



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**CARACTERISTICAS QUIMICAS Y MINERALOGICAS DE  
LOS JALES DE LA MINA GUERRERO EN TAXCO, GUERRERO**

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO GEOLOGO  
P R E S E N T A :  
I S A B E L P E R E Z M A R T I N E Z

ASESOR: DRA. MA. AURORA ARMIENTA HERNANDEZ  
COASESOR: M. en C. MA. GUADALUPE VILLA SEÑOR C.



MEXICO D.F.

ABRIL 2002

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.



LIBERTAD NACIONAL  
EXEMPTA DE  
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
60-I-055

**SRITA. ISABEL PEREZ MARTINEZ**  
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora Dra. Ma. Aurora Armenta Hernández y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geólogo:

**CARACTERISTICAS QUIMICAS Y MINERALOGICAS DE LOS JALES DE LA MINA  
GUERRERO EN TAXCO, GUERRERO**

- I INTRODUCCION
  - II MARCO GEOLOGICO
  - III MARCO TEORICO
  - IV METODO DE TRABAJO
  - V RESULTADOS
  - VI DISCUSION
  - VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- BIBLIOGRAFIA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cd. Universitaria, D.F., a 4 de febrero de 2002  
EL DIRECTOR

  
ING. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB\*RLLR\*gtg

PR

## **DEDICATORIAS**

**DEDICO ESTA TESIS A:**

**AMI ESPOSO:**

**POR SER ESA PERSONA TAN ESPECIAL CON LA QUE  
PUEDEO COMPARTIR MI VIDA Y QUE SIEMPRE ESTÁ  
CONMIGO BRINDANDOME SU APOYO Y CONFIANZA.**

**A MI HIJA MONTSERRAT:**

**POR QUE ELLA ES LA FUERZA QUE ME IMPULSA A  
SEGUIR ADELANTE.**

**A MIS PADRES Y HERMANOS:**

**POR QUE ME HAN APOYADO PARA SER LA PERSONA  
QUE SOY AHORA.**

## ***AGRADECIMIENTOS***

Agradezco afectuosamente a la Dra. Ma Aurora Armienta H. y a la M. en C. Ma. Guadalupe Villaseñor C. por su valiosa dirección, orientación y comentarios para la realización de esta tesis.

Al proyecto DGAPA IN104300 por el apoyo brindado.

También a la Q.I. Cecilia Salcedo L. del Laboratorio de Rayos X de Polvos del Depto. USAI (Facultad de Química, UNAM), a la M. en C. Guillermina González M. del Depto. de Ingeniería Metalúrgica (Facultad de Química, UNAM), al Técnico Juan José Ramírez E. del Laboratorio de Yacimientos Minerales (Facultad de Ingeniería, UNAM), a la Q.F.B. Olivia Cruz, a la I.Q. Alejandra Aguayo y a la Q.F.B. Nora Cisneros del Laboratorio de Química Analítica (Instituto de Geofísica, UNAM) por su ayuda y colaboración.

Además agradezco al Dr. Arturo Carranza E. al Ing. Alfredo Victoria y al Ing. Jorge Nieto por sus valiosos comentarios y sugerencias para la realización de esta tesis.

Y a todas aquellas personas que de una u otra manera contribuyeron y me apoyaron para llevar acabo este trabajo.

## RESUMEN

El Distrito Minero de Taxco, se localiza a 160 km aprox. al norte de la capital del estado, entre los paralelos  $18^{\circ} 23'$  y  $18^{\circ} 48'$  de latitud norte y entre los  $93^{\circ} 30'$  y  $93^{\circ} 47'$  de longitud este.

Se encuentra en la provincia fisiográfica de la Sierra Madre del Sur; está integrada por rocas metamórficas de edad Proterozoica (aun no bien establecida), cubiertas por rocas sedimentarias en la parte sur, conglomerados continentales del Cretácico y derrames volcánicos del Terciario.

Los tipos de yacimientos minerales del Distrito son: rellenos de fisura, vetas y mantos de remplazamiento, stockworks y chimeneas de brecha. Su génesis postula una evolución de la mineralización de la zona de Taxco, relacionada con la fase terminal de un sistema caldérico que funcionó en el Oligoceno.

El procesamiento de los minerales desde la época colonial produjo grandes depósitos de residuos, principalmente jales.

Para poder analizar las características químicas y mineralógicas de los jales de la Mina Guerrero en el Distrito Minero de Taxco, se recolectaron muestras en las paredes del depósito.

Estas muestras se analizaron mediante difracción de rayos X, microscopio óptico y microscopio electrónico (EDS) para conocer la mineralogía del jal. Además también se realizaron análisis químicos de contenido de metales como: Fe, Pb, Zn, Cu y el metaloide As, con la finalidad de obtener las concentraciones de estos metales en el depósito.

Se encontró que los principales minerales fueron: cuarzo, goethita, jarosita, yeso y algunos cristales de hematita, así como abundante material arcilloso. De acuerdo a la clasificación mineralógica de jales, el cuarzo y la hematita pueden ser minerales primarios, mientras que la goethita, jarosita y yeso son minerales secundarios.

Las concentraciones de los metales fueron muy elevadas con respecto a algunas concentraciones límite en suelos y agua dadas por algunos autores. Por el ambiente predominantemente ácido y el grado de oxidación prevaleciente en el depósito, se podría pensar que estos metales representan un factor importante de contaminación al ambiente, pero, por otro lado su solubilidad y movilidad está restringida por procesos como: adsorción de metales en óxidos, oxihidróxidos y arcillas así como su precipitación.

Estas características muestran un cierto grado de afectación al ambiente posiblemente por el drenaje ácido de mina (AMD), aunque no en gran escala.

## ÍNDICE:

Resumen	i
<b>CAPÍTULO No. 1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes	
1.2 Objetivos	
1.3 Justificación	
1.4 Localización y Acceso	
1.5 Clima	
1.6 Historia Minera	
1.7 Método de Trabajo	
<b>CAPÍTULO No. 2 MARCO GEOLÓGICO</b>	<b>7</b>
2.1 Fisiografía	
2.2 Geología estructural	
2.3 Estratigrafía	
2.4 Yacimientos Minerales	
2.5 Mineralogía	
2.6 Zoncamiento y Génesis del Yacimiento	
<b>CAPÍTULO No. 3 MARCO TEÓRICO</b>	<b>18</b>
3.1 Procesos de Flotación selectiva	
3.2 Presas de Jales	
3.3 Sedimentología de Jales	
3.4 Clasificación de Jales	
3.5 Clasificación Mineralógica de Jales	
3.5 Identificación de Minerales Secundarios	
3.6 Índice de Alteración	
3.7 Mineralogía de Depósitos Formados por la Oxidación de Sulfuros	
3.8 Sulfatos Disueltos	
3.9 Movilidad de Metales	
<b>CAPÍTULO No. 4 MÉTODO DE TRABAJO</b>	<b>27</b>
4.1 Recolección de Muestras	
4.2 Procesamiento de la Muestra	
4.3 Análisis Mineralógico	
4.4 Análisis Químico	
<b>CAPÍTULO No. 5 RESULTADO DE LOS ANÁLISIS</b>	<b>33</b>
5.1 Resultado de los Análisis Mineralógicos	
5.2 Resultado de los Análisis Químicos	
<b>CAPÍTULO No. 6 DISCUSIÓN</b>	<b>40</b>
6.1 Análisis Mineralógico	
6.2 Análisis Químico	

CAPÍTULO No. 7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	46
BIBLIOGRAFÍA		48
ANEXO I	Gráficas	
ANEXO II	Fotografías	
ANEXO III	Difractogramas	
ANEXO IV	Mapas	



## 1.- INTRODUCCIÓN.

### 1.1 Antecedentes.

La industria minera en México tiene gran relevancia, ya que es una de las actividades económicas más importantes de varios estados del país; Taxco, ha sido uno de los centros mineros de mayor tradición en el país desde tiempos de la Colonia por su producción de minerales metálicos, destacando por la alta producción en plata. Según el anuario estadístico de la Minería Mexicana del Consejo de Recursos Minerales, se le consigna al distrito una producción de plata de 1942 a 1987 de 2'127,317 kg. de plata; en el periodo de 1992 a 1996 se produjeron 369 kg. de oro, 137,194 kg. de plata, 19,099 t de plomo, 1,681 t de cobre y 66, 957 t de zinc. Es conocida la gran tradición minera de este distrito por sus artesanías realizadas con plata. Muchas de las actividades económicas del municipio, están relacionadas con la minería, como la creación de nuevos caminos y medios de transporte, así como el uso de insumos que se requieren en la exploración y explotación de los centros mineros.

Sin embargo, las actividades de esta industria, como muchas otras, pueden crear condiciones adversas al medio ambiente, puesto que los desechos que se producen al realizar el proceso de extracción del mineral pueden perjudicar el ecosistema si no son tratados correctamente de acuerdo con las condiciones del medio en el cual se depositan. Por ello se deben realizar estudios acerca de la prevención y remediación del impacto ambiental que esta actividad pueda ejercer a través de los desechos que produce.

Es necesario, en primer término conocer la mineralogía de los desechos mineros, a los que se conocen como jales, para poder tener una mejor visión de su composición, estos estudios se pueden realizar por diferentes métodos, de acuerdo con las condiciones de los jales y a los estudios geológicos previos; en segundo término se deben estudiar las condiciones de pH en las cuales se encuentran dichos materiales y el contenido de metales pesados que en estos existe, para saber de que manera los minerales están alterándose ó modificándose químicamente. Esta información es indispensable para poder dar un panorama de cómo es el comportamiento de los jales cuando estos ya están depositados y de que manera prevenir una posible contaminación al ambiente.

Los trabajos previos en México sobre jales son pocos, ya que en la actualidad apenas se comienzan a realizar investigaciones acerca de este tema y todavía falta mucha información para dar solución al problema de la contaminación producida por los jales. Algunos de los estudios sobre jales mexicanos son: 1) Evaluación Geoquímica Ambiental del Distrito Minero de Guanajuato (Carrillo-Chavez y otros; 2001). 2) Variabilidad Espacial de Condiciones Geoquímicas en Presas de Jales (Ramos Arroyo-Siebe Grabach, 1998). 3) Geoquímica de Metales Pesados en los Jales El Fraile municipio de Taxco, Guerrero (Barrera Olivarez, Marilú; 2001). 4) Especiación y Movilidad de Metales Pesados en Sedimentos del Río Taxco (Espinosa Serrano, Erick; en preparación). 5)

Mineralogía Comparativa de Tres Presas de Jales en Zimapán, Hgo. (Zaragoza, Miguel Angel 2001), 6) Distribución y Especiación de Arsénico en Sedimentos Fluviales del Río Tolimán en Zimapán, Hgo. (García Escobar, Alfonso 1997), 7) Fraccionamiento de Arsénico en Jales de Zimapán, Hgo. (Méndez Ramírez, Miriam, 2001), así como diversos informes técnicos privados.

Conociendo las necesidades de ampliar la información que existe sobre jales mineros en México, se está realizando un proyecto del Instituto de Geofísica en conjunción con el Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México titulado "Procesos Geoquímicos de Liberación y Transporte de Metales Pesados en dos distritos mineros de México" en el cual se estudiarán los factores que provocan la movilización de los metales pesados, posibles contaminantes al medio ambiente. En particular se pretende conocer la aportación que se realice al medio ambiente de metales y metaloides como arsénico, cobre, plomo, fierro y zinc a partir de los jales de dichos distritos mineros. Esta tesis de licenciatura forma parte del proyecto, ya que aportará datos acerca de la mineralogía y contenido de metales pesados de los jales de la mina Guerrero ubicada en el distrito minero de Taxco, Guerrero.

El distrito minero se divide en las siguientes minas: Guerrero, Remedios. San Antonio, Pedregal, de Jesús, San Carlos, La Azul y Acamixtla.

La mina Guerrero se localiza a 1.5 kilómetros al sur de la ciudad de Taxco (mapa anexo), representa el centro geográfico del Distrito; en ella se localiza la mayor cantidad de reservas de mineral cubicado y se concentra principalmente la actual explotación. En superficie se encuentran las instalaciones de la planta de beneficio "El Solar" (Juarez, 1977).

El mineral que se extrae del Distrito Minero de Taxco, se procesa por flotación selectiva en dicha planta de beneficio, que tiene una capacidad instalada de 3,300 t/día. Los productos finales de los procesos de flotación son concentrados de plomo y zinc; esta unidad beneficia minerales con leyes de 0.29 g/t de Au, 74 g/t de Ag, 0.99% de Pb. 0.10% de Cu y 3.36% de Zn.

## 1.2 Objetivos:

- 1) Determinar las características químicas y mineralógicas de los jales de la mina Guerrero.
- 2) Investigar la movilidad ambiental de metales en dichos jales. Colaborar con información que sirva de base para elaborar un modelo geoquímico de movilidad de metales en jales mineros derivados de yacimientos polimetálicos de acuerdo a sus principales características químicas y mineralógicas.

### 1.3 Justificación.

Aunque existen algunos estudios sobre jales mineros en México, aún falta ampliar la información que ya se tiene, por lo que es necesario realizar más investigaciones al respecto. Para lograr esta meta se deben realizar estudios mineralógicos, que consideren el marco geológico del lugar del cual provienen dichos jales para tener una idea de su posible composición mineralógica. Estos estudios permitirán conocer en primer término los minerales presentes en el depósito y con ello saber los posibles procesos de alteración secundaria que se han ido desarrollando dentro del jal; los cuales pueden generar contaminantes que afecten el medio en el que se encuentran depositados. Después se realizarán los análisis respecto a la química de dichos jales para saber el contenido de metales presentes en ellos; al realizar estos estudios, podríamos decir que tanto puede afectar su movilidad al ambiente, de acuerdo a las condiciones del depósito y a la concentración de cada elemento. Los métodos químicos para la detección de los metales pesados son diversos y estos se van a utilizar de acuerdo a las características que se deseen investigar.

Conforme a los resultados obtenidos en los análisis anteriores, se esperan conocer los procesos geoquímicos que afectan los jales entre los que se encuentra el intemperismo (ya que el clima predominante en el área es un factor determinante en dichos procesos) y así saber la posible contaminación que estos pueden crear en el ambiente que los rodea. Lo más importante de los estudios es poder dar recomendaciones concretas para el tratamiento y remediación de los jales antes de su depósito o las características requeridas en las presas de jales para que el efecto de contaminación se aminore.

### 1.4 Localización y Acceso.

El municipio de Taxco se localiza a 160 km aprox. al norte de la capital del estado, se encuentra entre los paralelos  $18^{\circ} 23'$  y  $18^{\circ} 48'$  de latitud norte y entre los  $93^{\circ} 30'$  y  $99^{\circ} 47'$  de longitud oeste, respecto al meridiano de Greenwich. Colinda al norte con Tetipac, al sur con el municipio de Iguala y Teloloapan; al este con el municipio de Buena Vista de Cuellar y el estado de Morelos; al oeste con los municipios de Pedro Ascencio Alquisiras e Ixcatcopan. Cuenta con una extensión territorial de 347 kilómetros cuadrados; su acceso es por las dos carreteras pavimentadas de Cuernavaca e Iguala, tanto la de cuota (carretera No.95) como la libre (INEGI, 1998). (Figura 1)



## 1.5 Clima.

El clima predominante es cálido subhúmedo, semicálido en las zonas montañosas y mayor a 20°C en zonas planas. Este clima va de lluvioso a tropical con lluvias en otoño y verano y sequía en invierno, con lluvias anuales de más de 1000 mm. La vegetación es de tipo de estepa, excepto en las partes elevadas, en las cuales hay un tipo de bosque de clima templado (INEGI, 1998).

Las corrientes hidrográficas se componen básicamente de los ríos Taxco y Temixco; los arroyos Tecalculco, Granados, San Juan, Plan de Campos, las Huertas y Acatlán.

## 1.6 Historia Minera.

De acuerdo con la información que se encuentra en la Monografía Geológica Minera del Estado de Guerrero (1999), se realizó una síntesis de la historia del Distrito Minero de Taxco:

Taxco, cuyo nombre indígena era Tlachco ( lugar donde se juega pelota), fue el asentamiento más importante de la comarca antes de la llegada de los españoles; el presente Taxco se encuentra en el lugar que se conocía como Tetelcingo (Cerro Pequeño). Actualmente Taxco el Viejo, se encuentra a 14km de Taxco.

Los depósitos de plata y oro en Taxco se comenzaron a trabajar en la época prehispánica (1428-1468). Después de la conquista de la Gran Tenochtitlan a finales de 1521, Hernán Cortes mandó reconocer la región taxqueña, resultando en la apertura de la primera mina de América, abierta por los españoles en 1522 con el "Socavón del Rey" o "Socavón de Cortés" en Tehuilotepec por Rodrigo de Castañeda. El distrito tuvo su primer periodo de auge desde 1570 hasta 1585, probablemente trabajando las numerosas minas que se encuentran al sur y al este de Taxco.

En 1747 comienza el periodo de mayor producción de plata cuando don José de la Borda explotó San Ignacio, El Pedregal, La Lajuela, El Coyote y Cerro Perdido el cual se prolongó hasta 1762. Entre 1752 y 1762 se descubrieron las minas La Borda y Yo Amigo; En 1780, Miguel José de la Estaca descubrió los depósitos de Juliantla.

Después de 1802, las actividades mineras disminuyeron considerablemente hasta quedar paralizadas en 1811. Hasta 1920, el distrito minero se reactivó con la explotación de menas de sulfuros complejos de plomo, zinc y cobre con plata y oro, debido a la introducción del sistema de beneficio por flotación selectiva, permitiendo tratar minerales de baja ley; se instaló la primera planta de beneficio y con ello empezó la explotación moderna de las minas.

La empresa American Smelting and Refining Company (ASARCO, hoy en día Industrial Minera México S.A. de C.V.), llegó a Taxco para el año de 1942 adquiriendo los principales fondos de la zona. En 1976 se inauguró la nueva "Unidad Taxco" con todas sus minas comunicadas en forma subterránea para concentrar el mineral producido en un punto que es el tiro "El Solar".

### 1.7 Método de Trabajo

Se realizó una compilación bibliográfica acerca del distrito minero de Taxco, sobre su historia minera y su geología, además de estudios sobre jales mineros. Posteriormente se realizó un muestreo de los jales de la mina Guerrero en Taxco, Gro. Dichas muestras se llevaron al laboratorio y se prepararon para su análisis posterior. Con ellas se hicieron análisis mineralógicos como son: difracción de R-X, análisis a través del microscopio óptico y electrónico de barrido; también se efectuaron análisis químicos de contenido de metales por digestión de muestras totales, contenido de sulfatos por el método turbidimétrico, medición del pH y conductancia.

La descripción de cada uno de los métodos utilizados para la realización de los análisis de las muestras, se hará en el capítulo No. 4.

## 2. – MARCO GEOLÓGICO

El distrito minero de Taxco, Gro. se encuentra en la provincia fisiográfica de la Sierra Madre del Sur. La parte sur está integrada por rocas Mesozoicas, principalmente sedimentos calcáreos y la parte norte por una secuencia de conglomerados continentales, piroclásticas y derrames volcánicos del terciario (Muñoz Cabral, 1981).

El distrito minero de Taxco, se encuentra en la plataforma Guerrero-Morelos del terreno Guerrero, según las definiciones de los terrenos tectonoestratigráficos que realizaron Campa y Coney (1983) (Figura 2). Representa una secuencia vulcanosedimentaria jurásica de arco insular, con las rocas calcáreas cretácicas y el sobrepuesto depósito tipo flysch del terreno Mixteco ( Guerra y Sánchez, 1991).

### 2.1 Fisiografía:

Según Raisz (1959), el Distrito Minero de Taxco se sitúa al borde septentrional de la subprovincia denominada cuenca del Balsas-Mexcala, en la provincia fisiográfica de la Sierra Madre del Sur (Figura 3); dicha cuenca es una región que muestra afloramientos de rocas que abarcan desde el Precámbrico hasta el Oligoceno. Está caracterizada por rocas mesozoicas depositadas en los bordes del masivo Taxco-Zitácuaro del paleozoico, sobreyaciendo estos estratos una gruesa secuencia de conglomerados continentales, flujos piroclásticos y volcánicos de edad terciaria. El área está intrusionada por troncos y diques de diversa composición y edad que han sido afectados por un fallamiento normal prevaeciente; algunas de estas fallas fueron ocupadas por soluciones mineralizantes y formaron vetas de fisura o de reemplazamiento.

De acuerdo con Escandón (1972) esta zona es de tipo "Montañas Complejas", se caracteriza por estar constituida por diferentes tipos de rocas muy plegadas y falladas, a menudo intrusionadas por diques y troncos de varias épocas.

Las rocas de la parte sur, formadas por sedimentos calcáreos tienen desagüe dendrítico, bien formado; los clásticos forman desagüe con cauces más profundos y angostos, además de relieve más anguloso. Estas características se muestran en un ciclo de erosión en una etapa de madurez (Muñoz, 1981).

La parte norte tiene una topografía muy abrupta, presentando cantiles y no tiene un desagüe integrado, por lo que su ciclo de erosión se encuentra en una etapa juvenil (Muñoz, 1981).



Figura No.2 Terrenos Tectono-estratigráficos ( Campa y Coney, 1983)



Figura No.3 Provincias, Regiones y subregiones de México (Raisz, 1959). Fuente: Página internet de la SEMARNAT

## 2.2 Geología Estructural.



## 2.2 Geología Estructural.

Los fenómenos tectónicos que plegaron y fallaron las rocas cretácicas existentes en el área, deben su origen a la acción de los esfuerzos compresionales opuestos que actuaron de este a oeste y en sentido contrario, durante la orogenia Laramide (Ontiveros, 1973).

El patrón estructural que predomina en el área, está constituido por una serie de pliegues anticlinales de forma alargada, generalmente asimétricos (Ontiveros, 1973). El Distrito de Taxco se encuentra sobre un anticlinorio orientado NE-SW ocasionado por la acreción del terreno Guerrero, lo cual produjo una serie de corrimientos interestratos en zonas de debilidad (contactos interformacionales) (Figura 4).

El principal rasgo estructural del Distrito Minero es una gran falla de bajo ángulo que llega a tener de uno a dos metros de salbanda rellenándola. Por lo general, los pliegues son amplios con ejes de gran extensión en las rocas calcáreas, no así en las lutitas donde se presentan estrechos, recumbentes y con ejes cortos e irregulares (Guerra, 1991).

