#325	99.96	0.916	0.873	143145
0.045 -	0.053	#325	#270	99.95	0.916	0.873	527973
0.053 -	0.063	#270	#230	99.86	0.907	0.864	1167327
0.063 -	0.075	#230	#200	99.72	0.899	0.832	976781
0.075 -	0.090	#200	#170	99.46	0.874	0.779	964215
0.090 -	0.106	#170	#140	99.13	0.845	0.740	756103
0.106 -	0.125	#140	#120	98.64	0.817	0.715	700004
0.125 -	0.150	#120	#100	97.78	0.785	0.693	715095
0.150 -	0.180	#100	#80	95.43	0.755	0.675	645532
0.180 -	0.212	#80	#70	94.55	0.728	0.661	536219
0.212 -	0.250	#70	#60	91.81	0.701	0.648	476605
0.250 -	0.300	#60	#50	87.77	0.674	0.638	415125
0.300 -	0.355	#50	#45	83.15	0.644	0.624	279659
0.355 -	0.425	#45	#40	77.92	0.618	0.612	187842
0.425 -	0.500	#40	#35	73.46	0.596	0.604	94999
0.500 -	0.600	#35	#30	69.27	0.600	0.612	52868
0.600 -	0.710	#30	#25	66.21	0.633	0.627	22420
0.710 -	0.850	#25	#20	63.49	0.697	0.657	12157
0.850 -	1.000	#20	#18	61.28	0.755	0.675	5904
1.000 -	1.180	#18	#16	59.04	0.757	0.677	3565
1.180 -	1.400	#16	#14	56.67	0.784	0.670	2402
1.400 -	1.700	#14	#12	53.95	0.791	0.671	1617
1.700 -	2.000	#12	#10	51.58	0.776	0.661	813
2.000 -	2.360	#10	#8	48.96	0.764	0.636	553
2.360 -	2.800	#8	#7	45.82	0.772	0.661	400
2.800 -	3.350	#7	#6	42.64	0.738	0.623	241
3.350 -	4.000	#6	#5	39.24	0.736	0.631	147
4.000 -	4.750	#5	#4	36.31	0.685	0.632	74
4.750 -	5.600	#4	#3.5	33.35	0.642	0.599	45
5.600 -	6.700	#3.5	0.265*	29.78	0.654	0.643	32
6.700 -	8.000	0.265*	0.3125*	23.93	0.646	0.624	29
8.000 -	9.500	0.3125*	0.375*	19.09	0.612	0.588	13
9.500 -	11.200	0.375*	0.4375*	15.10	0.488	0.549	7
11.200 -	13.200	0.4375*	0.530*	12.15	0.451	0.603	3
13.200 -	16.000	0.530*	0.625*	3.29	0.393	0.615	5
> 16.000		> 0.625*		0.00	0.067	0.327	1



CAM SIZER<sup>®</sup>



ANALISIS DE ARENA DE COSTAS MEXICANAS

Company:	INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM
User:	GBHC
Result file:	C:\CAM SIZER\CAMDAT\M16\M16_x_area_20140826_180231_001.rdf
Task file:	C:\CAM SIZER\CAMSYS\M16.atg
Time:	26.08.2014 , 18:02 , duration: 5 min 31 s at 1.0 % covered area, Image rate 1:1 and 60 mm feeder
Particle model:	Spheres
No. of particles:	CCD-B = 4265134 , CCD-Z = 337196
Fitting:	no
Material:	M16 (PORCION ALTA DE LA CUENCA)
Comment:	MUESTRA 1 MAYO DE 2014

Size class	[mm]	ASTM(+)	No(-)	Retenido [%]	SPHT3	b/3	PDN
0.000 -	0.026	PAN	0.00104*	99.99	0.908	0.867	104516
0.026 -	0.032	0.00104*	#450	99.99	0.908	0.867	23872
0.032 -	0.038	#450	#400	99.98	0.908	0.867	32027
0.038 -	0.045	#400	#325	99.98	0.908	0.867	92688
0.045 -	0.053	#325	#270	99.97	0.908	0.867	307407
0.053 -	0.063	#270	#230	99.92	0.895	0.840	659383
0.063 -	0.075	#230	#200	99.84	0.895	0.839	580144
0.075 -	0.090	#200	#170	99.69	0.865	0.772	595511
0.090 -	0.106	#170	#140	99.51	0.848	0.747	470395
0.106 -	0.125	#140	#120	99.21	0.813	0.713	435924
0.125 -	0.150	#120	#100	98.71	0.784	0.694	447641
0.150 -	0.180	#100	#80	97.93	0.754	0.677	395295
0.180 -	0.212	#80	#70	96.87	0.731	0.668	321554
0.212 -	0.250	#70	#60	95.37	0.710	0.661	276706
0.250 -	0.300	#60	#50	93.13	0.688	0.657	244971
0.300 -	0.355	#50	#45	90.53	0.666	0.651	166976
0.355 -	0.425	#45	#40	87.20	0.648	0.649	125796
0.425 -	0.500	#40	#35	83.85	0.633	0.648	75190
0.500 -	0.600	#35	#30	80.13	0.621	0.647	49037
0.600 -	0.710	#30	#25	76.64	0.612	0.645	27345
0.710 -	0.850	#25	#20	73.11	0.647	0.660	15947
0.850 -	1.000	#20	#18	70.06	0.704	0.678	8476
1.000 -	1.180	#18	#16	67.09	0.710	0.679	5040
1.180 -	1.400	#16	#14	64.19	0.751	0.677	3156
1.400 -	1.700	#14	#12	60.72	0.770	0.680	2179
1.700 -	2.000	#12	#10	57.81	0.768	0.675	1044
2.000 -	2.360	#10	#8	54.46	0.746	0.663	744
2.360 -	2.800	#8	#7	50.88	0.752	0.656	462
2.800 -	3.350	#7	#6	46.31	0.729	0.645	355
3.350 -	4.000	#6	#5	42.14	0.711	0.640	184
4.000 -	4.750	#5	#4	37.74	0.691	0.635	119
4.750 -	5.600	#4	#3.5	33.39	0.616	0.615	69
5.600 -	6.700	#3.5	0.265*	29.92	0.519	0.607	34
6.700 -	8.000	0.265*	0.3125*	23.69	0.503	0.619	33
8.000 -	9.500	0.3125*	0.375*	17.34	0.559	0.632	19
9.500 -	11.200	0.375*	0.4375*	12.03	0.607	0.609	9
11.200 -	13.200	0.4375*	0.530*	7.27	0.408	0.535	5
13.200 -	16.000	0.530*	0.625*	3.10	0.509	0.620	3
> 16.000	> 0.625*			0.00	0.759	0.801	1



CAM SIZER<sup>®</sup>



ANALISIS DE ARENA DE COSTAS MEXICANAS

Company:	INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM
User:	GBHC
Result file:	C:\CAM SIZER\CAMDAT\IM16_CuencaAlta2\IM16_CuencaAlta2_x_area_20140901_123908_001.rdf
Task file:	C:\CAM SIZER\CAMSYS\IM16_CuencaAlta2.afg
Time:	01.09.2014 , 12:39 , duration: 8 min 0 s at 1.0 % covered area, Image rate 1:1 and 60 mm feeder
Particle model:	Spheres
No. of particles:	CCD-B = 5203577 , CCD-Z = 377595
Fitting:	no
Material:	LA PAZ CUENCA ALTA
Comment:	01 MAYO 2014

Size class	[mm]	ASTM(+)	No(-)	Retenido [%]	SPHT3	b/3	PDN
0.000 -	0.259	PAN	0.01020"	93.41	0.746	0.681	5173807
0.259 -	0.518	0.01020"	0.02039"	75.39	0.647	0.643	861636
0.518 -	0.777	0.02039"	0.03059"	65.23	0.629	0.645	90618
0.777 -	1.036	0.03059"	0.04079"	59.25	0.733	0.690	18489
1.036 -	1.295	0.04079"	0.05098"	54.90	0.757	0.686	6109
1.295 -	1.554	0.05098"	0.06118"	51.17	0.812	0.693	2952
1.554 -	1.813	0.06118"	0.07138"	47.93	0.799	0.682	1536
1.813 -	2.072	0.07138"	0.08157"	45.15	0.787	0.672	857
2.072 -	2.331	0.08157"	#8	42.51	0.781	0.658	554
2.331 -	2.590	#8	0.10197"	40.16	0.770	0.645	350
2.590 -	2.849	0.10197"	#7	37.91	0.765	0.648	246
2.849 -	3.108	#7	0.12236"	35.63	0.750	0.643	192
3.108 -	3.367	0.12236"	#6	33.72	0.720	0.617	123
3.367 -	3.626	#6	0.14276"	31.46	0.726	0.645	113
3.626 -	3.885	0.14276"	0.15295"	29.67	0.712	0.643	74
3.885 -	4.144	0.15295"	0.16315"	28.06	0.701	0.662	54
4.144 -	4.403	0.16315"	0.17335"	26.36	0.699	0.677	46
4.403 -	4.662	0.17335"	#4	24.96	0.655	0.637	34
4.662 -	4.921	#4	0.19374"	23.52	0.634	0.591	27
4.921 -	5.180	0.19374"	0.20394"	22.55	0.661	0.613	15
5.180 -	5.439	0.20394"	0.21413"	21.12	0.527	0.590	21
5.439 -	5.698	0.21413"	#3.5	19.76	0.560	0.573	16
5.698 -	5.957	#3.5	0.23453"	19.28	0.609	0.604	5
5.957 -	6.216	0.23453"	0.25	18.48	0.447	0.549	8
6.216 -	6.475	0.25"	0.25492"	17.14	0.679	0.653	10
6.475 -	6.734	0.25492"	0.265"	16.68	0.764	0.630	3
6.734 -	6.993	0.265"	0.27531"	14.95	0.698	0.633	11
6.993 -	7.252	0.27531"	0.28551"	13.83	0.408	0.689	6
7.252 -	7.511	0.28551"	0.29571"	13.43	0.674	0.655	2
7.511 -	7.770	0.29571"	0.30591"	12.15	0.598	0.628	6
7.770 -	8.029	0.30591"	0.3125"	11.41	0.766	0.657	3
8.029 -	8.288	0.3125"	0.32630"	11.21	0.806	0.598	1
8.288 -	8.547	0.32630"	0.33650"	10.58	0.451	0.598	2
8.547 -	8.806	0.33650"	0.34669"	9.86	0.788	0.733	2
8.806 -	9.065	0.34669"	0.35689"	8.06	0.663	0.664	5
9.065 -	9.324	0.35689"	0.375"	7.67	0.818	0.832	1
9.324 -	9.583	0.375"	0.375"	6.47	0.689	0.650	2
9.583 -	9.842	0.375"	0.38748"	5.88	0.173	0.485	2
9.842 -	10.101	0.38748"	0.39768"	4.87	0.675	0.514	2
10.101 -	10.360	0.39768"	0.40787"	3.78	0.319	0.622	2
> 10.360		> 0.40787"		0.00	0.267	0.617	5



CAM SIZER<sup>®</sup>



ANALISIS DE ARENA DE COSTAS MEXICANAS

Company:	INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM
User:	GBHC
Result file:	C:\CAMSIZER\CAMDAT\IM17_PALOMAS\IM17_PALOMAS_x_area_20140901_132049_001.rdf
Task file:	C:\CAMSIZER\CAMSYS\IM17_PALOMAS.atg
Time:	01.09.2014 , 13:20 , duration 5 min 37 s at 1.0 % covered area, Image rate 1:1 and 60 mm feeder
Particle model:	Spheres
No. of particles:	CCD-B = 3516320 , CCD-Z = 272393
Fitting:	no
Material:	CUENCA ALTA LA PAZ
Comment:	01 MAYO2014