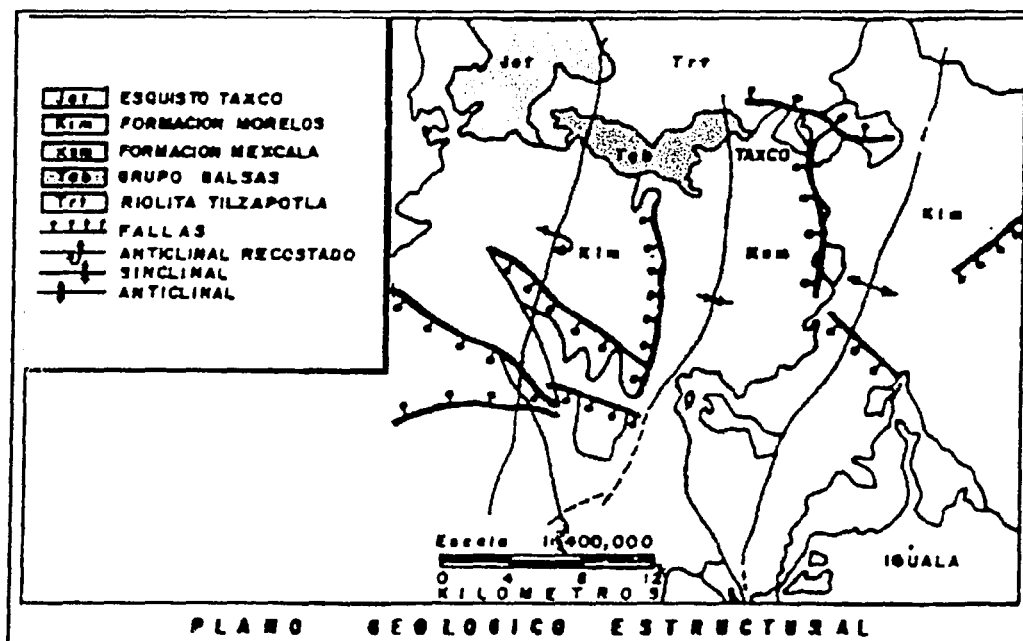


Figura No.4 Plano Geológico Estructural del distrito minero de Taxco (Clark, 1986).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 2.3 Estratigrafía.

Las unidades estratigráficas que afloran en el distrito son principalmente rocas cretácicas que descansan sobre rocas metamórficas de edad Jurásico Superior-Cretácico Inferior (Campa y Ramírez, 1979). Estas rocas metamórficas (Esquisto Taxco/ Roca verde Taxco Viejo) forman la unidad más antigua y consisten en esquistos sericíticos y cloríticos (provenientes de rocas volcánicas y de lutitas negras o limolitas) y pizarras que han sufrido metamorfismo de bajo grado de las facies de esquisto verde. De acuerdo con Campa y Ramírez (1979) estas dos formaciones son una sola y la posición estratigráfica de estas se encuentra invertida. Estas rocas afloran en la parte este de Taxco, entre las minas El Pedregal y Remedios.

En contacto tectónico por cabalgadura, las unidades anteriores están cubiertas por las calizas y dolomitas de la Formación Morelos, con una edad del Cretácico Inferior (Albiano-Cenomaniano Inferior). Los sedimentos de tipo flysch de la Formación Mexcala, sobreyacen en forma discordante a la formación anterior; consisten en capas intercaladas de areniscas, lutitas y limonita calcárea, su base es de composición calcárea y su cima es arcillosa, la edad de estos sedimentos es del Cretácico Superior. La presencia de fragmentos de la caliza Morelos en las capas bajas de la Formación Mexcala, sugieren que la región sufrió un levantamiento y no se depositó la caliza Cuautla del intervalo turoniano, sin embargo la caliza yace en la periferia del distrito localizada estratigráficamente entre las calizas Morelos y la Formación Mexcala. Las capas rojas continentales de la Formación Balsas cubren en discordancia todas estas formaciones y el conjunto está cortado por diques y diquestratos doleríticos y riolíticos. Al norte de Taxco afloran rocas volcánicas de la riolita Tilzapotla y tobas y lajares más recientes (CRM, 1999). (Figura No.5)

A continuación se da una descripción más detallada de la estratigrafía del Distrito de acuerdo con Guerra y Sánchez (1991):

**Esquisto Taxco.-** Fries (1960) lo describió como esquisto sericítico de color gris con intercalaciones de filitas, compuesto por cuarzo, feldespatos y sericita, todos enclavados en una matriz sericítica más densa, aunque también hay esquistos cloríticos y talcosos. El esquisto presenta numerosas vetillas de calcita y lentes de cuarzo que concuerdan con la esquistosidad.

**Roca Verde Taxco Viejo.-** Está compuesta por interestratificación de tobas, brechas y corrientes lávicas, casi todas de composición andesítica; sobreyace al esquisto Taxco en una inconformidad angular, de acuerdo a su posición estratigráfica le han asignado una edad del Jurásico Superior.

**Formación Morelos.-** Sucesión de estratos potentes de caliza y dolomía. Se encuentran separadas de las rocas anteriores por una inconformidad donde la base de las calizas tiene

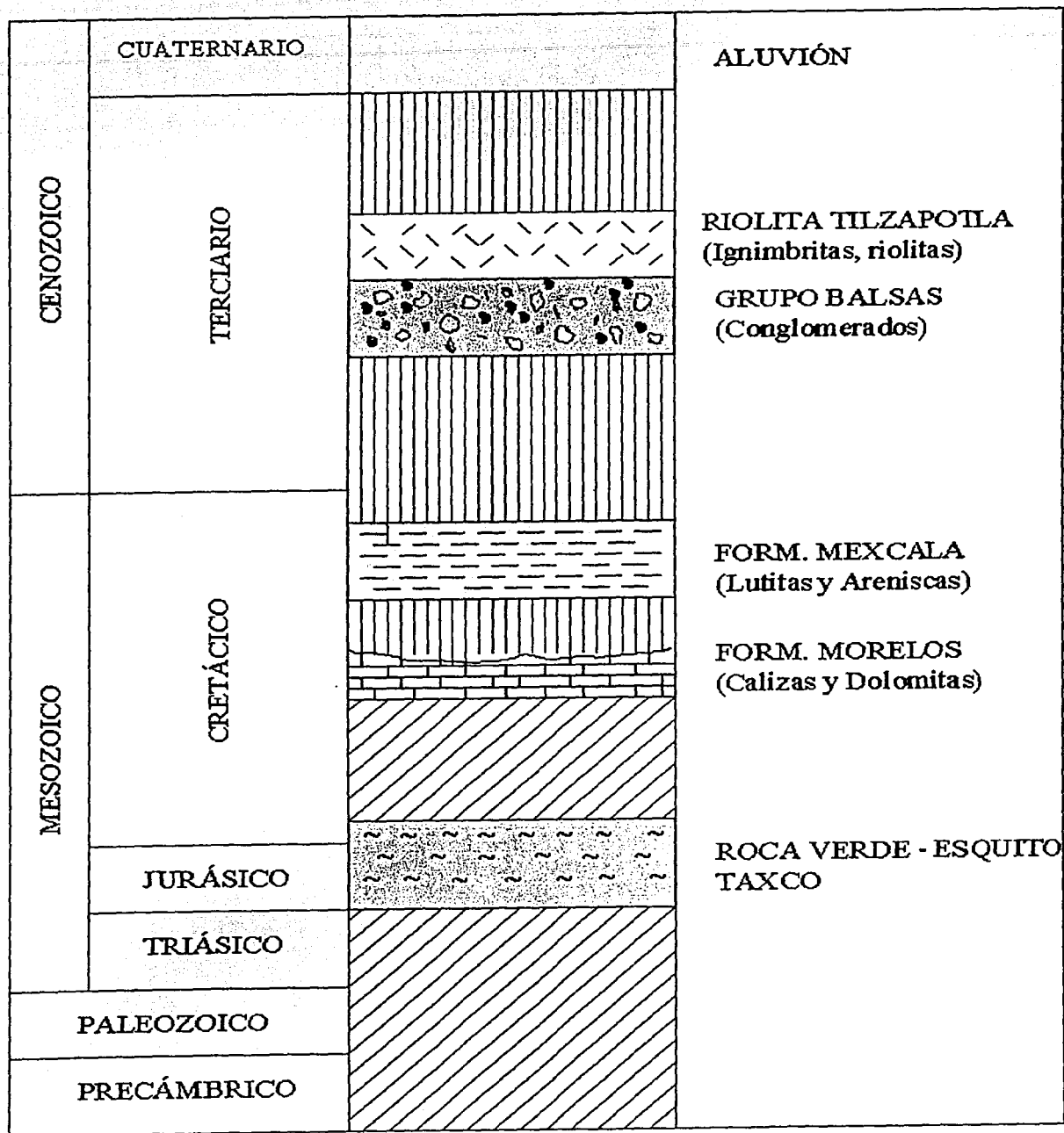


Figura No. 5 Columna Estratigráfica del Distrito Minero de Taxco, (Modificada de Clark, 1986 y Castro, 2002)

una zona de milonitas, lo que sugiere que estos estratos fueron commidos durante la orogenia Laramide.

Formación Mexcala.- Sucesión de lutitas y areniscas calcáreas interestratificadas. La base de esta formación es calcárea mientras que su cima es arcillosa; estas variaciones litológicas son muy importantes en el control de la mineralización producida en el distrito.

Formación Balsas.- Variedad de rocas clásticas continentales entre los que incluyen: yeso, caliza lacustre, conglomerado volcánico, tobas y otras. Está separada de las otras formaciones por una inconformidad horizontal, en la región de Taxco.

Riolita Tilzapotla.- Serie de ignimbritas, derrames riolíticos y tobas de la misma composición. Es una secuencia de brechas tobáceas, flujos de riolitas e ignimbritas, sobreyaciendo en concordancia al Grupo Balsas.

Rocas Intrusivas.- En la región de Taxco se encuentran un gran número de troncos, diques y diquestratos de composición y edades variables que intrusionan todas las rocas, desde el esquisto Taxco hasta la riolita Tilzapotla. Existen tres tipos de intrusivos: El primero restringido sólo al esquisto Taxco ( de Edad Precámbrico Superior o Paleozoico Inferior aproximadamente) clasificado como diorita altamente alterado; el segundo tipo de intrusivos lo constituyen diques de composición félsica que atraviesan tanto a las rocas precámbricas y cretácicas como a las vetas, se clasifican como sienitas y están fuertemente caolinizados, muchos de estos diques ocupan algunas fisuras de las vetas; el último evento intrusivo es de composición básica. Este intrusivo corta a todas las unidades litológicas en forma de diques y troncos por lo que es más joven que la mineralización, aunque la presencia de sulfuros en algunas de las vetas sugieren que fueron intrusionados en el momento en que las vetas se formaron.

#### 2.4 Yacimientos Minerales.

Existen diferentes tipos de yacimientos minerales en el distrito:

- Rellenos de Fisura
- Vetas de Reemplazamiento
- Manto de Reemplazamiento
- Stockworks
- Chimeneas de Brecha

Rellenos de Fisuras.- Desde el punto de vista económico, estas vetas son los depósitos más importantes en el distrito por su tonelaje y calidad. Son representativos de una gran provincia metalogenética; estas vetas constituyen dos sistemas cuya orientación es norte y N60°W con una inclinación variable. (Clark 1986). Las vetas de fisura son más

persistentes que las de reemplazamiento; son uniformes en el Esquisto Taxco e irregulares en la Formación Mexcala (CRM, 1999). Hacia el norte y noreste no se tiene una evidencia clara del límite de la mineralización, en el caso de la veta El Cobre las fisuras no continúan en la Formación Mexcala pero en la veta La Marqueza la mineralización termina con el esquisto aunque las fisuras persisten. Puede haber una zonación vertical, ya que a mayor profundidad los valores de plata decrecen, el Fe se comporta de manera similar pero los valores de zinc incrementan aunque en los niveles más bajos la mineralización persiste horizontalmente (Clark, 1986).

La posible paragénesis de estas vetas está dada por la mineralización que ocurre en dos etapas, la 1ª se caracteriza por cuarzo y sulfuros como: galena argentífera, esfalerita y pirita, la 2ª etapa ocurre mucho después y estructuralmente está asociada con un intrusivo básico que atraviesa la veta EL Cobre en su parte nor-central y está confinada a esa área; esta segunda etapa fue más rica en Ag y está representada por proustita, pirargirita, jamesonita y otras sulfosales (Clark, 1986).

La alteración de la roca encajonante es principalmente silicificación, y también existe caolinización especialmente en diques y diquestratos.

**Vetas de Reemplazamiento.**- Son similares a las anteriores, se diferencian porque la mineralización de las vetas de fisura preexiste y también reemplaza a la roca encajonante adyacente; algunas vetas pueden cambiar de vetas de fisura a vetas de reemplazamiento. Tienen una orientación N60°W y una inclinación variable. Excepto en pequeñas zonas, la roca encajonante de este tipo de vetas son las calizas Morelos y la Formación Mexcala. Su estructura interna no está definida, exhibiendo un reemplazamiento irregular en la roca encajonante especialmente donde esta roca es más calcárea. La alteración de estas vetas es de tipo silicatada, manifestada por la presencia de epidota, ilvaíta, actinolita y tremolita. La ganga tiende a ser silíceo en las vetas que arman el esquisto o en la lutita, mientras que en la caliza consiste predominantemente de carbonatos. Los sulfuros consisten en galena, esfalerita, pirita y calcopirita (Clark, 1986).

**Mantos de Reemplazamiento.**- Los mantos del distrito son considerados como de reemplazamiento de formas irregulares entre la caliza Morelos. Estos mantos se encuentran en lugares donde la caliza se adelgaza y algunas veces la atraviesan y forman pequeños cuerpos en la base de las lutitas de la formación Mexcala. Los mantos no tienen una estructura interna definida, la mineralización es más intensa en la base de las calizas y esta consiste de magnetita, pirita y specularita con algo de esfalerita y galena en una ganga donde prevalece la ilvaíta. Tienen leyes muy bajas en plomo y zinc, mientras que las de plata varían de 200 a 300 g/t. Un rasgo importante de los mantos es la presencia de magnetita y hematita masivas; no obstante, los minerales de los mantos, en términos generales, son los mismos que se presentan en vetas de reemplazamiento (Clark, 1986).

De los mantos, los más importantes están en el área de la mina Babilonia (actualmente los tiros El Solar y Guerrero), situada al sur de la ciudad de Taxco, entre las vetas El Cobre y Babilonia.(Figura 6)

# ESTADO DE GUERRERO

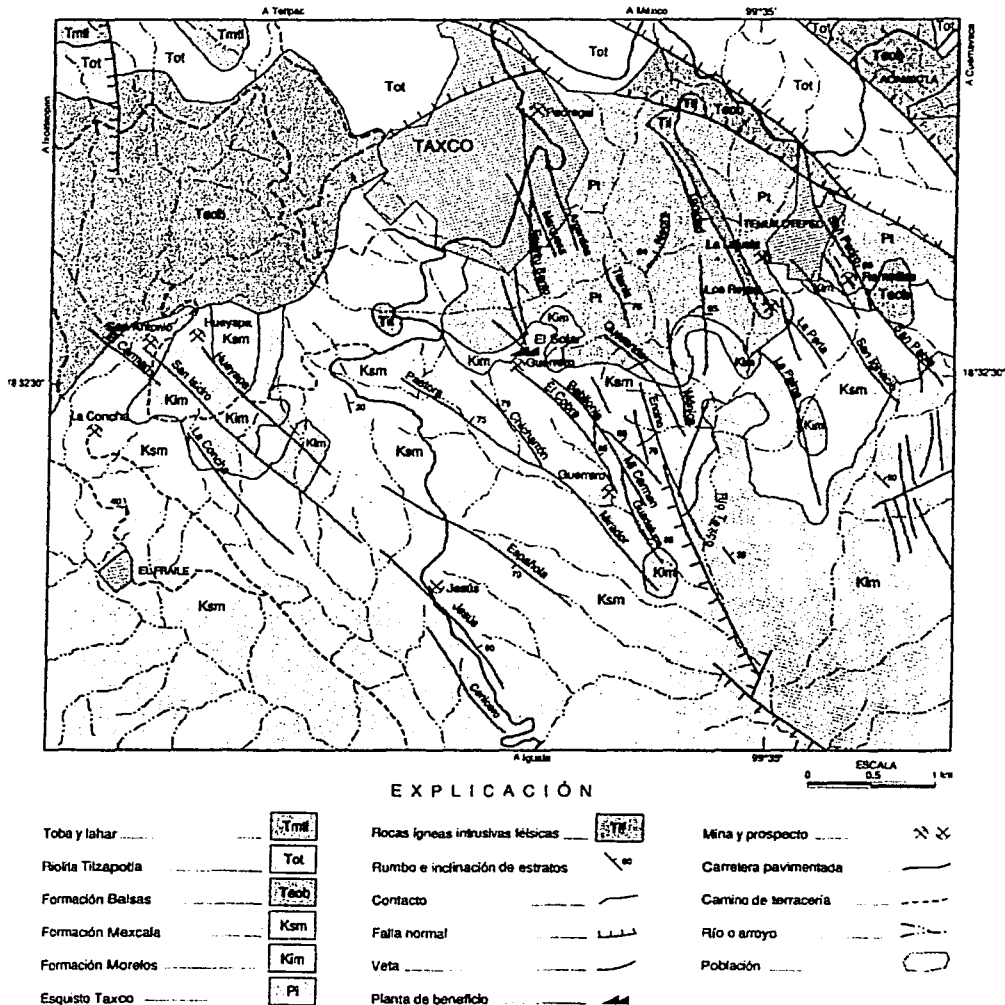


FIGURA 62: DISTRITO MINERO DE TAXCO

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Figura No.6 Mapa Geológico del distrito minero de Taxco, Guerrero. Fuente: Consejo de Recursos Minerales, 1999

Stockworks.- El cuerpo de tipo enjambre de hilos y vetillas (stockwork) en el área de la mina Remedios y al bajo de la veta El Cobre está formado por galena, esfalerita, calcopirita y pirita, los minerales de plata son pirargirita y argentita, mientras que la mineralogía del cuerpo de sulfuros masivos aún no está definitivamente establecida. Los stockworks están asociados con los cuerpos de reemplazamiento de la Formación Morelos, con una orientación N-S, (Clark, 1986).

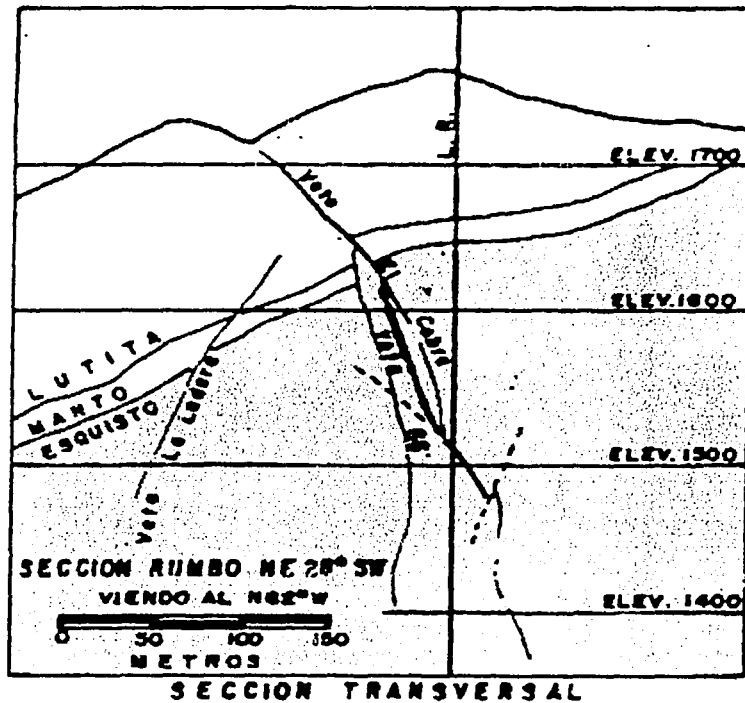


Figura No.7 Sección transversal de la veta El Cobre de la mina Guerrero en Taxco, Gro. (Clark, 1986)

Chimeneas de Brecha: Estos depósitos están localizados en el límite noreste del distrito minero. Las chimeneas constan de fragmentos de caliza y riolita reemplazados por fluorita, pero su matriz es tobácea.

## 2.5 Mineralogía.

La mineralogía del distrito se divide en minerales hipogenéticos, de enriquecimiento y supergenéticos (Tabla No.1).

Tabla No.1 Mineralogía de la Mina Guerrero en Taxco, Guerrero (Muñoz, 1981).

Minerales Transparentes		Minerales Opacos		
Mayores	Cuarzo (un tipo relacionado con la mineralización y otro postmineral).  Calcita (asociada a todas las vetas).		Hipogenéticos	Supergenéticos
		Mayores	Pirita Esfalerita Galena Marcasita	Hematita (es el mineral de mayor abundancia) Covelita Calcosita Bornita
Menores	Sericita Clorita Albita Fluorita Illita Epídota Tremolita Actinolita Biotita	Menores	Calcopirita Tetrahedrita Pirargirita	Pirolusita Cerusita Smithsonita Anglesita
		Traza	Arsenopirita Pirrotita Jamesonita Bournonita Magnetita	

## 2.6 Zoneamiento y Génesis del Yacimiento.

Las soluciones mineralizantes en las vetas fueron ascendentes y con una ligera tendencia hacia el sureste salvo las vetas de las mina Remedios que tienen tendencia casi vertical, ligeramente contraria a las anteriores, hacia el noroeste.

Las vetas de la mina Guerrero, más notable en la veta el Cobre y Ladera, indican una temperatura mayor de formación por lo que se puede considerar como centro de mineralización. En el zoneamiento distrital se observa una clara, aunque ligera tendencia de flujo de las soluciones de noroeste a sureste por lo que se asume que la mineralización proviene de una fuente profunda y localizada hacia el noroeste del distrito a nivel regional (Muñoz, 1981).



De acuerdo con la Monografía Geológico-Minera del Estado de Guerrero, se postula una hipótesis genética y de evolución de la mineralización de la zona de Taxco, relacionada con la fase terminal de un sistema caldérico que funcionó en el Oligoceno. Las principales evidencias de una caldera son: una estructura circular, presencia de abundantes materiales de origen explosivo (ignimbritas) y lavas riolíticas, abundancia de diques y estructuras intracaldera. La instalación de un sistema hidrotermal terminal tardío tuvo su mayor efecto en los bordes, septentrional y nororiental de la caldera, así como a lo largo de fracturas NNW-SSE dentro de la misma. La fuente de los metales en el sistema hidrotermal es la diseminación original en las rocas vulcanosedimentarias precretácicas (Esquisto Taxco/Rocaverde Taxco viejo). Como sello del sistema hidrotermal funcionaron rocas impermeables como la Riolita Tilzapotla al norte, diques preminerales en las fallas y efecto local de las facies lutíticas de la Formación Mexcala. La edad de la mineralización debe de haber sido inmediatamente después de la salida de las riolitas, probablemente al final del Oligoceno.

### 3.- MARCO TEÓRICO.

Los jales mineros comprenden la fracción no económica del mineral, que es separado de la mena durante los procesos mineros de molienda, flotación y espesado. La separación efectiva durante estos procesos, usualmente requiere que los depósitos de jales sean de partículas del tamaño de arena y limos.

La separación de la mena y los jales, se tiene que realizar a través de procesos tales como: lixiviación química, asentamiento gravitacional, flotación selectiva, etc. En el proceso de extracción frecuentemente se desea reunir los minerales valiosos en la forma de un concentrado, el cual deberá contener la totalidad de ellos con la menor cantidad de ganga que fuere posible.

#### 3.1 Proceso de Flotación Selectiva.

De acuerdo con Rabona (1975), el proceso de flotación selectiva es uno de los métodos más comunes para extraer los minerales valiosos de ciertas clases de menas y, cuando es aplicable, por lo general resulta más eficiente que cualquier otro proceso que pudiera aplicarse para los mismos límites de tamaños de partículas. Este proceso es empleado en la mina Guerrero, para la concentración del mineral.

El proceso de concentrar los minerales valiosos por flotación comprende cinco pasos: (1) trituración, (2) molienda, (3) flotación, (4) filtración del concentrado y (5) disposición de colas o jales.

En la sección relativa a trituración en la planta de flotación, el mineral que sale de la mina es quebrado hasta un tamaño que varía entre  $\frac{3}{4}$ " y  $\frac{3}{8}$ " en dos o tres etapas sin el uso del agua, excepto como rocío para remover el polvo, siendo éste el límite económico de la maquinaria que tritura en seco. El tamaño del producto terminado oscila entre malla 48 (0.295 mm) y malla 200 (0.074 mm).

La reducción de la mena a base de la molienda húmeda, es esencial para una flotación satisfactoria; el último paso de la reducción debe realizarse en agua para que cada superficie fresca del mineral expuesta en el proceso, llegue a estar bien humedecida. El tamaño del producto final debe ser lo suficientemente pequeño para liberar la totalidad del mineral de la ganga sin que se produzca una cantidad indebida de finos.

Durante o inmediatamente después de la molienda y antes de la operación de flotación que sigue, la pulpa se acondiciona con reactivos especiales, los cuales tienen funciones diferentes y se agregan por tres razones principales: 1) para afectar las superficies de las partículas a efecto de ser flotadas de tal modo que se adhieran a las

burbujas de aire introducidas en la pulpa en la máquina de flotación, 2) para estabilizar estas burbujas con el fin de hacer posible la formación de una espuma lo suficientemente coherente y 3) para hacer no flotables ciertos minerales metálicos y otros componentes de las rocas.

Después de la operación de acondicionamiento, la pulpa es llevada a la máquina de flotación en la que el aire es inyectado para producir una nube de burbujas de aire ascendente. Estas burbujas, llegan a cubrirse con el mineral en tanto se elevan a la superficie, donde se reúnen o aglomeran formando una espuma con partículas minerales adheridas, la que continuamente fluye o es retirada del labio (vertedor) de la máquina pasando a un canal colector. Si el concentrado así producido no resulta lo suficientemente limpio se pasa a la etapa siguiente de tratamiento, esto es, a una máquina más pequeña para conseguir que responda al grado de calidad requerida.

El concentrado final se filtra para remover la mayor parte del agua llevándose a la fundición, o bien, se somete a lixiviación o a otra sección de reducción metalúrgica.

La disposición de las colas o jales usualmente se consigue por espesamiento y asentamiento con recuperación del agua, comprendiendo lo anterior la última etapa del tratamiento de flotación.

El lodo o cola residual, es transportado por bombeo formando una mezcla de sedimentos y agua. Se producen grandes volúmenes de desechos los cuales se tienen que depositar en una zona cercana a la planta de beneficio. Los depósitos o también llamadas presas de jales deben estar ubicados en sitios donde no exista riesgo de contaminación a poblados o acuíferos.

### 3.2 Presas de Jales.

Las presas de jales tienen como función retener los lodos de jal (sólidos + agua) y durante el proceso de sedimentación permiten que las partículas dejen de estar en suspensión, se asienten y depositen gradualmente en el fondo del vaso de almacenamiento.

Las presas de jales deben contar con cuatro elementos básicos:

- a) La cortina contenedora.
- b) El vaso de almacenamiento.
- c) La alcantarilla o tubería de decantación y drenaje.
- d) El vertedor de demasías.

### 3.3 Sedimentología de Jales.

Los jales representan la parte terrosa que queda de los procesos de molienda llamada ganga y también una pequeña proporción de minerales de mena; el tamaño de grano depende de la finura de la molienda del mineral de mena.

Los jales pueden ser depositados por una gran variedad de métodos, los que son comúnmente bombeados a las presas de jales por medio de una mezcla de agua y sólidos, que posteriormente se dejan asentar.

El proceso más importante que afecta la estratigrafía de una presa de jales es la clasificación hidráulica del tamaño de granos que ocurre después de la descarga del jal. En estas presas encontramos dos tipos de ambientes de depósito: una zona subaérea que puede extenderse de decenas a cientos de metros del punto de descarga y una zona lacustre donde el agua se encuentra todavía estancada, caracterizada por una alta energía de los sedimentos.

Las estructuras sedimentarias tales como estratificación gradual, laminación y el bandeamiento cruzado son comunes; existe una buena clasificación del tamaño de grano así como un redepósito de finos que ocurre sobre una extensa área, sobre todo si el terreno tiene una pendiente diferente.

### 3.4 Clasificación de Jales.

Los tipos de jales cubren una amplia variedad de características lo que resulta en una difícil generalización; no solo varía el tipo de mineral, sino también el proceso de concentración.

Las bases generales de su caracterización física son el tamaño de partícula, la gravedad específica y la plasticidad. La tabla No.2 muestra la clasificación de las características físicas de los jales.

### 3.5 Clasificación Mineralógica de los Jales.

Algunas plantas procesadoras de minerales emplean agentes químicos que atacan a los minerales que se encuentran en la molienda; los jales que son descargados después de estos procesos conteniendo a los minerales que no han sido alterados químicamente, se encuentran en un estado original. Para distinguir estos minerales de los minerales que se precipitan a partir de los derivados químicos, cuando los jales ya han sido depositados, se ha dado la siguiente clasificación de jales de acuerdo con Jambor (1994):

### Minerales Primarios:

Son aquellos minerales provenientes de los procesos metalúrgicos de extracción de metales, (minerales de ganga y algunos minerales de mena) que sólo han sido afectados por procesos físicos y subsecuentemente fueron depositados en la presa sin presentar otro cambio.

Tabla No.2 Características físicas de los jales (Orozco, 1997).

CATEGORÍA	CARACTERÍSTICAS GENERALES
<b>Jales de rocas suaves</b> Residuos finos de carbón Trona no disuelta	Contiene fracciones de lodo y arena, pero el lodo puede dominar del todo las propiedades lo que puede causar la presencia de arcilla.
<b>Jales de roca dura</b> Hierro-Zinc. Cobre, Oro-Plata. Molibdeno, Níquel (sulfatos).	Puede contener fracciones de arena y lodo, pero los lodos son usualmente de baja plasticidad a no plásticos. Las arenas usualmente controlan todas las propiedades.
<b>Jales finos</b> Fosfatos Arcillosos Bauxitas de lodo rojo Jales finos de taconita Lodos de jales de arenas de alquitrán	La fracción de arenas es poca o no existe. El comportamiento del material, particularmente las características de sedimentación-consolidación son dominadas por partículas de tamaños de arcillas o limos y puede crear problemas en el volumen de los desechos.
<b>Jales de grano grueso</b> Jales arenosos de alquitrán Jales de uranio Jales de yeso Jales gruesos de taconita Arenas fosfatadas	Contienen principalmente arenas o limos no plásticos mostrando una conducta parecida al de las arenas y que pueden favorecer las características ingenieriles.

### Minerales Secundarios:

Estos se forman dentro de la presa, principalmente por precipitación de los constituyentes derivados de las reacciones de oxidación e hidrólisis cerca de la superficie

de la presa. El Yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) puede derivarse de la oxidación de los componentes que formaron parte en los procesos mineros acuosos y cristalizar in situ. Los minerales secundarios no se encuentran confinados a una zona superficial por lo que también pueden presentarse a profundidad, formando sitios de oxidación. Los minerales secundarios típicos son los oxihidróxidos de Fe, tales como la Goethita  $\text{FeO}(\text{OH})$  y sulfatos tales como la Jarosita  $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ .

#### Goethita:

La goethita se forma principalmente de la oxidación de la piritita y pirrotita, es considerada la forma más estable del óxido de Fe (III) y esto ocurre en casi todo tipo de ambientes superficiales, aunque la podemos encontrar típicamente en la zona saturada. Su distribución dentro del depósito se encuentra restringida al grado de oxidación; su abundancia puede decrecer en perfiles de oxidación madura, cerca de la zona superficial lixiviada; en un perfil de intermedio a maduro, demuestra su máxima acumulación a profundidad, comúnmente formando una capa dura que marca la zona de incremento en el pH.

#### Jarosita:

La jarosita es el miembro más común de la familia básica de sulfatos de Fe que pueden surgir por reemplazamiento parcial o una completa sustitución de  $\text{K}^+$  por otros cationes monovalentes y algunos divalentes. Es un mineral común en ambientes ácidos y de gran cantidad de sulfuros, usualmente aparecen entre la zona saturada y vadosa de los jales, así como en suelos ácidos de sulfuros. La distribución de la jarosita es mas o menos igual al de la goethita, pero es más ligera al aumentar su grado de oxidación; en un perfil maduro puede estar ausente o escasa en una zona cercana a la superficie lixiviada, pero su abundancia se incrementa con la profundidad.

#### Yeso:

El yeso secundario se caracteriza por un tamaño de grano grueso. con cristales individuales comúnmente de un milímetro o más de longitud; este tipo de yeso es típicamente más abundante en la zona oxidada, pero también a lo largo de la zona saturada. En la zona de oxidación las principales fuentes de Ca y  $\text{SO}_4$  son minerales de carbonatos disueltos y minerales de sulfuros oxidados respectivamente, aunque en la zona saturada el  $\text{SO}_4$ , probablemente se deriva de los reactivos de los jales.

Otros oxihidróxidos de Fe observados en los jales (Lepidocrosita, akaganeita y ferrihidrita), son raros en comparación con la abundancia de la goethita; la ausencia de hematita en los minerales secundarios es notable; de acuerdo a Jambor (1994), las condiciones que favorecen la formación de goethita son generalmente desfavorables para la formación de hematita y viceversa.

En la tabla No. 3 se muestran los minerales que pueden ser identificados en jales ricos en sulfuros, el orden se encuentra restringido a su presencia dentro del depósito.

#### Minerales Terciarios:

Son aquellos que cristalizan cuando los jales comienzan a drenarse o secarse en el depósito. Los constituyentes de estos productos terciarios que precipitan en los poros que va dejando el agua, son: yeso y sulfatos ferrosos que dan cohesión a los jales quedando rígidamente cementados; Estos precipitados normalmente forman superficies blancas donde afloran minerales de yeso y óxidos (Lepidocrosita y Ferrihidrita).

Tabla No.3 Minerales Secundarios dentro de un depósito de jales de acuerdo a su presencia en él.

Oxihidróxidos de Hierro:	Sulfatos (continuación):
Goethita [ $\alpha$ -FeO(OH)]	Anglesita[PbSO <sub>4</sub> ]
Lepidocrosita [ $\gamma$ -FeO(OHO)]	Copiapita
Akaganeita [ $\beta$ -FeO(OH,Cl)]	
Maghemita [ $\gamma$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ]	
Ferrihidrita [5Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·9H <sub>2</sub> O]	
Sulfatos:	Otros Minerales:
Yeso [CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O]	Marcasita[FeS <sub>2</sub> ]
Basanita[2CaSO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O]	Covelita[CuS]
Jarosita[(H <sub>3</sub> O)Fe <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> ]	Azufre[S]
Melanterita[FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O]	Cristobalita[SiO <sub>2</sub> ]
Goslarita[ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O]	Vermiculita
Ferrohexahidrita[FeSO <sub>4</sub> ·6H <sub>2</sub> O]	Esmectita
Epsomita [ MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O]	Caolinita[Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> ]
Hexahidrita[MgSO <sub>4</sub> ·6H <sub>2</sub> O]	
Siderotil[FeSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O]	
Rozenita[FeSO <sub>4</sub> ·4H <sub>2</sub> O]	

#### Minerales Cuaternarios:

Son aquellos que se forman por oxidación superficial cuando el jal se encuentra ya cementado. Los productos cuaternarios son los sulfatos hidratados simples del tipo FeSO<sub>4</sub>·nH<sub>2</sub>O. Estos minerales son Rozenita (FeSO<sub>4</sub>·4H<sub>2</sub>O) y Siderotil (FeSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O).

### 3.6 Identificación de Minerales Secundarios.

Para la determinación de la mineralogía es indispensable identificar el tipo de material existente dentro de los jales; esta se puede inferir (cuando no se conoce la mineralogía del yacimiento) a partir de modelos geoquímicos que adoptan  $Al(OH)_3$  en su fase sólida, precipitando cuando los poros de agua disminuyen, aunque la concentración de este compuesto nunca ha podido ser identificada sola en un mineral secundario, en los jales o en un precipitado de AMD (drenaje ácido de mina).

El reciente reconocimiento de sulfitos y tiosulfatos en los jales ya intemperizados es de un particular interés, porque estas fases representan los productos intermedios en la oxidación de sulfuros a sulfatos (Jambor, 1994); dándonos una idea del grado de oxidación y los minerales que podríamos encontrar.

### 3.7 Índice de Alteración.

De acuerdo con los estudios de Jambor (1994), se encontró que la pirrotita y la pirita pueden oxidarse totalmente en la zona superficial, pero la alteración remanente de esos minerales reaparecen por debajo de esa zona y el grado de alteración decrece con la profundidad. Estos minerales tienen diferentes índices de alteración.

### 3.8 Mineralogía de Depósitos Formados por la Oxidación de Sulfuros.

La oxidación por intemperismo de minerales de sulfuros de Fe procedentes de jales mineros, es parte de un problema mayor de contaminación del agua en regiones con una historia minera prolongada. La acumulación de estos depósitos, puede acompañar a la formación de suelos ácidos de sulfatos y hacer decrecer la capacidad de líneas de drenaje subterráneo.

Estudios recientes han demostrado que las fluctuaciones diurnas en la química de arroyos contaminados con drenaje de mina pueden estar relacionadas con la disolución y reprecipitación cíclica de los depósitos, causadas por las reacciones de oxido-reducción inducidas fotoquímicamente. Otras variaciones más dramáticas en la geoquímica ambiental pueden acarrear transformaciones o cambios en la solubilidad de las fases minerales constituyendo drenajes mineros de sulfuros oxidados.

La rápida oxidación y la hidrólisis del Fe pueden iniciar la precipitación de componentes con un tamaño de partícula extremadamente pequeño.



### 3.9 Sulfatos Disueltos.

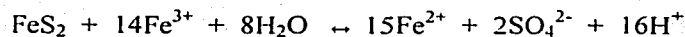
Los sulfatos son los aniones más comunes asociados con los ambientes de drenaje minero, y se puede esperar que la actividad de los sulfatos en solución juegue un papel importante en definir patrones de especiación de minerales durante la formación de depósitos formados por la oxidación de sulfuros. En resultados reportados por Bigham et al. (1992), la jarosita fue detectada en arroyos de drenaje minero sólo cuando el  $\text{SO}_4^{2-}$  excede los 3000 mg/L con un rango de pH de 2.6 a 3.3.

Los minerales secundarios tienen un rango de solubilidad muy amplio, estos se agrupan en: sulfatos solubles, sulfatos menos solubles e insolubles, óxidos metálicos e hidróxidos, carbonatos y sulfuros secundarios.

#### Sulfatos Solubles: Minerales de Fe.

La pirita ( $\text{FeS}_2$ ) y pirrotita ( $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$ ) forman parte de los minerales de sulfuros más abundantes en jales mineros, por lo que no sorprende que sus minerales de oxidación, los sulfatos de Fe, sean también los minerales secundarios más abundantes en estos ambientes. La geoquímica del Fe es complicada porque tiene dos estados de oxidación, ferroso ( $\text{Fe}^{\text{II}}$ ) y férrico ( $\text{Fe}^{\text{III}}$ ). Todos los minerales formados por estos iones son altamente solubles, ellos forman sales que precipitan de las aguas que contienen Fe y sulfatos. Los productos de oxidación de la pirita y la pirrotita, resultan de la combinación de procesos que incluyen la evaporación y oxidación del  $\text{Fe}^{\text{II}}$ . Los sulfatos de  $\text{Fe}^{\text{II}}$  ocurren comúnmente, mientras que los sulfatos de  $\text{Fe}^{\text{III}}$  son mucho menos comunes. La mineralogía de precipitación del  $\text{Fe}^{3+}$  secundario es compleja y depende de la composición de la solución, el pH, la temperatura y el grado de oxidación del  $\text{Fe}^{2+}$ .

A valores de pH abajo de 4, el ion férrico participa en forma importante en la oxidación de la pirita, como se muestra en la siguiente reacción:



Los minerales de sulfatos de Fe solubles y otros metales de transición se forman fácilmente del drenaje ácido de sulfatos en casi todos los climas, durante los periodos de sequía. La evaporación es un mecanismo importante en las formaciones de esas sales y es más probable que ocurra en interfaces entre condiciones saturadas e insaturadas con la presencia de aire.

La rápida disolución de las sales que ocurre durante tiempos de lluvia, puede resultar en un incremento significativo en ciertas concentraciones de metales (Cu, Al) con efectos severos en el ecosistema.

Los minerales de sulfatos menos solubles incluyendo los hidróxidos de sulfato del grupo de la alunita-jarosita pueden también incorporar metales de transición en sustitución de soluciones sólidas. Esos minerales a causa de su velocidad de disolución relativamente lenta, afectan en menor proporción la calidad del agua en comparación con los sulfatos solubles.

Los oxihidróxidos de Fe y Al y los minerales de hidroxisulfatos comúnmente precipitan del drenaje ácido en respuesta a una variedad de reacciones, más comúnmente por neutralización en respuesta a la hidrólisis ó por mezcla de aguas con pH alto.

### 3.9 Movilidad de Metales.

La movilidad de metales, en un ambiente superficial, es dominada por el transporte de soluciones acuosas. De acuerdo con Rose (1990), la movilidad de los elementos como el As, Cu, Fe, Pb, S, Zn así como sus productos de alteración, está dada en la siguiente tabla:

Tabla No.4 Movilidad de metales pesados (Cu, Fe, Pb, S, Zn) y el metaloide As, así como sus productos de alteración (Rose, 1990).

Elemento	Movilidad	Productos de Alteración
Arsénico (As)	En ambientes oxidantes está controlada por la coprecipitación con óxidos de Fe.	Óxidos de Fe.
Cobre (Cu)	Es intermedia, controlada por la adsorción por óxidos de Fe y Mn y materia orgánica y presipitación por hidrólisis a un pH>5.	Sulfuros, óxidos, carbonatos básicos, sulfatos y silicatos.
Hierro (Fe)	Para Fe <sup>2+</sup> moderada, para Fe <sup>3+</sup> muy baja.	Óxidos de Fe.
Plomo (Pb)	Relativamente baja, restringida por la tendencia de ser adsorbido por óxidos de Fe y Mn y materia orgánica insoluble.	Cerussita, anglesita, piromorfita, plumbojarosita, sulfatos de Pb y óxidos con Fe y Mn.
Azufre (S)	En sulfatos extremadamente alta, limitada sólo por el Eh, el que al disminuir resulta en la reducción de sulfatos a sulfuros, y la solubilidad de algunos minerales salinos, principalmente yeso.	Jarosita, sulfatos de Ca. y complejos de S solubles.
Zinc (Zn)	Moderadamente alta, limitada por la tendencia a ser adsorbido por MnO <sub>2</sub> y por materia orgánica insoluble.	Sulfatos de Zn, carbonatos y óxidos con Fe y Mn.

## 4.- MÉTODO DE TRABAJO

### 4.1 Recolección de Muestras.

Se tomaron muestras de los jales mineros de la mina Guerrero en Taxco, Guerrero. Se recolectaron ocho muestras en diferentes sitios sobre una de las paredes del depósito. En cada sitio se retiró la costra de la pared ( 1 metro cuadrado aproximadamente) y con una pala se raspó la pared para retirar el jal y guardarlos en bolsas de plástico; se recolectaron aproximadamente 2 kg de jal por muestra. Las bolsas se sellaron y etiquetaron para su posterior análisis.

### 4.2 Procesamiento de la muestra.

En el laboratorio se pusieron a secar las muestras a temperatura ambiente. durante cuatro días; se removieron y se dejaron secar por un día más. Cada muestra fue cuarteada dos veces, y de estas se tomaron aproximadamente 250g, los cuales se utilizaron en el laboratorio para las pruebas tanto mineralógicas como químicas. La muestra RG- 06 se dividió en dos submuestras porque presentaba características diferentes en cuanto a su color y consistencia.

De la fracción cuarteada se tomaron 50 g aproximadamente de cada muestra los cuales se disgregaron con un mortero de ágata para realizar los análisis por microscopio óptico y electrónico, y los análisis de difracción de rayos-X, para identificar los minerales. El resto de la muestra cuarteada se molió y se tamizó por una malla No. 150 para hacer los análisis químicos de muestra total.

Se realizó una separación por diferentes tamaños de partículas de las muestras molidas en el mortero, para ello se utilizaron tamices con un tamaño de malla del No. 35, No. 60, No. 80 y No. 120, los cuales se agitaron por 10 minutos en forma manual; cada fracción se separó en bolsas de papel glaccine. La fracción que pasó la malla No. 120 (fracción fina) se utilizó para hacer los segundos análisis por Difracción de Rayos X (por un difractómetro de polvo en el laboratorio de Rayos X de la Facultad de Química de la UNAM).

### 4.3 Difracción de rayos X.

Un cristal es una agrupación ordenada y periódica de átomos. que al ser alcanzados por un haz de rayos X los difunden simultáneamente. En general, las ondas disipadas interfieren unas con otras anulándose, pero en ciertas direcciones se refuerzan para formar un nuevo frente de onda. Este fenómeno de interferencia constructiva se conoce como "difracción" de acuerdo con Rodríguez (1982). Esas direcciones están

condicionadas por la geometría de la red cristalina, mientras que la intensidad de los haces depende del tipo y forma de agruparse los átomos en el cristal. Por ello el estudio de la geometría y la intensidad de la difracción permiten la determinación de la estructura cristalina.

La difracción de rayos X, es muy utilizada para realizar determinaciones mineralógicas; cada mineral puede ser determinado en mayor ó menor detalle. El estudio de texturas, fases de transformación y relaciones topotácticas, pueden ser auxiliares a los análisis de difracción de rayos X, proveer claves útiles de la naturaleza exacta de un mineral.

Ley de Bragg.

$$\lambda = 2 \frac{dhkl}{n} \text{sen} \theta$$

- a) Dice que la difracción de los rayos X tiene lugar al incidir sobre cristales sólidos
- b) Los rayos X se difractan sólo en una mínima proporción
- c) La difracción tiene lugar a ciertos valores de  $\theta$  que dependen: de  $\lambda$  de los rayos X, tipo de cristal y su orientación cristalográfica.