Size class	[mm]	ASTM(+)	No(-)	Fraccion [%]	Acumulado [%]	Retenido [%]	SPHT3
0.000 -	0.290	PAN	0.01142"	4.50	4.50	95.50	0.712
0.290 -	0.580	0.01142"	0.02283"	13.32	17.82	82.18	0.614
0.580 -	0.870	0.02283"	0.03425"	11.80	29.62	70.38	0.595
0.870 -	1.160	0.03425"	#16	8.24	37.86	62.14	0.665
1.160 -	1.450	#16	0.05709"	5.94	43.80	56.20	0.727
1.450 -	1.740	0.05709"	0.06850"	4.63	48.43	51.57	0.756
1.740 -	2.030	0.06850"	#10	3.56	51.99	48.01	0.759
2.030 -	2.320	#10	#8	2.91	54.90	45.10	0.752
2.320 -	2.610	#8	0.10276"	2.67	57.57	42.43	0.748
2.610 -	2.900	0.10276"	0.11417"	2.27	59.84	40.16	0.718
2.900 -	3.190	0.11417"	0.12559"	2.02	61.86	38.14	0.722
3.190 -	3.480	0.12559"	0.13701"	1.64	63.50	36.50	0.705
3.480 -	3.770	0.13701"	0.14843"	1.79	65.29	34.71	0.673
3.770 -	4.060	0.14843"	#5	1.74	67.03	32.97	0.675
4.060 -	4.350	#5	0.17126"	1.44	68.47	31.53	0.697
4.350 -	4.640	0.17126"	0.18268"	1.62	70.09	29.91	0.604
4.640 -	4.930	0.18268"	0.19409"	0.93	71.02	28.98	0.556
4.930 -	5.220	0.19409"	0.20551"	1.27	72.29	27.71	0.640
5.220 -	5.510	0.20551"	#3.5	0.89	73.18	26.82	0.579
5.510 -	5.800	#3.5	0.22835"	1.34	74.52	25.48	0.626
5.800 -	6.090	0.22835"	0.23976"	0.46	74.98	25.02	0.635
6.090 -	6.380	0.23976"	0.25"	1.05	76.03	23.97	0.653
6.380 -	6.670	0.25"	0.265"	0.81	76.84	23.16	0.722
6.670 -	6.960	0.265"	0.27402"	1.91	78.75	21.25	0.726
6.960 -	7.250	0.27402"	0.28543"	0.93	79.68	20.32	0.633
7.250 -	7.540	0.28543"	0.29685"	1.13	80.81	19.19	0.659
7.540 -	7.830	0.29685"	0.30827"	1.14	81.95	18.05	0.637
7.830 -	8.120	0.30827"	0.3125"	2.45	84.40	15.60	0.579
8.120 -	8.410	0.3125"	0.33110"	2.25	86.65	13.35	0.559
8.410 -	8.700	0.33110"	0.34252"	2.02	88.67	11.33	0.609
8.700 -	8.990	0.34252"	0.35394"	1.66	90.33	9.67	0.657
8.990 -	9.280	0.35394"	0.36535"	1.77	92.10	7.90	0.579
9.280 -	9.570	0.36535"	0.375"	0.00	92.10	7.90	
9.570 -	9.860	0.375"	0.38819"	0.00	92.10	7.90	
9.860 -	10.150	0.38819"	0.39961"	1.90	94.00	6.00	0.271
10.150 -	10.440	0.39961"	0.41102"	0.54	94.54	5.46	0.129
10.440 -	10.730	0.41102"	0.42244"	0.54	95.08	4.92	0.774
10.730 -	11.020	0.42244"	0.4375"	1.83	96.91	3.09	0.568
11.020 -	11.310	0.4375"	0.4375"	0.66	97.57	2.43	0.650
11.310 -	11.600	0.4375"	0.45669"	0.70	98.27	1.73	0.770
> 11.600		> 0.45669"		1.73	100.00	0.00	0.541



INSTITUTO  
DE INGENIERÍA  
UNAM

CAM SIZER<sup>®</sup>



ANALISIS DE ARENA DE COSTAS MEXICANAS

Company:	INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM
User:	GBHC
Result file:	C:\CAM SIZER\CAMDAT\IM15_REFORMA\IM15_REFORMA_x_area_20140901_135406_001.rdf
Task file:	C:\CAM SIZER\CAMSYS\IM15_REFORMA.atg
Time:	01.09.2014 , 13:54 , duration 3 min 50 s at 1.0 % covered area, Image rate 1:1 and 60 mm feeder
Particle model:	Spheres
No. of particles:	CCD-B = 468459 , CCD-Z = 44637
Fitting:	no
Material:	CUENCA ALTA LA PAZ
Comment:	01 MAYO 2014

Size class	[mm]	ASTM(+)	No(-)	Retenido [%]	SPHT3	b/3	PDN
0.000 -	0.308	PAN	0.01211"	99.23	0.747	0.681	548825
0.308 -	0.615	0.01211"	0.02421"	96.22	0.584	0.631	75961
0.615 -	0.922	0.02421"	0.03632"	91.49	0.546	0.633	24557
0.922 -	1.230	0.03632"	0.04843"	86.18	0.563	0.634	9586
1.230 -	1.538	0.04843"	0.06053"	81.38	0.649	0.651	4364
1.538 -	1.845	0.06053"	0.07264"	77.22	0.645	0.652	2041
1.845 -	2.152	0.07264"	0.08474"	73.40	0.648	0.655	1125
2.152 -	2.460	0.08474"	0.09685"	70.04	0.647	0.651	629
2.460 -	2.768	0.09685"	#7	67.53	0.648	0.649	325
2.768 -	3.075	#7	0.12106"	64.91	0.648	0.646	243
3.075 -	3.382	0.12106"	#6	62.39	0.670	0.651	170
3.382 -	3.690	#6	0.14528"	59.94	0.660	0.649	124
3.690 -	3.998	0.14528"	#5	57.42	0.661	0.652	102
3.998 -	4.305	#5	0.16949"	55.20	0.642	0.669	65
4.305 -	4.612	0.16949"	0.18159"	52.33	0.663	0.651	73
4.612 -	4.920	0.18159"	0.19370"	49.92	0.662	0.648	49
4.920 -	5.228	0.19370"	0.20581"	48.06	0.656	0.649	30
5.228 -	5.535	0.20581"	#3.5	45.84	0.713	0.671	32
5.535 -	5.843	#3.5	0.23002"	43.13	0.643	0.624	32
5.843 -	6.150	0.23002"	0.24213"	41.37	0.635	0.669	17
6.150 -	6.457	0.24213"	0.25423"	39.15	0.660	0.638	18
6.457 -	6.765	0.25423"	0.265"	36.99	0.671	0.647	16
6.765 -	7.072	0.265"	0.27844"	34.62	0.655	0.674	15
7.072 -	7.380	0.27844"	0.29055"	32.30	0.631	0.653	13
7.380 -	7.688	0.29055"	0.30266"	29.29	0.663	0.638	15
7.688 -	7.995	0.30266"	0.3125"	26.40	0.575	0.579	11
7.995 -	8.303	0.3125"	0.32687"	25.01	0.748	0.703	7
8.303 -	8.610	0.32687"	0.33898"	22.69	0.592	0.605	8
8.610 -	8.918	0.33898"	0.35108"	20.59	0.634	0.683	6
8.918 -	9.225	0.35108"	0.36319"	18.79	0.617	0.636	4
9.225 -	9.533	0.36319"	0.375"	16.70	0.600	0.567	6
9.533 -	9.840	0.375"	0.38740"	14.92	0.533	0.647	4
9.840 -	10.148	0.38740"	0.39951"	13.36	0.688	0.734	3
10.148 -	10.455	0.39951"	0.41161"	11.19	0.680	0.629	4
10.455 -	10.762	0.41161"	0.42372"	11.19			0
10.762 -	11.070	0.42372"	0.4375"	10.56	0.500	0.448	1
11.070 -	11.378	0.4375"	0.4375"	9.10	0.363	0.675	2
11.378 -	11.685	0.4375"	0.46004"	7.54	0.575	0.620	2
11.685 -	11.993	0.46004"	0.47215"	4.89	0.516	0.594	3
11.993 -	12.300	0.47215"	0.5"	3.94	0.665	0.607	1
> 12.300		> 0.5"		0.00	0.357	0.624	3



ANALISIS DE ARENA DE COSTAS MEXICANAS

Company:	INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM
User:	GBHC
Result file:	C:\CAMSIZER\CAMDAT\M18_LA CRUZ\M18_LA CRUZ_x_area_20140901_142241_001.rdf
Task file:	C:\CAMSIZER\CAMSYS\M18_LA CRUZ.atg
Time:	01.09.2014 , 14:22 , duration 6 min 6 s at 1.0 % covered area, Image rate 1:1 and 60 mm feeder
Particle model:	Spheres
No. of particles:	CCD-B - 2286772 , CCD-Z - 209934
Fitting:	no
Material:	CUENCA ALTA LA PAZ
Comment:	01 MAYO 2014

Size class	[mm]	ASTM(+)	No(-)	Retenido [%]	SPHT3	b/3	PDN
0.000 -	0.273	PAN	0.01073*	97.32	0.738	0.681	2877463
0.273 -	0.545	0.01073*	0.02146*	86.46	0.613	0.626	461848
0.545 -	0.818	0.02146*	0.03219*	75.47	0.561	0.613	93707
0.818 -	1.090	0.03219*	0.04291*	67.96	0.654	0.645	23358
1.090 -	1.363	0.04291*	0.05364*	62.67	0.689	0.661	7665
1.363 -	1.635	0.05364*	0.06437*	58.51	0.744	0.676	3419
1.635 -	1.908	0.06437*	0.07510*	55.03	0.749	0.674	1717
1.908 -	2.180	0.07510*	0.08583*	52.00	0.758	0.674	940
2.180 -	2.453	0.08583*	0.09656*	49.44	0.751	0.661	558
2.453 -	2.725	0.09656*	0.10728*	46.77	0.720	0.645	407
2.725 -	2.998	0.10728*	0.11801*	44.09	0.732	0.652	305
2.998 -	3.270	0.11801*	0.12874*	41.54	0.704	0.644	215
3.270 -	3.543	0.12874*	0.13947*	39.21	0.702	0.644	157
3.543 -	3.815	0.13947*	0.15020*	37.12	0.682	0.626	109
3.815 -	4.088	0.15020*	0.16093*	34.95	0.713	0.665	89
4.088 -	4.360	0.16093*	0.17165*	32.87	0.647	0.612	73
4.360 -	4.633	0.17165*	0.18238*	31.25	0.625	0.577	47
4.633 -	4.905	0.18238*	0.19311*	29.73	0.582	0.621	35
4.905 -	5.178	0.19311*	0.20384*	28.25	0.666	0.614	28
5.178 -	5.450	0.20384*	0.21457*	26.27	0.587	0.616	34
5.450 -	5.723	0.21457*	0.22530*	25.20	0.693	0.663	15
5.723 -	5.995	0.22530*	0.23602*	24.30	0.655	0.626	11
5.995 -	6.268	0.23602*	0.25*	22.99	0.607	0.628	15
6.268 -	6.540	0.25*	0.25748*	21.30	0.614	0.623	16
6.540 -	6.813	0.25748*	0.265*	19.41	0.543	0.549	16
6.813 -	7.085	0.265*	0.27894*	18.25	0.611	0.626	8
7.085 -	7.357	0.27894*	0.28967*	16.94	0.481	0.586	9
7.357 -	7.630	0.28967*	0.30039*	15.97	0.459	0.607	5
7.630 -	7.902	0.30039*	0.3125*	14.90	0.754	0.638	6
7.902 -	8.175	0.3125*	0.32185*	13.09	0.590	0.618	9
8.175 -	8.447	0.32185*	0.33258*	11.92	0.507	0.668	4
8.447 -	8.720	0.33258*	0.34331*	11.37	0.625	0.709	3
8.720 -	8.992	0.34331*	0.35404*	10.60	0.375	0.568	3
8.992 -	9.265	0.35404*	0.36476*	10.14	0.303	0.451	1
9.265 -	9.537	0.36476*	0.375*	9.78	0.650	0.689	1
9.537 -	9.810	0.375*	0.38622*	8.60	0.495	0.495	3
9.810 -	10.083	0.38622*	0.39695*	8.18	0.633	0.531	1
10.083 -	10.355	0.39695*	0.40768*	6.78	0.492	0.536	3
10.355 -	10.628	0.40768*	0.41841*	6.27	0.765	0.619	1
10.628 -	10.900	0.41841*	0.42913*	6.25	0.725	0.618	1
> 10.900		> 0.42913*		0.00	0.572	0.616	7