El difractómetro de polvos consta de un sistema de portamuestra plano, donde se deposita la muestra, que gira en torno a su eje con una velocidad angular  $\alpha$ . El haz de rayos X es el foco lineal de un tubo, colimado mediante una rendija paralela al eje de giro del difractómetro.

El haz difractado converge sobre una redija e incide en la ventana de un contador de radiación, estos dos forman una unidad móvil que se desplaza en torno al eje del difractómetro a una cierta distancia; estos deberán desplazarse a una velocidad constante de  $2\alpha$ .

El resultado después del barrido de la muestra es un gráfico, en el que se recogen, en función del ángulo  $2\theta$  las variaciones en la intensidad de los rayos X detectados.

#### 4.4 Análisis Mineralógico.

Se tomaron las muestras tamizadas de malla No. 80 para hacer superficies pulidas y observarlas a través del microscopio tanto óptico como electrónico y así realizar su posterior análisis.

### Técnica para la realización de superficies pulidas:

- En unas pequeñas charolas de plástico se coloca resina epóxica, a la cual se le agregan diez gotas de catalizador, mezclándolo hasta que quede homogéneo.
  - Se agrega la muestra de jal sobre las charolas con resina hasta que quede saturada la resina de muestra.
  - Se vierte esta mezcla en moldes más grandes de una pulgada de diámetro y se le agrega más resina (la cual previamente se mezcló con el catalizador) hasta alcanzar una altura de aproximadamente un centímetro.
  - Se tiene cuidado de sacar las burbujas de aire que queden dentro de la muestra, tratando de que en el fondo del recipiente quede homogéneo el material y por último se le coloca una etiqueta para su posterior identificación.
  - Se dejan secar durante varias horas y después se les retira del molde.
  - La superficie en donde se encuentra concentrada la muestra se desbasta con un polvo malla 320 de carburo de silicio, hasta quedar completamente plana.
  - Después se utiliza polvo abrasivo malla 600, dejando en esta también la superficie plana.
  - Por último se utiliza pasta de diamante para el pulido final.
- Las superficies pulidas se observaron al microscopio (con un microscopio óptico en el laboratorio de Yacimientos Minerales de la Fac. de Ingeniería, UNAM). Con este procedimiento se determinó la mineralogía de cada muestra.

Estas mismas superficies pulidas se utilizaron para hacer un análisis por SEM ( para determinar imágenes y análisis semicuantitativo por espectrometría de dispersión de energía de RX (EDS)), a través de un Microscopio Electrónico de Barrido marca JEOL 35-CF a 15 kilovolts con una corriente de 0.5 nano amperes (Depto. de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Química, UNAM).

### Microscopio Electrónico:

El microscopio electrónico provee de una técnica complementaria a la difracción de R-X, sobre todo cuando el tamaño de grano del material es muy pequeño (Zussman, 1972).

La información es obtenida por medio de los procesos de dispersión de los rayos X, cuando el rayo del electrón viaja a través de la muestra. La razón básica de la utilización del microscopio electrónico de barrido (MEB) es su alta resolución, resultado de las pequeñísimas ondas del electrón.

El microanálisis semicuantitativo de muestras se basa en la comparación de las características estándar de las intensidades distintivas de algunos elementos. En la espectrometría de cristales se utiliza la técnica de detección de la energía de dispersión de

rayos X; cada cierto tiempo los rayos X del elemento son analizados por un detector (Wenk, 1976).

El procesamiento de las muestras es a través del Sistema 5000 Ortec con un tiempo de adquisición de 20 seg. El procesamiento de las muestras para hacer la lectura en el microscopio es el siguiente: se cubren las superficies pulidas con una capa de grafito para hacerlas conductoras, se colocan en un porta muestras de distancia de trabajo de 39 mm (WT) para microanálisis; Se realiza un análisis puntual en los cristales ( la señal que se colecta para el análisis son RX); con el sistema de procesamiento de datos se observa el espectro para cada punto del cristal y en el se leen los picos para la determinación de cada elemento.

#### 4.5 Análisis Químicos.

Se realizaron diferentes análisis a las muestras ya molidas los cuales fueron:

##### Determinación del pH:

El método para determinar el pH en jales se realiza en muestras que tengan una proporción 1:10, un gramo de muestra por 10 mililitros de agua destilada; está solución se pone a agitar durante una hora, después se deja reposar por un minuto y se toma la lectura del pH (con un equipo Expandable ion Analyser EA940, marca ORION. calibrado con buffers de pH 4 y pH 7) cuando la medición se estabiliza.

##### Determinación de la Conductividad:

El método para determinar la conductividad. se realiza a partir de una solución con una proporción de 1:10 ( 10 gramos de muestra por 100 mililitros de agua destilada). Se pone a agitar la mezcla durante una hora, después se filtra con un filtro Whatman No. 4. La mezcla filtrada se coloca en la celda de conductividad en la cual se introduce la celda del conductímetro (Conductronic PC18) junto con el electrodo de la temperatura. La lectura se toma cuando ésta se estabiliza ( el aparato es calibrado antes de tomar la lectura con una solución estándar).

##### Determinación de Sulfatos:

Para medir el contenido de sulfatos en una muestra a partir de la misma solución con la que se midió la conductividad ya filtrada, se utiliza el método de turbidez; en el cual se mide la absorbancia. Estas mediciones se realizaron con una aparato de

espectroscopía de Rayos UV-Visible HP8452A, el cual da el porcentaje de absorbancia de cada muestra.

#### Método Turbidimétrico.

De acuerdo con Armienta (1994) este método se fundamenta en la precipitación de los sulfatos en medio ácido, con Cloruro de Bario.

La absorbancia de la suspensión Sulfato de Bario se mide con turbidímetro ó fotómetro y la concentración del sulfato se determina con una curva estándar.

Se toma una alícuota de la muestra que contenga más de 1.0 pero menos de 4.0mg de  $\text{SO}_4^{2-}$ , se lleva a 80 ml aproximadamente en un vaso de precipitado. Se adicionan 5 ml de la solución acondicionadora,  $130 \pm 10$  mg de Cloruro de Bario y se agita durante un minuto a velocidad constante. Transcurrido el minuto se traspasa rápida y cuantitativamente la solución a un matraz aforado de 100 ml y se lleva a la marca con agua destilada.

Se homogeniza la solución e inmediatamente se lee la absorbancia a 420 nm durante 4 segundos a intervalos de 30 segundos; generalmente la máxima turbidez se obtiene a los 2 minutos.

Para preparar la curva estándar se deben tomar 0, 10.0, 20.0, 30.0, 40.0 ml de la solución  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  y tratar a cada uno de acuerdo al procedimiento anterior. para obtener concentraciones de 0, 10.0, 20.0, 30.0, 40.0 mg/l de  $\text{SO}_4^{2-}$ . Se traza la curva patrón de la absorbancia en función de la concentración de sulfatos y se toma la concentración de la muestra por comparación de la curva. El rango de cuantificación se encuentra de 10 a 40 mg/l ya que en este intervalo la curva presenta un comportamiento lineal.

#### Digestión de Muestra Total:

El método para hacer las digestiones de muestras totales, consiste en hacer una solución con una proporción 5:1 de ácido fluorhídrico (HF) y perclórico ( $\text{HClO}_4$ ) que se añade a 1 g de la muestra (cuando esta se encuentra seca); la digestión se efectúa a través del incremento de la temperatura hasta la evaporación; posteriormente se añaden 1 ml de ácido perclórico y 10 ml de ácido fluorhídrico nuevamente hasta la evaporación; finalmente se agrega 1ml de ácido perclórico hasta la aparición de humos blancos. El residuo se disuelve en 5 ml de ácido clorhídrico diluyéndose con agua destilada a 50 ml; la solución se analiza con espectrofotometría de absorción atómica (Tessier. 1979).

Para la determinación del contenido de metales (Fe, Pb, Zn, As y Cu) se utilizó un espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer 2380 con lámparas de cátodo hueco de cada metal; se realizaron curvas de calibración con soluciones estandar para cada elemento y se compararon con las lecturas de absorbancia obtenidas de las muestras.



## 5.- RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS.

### 5.1 Resultados de los Análisis Mineralógicos.

#### Análisis Mineralógico por Difracción de RX.

Los resultados de los difractogramas obtenidos se analizaron por computadora (ésta se encuentra alimentada por tarjetas de difracción de cada mineral) y se corroboraron con tarjetas que muestran los datos de difracciones estándar conocidas para cada mineral. Se realizaron dos pruebas para cada muestra (cambiando sólo en el tamaño del grano observado uno de la otra, aunque para la muestra RG-08 no se realizó el análisis por grano fino). Estos se presentan en la siguiente tabla:

Tabla No.5 Resultados de los análisis realizados a las muestras de jales por medio de la difracción de rayos X.

No. DE MUESTRA	RESULTADO
RG- 02	Muestra Total: cuarzo, jarosita y yeso. Grano fino: cuarzo, jarosita y poco yeso.
RG- 03	Muestra Total: cuarzo, jarosita, yeso y goethita escasa. Grano fino: cuarzo, jarosita y goethita
RG- 04	Muestra Total: cuarzo, jarosita, yeso, poca goethita y arcillas. Grano fino: cuarzo jarosita, goethita y yeso escaso.
RG- 04'	Muestra Total: cuarzo, goethita, jarosita, arcillas y yeso. Grano fino: cuarzo, jarosita y arcillas.
RG- 05	Muestra Total: cuarzo, yeso, arcillas y poca jarosita. Gano fino: cuarzo, goethita, jarosita, arcillas y poco yeso.
RG- 06 <sub>A</sub>	Muestra Total: cuarzo, jarosita, poco yeso y arcillas. Grano fino: cuarzo, jarosita y goethita, yeso escaso.
RG- 06 <sub>B</sub>	Muestra Total: cuarzo, jarosita y yeso escaso. Grano fino: cuarzo, jarosita y goethita y poco yeso.
RG- 07	Muestra Total: cuarzo, jarosita y poco yeso. Grano fino: cuarzo, jarosita, goethita y poco yeso.
RG- 08	Muestra Total: Cuarzo, jarosita y goethita.

En resumen se encuentra un alto contenido de cuarzo en todas las muestras. La jarosita es también común a todas las muestras y la siguiente en abundancia después del cuarzo en casi todas (excepto RG-05). El yeso se reconoció en todas las muestras pero

este varía en abundancia en cada muestra específicamente, ya que, como se observa en la tabla anterior las muestras con mayor contenido son RG - 04, RG - 04' y RG - 05; también varía de acuerdo al tamaño de grano en la misma muestra. La goethita es el de menor abundancia de acuerdo al análisis por difracción. Por último en las muestras RG - 04' y RG - 05 el contenido de arcillas aumenta considerablemente.

Los sulfuros no se observan en difracción, pues su concentración es menor al límite de detección del método.

#### Análisis Mineralógico con el Microscopio Óptico.

Al realizar el análisis mineralógico por medio del microscopio óptico se observaron los siguientes minerales en cada una de las muestras:

Tabla No.6 Resultados de los análisis realizados a las muestras de jales con el microscopio óptico.

No. DE MUESTRA	RESULTADOS
RG- 02	Se encuentran agregados de óxidos con textura lamelar, minerales como goethita, hematita, magnetita, algunos pequeños cristales de pirita euhedrales de sección cuadrada y calcopirita redondeadas, contenidos en cristales de cuarzo. El contenido de óxidos es del 7% al 10%, en la muestra.
RG - 03	Agregados de óxidos muy finos, minerales de goethita, hematita, algunos cristales de pirita y calcopirita incluidos en cristales de cuarzo.
RG - 04	El porcentaje de óxidos disminuye a un 4% aprox. Encontramos poca hematita y el contenido de arcilla como de cristales de cuarzo aumenta considerablemente.
RG - 04'	Pocos cristales de hematita, gran contenido de arcillas de grano muy fino.
RG - 05	Hematita, gran cantidad de arcilla y cristales de cuarzo.
RG - 06 <sub>A</sub>	Aglomeraciones de goethita en bordes o fracturas de cristales de hematita, cuarzo y algunos cristales de pirita contenidos en el cuarzo.
RG - 06 <sub>B</sub>	Cristales de hematita y magnetita muy alterados y goethita. El contenido de óxidos se encontró entre 7% y 10%, en la muestra.
RG - 07	Mayor grado de oxidación, se encuentran cristales de hematita, aunque el porcentaje es de un 5% aprox.
RG - 08	Textura lamelar de los óxidos, se encontraron algunos cristales muy pequeños de pirita; el porcentaje de óxidos es de un 10% aprox.

De acuerdo con los resultados arrojados del microscopio óptico se observó que en casi todas las muestras se presentan gran cantidad de óxidos, aunque su porcentaje es menor en las muestras RG - 04, RG - 04' y RG - 05 ya que aumenta considerablemente la cantidad de material arcilloso; los cristales se encuentran alterados en su mayoría y se encontró la goethita, los óxidos son principalmente hematita y en algunas muestras se observó magnetita. También se tienen algunos pequeños cristales de pirita y calcopirita incrustados en los cristales de cuarzo, pero estos son en una proporción no significativa en las muestras. Los cristales de cuarzo predominan en las muestras de fracciones finas y en las totales.

#### Análisis Mineralógico con el Microscopio Electrónico.

Las observaciones al microscopio electrónico de las superficies pulidas de cada muestra, se realizaron analizando puntos seleccionados por microscopio óptico y en aquellas con composición homogénea se analizaron puntos al azar. Se obtuvo además de la imagen el análisis por EDS; con lo que los resultados fueron los siguientes:

Se observa que en la mayoría de las muestras se encuentran cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y óxidos de Fe ( $\text{Fe O}$ ), también se tiene potasio (K). Además en cada una de ellas hay azufre que puede existir de diferentes formas algunas como sulfatos y otras como sulfuros (que podríamos decir que son los pequeños cristales de pirita y calcopirita encontrados en el microscopio óptico). Las muestras RG - 02, RG - 03, RG - 05 y RG - 06<sub>A</sub> contienen cobre (Cu) posiblemente por la presencia de calcopirita en alguna de ellas; las muestras RG - 02, RG - 03, RG - 05, RG - 06<sub>A</sub>, RG - 06<sub>B</sub> y RG - 08 contienen zinc (Zn). este podría provenir de la esfalerita; sólo en la muestra RG - 05 se observó contenido de calcio (Ca) ya que en esta muestra existe yeso en forma de cristales bien definidos. en las otras muestras también existe ese mineral pero no se realizó el análisis por microscopio electrónico ya que sus cristales eran reconocibles a través del microscopio óptico. Sólo en la muestra RG-03 en los puntos 3 y 4 se encontró níquel (Ni).Tabla No. 7

Tabla No.7 Resultado de los análisis puntuales realizados a las muestras de jales con el microscopio electrónico de barrido.

No. DE MUESTRA	RESULTADOS ( los elementos se ordenaron de acuerdo con el porcentaje en peso en el punto de observación; de mayor a menor)
RG - 02	1) Fe, S, Cu, Zn, K, Si. 2) Fe, S, Si, K, Cu.
RG - 03	1) Fe, S, Si, Cu, K, Zn, Al. 2) Cl, Cu, Zn, Fe, Si. 3) Cu, Zn, Ni. 4) Cu, Zn, Ni. 5) Fe, Si, S, Zn, Cu. 6) Si, Al, K, Fe.
RG - 04	1) Fe, S.
RG - 04'	1) Si, Fe, Al, S, K. 2) Fe, Si, S, K. 3) Fe, Si, Al, S, K. 4) Fe, Si, S, Al, K.
RG - 05	1) Fe, Si, Zn, Al, S, K. 2) Si, Al, Fe, K. 3) Ca, S. 4) Fe, Si, Zn, Cu, S, K.
RG - 06 <sub>A</sub>	1) Si, K, Al, Fe, Cu, S. 2) Fe, Si, Al, S, K. 3) Fe, S, Si, Al.
RG - 06 <sub>B</sub>	1) Si. 2) S, Si. 3) S, Si. 4) Fe, Zn, S, Si.
RG - 07	1) Fe, S. 2) Si, K, Al, S, Fe.
RG - 08	1) Fe, S, Zn. 2) Fe, S, Zn. 3) Fe, S. 4) Zn, S, Fe.

## 5.2 Resultados de los análisis químicos.

Los valores obtenidos para los diferentes parámetros se presentan en la Tabla No. 8.

### Resultados de la determinación del pH.

En los resultados de los análisis de pH, se observa que todas las muestras se encuentran en un ambiente ácido, ya que los valores encontrados son entre 2 y 4, los cuales son valores de pH muy ácidos; la muestra con el pH más alto es la RG - 04' y con el pH más bajo es la RG - 06<sub>A</sub>. Estos datos concuerdan con la mineralogía, porque encontramos óxidos y sulfatos con lo que indica que el ambiente es ácido y que hay un fuerte intemperismo.

### Resultados de la Conductividad:

En estos resultados podemos decir que la conductividad de las muestras es alta, los valores oscilan entre los 2000 y 4000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , aunque hay dos muestras que están por debajo de estos valores que son la RG - 02 y la RG - 08 con valores de 730 y 610  $\mu\text{S}/\text{cm}$  respectivamente. Esto sugiere que hay muchos sulfatos solubles dentro de las muestras y que puede haber una cierta solubilidad de metales.

### Resultados de la determinación de Sulfatos.

El contenido de sulfatos en las muestras es alto, lo que indica que los sulfuros que pudieron haber existido en los jales ya han reaccionado y se han convertido en sulfatos. Las concentraciones oscilan alrededor de las 20,000 ppm y sólo las muestras RG - 02 y RG - 08 están por debajo de este valor con 3,414.5 y 1,274.5 ppm respectivamente.

### Resultados de la Determinación de Fe.

Los resultados del análisis para el Fe demuestran que hay un gran contenido de este elemento en todas las muestras; la mayoría se encuentran entre 12,000 a 18,000 ppm, sólo las muestras RG - 02 y RG - 04 tienen un contenido menor al de las demás con 7,612.5 y 7,250 ppm respectivamente. La muestra que tiene el contenido mayor es la RG - 06<sub>A</sub> con 18,400 ppm.

#### Resultados de la Determinación de Pb.

El contenido de Pb, es alto, aunque en algunas muestras es considerablemente más alto que en las otras, estas son la RG - 04', RG - 06<sub>B</sub> y RG - 08, que sobrepasan las 1000 ppm. Las demás muestras se encuentran con valores entre las 300 y 900 ppm.

#### Resultado de la Determinación de Zn.

Los resultados de la determinación de Zn, se encuentran entre los valores de 150 a 600 ppm, las muestras con mayor contenido son la RG - 05 y la RG - 04'; estos valores de Zn nos muestran que no hay un porcentaje muy alto de este en los jales.

#### Resultados de la Determinación de Cu.

Los valores de los resultados de la determinación de Cu, se encuentran entre 35 y 16 ppm, el mayor contenido de Cu fue la muestra RG - 05 y la de menor contenido es RG - 06<sub>B</sub> con valores de 35.5 y 16.9 respectivamente.

#### Resultados de la Determinación de As.

Los valores arrojados para la determinación de As se encuentran entre 1000 y 1600 ppm, las muestras que se salen de este rango son la RG - 06<sub>B</sub> con 780 ppm y las que tienen mayor contenido son RG - 04 y RG - 08 con 3525 y 3285 ppm respectivamente. Estos contenidos nos demuestran una cantidad considerable de As, aunque en los estudios mineralógicos no se encontraron minerales que contuvieran este elemento. por lo que se cree que podría estar en el material arcilloso o en los hidróxidos de Fe como la goethita.

Finalmente se muestra una tabla general de todas las muestras con sus respectivos resultados de los análisis mineralógicos y químicos.

No. De Muestra	Difracción de R-X	Microscopio Minerográfico	Microscopio Electr	PH	$\Omega$ ( $\mu$ s)	SO <sub>4</sub> (ppm)	Fe (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	As (ppm)
RG - 02	Cuarzo Jarosita Yeso (poco)	Goethita-limonita óxidos(hematita) pequeños cristales de pirita aislados	Si, O, S, K, Fe, Cu, Zn.	3.47	730	3,414.5	7,612.5	512.5	257.5	27.5	1,400
RG - 03	Cuarzo Jarosita Poca goethita Poco yeso	Hematita Goethita-limonita pequeños cristales de pirita y calcopirita aislados	Si, O, S, K, Fe, Al, Cu, Zn, Cl, Ni	2.94	3,100	20,520	14,725	725	236.25	33.25	1,300
RG - 04	Cuarzo Jarosita Yeso Goethita	Hematita Mayor proporción de arcillas	S, Fe	2.73	3,750	25,070	7,250	375	153.75	24.75	3,525
RG - 04'	Cuarzo Jarosita Yeso goethita Arcilla	Arcilla Hematita	Si, O, Fe, Al, K	4.16	3,100	24,050	13,525	1,125	522.5	31	1,100
RG - 05	Cuarzo Abundante yeso Jarosita, goethita Arcilla	Hematita Hidróxidos	Si, O, S, Fe, Al, K, Ca, Cu	3.64	2,950	23,540	12,150	737.5	687.5	35.5	1,122.5
RG 06-	Cuarzo Jarosita Yeso Goethita	Hematita Pequeños cristales de pirita aislados goethita-limonita	Si, O, S, Fe, Al, Cu, Zn	2.53	4,080	25,730	18,400	925	262.5	25	1,015
RG - 06 <sub>n</sub>	Cuarzo Jarosita Goethita Poco yeso	Hematita Magnetita Goethita	Si, O, S, Fe, zn	2.64	3,720	24,562	13,050	2,750	312.5	16.85	780
RG - 07	Cuarzo Jarosita Goethita Poco yeso	Hematita Gran porcentaje de óxidos	Si, O, S, Fe, Al	3.01	2,580	16,872	14,350	887.5	395	24.75	1,570
RG - 08	Cuarzo Jarosita Goethita	Hematita Pequeños cristales de pirita aislados	S, Fe, Zn	2.97	610	1,274.5	15,475	1,012.5	395	32.75	3,285

Tabla No.8 Resultados de los análisis mineralógicos y químicos, realizados alas muestras de jales de la Mina Guerrero.

## 6.-DISCUSIÓN.

### 6.1 Análisis Mineralógico.

De acuerdo con la clasificación de los jales realizada por Jambor (1994), los minerales secundarios encontrados en los jales son aquellos que son precipitados de los constituyentes derivados de las reacciones de oxidación cerca de la superficie, dentro de la presa los más abundantes son: goethita, jarosita y yeso.

En las muestras de los jales de la mina Guerrero, de acuerdo a los análisis realizados, se encontraron cuarzo, yeso, jarosita y goethita en todas las muestras; la mayor parte del cuarzo puede ser primario, aunque podría haber cuarzo secundario si estos silicatos se encuentran alterados; los demás minerales se les podría considera como minerales secundarios dentro de los jales.

Los minerales secundarios pueden encontrarse dispersos y su distribución vertical puede estar restringida de acuerdo al estado de oxidación en el que se encuentren los jales. La goethita, que se da por la oxidación de la pirita y pirrotita, ocurre sobre la zona saturada; cuando el grado de oxidación es alto la goethita puede decrecer en la zona cerca de la superficie, conforme aumenta la profundidad va aumentando el contenido de goethita, aumentando a su vez los valores de pH. La jarosita en jales con un alto grado de oxidación puede estar ausente o escasa en la zona superficial, pero se incrementa con la profundidad (en menor proporción que la goethita). El yeso es muy abundante en la zona oxidada, sus cristales son de tamaño de grano grueso.

Las muestras de jales de la mina Guerrero, se recolectaron en las paredes del depósito, por lo que se puede considerar que es una zona superficial con un grado de oxidación alto y con lixiviación de la superficie, donde los minerales que se encuentran van a ser minerales altamente alterados. De acuerdo a esta localización y a lo antes escrito sobre la dispersión y distribución de los minerales secundarios, podemos considerar que la mineralogía de los jales en dicha zona presenta una acumulación de goethita y jarosita considerable pero poco abundante, por lo que al realizar los análisis mineralógicos a través del microscopio la goethita se observó como alteración de los pocos cristales de hematita presentes en la muestras. La jarosita no se observa sólo se sabe que está presente por medio de los análisis de difracción de R-X. El yeso como se mencionó anteriormente se observa a simple vista en algunas muestras. los cristales de yeso son de un tamaño considerable y sobre todo se encontraron en las zonas más oxidadas de la pared del depósito de jales. En las muestras donde no se podía observar los cristales a simple vista, también está presente el yeso, pero en mucho menor proporción, este mineral sólo se pudo registrar por medio de la difracción, estas muestras tienen un grado menor de oxidación que las que contienen los grandes cristales de yeso, por lo que el contenido de sulfato de calcio presente se podría considerar que sea de origen primario.



Según Jambor (1994), es notable la ausencia de hematita en jales que contienen minerales secundarios, ya que las condiciones que favorecen la formación de goethita son desfavorables para la formación de hematita. Y si en los jales con un cierto grado de oxidación se dice que uno de los minerales más abundantes es la goethita, por consiguiente, no es probable encontrar gran contenido de hematita. Sin embargo, en las muestras de los jales de la mina Guerrero, con un alto grado de oxidación y presencia de goethita se observa hematita ; esto se corroboró con los análisis mineralógicos a través del microscopio, ya que en ellos se observaron pocos cristales de hematita. Esto significaría que este mineral pudiera ser de origen primario; puesto que son casi los únicos cristales todavía observables en las muestras, pero ya se encuentran muy alterados y esta alteración es precisamente la goethita.

La pirita según Jambor (1994), puede oxidarse totalmente en la zona superficial y el grado de alteración decrece con la profundidad. Con esto se puede explicar el porque no se encontró pirita en las muestras analizadas, ya que en esa zona se puede pensar que la oxidación de pirita ha sido máxima, y que muy probablemente si se analizan muestras que se encuentren a una mayor profundidad dentro del depósito de los jales se podrían encontrar residuos de este mineral. La reacción de óxido-reducción de la pirita produce ácido sulfúrico, esto podría indicar la presencia de drenaje ácido dentro del depósito.

Para poder analizar mejor este tipo de jales, se consultó sobre la mineralogía de los depósitos formados por oxidación de sulfuros (Bigham en Jambor, 1994). en donde se dice que los minerales que se van a encontrar son: goethita, lepidocrosita, ferrihidritas, schwertmanitas y jarosita. La goethita la encontramos en ambientes superficiales y la jarosita en ambientes ácidos, producidos por la oxidación y con gran cantidad de sulfuros; con esto podemos decir que estos jales son un depósito ocre formado de los sulfuros ya que en él encontramos a la goethita y jarosita en las condiciones que se mencionaron anteriormente (ambiente superficial y ácido respectivamente). Los minerales restantes no los podemos observar, puesto que los análisis realizados no son suficientes para poder identificarlos.

## 6.2 Análisis Químicos.

pH.- Los resultados de la determinación del pH, con valores que van desde 2.53 a 4.16 nos indican que tenemos un ambiente ácido en las paredes de la presa de jales. esto sugiere que al haber una posible lixiviación de los jales se crea lo que se conoce como drenaje ácido de mina (AMD) con valores de pH bajos; también sugiere que se ha llevado a cabo una gran oxidación y alteración de los minerales que se encuentran ahí depositados.

## Métales Pesados

Para estimar el peligro que representan los jales al ambiente en función a su contenido de metales, es conveniente conocer los valores reportados para suelos no contaminados y las concentraciones máximas permisibles para que estos no sean agentes contaminantes. Los valores se dan en la siguiente tabla:

Tabla No.9 Valores límite para suelos (Datos de Tammerman y Talavera tomados de Barrera, 2001).

Metal	Tammerman (1984)	Talavera (2001)	Rose (1990)	Muestras de Jales M. G.
Zn	150	64.3	36	230-690
Pb	50	25.5	17	375-2750
As	20	29.5	7.5	780-3525
Fe		2.7	21000	7200-18400
Cu			15	16-36

Conforme a los resultados registrados en los análisis, los valores de zinc sobrepasan las tres referencias anteriores, la concentración de este metal está muy por encima ya que el valor mayor es de 150 ppm mientras que todas las muestras sobrepasan este límite.

Para la concentración del plomo, como se puede ver en la tabla las muestras de jales tienen un muy alto contenido del metal pudiendo representar un riesgo de contaminación al ambiente. En cuanto al arsénico se nota un comportamiento similar al de los metales anteriores ya que su concentración sobrepasa los diferentes límites dados por los autores; este metaloide es de un particular interés ya que es un contaminante peligroso para la salud.

Las muestras presentan un alto contenido de hierro, el valor límite para este metal que da Talavera (2001) es demasiado bajo en comparación con la concentración en el jal; mientras que el límite dado por Rose (1990) sobrepasa a la concentración que existe en las muestras. Finalmente el cobre se encuentra sobrepasando el límite dado por Rose aunque no en un porcentaje alto, por lo que se podría considerar que este es el único metal que no está muy por encima de los límites dados y no representaría un riesgo de contaminación al ambiente.

De acuerdo a la tabla No. 10 sobre los límites de metales pesados en suelo y agua establecidos por la norma oficial mexicana NOM-001-ECOL-1996, los resultados de los análisis realizados a las muestras de jales para metales pesados, presentan un muy alto contenido de dichos metales (As, Cu, Pb, y Zn). Por lo que si estos se llegan a disolver en cuerpos de agua presentarían un riesgo a la salud por su toxicidad.

De acuerdo a la tabla siguiente los valores permitidos de metales para agua potable son mucho menores que los dados anteriormente en la tabla No.11; por lo que las concentraciones de metales que se encontraron en las muestras exceden en mucho estos límites.

Tabla No.10 Límites Máximos Permisibles para Contaminación Básica; parámetros medidos de manera total en mg/L ( Fuente: página de internet de la CNA, norma NOM-001-ECOL-1996)

Elemento	Ríos	Suelos
Parámetros medidos en mg/L	Uso Agrícola	Uso Agrícola
As	0.4	0.4
Cu	6.0	6.0
Ni	4.0	4.0
Pb	1.0	10
Zn	20	20

Tabla No.11 Límites Permisibles de Metales para Agua Potable (concentración total en agua, suspendidos y disueltos). Fuente: Secretaria de Salud NOM-127-SSA I-1999.

	Límite Permisible de Metales (mg/L)
As	0.05
Cu	2.00
Fe	0.30
PH	6.5 – 8.5
Zn	5.00
Pb	0.025
Sulfatos	400.00

Para el contenido de sulfatos el límite permisible es de 400 ppm y en las muestras se encuentran valores entre 1,274.5 a 25, 730 ppm, lo que rebasa las normas de calidad para el agua.

La correlación entre los diferentes parámetros medidos puede indicar la forma en que los metales se encuentran en el jal y como estos son afectados por el pH.

De acuerdo a Rose (1990), la movilidad para el zinc, es moderadamente alta y sólo esta restringida por MnO<sub>2</sub> y materia orgánica insoluble, por lo que se puede decir que es un elemento que posiblemente ya ha sido transportado del depósito, aunque una parte de este todavía se encuentra en el depósito con posibilidad de ser removido.

Para el plomo, su movilidad es relativamente baja, porque este metal puede ser adsorbido por óxidos de Fe y Mn, además que los compuestos que se forman son insolubles; como en el jal encontramos una gran cantidad de óxidos de Fe, se puede pensar que el plomo no tendrá una gran movilidad en el depósito, aunque por su alta concentración representaría un peligro latente de contaminación.

La movilidad del arsénico en ambientes oxidantes, puede ser controlada por la coprecipitación de óxidos de Fe; por lo que el transporte que este elemento puede tener dentro del depósito es baja, una forma en la que posiblemente se podría comprobar es su alta concentración observada en las muestras y que no se presenta como un mineral de arsénico, ya que pudiera estar precipitado o adsorbido en los óxidos de Fe. El arsénico también podría estar en forma adsorbida en las arcillas.

El fierro, en cuanto a su movilidad, va a depender de acuerdo al estado de oxidación en que se encuentre; el Fe<sup>2+</sup>, es más soluble que el Fe<sup>3+</sup>; el Fe<sup>3+</sup> se precipita en oxihidróxidos de Fe y sulfatos, cuando el pH tiene valores mayores a 3, en suspensión coloidal los oxihidróxidos de Fe pueden ser estables. Por su alta concentración en las muestras se puede decir que este metal no ha sufrido gran movilidad y que se encuentra en forma de óxidos y oxihidróxidos.

La movilidad para el cobre, se dice que es intermedia y está controlada por la adsorción en óxidos de Fe y Mn; entonces se puede decir que su movilidad en el depósito se ve afectada por los óxidos que tenemos, aunque su concentración no es muy alta por lo que pudiera ser también que ya haya sido transportado del depósito.

También sería importante saber las concentraciones de los metales que se encuentran en los jales cuando estos acaban de ser transportados al depósito, para darnos una idea de cuanto se han disuelto estos a lo largo del tiempo.

Para dar una idea del posible significado que representan los valores de las concentraciones obtenidas de los metales en las muestras, se realizaron una serie de gráficas, con la finalidad de saber si estos metales están controlados por los parámetros tales como pH, conductancia y sulfatos disueltos. Las relaciones que se pudieron encontrar se dan a continuación:

En la gráfica No.1 de SO<sub>4</sub> & Ω se observa un patrón lineal, lo cual está indicando que existe una correlación entre estos dos parámetros, ya que los sulfatos van aumentando

de acuerdo al aumento en la conductancia; esto indica la gran cantidad de sulfatos que se encuentran en solución en las muestras.

La gráfica No.2 de pH & SO<sub>4</sub>, no muestra un patrón general de todas las muestras, aunque se puede ver que la tendencia de las muestras es que a valores de pH menores el contenido de sulfatos aumenta.

En la gráfica No.3 de correlación entre pH & Ω, se observa que la tendencia general de las muestras a la disminución de la conductancia, cuando los valores de pH aumentan. Aunque algunas muestras con valores bajos de pH, presentan valores de conductancia más bajos.

En la gráfica No. 4 de correlación entre pH y Fe, no se puede ver una relación clara entre estos dos parámetros, puesto que las muestras que contienen aproximadamente un valor de pH de 2.5 tienen diferentes concentraciones de Fe, aunque con una ligera tendencia a la disminución en la concentración con el aumento del pH, pero sólo en ese tramo de la gráfica; en la parte donde los valores de pH son de 3.5 y mayores la concentración de Fe tiene una tendencia a aumentar.

La gráfica No.5 de pH & Pb, se puede observar que la concentración de Pb no está influida por el pH, ya que las muestras tienen concentraciones similares aunque los valores de pH aumenten. Sólo se puede decir que entre los valores de pH que tenemos en la gráfica ( de 2 a 4.5) la concentración de Pb depende de cada muestra y oscila entre valores de 250 a 1250 ppm. La muestra RG-06B sale de ese rango ya que con un valor de pH igual a 2.64 tiene una concentración de 2750 ppm.

La gráfica No.6 de pH & Zn se observa que la concentración tiende a aumentar conforme aumenten los valores de pH, ya que para valores de 2.5 se tienen las menores concentraciones. Aunque en el rango de valores de 2.5 a 3.5 la concentración aumenta; después de 3.5 se tienen las concentraciones más altas de todas las muestras, las cuales son: RG-04 y RG-05 con 522.5 ppm y 687.5 ppm respectivamente.

La gráfica No.7 de pH & Cu, muestra que hay una ligera tendencia de la concentración a aumentar conforme van aumentando los valores de pH, puesto que en un valor de pH de 2.5 se tiene la concentración más baja mientras que arriba del 3.5 se encuentran las concentraciones más altas de Cu.

La gráfica No.8 de pH vs As, es la última que corresponde a las variaciones de metales y pH, en ella encontramos que este metaloide no tiene una variación en función del pH ya que en toda la gráfica aunque cambie el valor de pH la concentración no varía mucho. Aunque hay dos excepciones que son las muestras RG-04 y RG-08 que tienen las concentraciones más altas de las muestras analizadas, además de que sus valores de pH son similares (2.94 y 2.97 respectivamente)

## 7.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

De acuerdo a los objetivos descritos al principio del trabajo, las características mineralógicas y químicas de los jales de la Mina Guerrero son las siguientes:

- 1) Según los resultados de los análisis mineralógicos de las muestras, se encontraron los minerales: cuarzo, jarosita, goethita y yeso principalmente (silicatos, oxihidroxidos de Fe y sulfatos), además de un alto contenido de material arcilloso.
- 2) Se observaron algunos cristales de hematita, aunque se piensa que esta sería un mineral primario de acuerdo a la clasificación mineralógica de jales; mientras que los minerales anteriores podrían ser secundarios.
- 3) Dichas muestras tienen altas concentraciones de metales como fierro (Fe), plomo (Pb), zinc (Zn), cobre (Cu) y el metaloide arsénico (As); lo que indica que estos metales pueden ser liberados en solución dentro de los jales.
- 4) En los jales encontramos un ambiente predominantemente ácido ( $\text{pH} < 4$ ) y con un alto grado de oxidación en el depósito.

De lo anterior se pueden deducir algunas características acerca de la movilidad ambiental de estos metales:

- 5) Estas altas concentraciones de metales pesados, pueden representar un factor importante de contaminación al ambiente, ya que podrían solubilizarse y sufrir algún transporte; aunque su movilidad puede ser restringida por diversos factores tales como adsorción en óxidos y oxihidróxidos, precipitación de los mismos metales y adsorción por arcillas ( las cuales predominan en el depósito).
- 6) El proceso fundamental para la producción de minerales de alteración. es la oxidación. Cuando la oxidación de los sulfuros ocurre, se desarrolla lo que se conoce como el drenaje ácido de mina (AMD). que produce soluciones ácidas con altas concentraciones de sulfatos y metales pesados. Este proceso puede provocar contaminación al ambiente, no sólo de la zona en que son depositados los jales. también en lugares más alejados por el efecto de transporte de metales a través del drenaje. Sobre todo cuando en la zona del depósito encontramos corrientes de agua como ríos o arroyos. Las características mineralógicas y químicas encontradas en los jales Guerrero indican la ocurrencia de este proceso, lo cual es particularmente riesgoso por la ubicación de los jales a orillas del río Taxco.

El grado en que los jales pueden contaminar el ambiente, va a depender de las concentraciones de metales pesados en los jales que salen del proceso de extracción del mineral dentro de la mina; por lo que sería importante conocer estas concentraciones. además de determinar la mineralogía del yacimiento del cual provienen los jales. Con esta

información se podrían estimar las concentraciones de los metales que pudieran liberarse al ambiente, de acuerdo a la solubilidad y movilidad característica de cada elemento, después de los procesos geoquímicos de alteración de minerales bajo las condiciones climáticas existentes en el área del depósito. Esto permitiría realizar análisis más profundos del comportamiento y especiación de metales pesados para conocer el grado de contaminación que estos pueden producir al ambiente.

## BIBLIOGRAFÍA.

- Allovey B. J. (1995); *Heavy Metals in Soils*; 2ª ed. Editorial Jonh Miley & Sons; pag. 11,12,42,51 (libro de consulta)
- Armienta, M. A. y F. J. Zamora (1994); *Manual para el Análisis Químico de Aguas Naturales, en el Campo y en el Laboratorio*; Comunicaciones Técnicas. Instituto de Geofísica; pag. 56-58
- Barrera, M. O. (2001); *Geoquímica de Metales Pesados en los Jales El Fraile municipio de Taxco*; Tesis de Maestría del Instituto de Geofísica, UNAM.
- Campa, M.F. and Coney P. (1983); *Tectonostratigraphics Terranes and Mineral Resource Distributions in Mexico*; *Canadian Journal of Earth Science* 20; pag. 1040-1051.
- Carrillo A.C, Ofelia M, E. González, Hilda R, Gretchen O. (2001); *Evaluación Geoquímica Ambiental del Distrito Minero de Guanajuato*; *Actas INAGEQ*; Vol. 7 Num. 1
- Consejo de Recursos Minerales (1999); *Monografía Geológico Minera del Estado de Guerrero*; Secretaria de Comercio y Fomento Industrial.
- Clark K. F. (1986); *Precious Metal Deposits of Taxco, Guanajuato and Pachuca-Real del Monte, México*; *Guidebook for Field and Mine Excursions*, Society of Economic Geologists; pag. 27-40
- De Cserna, Z. Fries C. Jr, (1981); *Hoja Taxco 14Q-h(7) con resumen de la geología de la Hoja Taxco, Estado de Guerrero, México y Morelos*; Instituto de Geología, UNAM; serie 1:100 000, mapa con texto pag. 44.
- Espinosa, E. S. (en preparación); *Especiación y Movilidad de Metales Pesados en Sedimentos del Río Taxco*; Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. Instituto de Geofísica, UNAM.
- Fries, C. Jr, 1960; *Geología del Estado de Morelos y de las Partes Adyacentes del Estado de México y Guerrero, Región Central Meridional de México*; Instituto de Geología, UNAM; *Boletín* 60 , pag. 223.
- García, A. E. (1997); *Distribución y Especiación de Arsénico en Sedimentos Fluviales del Río Tolimán en Zimapán Hidalgo*. Tesis de Maestría del Instituto de Geofísica, UNAM.

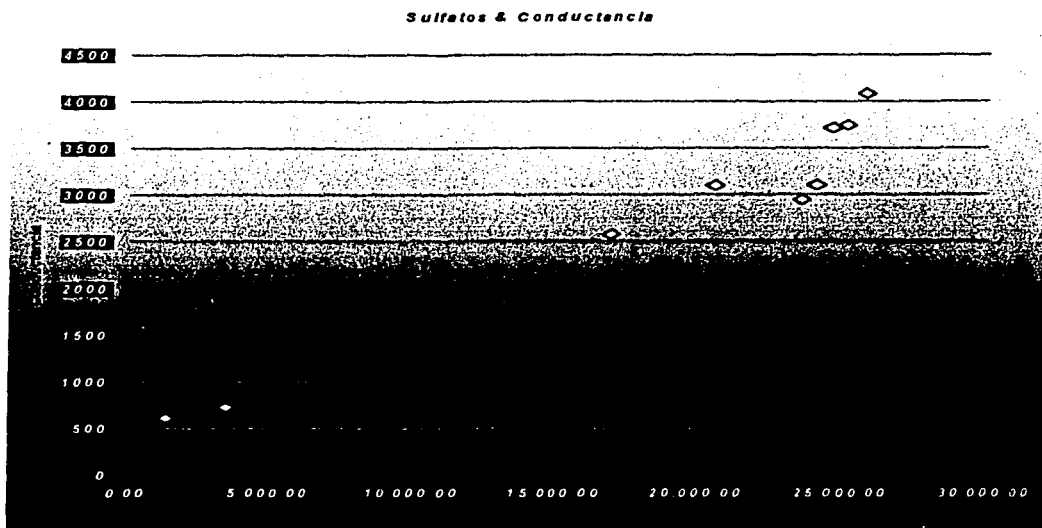


- Guerra, J.L.P. y Jaime S.T. (1991); Características de Cuerpos Diseminados de Plata en Taxco, Guerrero; Industria Minera México S.A. pag. 297-306
- INEGI, (1998); Cuaderno Estadístico Municipal, Taxco de Alarcón, Estado de Guerrero.
- Jambor, J.L. & D. W. Blowes (1994); Short Course Handbook on Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-Wastes; Mineralogical Association of Canada; capítulos: 1,3 y 4.
- Juárez, A.A.(1977); Geología y Yacimientos Minerales del Distrito de Taxco, Guerrero México; Tesis UNAM; pag. 16-81
- Méndez, M.R. (2001); Fraccionamiento de Arsénico en Jales de Zimapán Hidalgo; Tesis de Maestría del Instituto de Geofísica, UNAM.
- Muñoz, F.C. (1981); Paragénesis y Zoneamiento Aplicando Cocientes Metálicos del Distrito Minero de Taxco, Guerrero; Memorias Convención Nacional AIMMOM; Octubre 29; pag. 293-313
- Ontiveros, G.T. (1973); Estudio Estratigráfico de la Porción Noroccidental de la Cuenca Morelos-Guerrero; Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros; Vol.25 No.4-6 pag 190
- Orozco, R.V.S.(1991); Boletín Técnico COREMI, SECOFI; Consejo de Recursos Minerales; Año III, No.14; pag 16,17
- Orozco R.V.S.(1997); 2º Seminario sobre Presas de Jales; AIMMyG de México: PROCAR Universidad de Guanajuato; pag. 2-16
- Rabona P. (1975); Concentración de Minerales por Flotación; 4ª ed. Comisión de Fomento Minero; pag. 1-8, 113, 212-281
- Raisz, E. (1957); Carta Geomorfológica de la República Mexicana
- Ramos, R.A. y Christina S.G. (1998); Variabilidad Espacial de Condiciones Geoquímicas en Presas de Jales; Instituto Nacional de Geoquímica, UNAM.
- Rodríguez, M.G. (1982); La Difracción de los Rayos X; Universidad Alambra, España; capítulos 5 y 12
- Rose, A.W. Herbert E. H. and John S.W. (1990); Geochemistry in Mineral Exploration; Academic Press.