CAMSIZER<sup>®</sup>



ANALISIS DE ARENA DE COSTAS MEXICANAS

Company:	INSTITUTO DE INGENIERIA
User:	GBHC
Result file:	C:\CAMISIZER\CAMDAT\IM21_LA_COLPA\IM21_LA_COLPA_x_area_20140901_145317_001.rdf
Task file:	C:\CAMISIZER\CAMSYS\IM21_LA_COLPA.afg
Time:	01.09.2014 , 14:53 , duration: 8 min 23 s at 1.0 % covered area, Image rate 1:1 and 60 mm feeder
Particle model:	Spheres
No. of particles:	CCD-B - 6810599 , CCD-Z - 1008678
Fitting:	no
Material:	PORCION ALTA LA PAZ
Comment:	01 MAYO 2014

Size class	[mm]	ASTM(+)	No(-)	Retenido [%]	SPHT3	b/3	PDN
0.000 -	0.280	PAN	0.01102*	91.85	0.727	0.680	12777330
0.280 -	0.560	0.01102*	0.02205*	70.67	0.574	0.623	1102001
0.560 -	0.840	0.02205*	#20	55.55	0.541	0.624	154265
0.840 -	1.120	#20	0.04409*	47.43	0.666	0.677	29547
1.120 -	1.400	0.04409*	#14	42.07	0.720	0.698	9167
1.400 -	1.680	#14	#12	38.30	0.780	0.712	3597
1.680 -	1.960	#12	#10	35.10	0.777	0.714	1814
1.960 -	2.240	#10	0.08819*	32.43	0.774	0.705	979
2.240 -	2.520	0.08819*	0.09921*	30.04	0.770	0.711	607
2.520 -	2.800	0.09921*	#7	28.32	0.737	0.687	305
2.800 -	3.080	#7	0.12126*	26.56	0.742	0.694	226
3.080 -	3.360	0.12126*	#6	24.84	0.738	0.695	171
3.360 -	3.640	#6	0.14331*	23.14	0.724	0.701	131
3.640 -	3.920	0.14331*	#5	21.70	0.676	0.673	86
3.920 -	4.200	#5	0.16535*	20.11	0.675	0.674	79
4.200 -	4.480	0.16535*	0.17638*	18.58	0.629	0.687	56
4.480 -	4.760	0.17638*	#4	17.31	0.680	0.697	45
4.760 -	5.040	#4	0.19843*	16.17	0.710	0.720	30
5.040 -	5.320	0.19843*	0.20945*	14.90	0.673	0.689	29
5.320 -	5.600	0.20945*	#3.5	13.66	0.677	0.697	25
5.600 -	5.880	#3.5	0.23150*	12.46	0.630	0.662	20
5.880 -	6.160	0.23150*	0.24252*	11.59	0.652	0.701	13
6.160 -	6.440	0.24252*	0.25354*	10.67	0.650	0.699	11
6.440 -	6.720	0.25354*	0.265*	9.38	0.610	0.677	14
6.720 -	7.000	0.265*	0.27559*	8.55	0.584	0.703	8
7.000 -	7.280	0.27559*	0.28661*	8.22	0.714	0.618	3
7.280 -	7.560	0.28661*	0.29764*	7.65	0.536	0.648	4
7.560 -	7.840	0.29764*	0.3125*	7.50	0.790	0.711	1
7.840 -	8.120	0.3125*	0.3125*	6.46	0.652	0.716	6
8.120 -	8.400	0.3125*	0.33071*	5.36	0.411	0.630	6
8.400 -	8.680	0.33071*	0.34173*	4.94	0.613	0.649	2
8.680 -	8.960	0.34173*	0.35276*	4.90			0
8.960 -	9.240	0.35276*	0.36378*	3.95	0.569	0.628	4
9.240 -	9.520	0.36378*	0.375*	3.95			0
9.520 -	9.800	0.375*	0.38583*	3.95			0
9.800 -	10.080	0.38583*	0.39685*	3.62	0.383	0.720	1
10.080 -	10.360	0.39685*	0.40787*	2.87	0.309	0.641	2
10.360 -	10.640	0.40787*	0.41890*	2.48	0.346	0.617	1
10.640 -	10.920	0.41890*	0.42992*	2.48			0
10.920 -	11.200	0.42992*	0.4375*	2.00	0.708	0.600	1
> 11.200		> 0.4375*		0.00	0.306	0.638	3



CAM SIZER<sup>®</sup>



ANALISIS DE ARENA DE COSTAS MEXICANAS

Company:	INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM
User:	GBHC
Result file:	C:\CAM SIZER\CAM DAT\IM20_EL OCOTE\IM20_EL OCOTE_x_area_20140901_151912_001.rdf
Task file:	C:\CAM SIZER\CAM SYS\IM20_EL OCOTE.afg
Time:	01.09.2014 , 15:19 , duration 9 min 42 s at 1.0 % covered area, Image rate 1:1 and 60 mm feeder
Particle model:	Spheres
No. of particles:	CCD-B - 6166507 , CCD-Z - 405781
Fitting:	no
Material:	CUENCA ALTA_LA PAZ
Comment:	01 MAYO 2014

Size class	[mm]	ASTM(+)	No(-)	Retenido [%]	SPHT3	b/3	PDN
0.000 -	0.330	PAN	0.01299*	89.63	0.723	0.670	5716420
0.330 -	0.660	0.01299*	0.02598*	69.35	0.628	0.631	655129
0.660 -	0.990	0.02598*	#18	60.02	0.657	0.651	53637
0.990 -	1.320	#18	0.05197*	54.76	0.722	0.673	10437
1.320 -	1.650	0.05197*	0.06496*	51.07	0.771	0.679	3541
1.650 -	1.980	0.06496*	#10	48.35	0.760	0.667	1376
1.980 -	2.310	#10	0.09094*	45.99	0.756	0.660	727
2.310 -	2.640	0.09094*	0.10394*	44.01	0.741	0.651	391
2.640 -	2.970	0.10394*	0.11693*	42.10	0.722	0.633	255
2.970 -	3.300	0.11693*	#6	40.06	0.687	0.636	195
3.300 -	3.630	#6	0.14291*	38.15	0.672	0.652	135
3.630 -	3.960	0.14291*	#5	36.56	0.662	0.637	87
3.960 -	4.290	#5	0.16890*	34.66	0.632	0.634	75
4.290 -	4.620	0.16890*	0.18189*	33.20	0.562	0.613	47
4.620 -	4.950	0.18189*	0.19488*	31.71	0.582	0.623	40
4.950 -	5.280	0.19488*	0.20787*	30.52	0.611	0.571	25
5.280 -	5.610	0.20787*	#3.5	29.17	0.497	0.588	23
5.610 -	5.940	#3.5	0.23386*	28.37	0.554	0.571	11
5.940 -	6.270	0.23386*	0.25*	27.37	0.477	0.597	13
6.270 -	6.600	0.25*	0.265*	26.94	0.568	0.652	5
6.600 -	6.930	0.265*	0.27283*	25.51	0.453	0.609	12
6.930 -	7.260	0.27283*	0.28583*	23.70	0.505	0.607	14
7.260 -	7.590	0.28583*	0.29882*	22.55	0.601	0.579	8
7.590 -	7.920	0.29882*	0.3125*	21.67	0.693	0.590	5
7.920 -	8.250	0.3125*	0.32480*	20.84	0.389	0.671	4
8.250 -	8.580	0.32480*	0.33780*	19.80	0.489	0.667	5
8.580 -	8.910	0.33780*	0.35079*	17.80	0.373	0.537	8
8.910 -	9.240	0.35079*	0.36378*	17.00	0.629	0.579	3
9.240 -	9.570	0.36378*	0.375*	16.25	0.732	0.710	2
9.570 -	9.900	0.375*	0.38976*	14.47	0.349	0.664	5
9.900 -	10.230	0.38976*	0.40276*	13.70	0.516	0.736	2
10.230 -	10.560	0.40276*	0.41575*	13.28	0.147	0.526	1
10.560 -	10.890	0.41575*	0.42874*	13.28			0
10.890 -	11.220	0.42874*	0.4375*	12.22	0.496	0.643	2
11.220 -	11.550	0.4375*	0.45472*	9.89	0.394	0.532	4
11.550 -	11.880	0.45472*	0.46772*	9.23	0.019	0.565	1
11.880 -	12.210	0.46772*	0.48071*	9.23			0
12.210 -	12.540	0.48071*	0.5*	7.71	0.365	0.699	2
12.540 -	12.870	0.5*	0.50669*	7.71			0
12.870 -	13.200	0.50669*	0.530*	7.71			0
> 13.200		> 0.530*		0.00	0.166	0.542	4



CAM SIZER<sup>®</sup>



ANALISIS DE ARENA DE COSTAS MEXICANAS

Company:	INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM
User:	GBHC
Result file:	C:\CAMSIZER\CAMDAT\M22_EL POLVORIN\M22_EL POLVORIN_x_area_20140901_154647_001.rdf
Task file:	C:\CAMSIZER\CAMSYS\M22_EL POLVORIN.afg
Time:	01.09.2014 , 15:46 , duration: 4 min 35 s at 1.0 % covered area, Image rate 1:1 and 60 mm feeder
Particle model:	Spheres
No. of particles:	CCD-B = 3506890 , CCD-Z = 348036
Fitting:	no
Material:	CUENCA ALTA
Comment:	01 MAYO 2014

Size class	[mm]	ASTM(+)	No(-)	Retenido [%]	SPHT3	b/3	PDN
0.000 -	0.270	PAN	0.01063*	95.22	0.731	0.675	5285048
0.270 -	0.540	0.01063*	0.02126*	85.90	0.616	0.626	422357
0.540 -	0.810	0.02126*	0.03189*	81.69	0.606	0.625	34242
0.810 -	1.080	0.03189*	0.04252*	79.07	0.730	0.660	7286
1.080 -	1.350	0.04252*	0.05315*	76.92	0.767	0.662	2846
1.350 -	1.620	0.05315*	0.06378*	74.96	0.775	0.660	1461
1.620 -	1.890	0.06378*	0.07441*	73.30	0.777	0.644	748
1.890 -	2.160	0.07441*	0.08504*	71.51	0.753	0.637	510
2.160 -	2.430	0.08504*	0.09567*	69.59	0.762	0.628	377
2.430 -	2.700	0.09567*	0.10630*	67.87	0.764	0.633	241
2.700 -	2.970	0.10630*	0.11693*	66.26	0.752	0.625	166
2.970 -	3.240	0.11693*	0.12756*	64.55	0.743	0.620	135
3.240 -	3.510	0.12756*	0.13819*	62.86	0.754	0.622	105
3.510 -	3.780	0.13819*	0.14882*	61.59	0.720	0.642	59
3.780 -	4.050	0.14882*	#5	59.99	0.711	0.627	60
4.050 -	4.320	#5	0.17008*	58.18	0.743	0.643	56
4.320 -	4.590	0.17008*	0.18071*	56.86	0.715	0.633	33
4.590 -	4.860	0.18071*	0.19134*	55.25	0.713	0.586	36
4.860 -	5.130	0.19134*	0.20197*	53.50	0.715	0.629	32
5.130 -	5.400	0.20197*	0.21260*	51.39	0.706	0.629	32
5.400 -	5.670	0.21260*	#3.5	49.92	0.725	0.641	20
5.670 -	5.940	#3.5	0.23386*	46.91	0.615	0.603	33
5.940 -	6.210	0.23386*	0.25*	45.19	0.656	0.588	17
6.210 -	6.480	0.25*	0.25512*	43.90	0.696	0.605	12
6.480 -	6.750	0.25512*	0.265*	42.12	0.591	0.573	13
6.750 -	7.020	0.265*	0.27638*	40.75	0.762	0.658	9
7.020 -	7.290	0.27638*	0.28701*	38.30	0.590	0.585	15
7.290 -	7.560	0.28701*	0.29764*	36.65	0.618	0.602	9
7.560 -	7.830	0.29764*	0.30827*	35.11	0.625	0.627	7
7.830 -	8.100	0.30827*	0.3125*	33.06	0.703	0.677	9
8.100 -	8.370	0.3125*	0.32953*	31.21	0.652	0.623	7
8.370 -	8.640	0.32953*	0.34016*	29.85	0.603	0.591	5
8.640 -	8.910	0.34016*	0.35079*	27.02	0.748	0.693	9
8.910 -	9.180	0.35079*	0.36142*	25.86	0.562	0.694	3
9.180 -	9.450	0.36142*	0.375*	24.53	0.492	0.630	4
9.450 -	9.720	0.375*	0.38268*	22.51	0.754	0.750	4
9.720 -	9.990	0.38268*	0.39331*	21.12	0.665	0.559	3
9.990 -	10.260	0.39331*	0.40394*	17.63	0.440	0.601	7
10.260 -	10.530	0.40394*	0.41457*	15.97	0.691	0.647	3
10.530 -	10.800	0.41457*	0.42520*	15.97			0
> 10.800		> 0.42520*		0.00	0.619	0.576	18



CAMSIZER<sup>®</sup>



ANALISIS DE ARENA DE COSTAS MEXICANAS

Company:	INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM
User:	GBHC
Result file:	C:\CAMSIZE\CAMDAT\IM_GUASAVE\IM_GUASAVE_x_area_20140903_153144_001.rdf
Task file:	C:\CAMSIZE\CAMSYS\IM_GUASAVE.afg
Time:	03.09.2014 , 15:31 , duration 0 min 52 s at 1.0 % covered area, Image rate 1:1 and 60 mm feeder
Particle model:	Spheres
No. of particles:	CCD-B = 583637 , CCD-Z = 42645
Fitting:	no
Material:	TERREROS CUENCA ALTA
Comment:	01 MAYO 2014

Size class	[mm]	ASTM(+)	No(-)	Retenido [%]	SPHT3	b/3	PDN
0.000 -	0.260	PAN	0.01024*	98.32	0.739	0.674	589792
0.260 -	0.520	0.01024*	0.02047*	92.08	0.639	0.637	96718
0.520 -	0.780	0.02047*	0.03071*	85.09	0.589	0.621	21320
0.780 -	1.040	0.03071*	0.04094*	79.72	0.662	0.646	6139
1.040 -	1.300	0.04094*	0.05118*	75.09	0.658	0.648	2331
1.300 -	1.560	0.05118*	0.06142*	71.64	0.700	0.648	1034
1.560 -	1.820	0.06142*	0.07165*	68.95	0.698	0.651	477
1.820 -	2.080	0.07165*	0.08189*	66.66	0.706	0.639	259
2.080 -	2.340	0.08189*	#8	64.70	0.683	0.646	158
2.340 -	2.600	#8	0.10236*	62.97	0.703	0.643	96
2.600 -	2.860	0.10236*	0.11260*	61.10	0.642	0.588	73
2.860 -	3.120	0.11260*	0.12283*	59.48	0.677	0.606	51
3.120 -	3.380	0.12283*	#6	57.45	0.685	0.637	50
3.380 -	3.640	#6	0.14331*	55.07	0.689	0.654	45
3.640 -	3.900	0.14331*	0.15354*	53.03	0.661	0.570	32
3.900 -	4.160	0.15354*	0.16378*	49.90	0.582	0.616	37
4.160 -	4.420	0.16378*	0.17402*	47.92	0.632	0.636	21
4.420 -	4.680	0.17402*	#4	46.51	0.710	0.604	13
4.680 -	4.940	#4	0.19449*	45.24	0.592	0.655	8
4.940 -	5.200	0.19449*	0.20472*	42.93	0.501	0.510	14
5.200 -	5.460	0.20472*	0.21496*	40.87	0.586	0.636	12
5.460 -	5.720	0.21496*	0.22520*	39.13	0.503	0.602	8
5.720 -	5.980	0.22520*	0.23543*	38.56	0.668	0.649	2
5.980 -	6.240	0.23543*	0.25	36.55	0.466	0.513	7
6.240 -	6.500	0.25	0.25591*	35.56	0.541	0.555	3
6.500 -	6.760	0.25591*	0.265*	33.00	0.715	0.616	7
6.760 -	7.020	0.265*	0.27638*	33.00			0
7.020 -	7.280	0.27638*	0.28661*	31.58	0.622	0.687	3
7.280 -	7.540	0.28661*	0.29685*	30.11	0.501	0.696	3
7.540 -	7.800	0.29685*	0.30709*	28.82	0.541	0.636	2
7.800 -	8.060	0.30709*	0.3125*	28.16	0.794	0.682	1
8.060 -	8.320	0.3125*	0.32756*	25.18	0.267	0.566	4
8.320 -	8.580	0.32756*	0.33780*	23.60	0.639	0.714	2
8.580 -	8.840	0.33780*	0.34803*	22.61	0.196	0.440	1
8.840 -	9.100	0.34803*	0.35827*	20.69	0.129	0.497	2
9.100 -	9.360	0.35827*	0.375*	20.69			0
9.360 -	9.620	0.375*	0.375*	17.21	0.499	0.521	3
9.620 -	9.880	0.375*	0.38898*	15.98	0.316	0.686	1
9.880 -	10.140	0.38898*	0.39921*	15.98			0
10.140 -	10.400	0.39921*	0.40945*	15.98			0
> 10.400		> 0.40945*		0.00	0.131	0.500	6



CAMSIZER<sup>®</sup>



ANALISIS DE ARENA DE COSTAS MEXICANAS

Company:	INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM
User:	GBHC
Result file:	C:\CAMSIZE\CAMDAT\IM14_LA.AURORA\IM14_LA.AURORA_x_area_20140903_155212_001.rdf
Task file:	C:\CAMSIZE\CAMSYS\IM14_LA.AURORA.afg
Time:	03.09.2014 , 15:52 , duration 3 min 7 s at 1.0 % covered area, Image rate 1:1 and 60 mm feeder
Particle model:	Spheres
No. of particles:	CCD-B = 546460 , CCD-Z = 44810
Fitting:	no
Material:	TERREROS CUENCA ALTA
Comment:	01 MAYO 2014

Size class	[mm]	ASTM(+)	No(-)	Retenido [%]	SPHT3	b/3	PDN
0.000 -	0.305	PAN	#50	99.33	0.724	0.670	611383
0.305 -	0.610	#50	#30	96.23	0.555	0.622	88499
0.610 -	0.915	#30	0.03602"	89.51	0.523	0.630	39563
0.915 -	1.220	0.03602"	0.04803"	80.80	0.540	0.630	19000
1.220 -	1.525	0.04803"	0.06004"	72.36	0.610	0.639	9172
1.525 -	1.830	0.06004"	0.07205"	65.11	0.602	0.636	4323
1.830 -	2.135	0.07205"	0.08406"	59.03	0.595	0.642	2143
2.135 -	2.440	0.08406"	0.09606"	53.75	0.587	0.643	1222
2.440 -	2.745	0.09606"	#7	49.10	0.602	0.648	722
2.745 -	3.050	#7	0.12008"	45.23	0.592	0.641	426
3.050 -	3.355	0.12008"	#6	41.21	0.612	0.651	325
3.355 -	3.660	#6	0.14409"	37.79	0.604	0.631	212
3.660 -	3.965	0.14409"	#5	35.08	0.593	0.646	132
3.965 -	4.270	#5	0.16811"	32.65	0.591	0.623	92
4.270 -	4.575	0.16811"	0.18012"	30.27	0.579	0.620	70
4.575 -	4.880	0.18012"	0.19213"	27.72	0.606	0.637	64
4.880 -	5.185	0.19213"	0.20413"	25.61	0.612	0.633	43
5.185 -	5.490	0.20413"	#3.5	23.75	0.633	0.651	31
5.490 -	5.795	#3.5	0.22815"	21.80	0.554	0.598	27
5.795 -	6.100	0.22815"	0.24016"	19.87	0.540	0.662	24
6.100 -	6.405	0.24016"	0.25"	17.91	0.574	0.655	21
6.405 -	6.710	0.25"	0.265"	15.87	0.648	0.659	18
6.710 -	7.015	0.265"	0.27618"	14.69	0.610	0.615	10
7.015 -	7.320	0.27618"	0.28819"	13.36	0.593	0.632	8
7.320 -	7.625	0.28819"	0.30020"	11.83	0.536	0.597	10
7.625 -	7.930	0.30020"	0.3125"	10.28	0.580	0.579	8
7.930 -	8.235	0.3125"	0.32421"	9.26	0.713	0.631	5
8.235 -	8.540	0.32421"	0.33622"	8.56	0.503	0.615	3
8.540 -	8.845	0.33622"	0.34823"	7.43	0.510	0.702	5
8.845 -	9.150	0.34823"	0.36024"	5.91	0.420	0.619	5
9.150 -	9.455	0.36024"	0.375"	5.28	0.592	0.663	2
9.455 -	9.760	0.375"	0.38425"	4.66	0.609	0.669	2
9.760 -	10.065	0.38425"	0.39626"	4.50			1
10.065 -	10.370	0.39626"	0.40827"	4.50			0
10.370 -	10.675	0.40827"	0.42028"	3.49	0.538	0.632	2
10.675 -	10.980	0.42028"	0.4375"	3.49			0
10.980 -	11.285	0.4375"	0.4375"	3.49			0
11.285 -	11.590	0.4375"	0.45630"	2.20	0.470	0.374	2
11.590 -	11.895	0.45630"	0.46831"	2.20			0
11.895 -	12.200	0.46831"	0.48031"	2.20			0
> 12.200		> 0.48031"		0.00	0.338	0.611	2



CAMSIZER<sup>®</sup>



ANALISIS DE ARENA DE COSTAS MEXICANAS

Company:	INSTITUTO DE INGENIERIA, UNAM
User:	GBHC
Result file:	C:\CAMISIZER\CAMDAT\ISED_09\SED_09_x_area_20140905_120733_001.rdf
Task file:	C:\CAMISIZER\CAMSYS\ISED_09.atg
Time:	05.09.2014 , 12:07 , duration 5 min 8 s at 1.0 % covered area, Image rate 1:1 and 60 mm feeder
Particle model:	Spheres
No. of particles:	CCD-B = 4642891 , CCD-Z = 374614
Fitting:	no
Material:	
Comment:	01 MAYO 2014