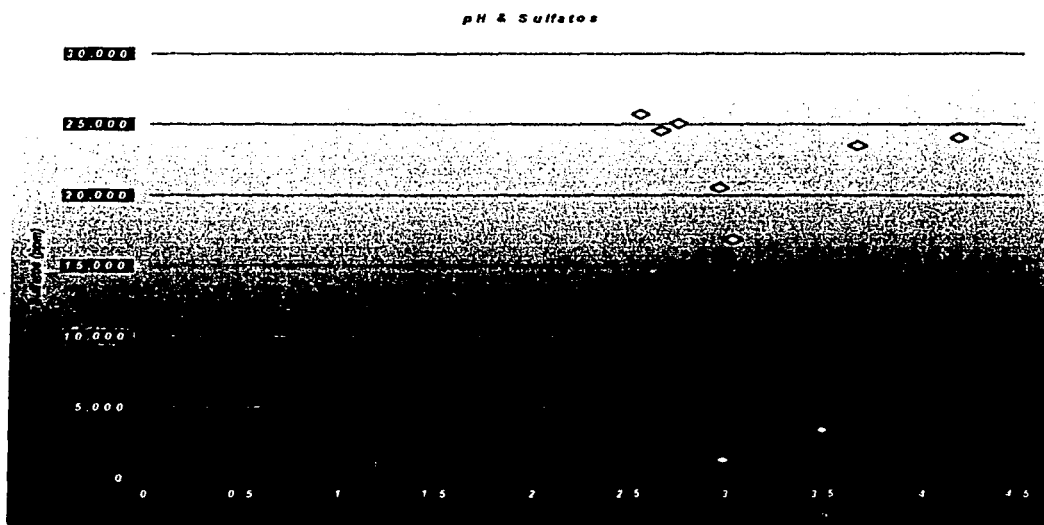
**ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA**

- Salas, G.P. (1988); Distrito Minero de Taxco, Estado de Guerrero; Geología Económica de México; pag. 483-485
- Tessier, A. P. G. C. Campbell and M. Bisson (1979); Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Partien Trace Metals; Analytical Chemistry; Vol.51 No.7
- Wenk, H.R. (1976);Electron Microscopy in Mineralogy; Ed. Springer-Verlag; pag. 18, 506-509, 520,521
- Zaragoza, M.A. (2001); Mineralogía Comparativa de Tres Presas de Jales en Zimapán Hidalgo; Tesis de Licenciatura, UNAM.
- Zussman (1972); Physical Methods in Determinative Mineralogy; Ed. Academic Press; pag. 265-270

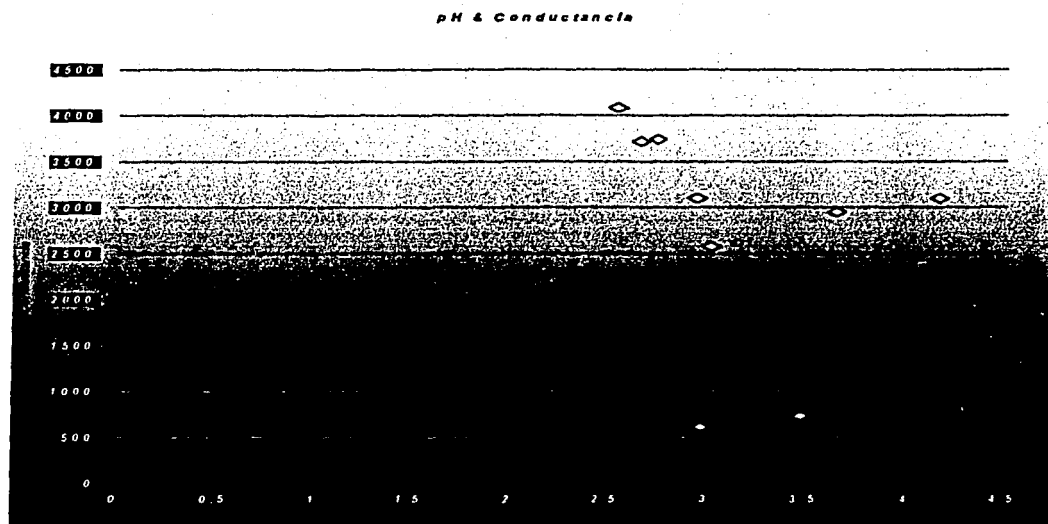
*ANEXO I*  
*GRÁFICAS*



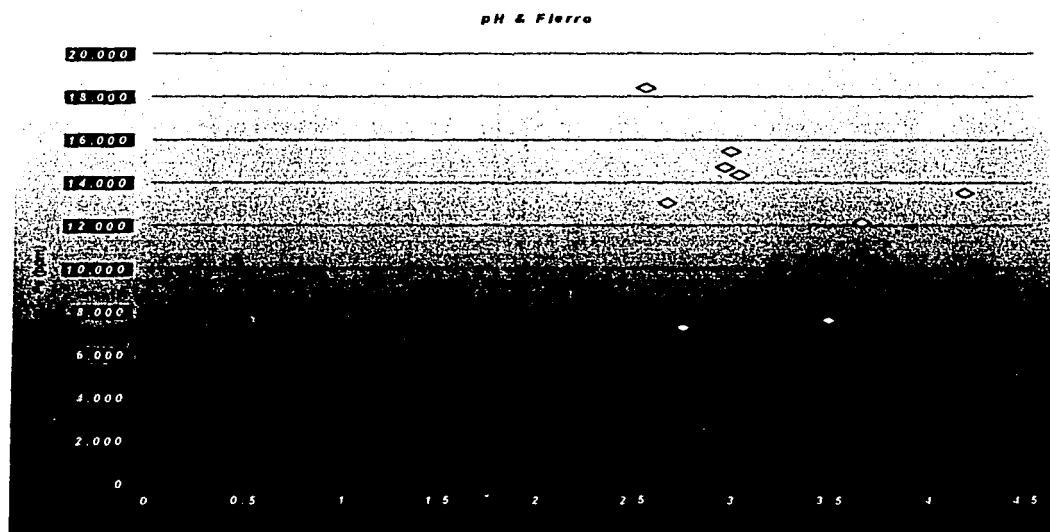
Gráfica No. 1 Relación de concentración de Sulfatos y Conductancia de los jales de la Mina Guerrero



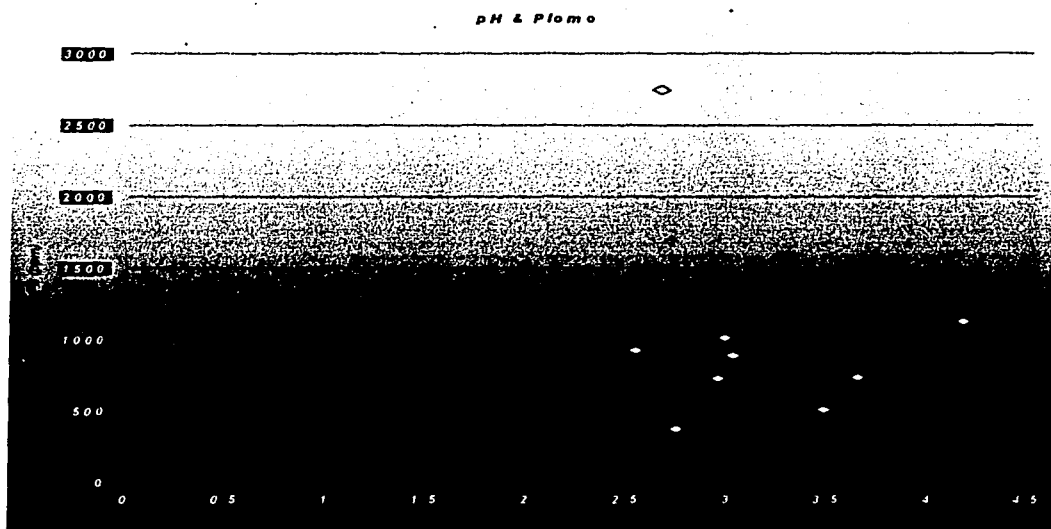
Gráfica No. 2 Relación entre pH y Sulfatos de las muestras de jales de la Mina Guerrero.



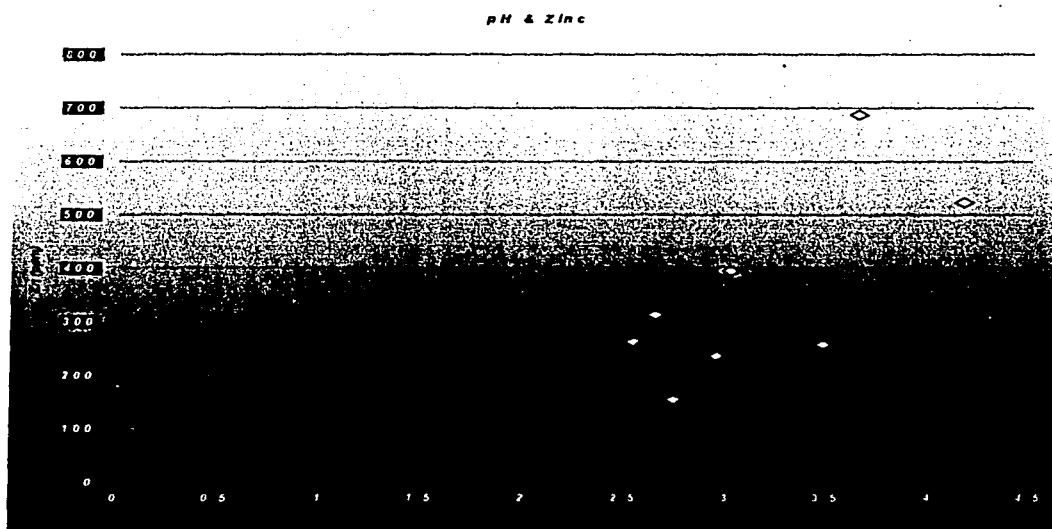
Gráfica No. 3 Relación entre valores de pH y Conductancia de los jales de la Mina Guerrero



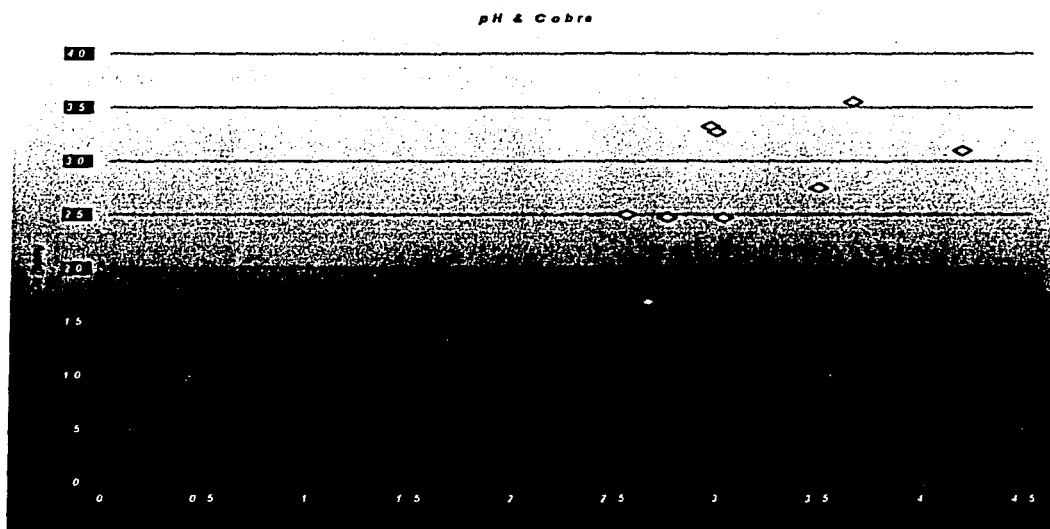
Gráfica No. 4 Relación entre valores de pH y Hierro de los jales de la Mina Guerrero.



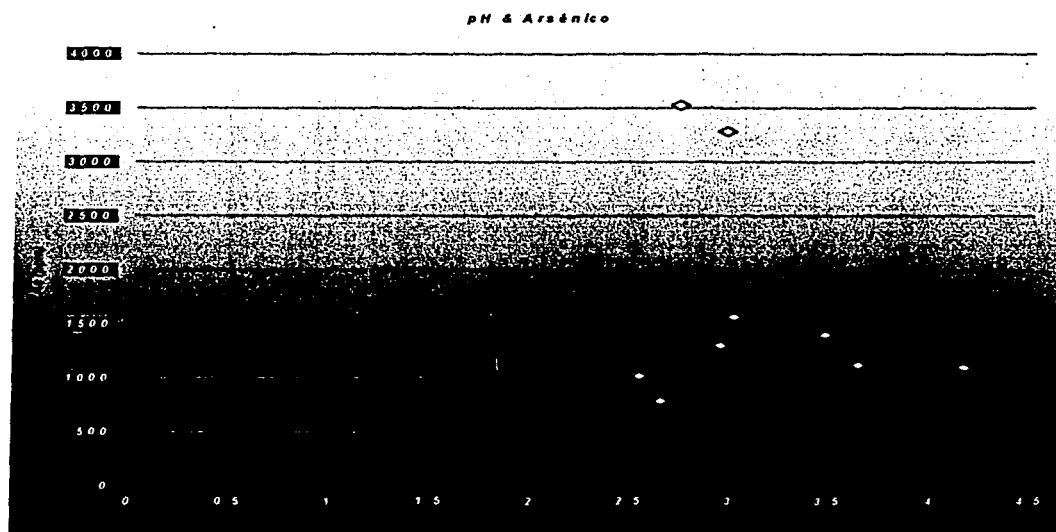
Gráfica No. 5 Relación entre valores de pH y concentraciones de Plomo en los jales de la Mina Guerrero.



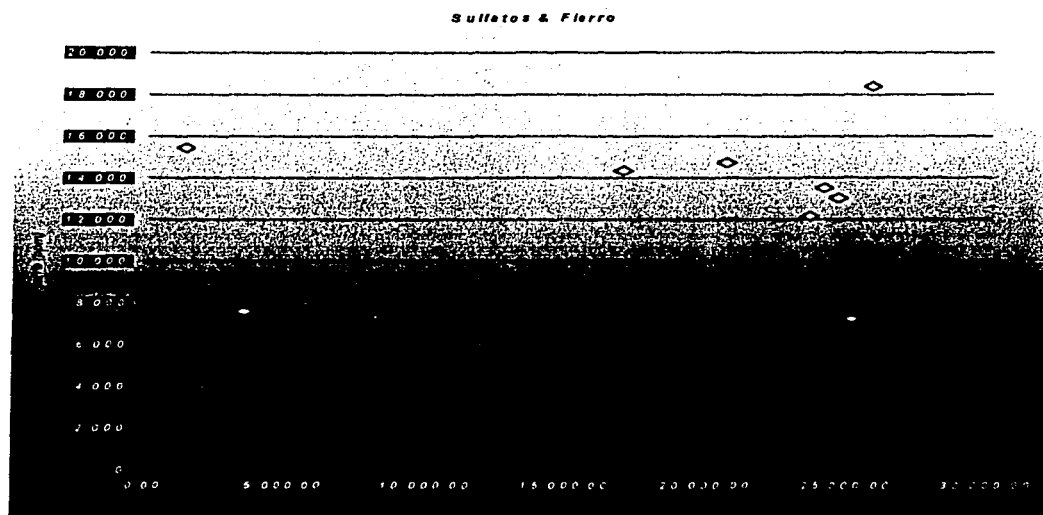
Gráfica No. 6 Relación entre valores de pH y Zinc de los jales de la Mina Guerrero.



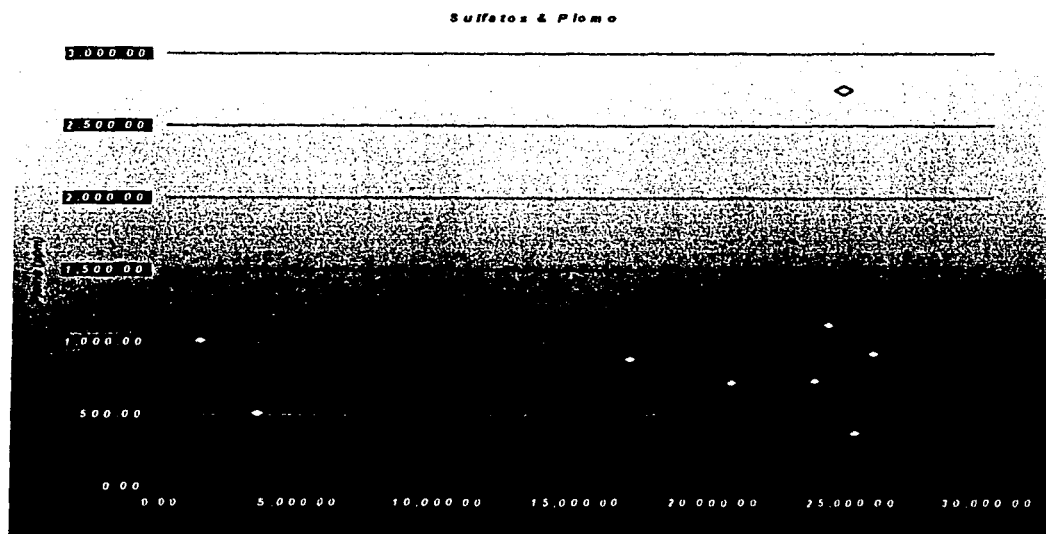
Gráfica No. 7 Relación entre pH y Cobre de las muestras de jales de la Mina Guerrero.



Gráfica No. 8 Relación entre valores de pH y Arsénico de los jales de la Mina Guerrero

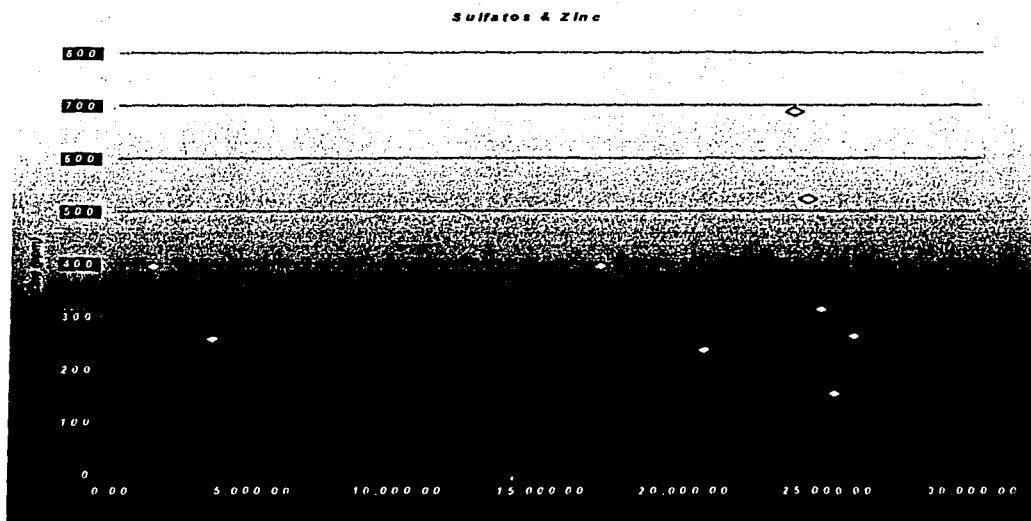


Gráfica No. 9 Relación entre valores de concentraciones de Sulfatos y Hierro de los jales de la Mina Guerrero.

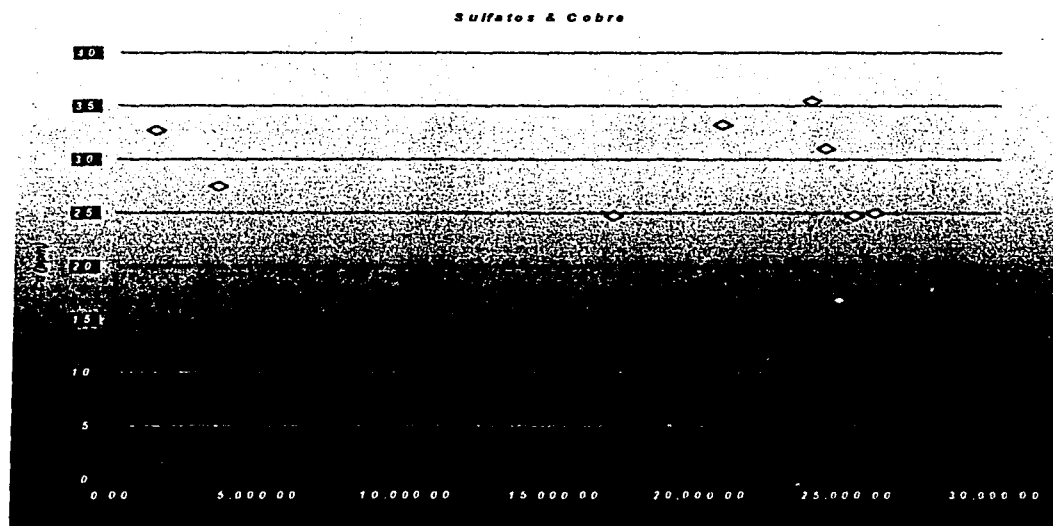


Gráfica No. 10 Relación entre Sulfatos y Plomo de los jales de la Mina Guerrero.



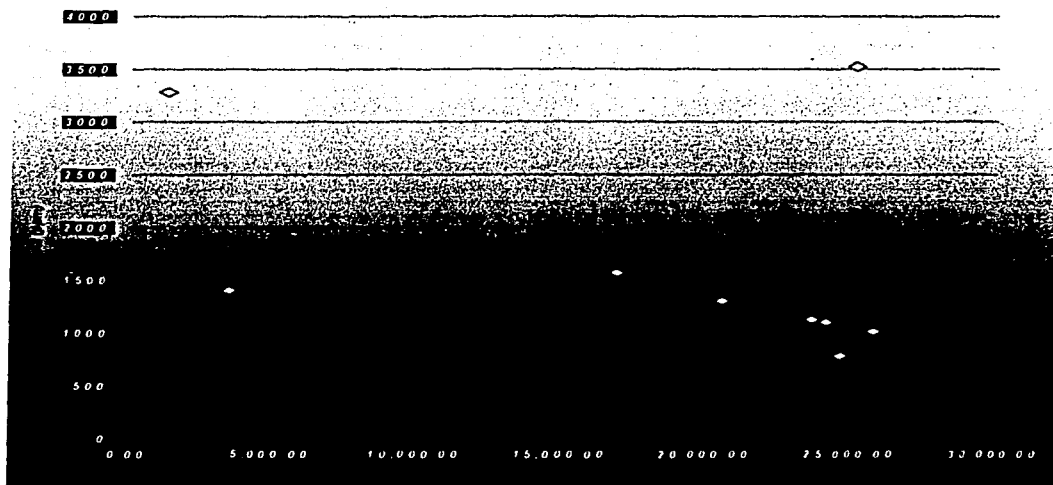


Gráfica No. 11 Relación entre valores de Sulfatos y Zinc de los jales de la Mina Guerrero.