Size class	[mm]	ASTM(+)	No(-)	Retenido [%]	SPHT3	b/3	PDN
0.000 -	0.195	PAN	0.00768*	95.78	0.810	0.691	4558859
0.195 -	0.390	0.00768*	0.01535*	83.98	0.769	0.662	963034
0.390 -	0.585	0.01535*	0.02303*	74.29	0.788	0.672	142784
0.585 -	0.780	0.02303*	0.03071*	65.60	0.794	0.680	41763
0.780 -	0.975	0.03071*	0.03839*	58.11	0.836	0.712	18009
0.975 -	1.170	0.03839*	#16	51.88	0.835	0.715	6095
1.170 -	1.365	#16	0.05374*	46.64	0.850	0.721	4239
1.365 -	1.560	0.05374*	0.06142*	42.53	0.858	0.724	2251
1.560 -	1.755	0.06142*	0.06909*	39.06	0.855	0.719	1298
1.755 -	1.950	0.06909*	0.07677*	35.98	0.852	0.716	827
1.950 -	2.145	0.07677*	0.08445*	33.48	0.848	0.713	493
2.145 -	2.340	0.08445*	#8	30.87	0.847	0.713	390
2.340 -	2.535	#8	0.09980*	28.76	0.836	0.695	239
2.535 -	2.730	0.09980*	0.10748*	26.66	0.823	0.674	195
2.730 -	2.925	0.10748*	0.11516*	24.70	0.842	0.709	143
2.925 -	3.120	0.11516*	0.12283*	22.98	0.839	0.714	103
3.120 -	3.315	0.12283*	#6	21.03	0.829	0.701	98
3.315 -	3.510	#6	0.13819*	19.38	0.807	0.695	66
3.510 -	3.705	0.13819*	0.14587*	17.87	0.796	0.702	53
3.705 -	3.900	0.14587*	0.15354*	16.77	0.812	0.686	31
3.900 -	4.095	0.15354*	0.16122*	15.33	0.826	0.686	38
4.095 -	4.290	0.16122*	0.16890*	13.86	0.826	0.711	31
4.290 -	4.485	0.16890*	0.17657*	12.80	0.846	0.747	21
4.485 -	4.680	0.17657*	#4	11.61	0.767	0.653	20
4.680 -	4.875	#4	0.19193*	10.98	0.730	0.565	10
4.875 -	5.070	0.19193*	0.19961*	9.53	0.783	0.654	18
5.070 -	5.265	0.19961*	0.20728*	8.87	0.835	0.716	8
5.265 -	5.460	0.20728*	0.21496*	8.52	0.734	0.647	4
5.460 -	5.655	0.21496*	#3.5	7.69	0.811	0.679	7
5.655 -	5.850	#3.5	0.23031*	6.91	0.820	0.693	7
5.850 -	6.045	0.23031*	0.23799*	6.32	0.796	0.642	4
6.045 -	6.240	0.23799*	0.25*	5.79	0.791	0.566	4
6.240 -	6.435	0.25*	0.25335*	5.55	0.674	0.467	1
6.435 -	6.630	0.25335*	0.265*	5.55			0
6.630 -	6.825	0.265*	0.265*	5.17	0.775	0.674	2
6.825 -	7.020	0.265*	0.27638*	4.73	0.819	0.720	2
7.020 -	7.215	0.27638*	0.28406*	4.49	0.578	0.709	1
7.215 -	7.410	0.28406*	0.29173*	3.24	0.742	0.531	5
7.410 -	7.605	0.29173*	0.29941*	2.65	0.727	0.531	2
7.605 -	7.800	0.29941*	0.30709*	2.65			0
> 7.800	> 0.30709*			0.00	0.798	0.692	7



CAMSIZER<sup>®</sup>



ANALISIS DE ARENA DE COSTAS MEXICANAS

Company:	INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM
User:	GBHC
Result file:	C:\CAMSIZER\CAMDAT\ISED_12\SED_12_x_area_20140905_122413_001.rdf
Task file:	C:\CAMSIZER\CAMSYS\ISED_12.atg
Time:	05.09.2014 , 12:24 , duration 3 min 58 s at 1.0 % covered area, Image rate 1:1 and 60 mm feeder
Particle model:	Spheres
No. of particles:	CCD-B - 1721196 , CCD-Z - 158317
Fitting:	no
Material:	CUENCA BAJA, SEDIMENTOS
Comment:	01 MAYO 2014

Size class	[mm]	ASTM(+)	No(-)	Retenido [%]	SPHT3	b/3	PDN
0.000 -	0.026	PAN	0.00104*	100.00	0.912	0.866	17356
0.026 -	0.032	0.00104*	#450	100.00	0.912	0.866	3653
0.032 -	0.038	#450	#400	100.00	0.912	0.866	8484
0.038 -	0.045	#400	#325	100.00	0.912	0.866	42879
0.045 -	0.053	#325	#270	99.97	0.898	0.835	181185
0.053 -	0.063	#270	#230	99.93	0.898	0.835	385707
0.063 -	0.075	#230	#200	99.88	0.898	0.835	298248
0.075 -	0.090	#200	#170	99.79	0.858	0.752	271533
0.090 -	0.106	#170	#140	99.68	0.847	0.730	198313
0.106 -	0.125	#140	#120	99.53	0.823	0.704	176559
0.125 -	0.150	#120	#100	99.28	0.796	0.681	167749
0.150 -	0.180	#100	#80	98.92	0.775	0.669	140779
0.180 -	0.212	#80	#70	98.40	0.763	0.666	117329
0.212 -	0.250	#70	#60	97.62	0.755	0.664	108201
0.250 -	0.300	#60	#50	96.36	0.757	0.667	103542
0.300 -	0.355	#50	#45	94.69	0.762	0.669	79914
0.355 -	0.425	#45	#40	92.19	0.778	0.678	71453
0.425 -	0.500	#40	#35	89.18	0.787	0.681	50190
0.500 -	0.600	#35	#30	85.13	0.787	0.678	40003
0.600 -	0.710	#30	#25	80.49	0.790	0.679	26551
0.710 -	0.850	#25	#20	74.87	0.806	0.695	19127
0.850 -	1.000	#20	#18	69.05	0.827	0.710	12176
1.000 -	1.180	#18	#16	62.31	0.821	0.702	8628
1.180 -	1.400	#16	#14	55.44	0.843	0.720	5585
1.400 -	1.700	#14	#12	47.77	0.848	0.715	3702
1.700 -	2.000	#12	#10	41.77	0.842	0.708	1680
2.000 -	2.360	#10	#8	36.23	0.838	0.697	936
2.360 -	2.800	#8	#7	31.11	0.838	0.699	530
2.800 -	3.350	#7	#6	26.60	0.833	0.708	270
3.350 -	4.000	#6	#5	21.99	0.836	0.697	160
4.000 -	4.750	#5	#4	18.64	0.804	0.679	70
4.750 -	5.600	#4	#3.5	16.65	0.819	0.680	24
5.600 -	6.700	#3.5	0.265*	13.36	0.807	0.720	23
6.700 -	8.000	0.265*	0.3125*	10.68	0.781	0.668	11
8.000 -	9.500	0.3125*	0.375*	8.23	0.782	0.637	6
> 9.500		> 0.375*		0.00	0.816	0.770	8



CAM SIZER<sup>®</sup>



ANALISIS DE ARENA DE COSTAS MEXICANAS

Company:	INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM
User:	GHBC
Result file:	C:\CAM SIZER\CAMDAT\ISED 13\SED_13_x_area_20140905_123950_001.rdf
Task file:	C:\CAM SIZER\CAMSYS\ISED_13.atg
Time:	05.09.2014 , 12:39 , duration 7 min 42 s at 1.0 % covered area, Image rate 1:1 and 60 mm feeder
Particle model:	Spheres
No. of particles:	CCD-B - 5110234 , CCD-Z - 350986
Fitting:	no
Material:	SEDIMENTOS DE LA CUENCA BAJA DE LA PAZ
Comment:	01 MAYO 2014

Size class	[mm]	ASTM(+)	No(-)	Retenido [%]	SPHT3	b/3	PDN
0.000 -	0.026	PAN	0.00104*	100.00	0.918	0.805	15215
0.026 -	0.032	0.00104*	#450	100.00	0.918	0.805	3929
0.032 -	0.038	#450	#400	100.00	0.924	0.881	6391
0.038 -	0.045	#400	#325	99.99	0.924	0.882	30904
0.045 -	0.053	#325	#270	99.99	0.924	0.882	151419
0.053 -	0.063	#270	#230	99.93	0.915	0.842	407853
0.063 -	0.075	#230	#200	99.86	0.914	0.839	440635
0.075 -	0.090	#200	#170	99.69	0.883	0.767	555017
0.090 -	0.106	#170	#140	99.43	0.857	0.729	491405
0.106 -	0.125	#140	#120	99.01	0.828	0.699	483991
0.125 -	0.150	#120	#100	98.26	0.805	0.682	516659
0.150 -	0.180	#100	#80	97.02	0.789	0.676	492035
0.180 -	0.212	#80	#70	95.16	0.779	0.672	436570
0.212 -	0.250	#70	#60	92.34	0.772	0.673	405086
0.250 -	0.300	#60	#50	87.88	0.769	0.672	379341
0.300 -	0.355	#50	#45	82.30	0.772	0.675	278532
0.355 -	0.425	#45	#40	74.58	0.776	0.679	225516
0.425 -	0.500	#40	#35	66.20	0.777	0.678	146185
0.500 -	0.600	#35	#30	55.45	0.779	0.682	110603
0.600 -	0.710	#30	#25	45.06	0.778	0.683	61031
0.710 -	0.850	#25	#20	34.45	0.795	0.695	37918
0.850 -	1.000	#20	#18	26.24	0.828	0.716	18202
1.000 -	1.180	#18	#16	19.39	0.823	0.713	9129
1.180 -	1.400	#16	#14	13.99	0.845	0.718	4504
1.400 -	1.700	#14	#12	9.70	0.854	0.722	2195
1.700 -	2.000	#12	#10	7.30	0.846	0.712	699
2.000 -	2.360	#10	#8	5.56	0.842	0.697	308
2.360 -	2.800	#8	#7	4.19	0.838	0.693	148
2.800 -	3.350	#7	#6	3.21	0.800	0.704	63
3.350 -	4.000	#6	#5	2.46	0.799	0.686	30
4.000 -	4.750	#5	#4	2.09	0.703	0.576	8
4.750 -	5.600	#4	#3.5	1.76	0.568	0.562	4
5.600 -	6.700	#3.5	0.265*	0.82	0.766	0.697	7
> 6.700		> 0.265*		0.00	0.360	0.542	3



**INSTITUTO  
DE INGENIERÍA  
UNAM**

**CAM SIZER<sup>®</sup>**



**ANALISIS DE ARENA DE COSTAS MEXICANAS**

Company:	INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM
User:	GHBC
Result file:	C:\CAM SIZER\CAMDAT\SED 10\SED_10_x_area_20140905_125821_001.rdf
Task file:	C:\CAM SIZER\CAMSYS\SED_10.atg
Time:	05.09.2014 , 12:58 , duration 5 min 14 s at 1.0 % covered area, Image rate 1:1 and 60 mm feeder
Particle model:	Spheres
No. of particles:	CCD-B - 2643136 , CCD-Z - 224256
Fitting:	no
Material:	SEDIMENTOS DE LA CUENCA MEDIA, LA PAZ
Comment:	01 MAYO 2014

Size class	[mm]	ASTM(+)	No(-)	Retenido [%]	SPHT3	b/3	PDN
0.000 -	0.026	PAN	0.00104*	99.99	0.915	0.879	26021
0.026 -	0.032	0.00104*	#450	99.99	0.915	0.879	6554
0.032 -	0.038	#450	#400	99.99	0.915	0.879	11247
0.038 -	0.045	#400	#325	99.99	0.915	0.879	49596
0.045 -	0.053	#325	#270	99.98	0.893	0.824	206235
0.053 -	0.063	#270	#230	99.92	0.882	0.795	456959
0.063 -	0.075	#230	#200	99.85	0.882	0.795	369752
0.075 -	0.090	#200	#170	99.76	0.882	0.795	348575
0.090 -	0.106	#170	#140	99.62	0.836	0.720	253206
0.106 -	0.125	#140	#120	99.42	0.811	0.691	231382
0.125 -	0.150	#120	#100	99.09	0.790	0.674	234565
0.150 -	0.180	#100	#80	98.52	0.771	0.664	222810
0.180 -	0.212	#80	#70	97.66	0.764	0.662	204087
0.212 -	0.250	#70	#60	96.30	0.760	0.664	195439
0.250 -	0.300	#60	#50	93.97	0.755	0.663	198057
0.300 -	0.355	#50	#45	91.00	0.758	0.666	147833
0.355 -	0.425	#45	#40	86.60	0.766	0.670	128555
0.425 -	0.500	#40	#35	81.53	0.773	0.671	88547
0.500 -	0.600	#35	#30	74.77	0.782	0.678	69102
0.600 -	0.710	#30	#25	67.55	0.782	0.678	42072
0.710 -	0.850	#25	#20	59.19	0.797	0.688	30118
0.850 -	1.000	#20	#18	52.02	0.824	0.709	15813
1.000 -	1.180	#18	#16	45.39	0.822	0.710	8833
1.180 -	1.400	#16	#14	39.36	0.840	0.714	5078
1.400 -	1.700	#14	#12	33.69	0.847	0.712	2866
1.700 -	2.000	#12	#10	29.87	0.846	0.713	1125
2.000 -	2.360	#10	#8	26.53	0.832	0.696	587
2.360 -	2.800	#8	#7	23.41	0.828	0.691	329
2.800 -	3.350	#7	#6	20.62	0.816	0.694	177
3.350 -	4.000	#6	#5	17.51	0.805	0.676	113
4.000 -	4.750	#5	#4	15.35	0.792	0.680	47
4.750 -	5.600	#4	#3.5	12.85	0.808	0.679	32
5.600 -	6.700	#3.5	0.265*	11.38	0.820	0.696	11
> 6.700		> 0.265*		0.00	0.771	0.668	14



ANALISIS DE ARENA DE COSTAS MEXICANAS

Company:	INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM
User:	GBHC
Result file:	C:\CAMSIZER\CAMDAT\ISED_14\SED_14_x_area_20140905_131341_001.rdf
Task file:	C:\CAMSIZER\CAMSYS\ISED_14.atg
Time:	05.09.2014 , 13:13 , duration 4 min 22 s at 1.0 % covered area, Image rate 1:1 and 60 mm feeder
Particle model:	Spheres
No. of particles:	CCD-B - 1574368 , CCD-Z - 150792
Fitting:	no
Material:	SEDIMENTOS DE LA CUENCA BAJA DE LA PAZ
Comment:	01 MAYO 2014

Size class	[mm]	ASTM(+)	No(-)	Retenido [%]	SPHT3	b/3	PDN
0.000 -	0.026	PAN	0.00104*	100.00	0.907	0.830	22085
0.026 -	0.032	0.00104*	#450	100.00	0.907	0.830	4608
0.032 -	0.038	#450	#400	100.00	0.907	0.830	8730
0.038 -	0.045	#400	#325	99.99	0.899	0.851	42055
0.045 -	0.053	#325	#270	99.96	0.899	0.851	169015
0.053 -	0.063	#270	#230	99.93	0.899	0.851	364680
0.063 -	0.075	#230	#200	99.89	0.876	0.798	263028
0.075 -	0.090	#200	#170	99.81	0.856	0.749	242088
0.090 -	0.106	#170	#140	99.72	0.834	0.723	160584
0.106 -	0.125	#140	#120	99.60	0.808	0.690	130486
0.125 -	0.150	#120	#100	99.41	0.788	0.675	126960
0.150 -	0.180	#100	#80	99.10	0.777	0.667	115796
0.180 -	0.212	#80	#70	98.60	0.768	0.665	110300
0.212 -	0.250	#70	#60	97.81	0.766	0.667	107054
0.250 -	0.300	#60	#50	96.46	0.764	0.665	108806
0.300 -	0.355	#50	#45	94.64	0.767	0.665	85369
0.355 -	0.425	#45	#40	92.01	0.773	0.666	73039
0.425 -	0.500	#40	#35	89.00	0.787	0.674	49415
0.500 -	0.600	#35	#30	84.85	0.793	0.671	40470
0.600 -	0.710	#30	#25	80.10	0.792	0.675	25960
0.710 -	0.850	#25	#20	74.07	0.811	0.692	19848
0.850 -	1.000	#20	#18	67.68	0.836	0.711	13116
1.000 -	1.180	#18	#16	60.70	0.831	0.712	8758
1.180 -	1.400	#16	#14	53.15	0.851	0.716	5992
1.400 -	1.700	#14	#12	44.53	0.855	0.715	4109
1.700 -	2.000	#12	#10	37.59	0.847	0.709	1925
2.000 -	2.360	#10	#8	31.13	0.847	0.708	1100
2.360 -	2.800	#8	#7	25.03	0.835	0.689	627
2.800 -	3.350	#7	#6	19.67	0.831	0.701	317
3.350 -	4.000	#6	#5	15.73	0.831	0.701	134
4.000 -	4.750	#5	#4	12.13	0.810	0.654	74
4.750 -	5.600	#4	#3.5	8.39	0.799	0.674	45
5.600 -	6.700	#3.5	0.265*	6.67	0.772	0.662	12
> 6.700		> 0.265*		0.00	0.758	0.669	14



CAM SIZER<sup>®</sup>



ANALISIS DE ARENA DE COSTAS MEXICANAS

Company:	INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM
User:	GBHC
Result file:	C:\CAM SIZER\CAMDAT\ISED_11\SED_11_x_area_20140905_133828_001.rtf
Task file:	C:\CAM SIZER\CAMSYS\ISED_11.atg
Time:	05.09.2014 , 13:38 , duration 7 min 11 s at 1.0 % covered area, Image rate 1:1 and 60 mm feeder
Particle model:	Spheres
No. of particles:	CCD-B - 5249238 , CCD-Z - 385243
Fitting:	no
Material:	SEDIMENTOS DE LA CUENCA MEDIA DE LA PAZ
Comment:	01 MAYO 2014

Size class	[mm]	ASTM(+)	No(-)	Retenido [%]	SPHT3	b/3	PDN
0.000 -	0.026	PAN	0.00104*	100.00	0.908	0.872	107380
0.026 -	0.032	0.00104*	#450	99.99	0.908	0.872	15429
0.032 -	0.038	#450	#400	99.99	0.908	0.872	20811
0.038 -	0.045	#400	#325	99.99	0.908	0.872	62352
0.045 -	0.053	#325	#270	99.97	0.904	0.853	236033
0.053 -	0.063	#270	#230	99.91	0.904	0.851	567849
0.063 -	0.075	#230	#200	99.81	0.889	0.808	551842
0.075 -	0.090	#200	#170	99.64	0.877	0.776	642439
0.090 -	0.106	#170	#140	99.37	0.845	0.729	562185
0.106 -	0.125	#140	#120	98.92	0.816	0.702	559142
0.125 -	0.150	#120	#100	98.12	0.787	0.682	600439
0.150 -	0.180	#100	#80	95.80	0.752	0.659	564231
0.180 -	0.212	#80	#70	94.89	0.740	0.662	485434
0.212 -	0.250	#70	#60	92.12	0.725	0.659	429862
0.250 -	0.300	#60	#50	87.95	0.708	0.654	382215
0.300 -	0.355	#50	#45	83.28	0.701	0.656	251997
0.355 -	0.425	#45	#40	77.49	0.694	0.658	184720
0.425 -	0.500	#40	#35	72.26	0.700	0.663	99295
0.500 -	0.600	#35	#30	66.24	0.712	0.673	66963
0.600 -	0.710	#30	#25	60.81	0.718	0.677	35835
0.710 -	0.850	#25	#20	55.48	0.753	0.697	20570
0.850 -	1.000	#20	#18	51.08	0.809	0.717	10398
1.000 -	1.180	#18	#16	46.67	0.818	0.719	6258
1.180 -	1.400	#16	#14	42.53	0.841	0.719	3708
1.400 -	1.700	#14	#12	38.09	0.855	0.728	2365
1.700 -	2.000	#12	#10	34.29	0.845	0.715	1153
2.000 -	2.360	#10	#8	30.49	0.838	0.710	715
2.360 -	2.800	#8	#7	26.31	0.825	0.695	457
2.800 -	3.350	#7	#6	21.86	0.807	0.692	297
3.350 -	4.000	#6	#5	18.44	0.777	0.670	130
4.000 -	4.750	#5	#4	14.95	0.718	0.666	77
4.750 -	5.600	#4	#3.5	12.93	0.773	0.697	26
5.600 -	6.700	#3.5	0.265*	11.47	0.512	0.582	11
6.700 -	8.000	0.265*	0.3125*	9.95	0.641	0.584	7
> 8.000		> 0.3125*		0.00	0.665	0.549	12



CAM SIZER<sup>®</sup>



ANÁLISIS DE ARENA DE COSTAS MEXICANAS

Company:	ISNTTITO DE INGENIERIA UNAM
User:	GBHC
Result file:	C:\CAM SIZER\CAMDAT\SED_08\SED_08_x_area_20140905_135421_001.rtf
Task file:	C:\CAM SIZER\CAMSYS\SED_08.atg
Time:	05.09.2014 , 13:54 , duration 4 min 29 s at 1.0 % covered area, Image rate 1:1 and 60 mm feeder
Particle model:	Spheres
No. of particles:	CCD-B - 3063005 , CCD-Z - 231386
Fitting:	no
Material:	SEDIMENTOS DE LA CUENCA MEDIA DE LA PAZ
Comment:	01 MAYO 2014

Size class	[mm]	ASTM(+)	No(-)	Retenido [%]	SPHT3	Symm3	b/3
0.000 -	0.026	PAN	0.00104*	99.99	0.913	0.868	0.875
0.026 -	0.032	0.00104*	#450	99.99	0.913	0.868	0.875
0.032 -	0.038	#450	#400	99.99	0.913	0.868	0.875
0.038 -	0.045	#400	#325	99.99	0.913	0.868	0.875
0.045 -	0.053	#325	#270	99.99	0.913	0.868	0.875
0.053 -	0.063	#270	#230	99.94	0.901	0.860	0.839
0.063 -	0.075	#230	#200	99.89	0.898	0.859	0.833
0.075 -	0.090	#200	#170	99.77	0.871	0.855	0.761
0.090 -	0.106	#170	#140	99.61	0.846	0.850	0.727
0.106 -	0.125	#140	#120	99.37	0.827	0.846	0.706
0.125 -	0.150	#120	#100	98.93	0.799	0.839	0.683
0.150 -	0.180	#100	#80	98.21	0.781	0.835	0.674
0.180 -	0.212	#80	#70	97.12	0.770	0.835	0.669
0.212 -	0.250	#70	#60	95.44	0.762	0.837	0.667
0.250 -	0.300	#60	#50	92.84	0.757	0.840	0.668
0.300 -	0.355	#50	#45	89.60	0.757	0.845	0.669
0.355 -	0.425	#45	#40	85.36	0.765	0.855	0.674
0.425 -	0.500	#40	#35	80.75	0.773	0.863	0.677
0.500 -	0.600	#35	#30	75.14	0.777	0.869	0.676
0.600 -	0.710	#30	#25	69.48	0.775	0.871	0.676
0.710 -	0.850	#25	#20	63.06	0.793	0.873	0.692
0.850 -	1.000	#20	#18	57.22	0.824	0.876	0.712
1.000 -	1.180	#18	#16	51.65	0.820	0.878	0.712
1.180 -	1.400	#16	#14	46.61	0.849	0.881	0.724
1.400 -	1.700	#14	#12	41.28	0.848	0.881	0.717
1.700 -	2.000	#12	#10	36.95	0.841	0.881	0.714
2.000 -	2.360	#10	#8	32.81	0.839	0.884	0.707
2.360 -	2.800	#8	#7	28.65	0.829	0.884	0.696
2.800 -	3.350	#7	#6	24.78	0.818	0.883	0.697
3.350 -	4.000	#6	#5	20.92	0.789	0.878	0.684
4.000 -	4.750	#5	#4	17.74	0.778	0.878	0.678
4.750 -	5.600	#4	#3.5	14.53	0.813	0.893	0.684
5.600 -	6.700	#3.5	0.265*	12.00	0.748	0.868	0.698
6.700 -	8.000	0.265*	0.3125*	9.92	0.805	0.862	0.748
8.000 -	9.500	0.3125*	0.375*	8.30	0.520	0.842	0.602
9.500 -	11.200	0.375*	0.4375*	6.25	0.406	0.755	0.560
11.200 -	13.200	0.4375*	0.530*	6.25			
13.200 -	16.000	0.530*	0.625*	3.58	0.897	0.916	0.857
16.000 -	19.000	0.625*	0.75*	0.00	0.150	0.729	0.455
> 19.000		> 0.75*		0.00			