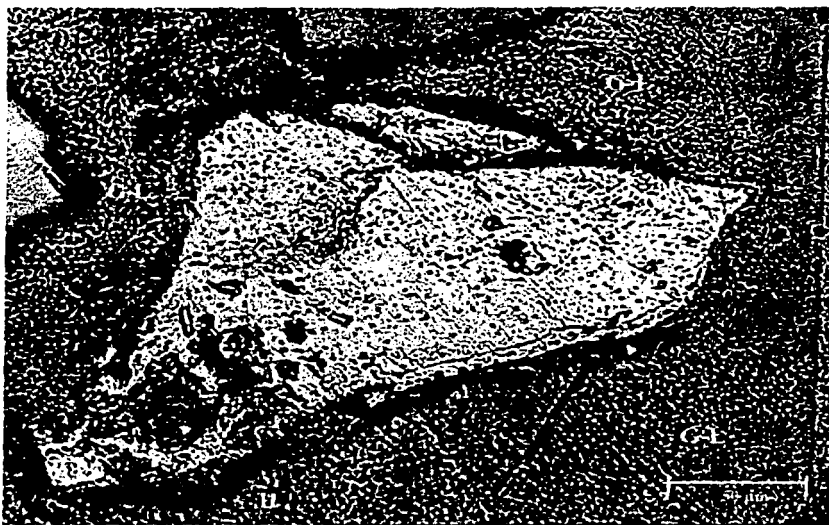
Gráfica No. 12 relación entre concentraciones de Sulfatos y Cobre de los jales de la Mina Guerrero.

Sulfatos & Arsénico



Gráfica No. 13 Relación entre concentraciones de Sulfatos y Arsénico de los jales de la Mina Guerrero.

*ANEXO II*  
*FOTOGRAFIAS*



Fotografía No. 1 RG-02 Goethita-Limonita (G-L) en forma de banda, rodeando un cristal de cuarzo (Q).



Fotografía No. 2 RG-02 Cristales de hematita (H).



Fotografía No. 3 RG-02 Cristales de magnetita (M), con posibles inclusiones de hematita (H).



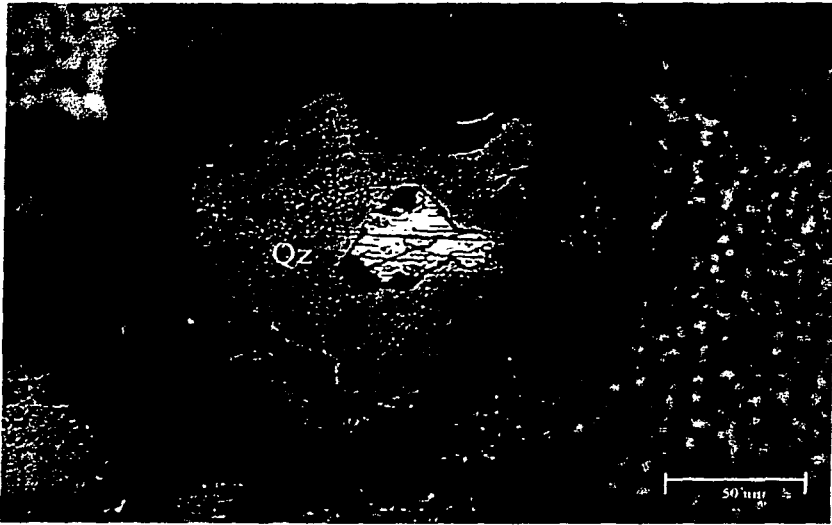
Fotografía No.4 RG-02 Hematitas masivas, intercrecidas en cuarzo.



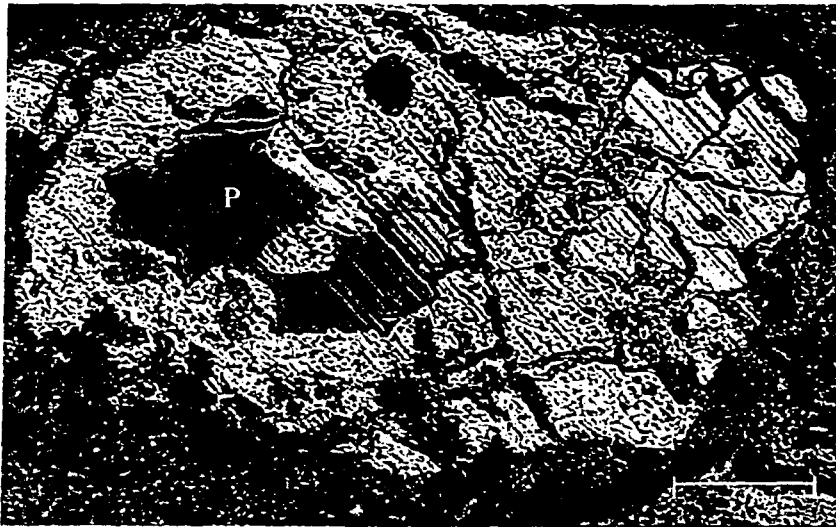
Fotografía No.5 RG- 03 Hematita (H) con goethita-limonita (G-L).



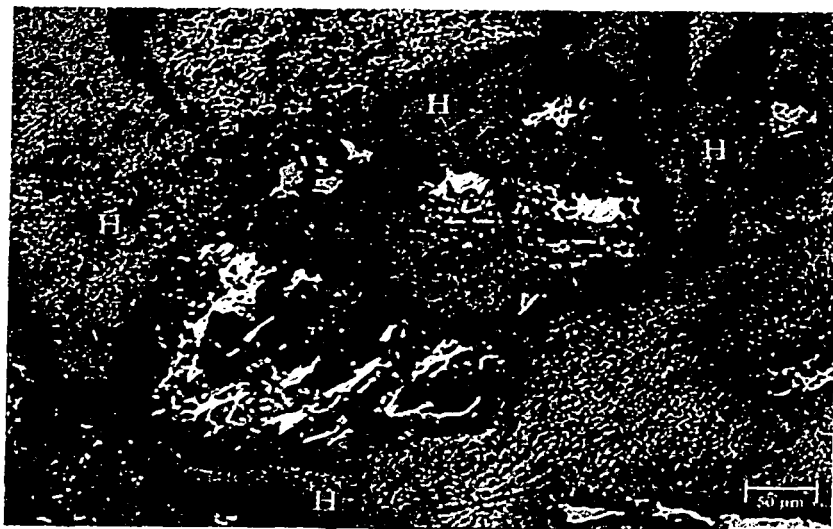
Fotografía No.6 RG-03 Cristales anhedrales de pirita (P), disseminados en cristales de cuarzo (Q).



Fotografía No. 7 RG-03 Cristal de calcopirita (Cp) dentro de un cristal de cuarzo (Q).



Fotografía No.8 RG-06A Cristales de hematita (H) y pirita (P) en un agregado.



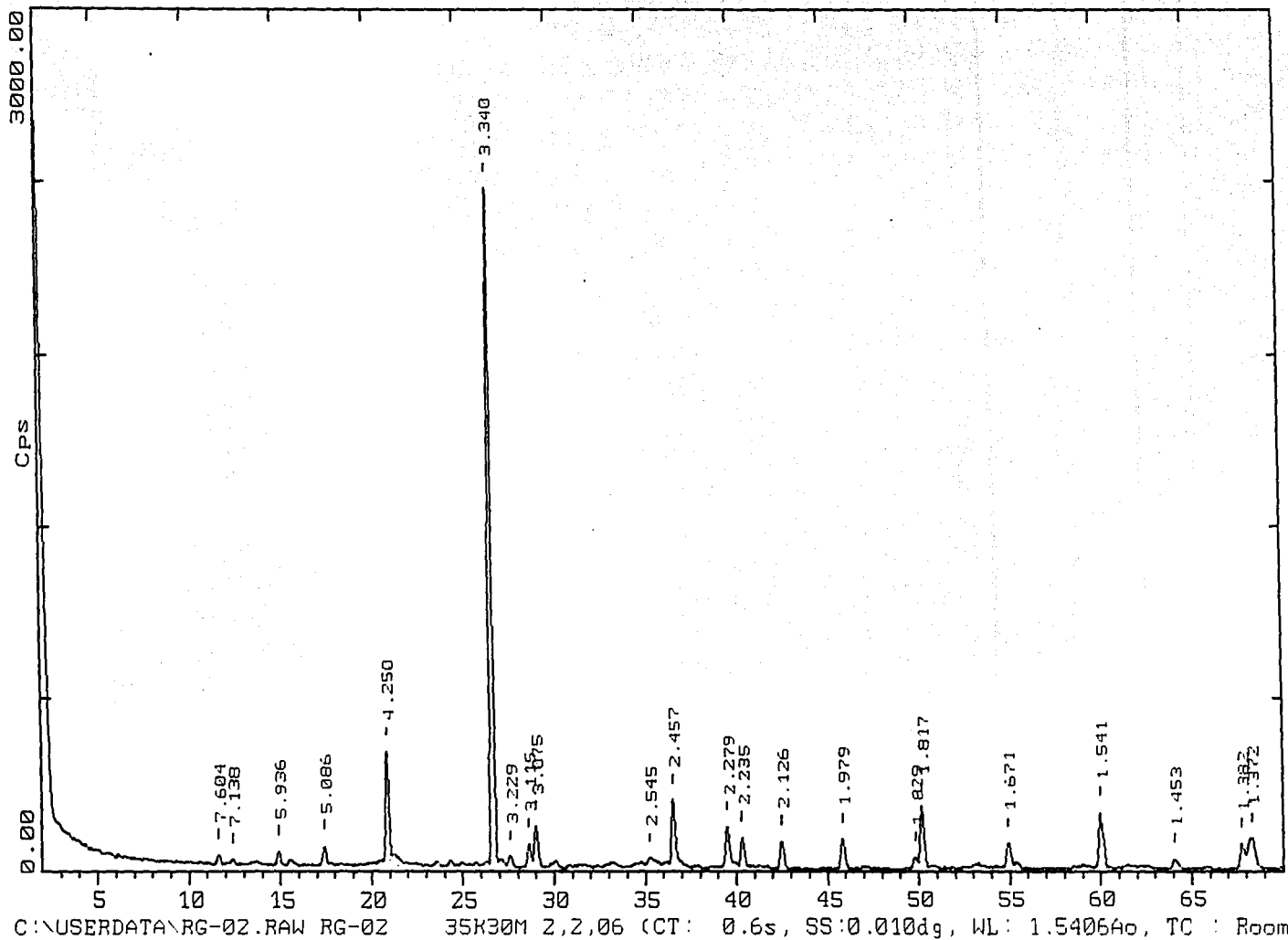
Fotografía No.9 RG-06B Cristales de hematita (H) alterado



*ANEXO III*  
*DIFRACTOGRAMAS*

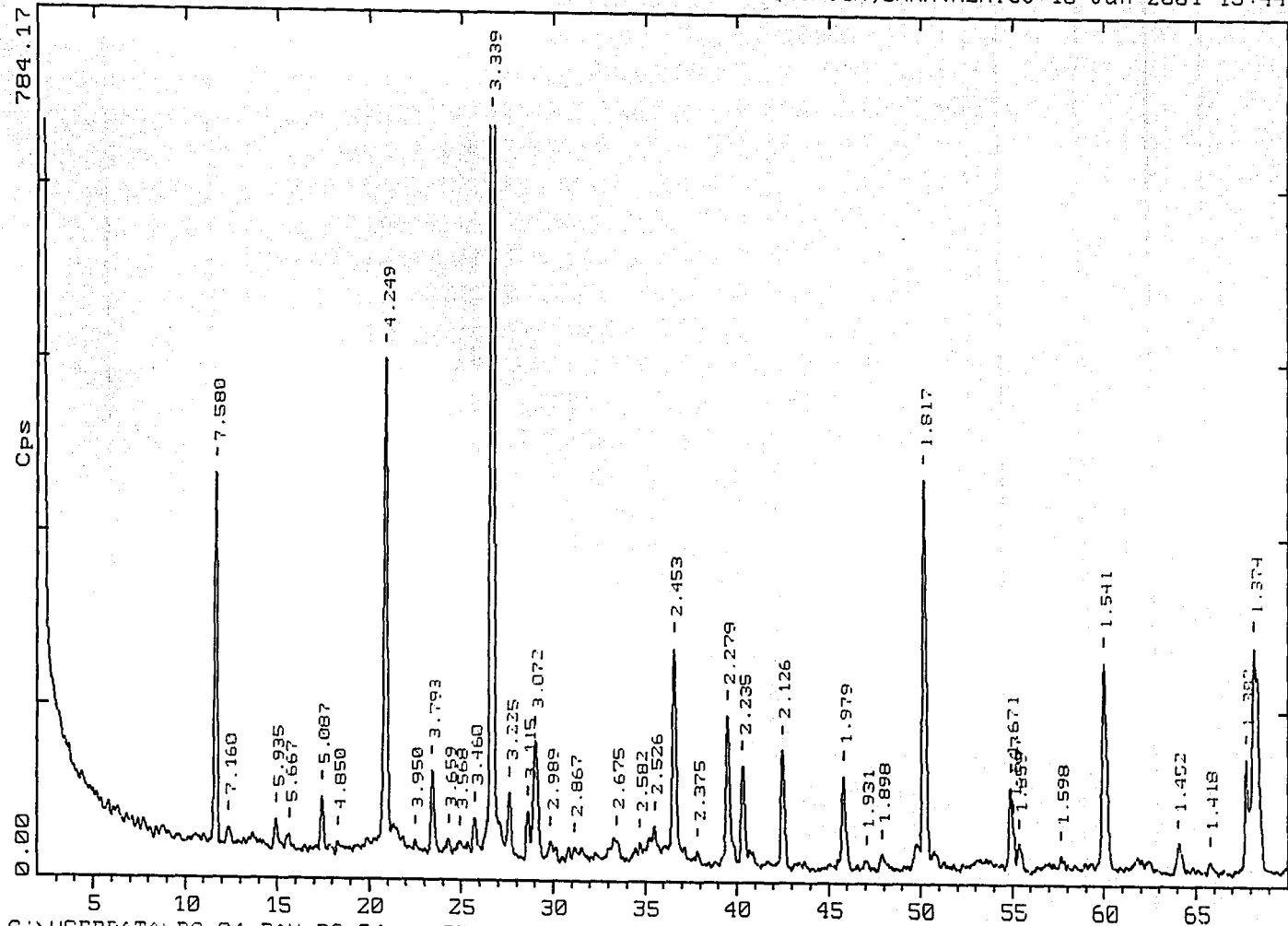
Z-Theta - Scale

FACULTAD DE QUIMICA, UNAM. MEXICO 13-Dec-2000 14:20



Z-Theta - Scale

FACULTAD DE QUIMICA, UNAM, MEXICO 16-Jan-2001 13:44

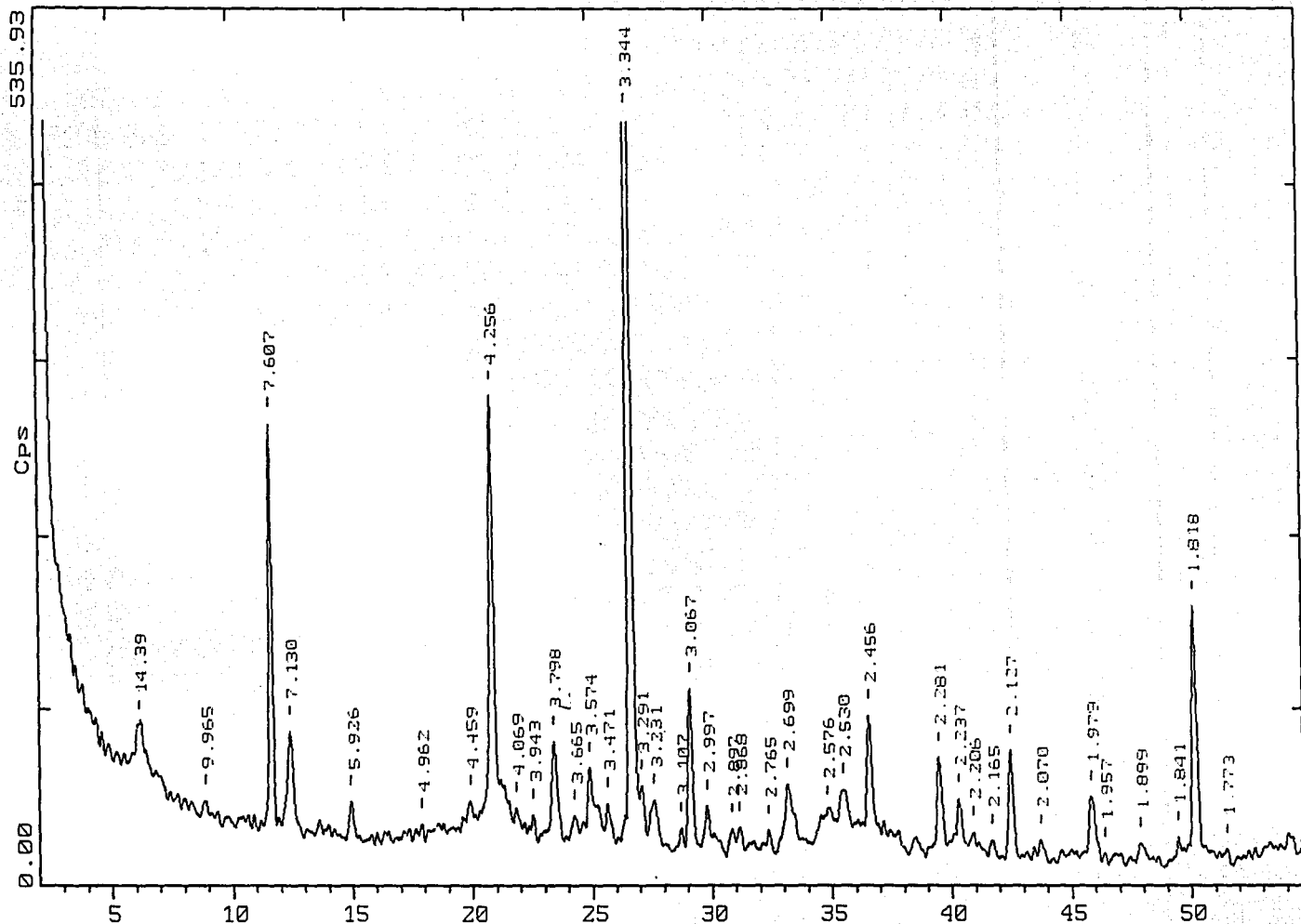


C:\USERDATA\RG-04.RAW RG-04

35K30M 2,2,06 (CT: 0.6s, SS:0.010dg, WL: 1.5406Ao, TC: Room

Z-Theta - Scale

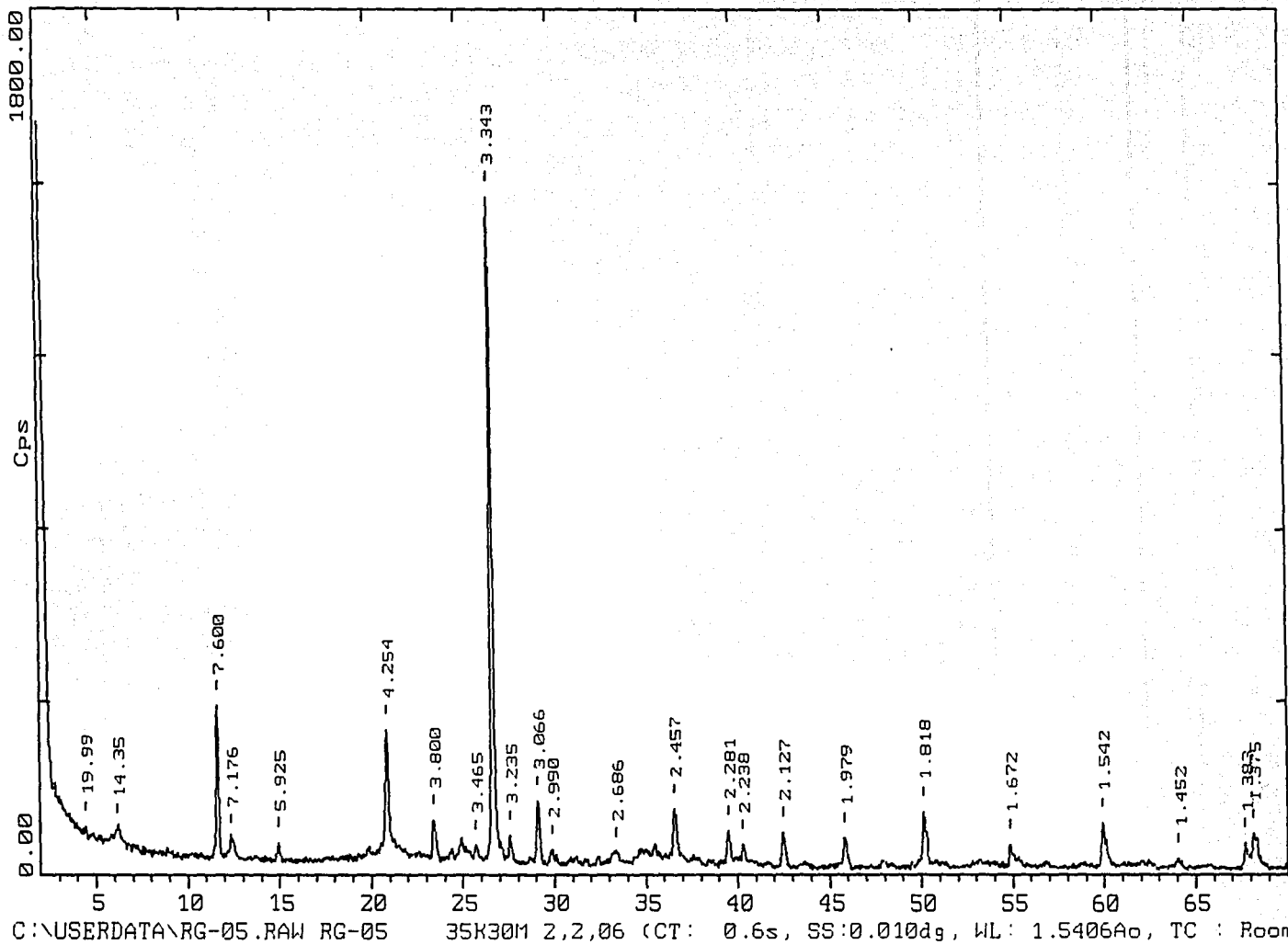
FACULTAD DE QUIMICA, UNAM, MEXICO 16-Jan-2001 13:53