CAMSIZER<sup>®</sup>



ANALISIS DE ARENA DE COSTAS MEXICANAS

Company:	ISNTTITO DE INGENIERIA UNAM
User:	GBHC
Result file:	C:\CAMISIZER\CAMDAT\ISED_01\SED_01_x_area_20140905_140838_001.rtf
Task file:	C:\CAMISIZER\CAMSYS\ISED_01.atg
Time:	05.09.2014 , 14:08 , duration 4 min 49 s at 1.0 % covered area, Image rate 1:1 and 60 mm feeder
Particle model:	Spheres
No. of particles:	CCD-B - 3102343 , CCD-Z - 269993
Fitting:	no
Material:	SEDIMENTOS DE LA CUENCA BAJA, LA PAZ
Comment:	01 MAYO 2014

Size class	[mm]	ASTM(+)	No(-)	Retenido [%]	SPHT3	b/3	PDN
0.000 -	0.216	PAN	#70	96.78	0.774	0.678	3510663
0.216 -	0.432	#70	#40	87.07	0.726	0.653	601071
0.432 -	0.649	#40	0.02554"	77.73	0.759	0.674	107809
0.649 -	0.865	0.02554"	#20	69.15	0.791	0.687	33772
0.865 -	1.081	#20	0.04256"	61.23	0.824	0.709	14838
1.081 -	1.297	0.04256"	0.05107"	54.40	0.832	0.713	6886
1.297 -	1.514	0.05107"	0.05959"	48.71	0.853	0.724	3749
1.514 -	1.730	0.05959"	#12	43.74	0.850	0.719	2101
1.730 -	1.946	#12	0.07661"	39.11	0.846	0.719	1345
1.946 -	2.162	0.07661"	0.08513"	35.37	0.837	0.707	775
2.162 -	2.378	0.08513"	#8	31.88	0.845	0.712	528
2.378 -	2.595	#8	0.10215"	29.12	0.837	0.709	318
2.595 -	2.811	0.10215"	#7	26.86	0.848	0.720	206
2.811 -	3.027	#7	0.11917"	24.28	0.825	0.697	184
3.027 -	3.243	0.11917"	0.12769"	22.11	0.819	0.701	123
3.243 -	3.459	0.12769"	0.13620"	19.85	0.827	0.699	104
3.459 -	3.676	0.13620"	0.14471"	18.03	0.805	0.710	71
3.676 -	3.892	0.14471"	0.15322"	16.03	0.788	0.700	62
3.892 -	4.108	0.15322"	0.16174"	14.64	0.812	0.692	38
4.108 -	4.324	0.16174"	0.17025"	13.32	0.792	0.703	31
4.324 -	4.540	0.17025"	0.17876"	12.35	0.804	0.706	18
4.540 -	4.757	0.17876"	#4	11.83	0.834	0.742	9
4.757 -	4.973	#4	0.19579"	11.17	0.780	0.670	10
4.973 -	5.189	0.19579"	0.20430"	10.38	0.758	0.650	10
5.189 -	5.405	0.20430"	0.21281"	9.32	0.805	0.772	12
5.405 -	5.622	0.21281"	#3.5	8.72	0.625	0.705	6
5.622 -	5.838	#3.5	0.22983"	7.83	0.808	0.690	8
5.838 -	6.054	0.22983"	0.23835"	7.10	0.789	0.648	6
6.054 -	6.270	0.23835"	0.25"	6.53	0.748	0.684	4
6.270 -	6.487	0.25"	0.25537"	6.06	0.820	0.698	3
6.487 -	6.703	0.25537"	0.265"	5.71	0.793	0.644	2
6.703 -	6.919	0.265"	0.27240"	5.31	0.674	0.551	2
6.919 -	7.135	0.27240"	0.28091"	4.89	0.758	0.716	2
7.135 -	7.351	0.28091"	0.28943"	4.65	0.430	0.375	1
7.351 -	7.568	0.28943"	0.29794"	4.65			0
7.568 -	7.784	0.29794"	0.30645"	4.10	0.450	0.672	2
7.784 -	8.000	0.30645"	0.3125"	4.10			0
> 8.000		> 0.3125"		0.00	0.652	0.591	7



CAM SIZER<sup>®</sup>



ANALISIS DE ARENA DE COSTAS MEXICANAS

Company:	ISNTTITO DE INGENIERIA UNAM
User:	GBHC
Result file:	C:\CAM SIZER\CAMDAT\SED_03\SED_03_x_area_20140905_142429_001.rdf
Task file:	C:\CAM SIZER\CAMSYS\SED_03.atg
Time:	05.09.2014 , 14:24 , duration 5 min 0 s at 1.0 % covered area, Image rate 1:1 and 60 mm feeder
Particle model:	Spheres
No. of particles:	CCD-B = 4427140 , CCD-Z = 314121
Fitting:	no
Material:	
Comment:	01 MAYO 2014

Size class	[mm]	ASTM(+)	No(-)	Retenido [%]	SPHT3	b/3	PDN
0.000 -	0.330	PAN	0.01299*	87.90	0.747	0.667	4718061
0.330 -	0.660	0.01299*	0.02598*	68.69	0.711	0.665	406535
0.660 -	0.990	0.02598*	#18	56.10	0.764	0.695	46871
0.990 -	1.320	#18	0.05197*	47.34	0.814	0.715	11101
1.320 -	1.650	0.05197*	0.06496*	40.96	0.852	0.732	3939
1.650 -	1.980	0.06496*	#10	36.01	0.845	0.721	1650
1.980 -	2.310	#10	0.09094*	31.38	0.839	0.716	916
2.310 -	2.640	0.09094*	0.10394*	27.47	0.835	0.710	507
2.640 -	2.970	0.10394*	0.11693*	24.14	0.838	0.713	287
2.970 -	3.300	0.11693*	#6	21.38	0.830	0.712	175
3.300 -	3.630	#6	0.14291*	18.83	0.789	0.691	115
3.630 -	3.960	0.14291*	#5	16.82	0.814	0.710	71
3.960 -	4.290	#5	0.16890*	15.15	0.768	0.694	44
4.290 -	4.620	0.16890*	0.18189*	13.60	0.797	0.679	34
4.620 -	4.950	0.18189*	0.19488*	12.14	0.723	0.625	23
4.950 -	5.280	0.19488*	0.20787*	11.44	0.744	0.699	10
5.280 -	5.610	0.20787*	#3.5	10.79	0.705	0.569	7
5.610 -	5.940	#3.5	0.23386*	10.09	0.648	0.566	7
5.940 -	6.270	0.23386*	0.25"	9.85	0.774	0.689	2
6.270 -	6.600	0.25"	0.265"	9.27	0.815	0.657	4
6.600 -	6.930	0.265"	0.27283"	9.24			0
6.930 -	7.260	0.27283"	0.28583"	9.03	0.796	0.802	1
7.260 -	7.590	0.28583"	0.29882"	8.81	0.534	0.383	1
7.590 -	7.920	0.29882"	0.3125"	8.54	0.863	0.693	1
7.920 -	8.250	0.3125"	0.32480"	8.54			0
8.250 -	8.580	0.32480"	0.33780"	7.85	0.830	0.748	2
8.580 -	8.910	0.33780"	0.35079"	7.83			0
8.910 -	9.240	0.35079"	0.36378"	6.94	0.676	0.693	2
9.240 -	9.570	0.36378"	0.375"	6.94			0
9.570 -	9.900	0.375"	0.38976"	6.38	0.840	0.758	1
9.900 -	10.230	0.38976"	0.40276"	6.38			0
10.230 -	10.560	0.40276"	0.41575"	6.38			0
10.560 -	10.890	0.41575"	0.42874"	6.38			0
10.890 -	11.220	0.42874"	0.4375"	6.38			0
11.220 -	11.550	0.4375"	0.45472"	6.38			0
11.550 -	11.880	0.45472"	0.46772"	6.38			0
11.880 -	12.210	0.46772"	0.48071"	6.38			0
12.210 -	12.540	0.48071"	0.5"	6.38			0
12.540 -	12.870	0.5"	0.50669"	6.38			0
12.870 -	13.200	0.50669"	0.530"	6.38			0
> 13.200		> 0.530"		0.00	0.628	0.653	2



**INSTITUTO  
DE INGENIERÍA  
UNAM**

**CAM SIZER<sup>®</sup>**



**ANALISIS DE ARENA DE COSTAS MEXICANAS**

Company:	ISNTTUTO DE INGENIERIA
User:	GBHC
Result file:	C:\CAM SIZER\CAMDAT\SED_02\SED_02_x_area_20140905_144054_001.rdf
Task file:	C:\CAM SIZER\CAMSYS\SED_02.atg
Time:	05.09.2014 , 14:40 , duration : 8 min 41 s at 1.0 % covered area, Image rate 1:1 and 60 mm feeder
Particle model:	Spheres
No. of particles:	CCD-B - 9314729 , CCD-Z - 733029
Fitting:	no
Material:	SEDIMENTOS DE LA PORCION MEDIA DE LA PAZ
Comment:	01 MAYO 2014

Size class	[mm]	ASTM(+)	No(-)	Retenido [%]	SPHT3	b/3	PDN
0.000 -	0.026	PAN	0.00104*	100.00	0.916	0.861	58551
0.026 -	0.032	0.00104*	#450	100.00	0.916	0.861	16580
0.032 -	0.038	#450	#400	100.00	0.916	0.861	24064
0.038 -	0.045	#400	#325	100.00	0.916	0.861	100114
0.045 -	0.053	#325	#270	99.93	0.918	0.869	465609
0.053 -	0.063	#270	#230	99.83	0.916	0.864	1234193
0.063 -	0.075	#230	#200	99.59	0.906	0.823	1283236
0.075 -	0.090	#200	#170	99.13	0.881	0.768	1520308
0.090 -	0.106	#170	#140	98.46	0.851	0.726	1278393
0.106 -	0.125	#140	#120	97.44	0.823	0.696	1201886
0.125 -	0.150	#120	#100	95.69	0.800	0.679	1219144
0.150 -	0.180	#100	#80	93.04	0.783	0.671	1059649
0.180 -	0.212	#80	#70	89.54	0.773	0.666	835924
0.212 -	0.250	#70	#60	84.96	0.767	0.665	669065
0.250 -	0.300	#60	#50	79.03	0.765	0.664	511394
0.300 -	0.355	#50	#45	73.01	0.768	0.666	305611
0.355 -	0.425	#45	#40	66.13	0.773	0.669	204935
0.425 -	0.500	#40	#35	59.60	0.780	0.675	115056
0.500 -	0.600	#35	#30	52.08	0.784	0.678	78386
0.600 -	0.710	#30	#25	45.03	0.781	0.680	41907
0.710 -	0.850	#25	#20	37.61	0.803	0.691	27243
0.850 -	1.000	#20	#18	31.09	0.824	0.714	14291
1.000 -	1.180	#18	#16	24.95	0.824	0.718	8200
1.180 -	1.400	#16	#14	19.29	0.841	0.721	4708
1.400 -	1.700	#14	#12	13.97	0.844	0.721	2688
1.700 -	2.000	#12	#10	10.79	0.840	0.713	932
2.000 -	2.360	#10	#8	8.48	0.825	0.698	416
2.360 -	2.800	#8	#7	6.95	0.820	0.698	165
2.800 -	3.350	#7	#6	5.61	0.790	0.705	85
3.350 -	4.000	#6	#5	4.53	0.791	0.710	38
4.000 -	4.750	#5	#4	3.84	0.741	0.647	15
4.750 -	5.600	#4	#3.5	3.59	0.758	0.587	3
> 5.600		> #3.5		0.00	0.758	0.650	8



CAMSIZER<sup>®</sup>



ANALISIS DE ARENA DE COSTAS MEXICANAS

Company:	ISNTITUTO DE INGENIERIA
User:	GBHC
Result file:	C:\CAMISIZER\CAMDAT\ISED_04\SED_04_x_area_001.rdf
Task file:	C:\CAMISIZER\CAMSYS\ISED_04.atg
Time:	05.09.2014 , 14:59 , duration 2 min 53 s at 1.0 % covered area, Image rate 1:1 and 60 mm feeder
Particle model:	Spheres
No. of particles:	CCD-B - 1813616 , CCD-Z - 177282
Fitting:	no
Material:	SEDIMENTOS DE LA CUENCA MEDIA DE LA PAZ
Comment:	01 MAYO 2014

Size class	[mm]	ASTM(+)	No(-)	Retenido [%]	SPHT3	b/3	PDN
0.000 -	0.367	PAN	0.01447"	93.50	0.776	0.672	2775904
0.367 -	0.735	0.01447"	0.02894"	81.24	0.786	0.671	176389
0.735 -	1.103	0.02894"	0.04341"	72.53	0.827	0.702	22477
1.103 -	1.470	0.04341"	0.05787"	65.83	0.843	0.709	6146
1.470 -	1.837	0.05787"	0.07234"	60.53	0.850	0.714	2343
1.837 -	2.205	0.07234"	0.08681"	56.45	0.847	0.707	956
2.205 -	2.572	0.08681"	0.10128"	52.38	0.836	0.695	572
2.572 -	2.940	0.10128"	0.11575"	49.06	0.834	0.694	302
2.940 -	3.308	0.11575"	#6	46.06	0.834	0.694	184
3.308 -	3.675	#6	0.14469"	43.80	0.824	0.682	98
3.675 -	4.043	0.14469"	#5	41.52	0.830	0.681	74
4.043 -	4.410	#5	0.17362"	39.74	0.829	0.687	43
4.410 -	4.777	0.17362"	#4	37.88	0.814	0.657	35
4.777 -	5.145	#4	0.20256"	36.44	0.798	0.662	22
5.145 -	5.513	0.20256"	#3.5	34.62	0.819	0.677	20
5.513 -	5.880	#3.5	0.23150"	33.05	0.781	0.615	16
5.880 -	6.247	0.23150"	0.25"	32.04	0.759	0.635	8
6.247 -	6.615	0.25"	0.265"	31.58	0.840	0.743	3
6.615 -	6.982	0.265"	0.27490"	30.79	0.817	0.741	4
6.982 -	7.350	0.27490"	0.28937"	29.82	0.852	0.742	5
7.350 -	7.718	0.28937"	0.30384"	27.85	0.799	0.649	8
7.718 -	8.085	0.30384"	0.3125"	26.95	0.817	0.718	3
8.085 -	8.453	0.3125"	0.33278"	25.93	0.815	0.695	3
8.453 -	8.820	0.33278"	0.34724"	25.57			1
8.820 -	9.188	0.34724"	0.36171"	24.70	0.834	0.770	2
9.188 -	9.555	0.36171"	0.375"	24.20	0.606	0.660	1
9.555 -	9.922	0.375"	0.39065"	22.52	0.791	0.638	3
9.922 -	10.290	0.39065"	0.40512"	22.52			0
10.290 -	10.658	0.40512"	0.41959"	21.85	0.611	0.494	1
10.658 -	11.025	0.41959"	0.4375"	21.78			1
11.025 -	11.393	0.4375"	0.4375"	19.98	0.801	0.660	2
11.393 -	11.760	0.4375"	0.46299"	16.04	0.824	0.712	4
11.760 -	12.128	0.46299"	0.47746"	13.93	0.895	0.888	2
12.128 -	12.495	0.47746"	0.5"	12.73	0.811	0.745	1
12.495 -	12.863	0.5"	0.50640"	12.73			0
12.863 -	13.230	0.50640"	0.530"	8.50	0.778	0.653	3
13.230 -	13.598	0.530"	0.53533"	6.94	0.844	0.727	1
13.598 -	13.965	0.53533"	0.54980"	6.94			0
13.965 -	14.333	0.54980"	0.56427"	6.94			0
14.333 -	14.700	0.56427"	0.57874"	4.93	0.782	0.742	1
> 14.700		> 0.57874"		0.00	0.836	0.851	2



CAMSIZER<sup>®</sup>



ANALISIS DE ARENA DE COSTAS MEXICANAS

Company:	ISNTTITO DE INGENIERIA
User:	GBHC
Result file:	C:\CAMISIZER\CAMDAT\SED 05\SED_05_x_area_20140905_151233_001.rdf
Task file:	C:\CAMISIZER\CAMSYS\SED_05.atg
Time:	05.09.2014 , 15:12 , duration 4 min 6 s at 1.0 % covered area, Image rate 1:1 and 60 mm feeder
Particle model:	Spheres
No. of particles:	CCD-B = 3143870 , CCD-Z = 285606
Fitting:	no
Material:	SEDIMENTOS DE LA CUENCA MEDIA DE LA PAZ
Comment:	01 MAYO 2014

Size class	[mm]	ASTM(+)	No(-)	Retenido [%]	SPHT3	b/3	PDN
0.000 -	0.330	PAN	0.01299*	90.77	0.789	0.673	4013933
0.330 -	0.660	0.01299*	0.02598*	72.44	0.796	0.671	310962
0.660 -	0.990	0.02598*	#18	59.29	0.821	0.697	40650
0.990 -	1.320	#18	0.05197*	49.99	0.836	0.710	10414
1.320 -	1.650	0.05197*	0.06496*	43.38	0.854	0.717	3579
1.650 -	1.980	0.06496*	#10	38.32	0.850	0.717	1484
1.980 -	2.310	#10	0.09094*	34.37	0.845	0.710	703
2.310 -	2.640	0.09094*	0.10394*	30.96	0.837	0.695	376
2.640 -	2.970	0.10394*	0.11693*	27.91	0.827	0.694	233
2.970 -	3.300	0.11693*	#6	25.67	0.831	0.696	124
3.300 -	3.630	#6	0.14291*	23.63	0.822	0.696	82
3.630 -	3.960	0.14291*	#5	22.04	0.805	0.698	46
3.960 -	4.290	#5	0.16890*	20.24	0.803	0.659	42
4.290 -	4.620	0.16890*	0.18189*	18.84	0.808	0.694	29
4.620 -	4.950	0.18189*	0.19488*	17.38	0.799	0.641	21
4.950 -	5.280	0.19488*	0.20787*	16.41	0.751	0.584	12
5.280 -	5.610	0.20787*	#3.5	14.90	0.771	0.588	16
5.610 -	5.940	#3.5	0.23386*	13.58	0.739	0.599	11
5.940 -	6.270	0.23386*	0.25*	12.72	0.817	0.645	6
6.270 -	6.600	0.25*	0.265*	11.87	0.770	0.658	5
6.600 -	6.930	0.265*	0.27283*	11.51	0.738	0.552	2
6.930 -	7.260	0.27283*	0.28583*	10.38	0.753	0.621	5
7.260 -	7.590	0.28583*	0.29882*	9.89	0.840	0.710	2
7.590 -	7.920	0.29882*	0.3125*	9.25	0.744	0.564	2
7.920 -	8.250	0.3125*	0.32480*	8.85	0.824	0.769	2
8.250 -	8.580	0.32480*	0.33780*	8.48	0.756	0.821	1
8.580 -	8.910	0.33780*	0.35079*	8.48			0
8.910 -	9.240	0.35079*	0.36378*	7.97	0.820	0.593	1
9.240 -	9.570	0.36378*	0.375*	7.97			0
9.570 -	9.900	0.375*	0.38976*	7.97			0
9.900 -	10.230	0.38976*	0.40276*	7.25	0.878	0.728	1
10.230 -	10.560	0.40276*	0.41575*	6.50	0.792	0.724	1
10.560 -	10.890	0.41575*	0.42874*	5.67	0.741	0.784	1
10.890 -	11.220	0.42874*	0.4375*	3.80	0.813	0.663	2
11.220 -	11.550	0.4375*	0.45472*	3.80			0
11.550 -	11.880	0.45472*	0.46772*	3.80			0
11.880 -	12.210	0.46772*	0.48071*	3.80			0
12.210 -	12.540	0.48071*	0.5*	3.80			0
12.540 -	12.870	0.5*	0.50669*	3.80			0
12.870 -	13.200	0.50669*	0.530*	3.80			0
> 13.200		> 0.530*		0.00	0.849	0.869	2



CAM SIZER<sup>®</sup>



ANALISIS DE ARENA DE COSTAS MEXICANAS

Company:	ISNTTUTO DE INGENIERIA UNAM
User:	GBHC
Result file:	C:\CAM SIZER\CAMDAT\SED_06\SED_06_x_area_20140905_152512_001.rtf
Task file:	C:\CAM SIZER\CAMSYS\SED_06.atg
Time:	05.09.2014 , 15:25 , duration 6 min 34 s at 1.0 % covered area, Image rate 1:1 and 60 mm feeder
Particle model:	Spheres
No. of particles:	CCD-B - 4630201 , CCD-Z - 331601
Fitting:	no
Material:	SEDIMENTOS DE LA CUENCA MEDIA DE LA PAZ
Comment:	01 MAYO 2014

Size class	[mm]	ASTM(+)	No(-)	Retenido [%]	SPHT3	Symm3	b/3
0.000 -	0.026	PAN	0.00104*	100.00	0.910	0.875	0.848
0.026 -	0.032	0.00104*	#450	100.00	0.910	0.875	0.848
0.032 -	0.038	#450	#400	100.00	0.910	0.875	0.848
0.038 -	0.045	#400	#325	99.99	0.911	0.865	0.846
0.045 -	0.053	#325	#270	99.95	0.911	0.865	0.846
0.053 -	0.063	#270	#230	99.91	0.911	0.865	0.846
0.063 -	0.075	#230	#200	99.85	0.911	0.865	0.846
0.075 -	0.090	#200	#170	99.67	0.885	0.862	0.773
0.090 -	0.106	#170	#140	99.41	0.860	0.857	0.734
0.106 -	0.125	#140	#120	98.97	0.834	0.852	0.703
0.125 -	0.150	#120	#100	98.17	0.809	0.845	0.683
0.150 -	0.180	#100	#80	95.82	0.791	0.841	0.674
0.180 -	0.212	#80	#70	94.88	0.778	0.839	0.668
0.212 -	0.250	#70	#60	92.12	0.768	0.838	0.663
0.250 -	0.300	#60	#50	88.23	0.762	0.840	0.663
0.300 -	0.355	#50	#45	84.08	0.758	0.843	0.663
0.355 -	0.425	#45	#40	79.16	0.760	0.849	0.661
0.425 -	0.500	#40	#35	74.54	0.770	0.858	0.668
0.500 -	0.600	#35	#30	69.11	0.779	0.866	0.673
0.600 -	0.710	#30	#25	63.81	0.784	0.873	0.680
0.710 -	0.850	#25	#20	57.88	0.803	0.876	0.689
0.850 -	1.000	#20	#18	51.94	0.834	0.879	0.718
1.000 -	1.180	#18	#16	45.71	0.832	0.880	0.711
1.180 -	1.400	#16	#14	38.92	0.851	0.882	0.722
1.400 -	1.700	#14	#12	31.40	0.855	0.884	0.718
1.700 -	2.000	#12	#10	25.55	0.846	0.884	0.713
2.000 -	2.360	#10	#8	20.21	0.840	0.885	0.704
2.360 -	2.800	#8	#7	15.69	0.829	0.886	0.691
2.800 -	3.350	#7	#6	12.29	0.829	0.886	0.702
3.350 -	4.000	#6	#5	9.77	0.801	0.892	0.655
4.000 -	4.750	#5	#4	7.66	0.781	0.886	0.688
4.750 -	5.600	#4	#3.5	6.42	0.728	0.882	0.680
5.600 -	6.700	#3.5	0.265*	5.92	0.826	0.919	0.656
> 6.700		> 0.265*		0.00	0.727	0.874	0.620