C:\USERDATA\RG-04'.RAW RG-04' 35K30M 2,2,06 (CT: 0.6s, SS:0.010dg, WL: 1.5406Ao, TC : Roo

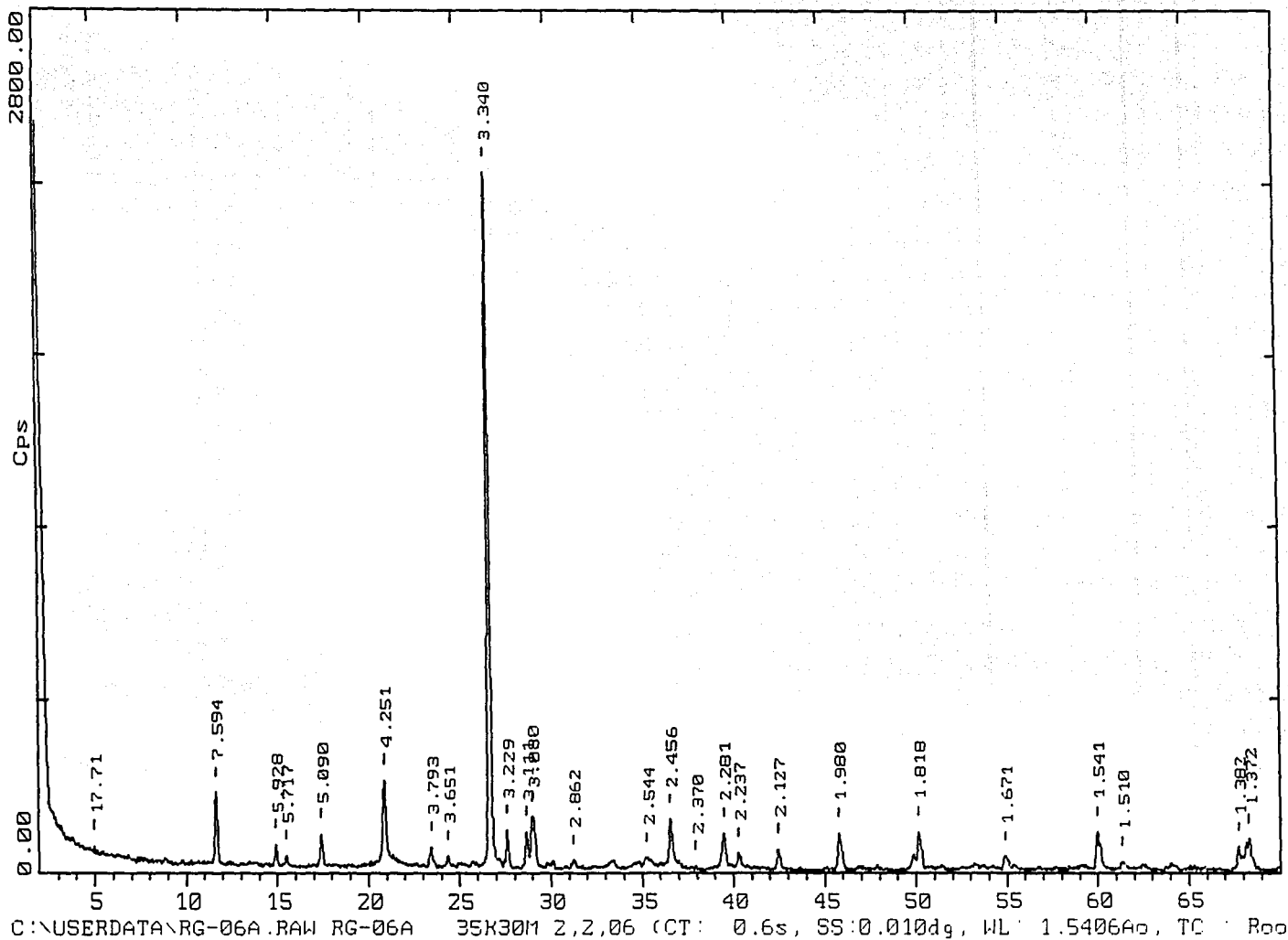
Z-Theta - Scale

FACULTAD DE QUIMICA, UNAM, MEXICO 28-Feb-2002 11:35



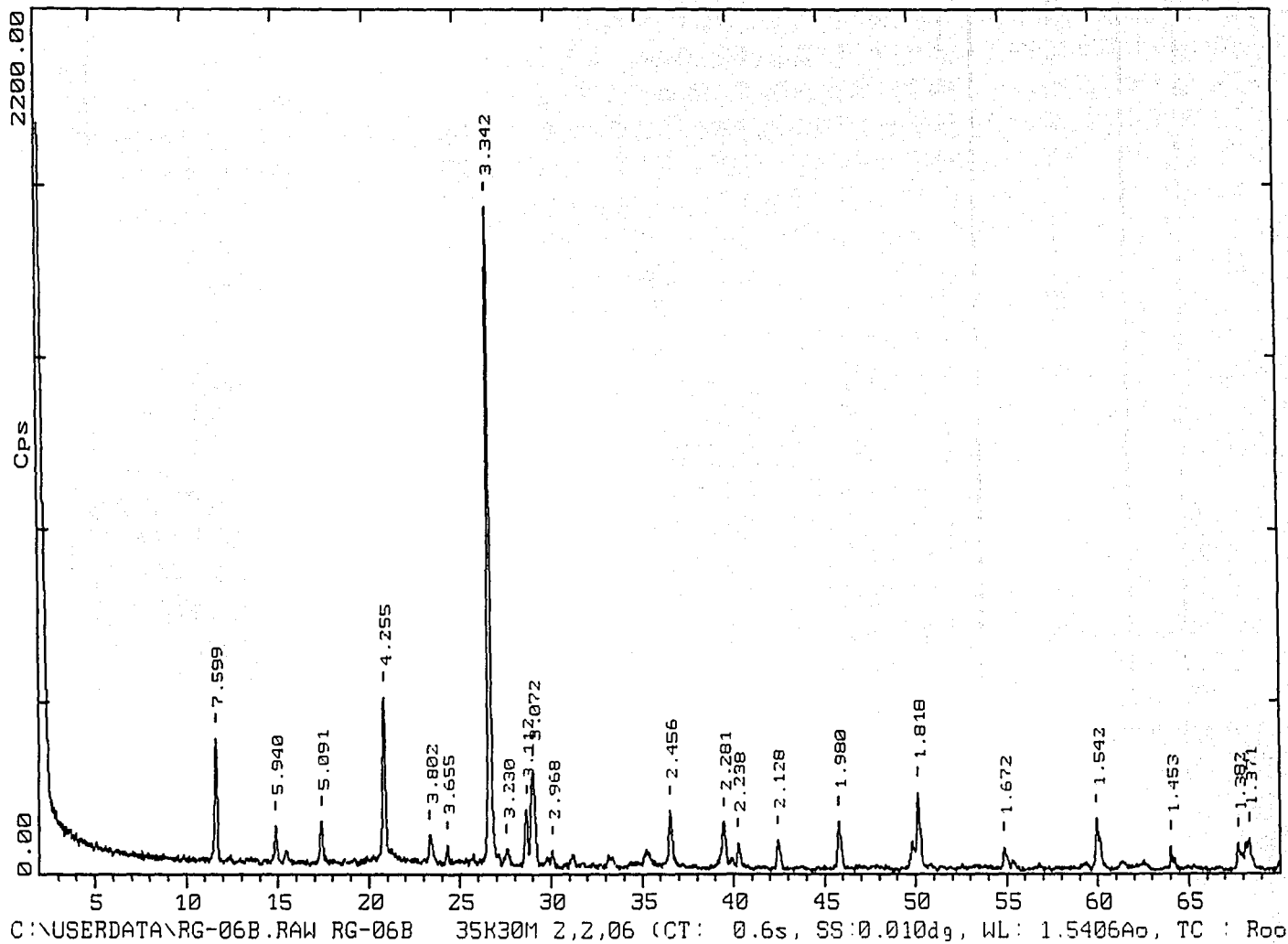
2-Theta - Scale

FACULTAD DE QUIMICA, UNAM. MEXICO 28-Feb-2002 11:37



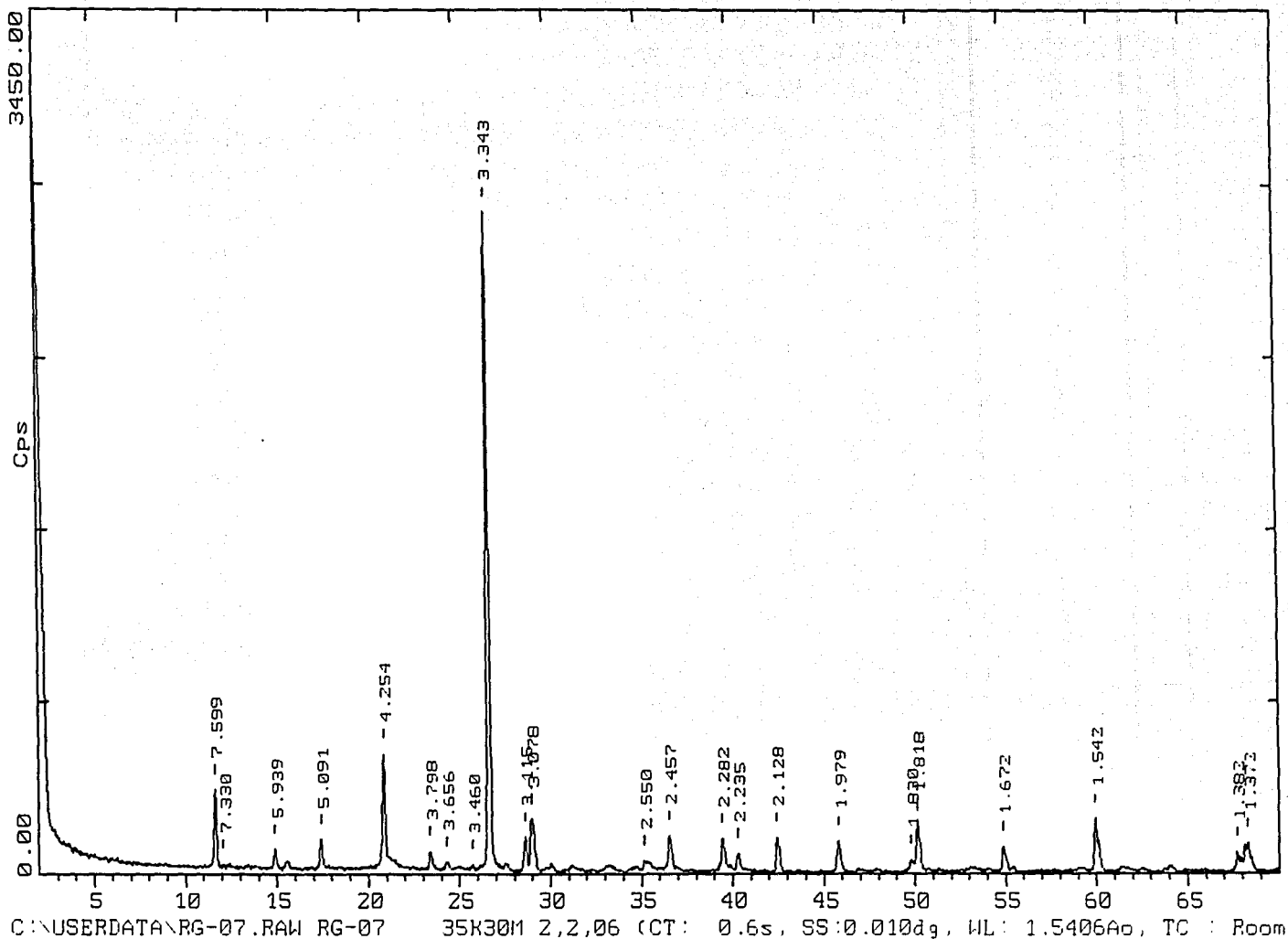
Z-Theta - Scale

FACULTAD DE QUIMICA, UNAM. MEXICO 28-Feb-2002 11:37



Z-Theta - Scale

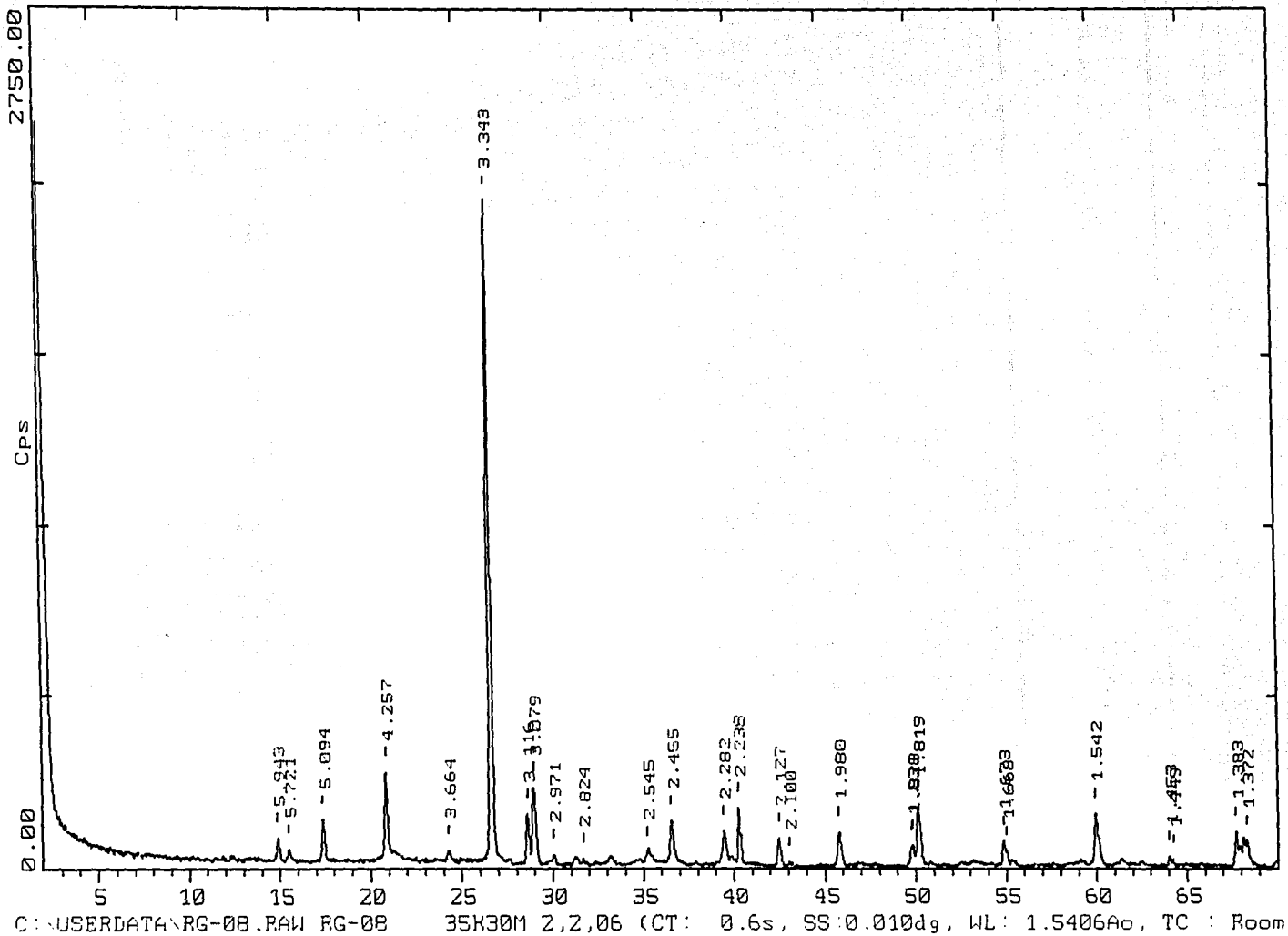
FACULTAD DE QUIMICA, UNAM. MEXICO 28-Feb-2002 11:38





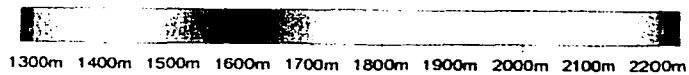
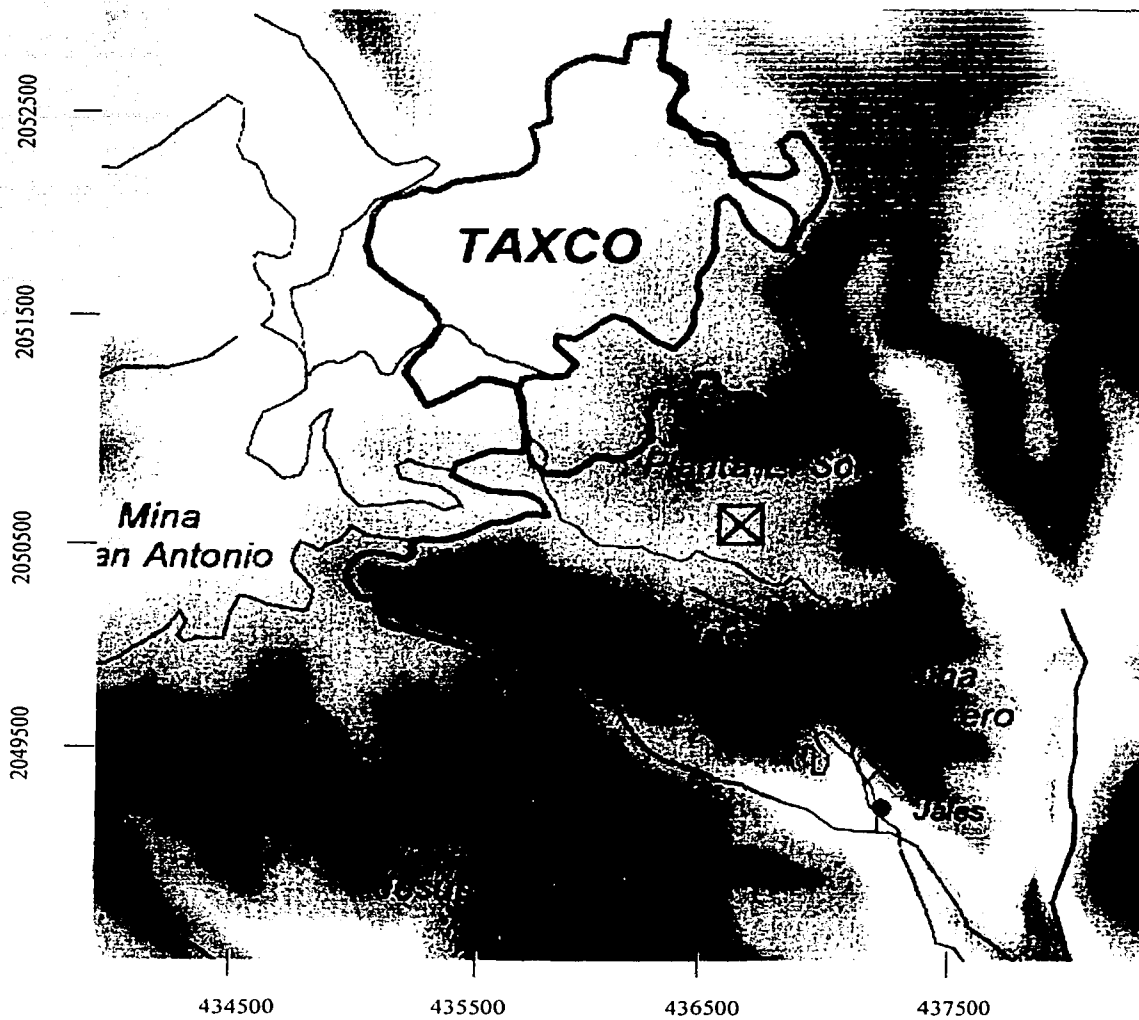
2-Theta - Scale

FACULTAD DE QUIMICA, UNAM. MEXICO 28-Feb-2002 11:38

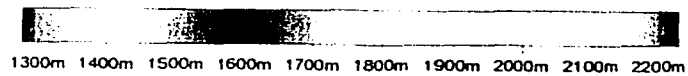
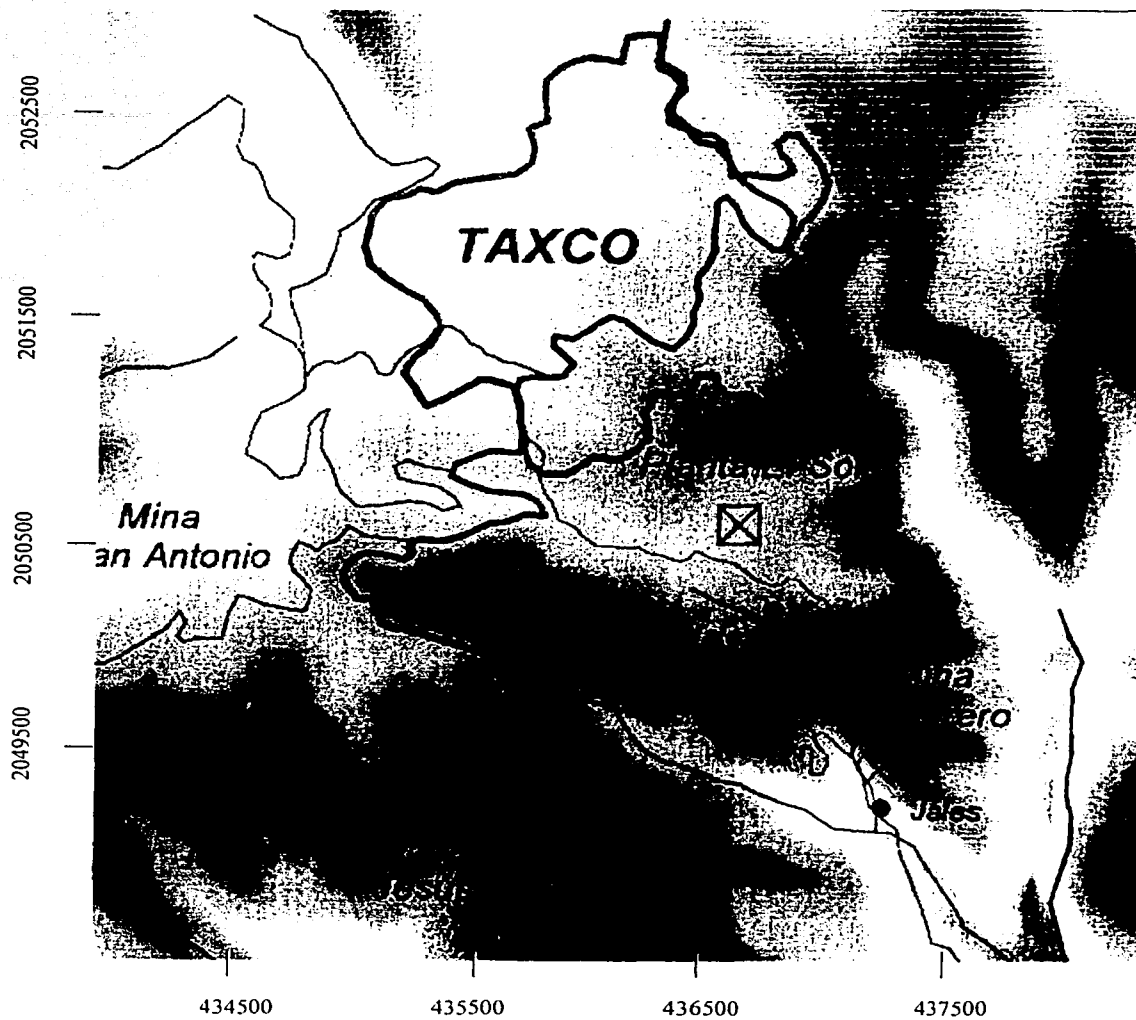


*ANEXO IV*

*MAPAS*



Mapa Hipsométrico del Distrito de Taxco, Guerrero



Mapa Hipsométrico del Distrito de Taxco, Guerrero