

01123
11

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARACTERIZACIÓN DEL CUERPO DE
SULFUROS MASIVOS VULCANOSSEDIMENTARIOS
Y SU ROCA ENCAJONANTE EN EL DISTRITO MINERO
AIRE LIBRE, TEZIUTLÁN, PUEBLA.**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO GEÓLOGO
P R E S E N T A:
NUBIA GABRIELA ROJAS MALDONADO**

**DIRECTOR DE TESIS:
ING. ALFREDO VICTORIA MORALES**



MEXICO, D.F.

JULIO DE 2003

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A



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.



FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-600

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

SRITA. NUBIA GABRIELA ROJAS MALDONADO
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Alfredo Victoria Morales y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geólogo:

**CARACTERIZACIÓN DEL CUERPO DE SULFUROS MASIVOS
VULCANOSSEDIMENTARIOS Y SU ROCA ENCAJONANTE EN EL DISTRITO MINERO
AIRE LIBRE, TEZIUTLÁN, PUEBLA**

	INTRODUCCIÓN
	OBJETIVO Y MÉTODO DE TRABAJO
I	GENERALIDADES
II	MARCO GEOLÓGICO LOCAL
III	PETROGRAFÍA DE LA SECUENCIA LITOLÓGICA DE LA ZONA
IV	MINERAGRAFÍA DE LOS CUERPOS DE SULFUROS AURORA Y VENUS
V	GEOQUÍMICA DE LA ROCA ENCAJONANTE
VI	DISCUSIÓN DE RESULTADOS
VII	CONCLUSIONES
	REFERENCIAS CONSULTADAS
	ANEXOS

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 HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria D. F., a 3 de mayo de 2002
EL DIRECTOR

ING. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB*RLLR*gtg

pp

DEDICATORIA

A MIS PADRES, por ser lo más valioso que tengo.

AGRADECIMIENTOS

En especial a la Universidad Nacional Autónoma de México mi alma Mater, por permitirme desarrollarme no solo como profesional sino también como persona.

A la DGAPA y al Instituto de Geofísica, especialmente al Departamento de Recursos Naturales por el apoyo dado durante la realización de este trabajo.

A la Compañía Minera Autlán, S.A. de C.V., por permitir la realización de éste trabajo, al Ing. Sergio Lombardini por sus comentarios.

Al Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Depósitos Minerales de la Universidad de Barcelona en especial al Dr. Joan Carles Melgarejo por el apoyo en el estudio de la Microsonda Electrónica.

A los Químicos Rufino Lozano Santa Cruz y Patricia Girón del Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica (LUGIS), del Instituto de Geología de la UNAM.

A mi Facultad por brindarme la formación de Ingeniera y por los gratos recuerdos.

A todos mis profesores y compañeros de Ciencias de la Tierra por su amistad.

Un agradecimiento muy especial a mis más queridos amigos.

Al Ing. Alfredo Victoria Morales por compartir sus valiosos conocimientos, por brindarme su comprensión, paciencia y consejos, pero sobre todo por su amistad.

A mis sinodales a los cuales les guardo un profundo respeto y admiración por su trabajo profesional y su calidad humana. Ing. Jorge Nieto Obregón, M.C. Ma. Guadalupe Villaseñor Cabral, M.C. Enrique González Torres y al Dr. Carles Canet Miquel. Gracias por sus comentarios y correcciones.

A mis padres Carmen y José, por todo su amor, comprensión y por ser el apoyo para seguir fomentando mi aprendizaje. A mi hermano Cristian por seguirme brindando motivos para dar mi mayor esfuerzo.

A mis queridísimos abuelos, tíos y primos.

Y especialmente a Darío, quien acompañó este trabajo paso a paso, compartiendo vuelos y tropezones, con misteriosa paciencia, hasta la última línea, gracias.

La conquista de las almas, es la conquista por excelencia, diariamente deberías levantarte con el propósito de conquistar a todos aquellos a quienes el destino te ponga en contacto. Sé un Don Juan de las almas, deja en cada una de las que encuentres una huella de tu luz.

Amado Nervo

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	i
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	1
MÉTODO DE TRABAJO	2
1 GENERALIDADES	5
1.1 LOCALIZACIÓN	5
1.2 VÍAS DE COMUNICACIÓN Y ACCESO	5
1.3 CLIMA	8
1.4 FISIOGRAFÍA	8
1.5 HISTORIA DEL DISTRITO MINERO AIRE LIBRE	10
1.6 INVESTIGACIONES GEOLÓGICAS PREVIAS DE LA ZONA DEL MACIZO DE TEZIUTLÁN	11
2 MARCO GEOLÓGICO LOCAL	14
INTRODUCCIÓN	14
2.1 GEOMORFOLOGÍA	16
2.2 UNIDADES LITOLÓGICAS	16
2.2.1 ROCAS METAMÓRFICAS	16
2.2.2 ROCAS ÍGNEAS	22
2.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	23
3 PETROGRAFÍA DE LA SECUENCIA LITOLÓGICA DE LA ZONA	28
3.1 ESQUISTO DE MOSCOVITA	28
3.2 ESQUISTO DE CLORITA	36
3.3 ESQUISTO CUARZO - SERICÍTICO	41
3.4 METAMORFISMO DE LA SECUENCIA PELÍTICA	46

4 MINERAGRAFÍA DE LOS CUERPOS DE SULFUROS AURORA Y VENUS	49
4.1 FORMA Y ESTRUCTURA DEL YACIMIENTO	49
4.2 MINERALOGÍA	51
4.2.1 MENA NEGRA	52
4.2.2 MENA AMARILLA	55
4.2.3 CUERPO DE MAGNETITA	59
4.3 PARAGÉNESIS	61
4.4 ANÁLISIS DE TETRAEDRITA-TENANTITA	63
5 GEOQUÍMICA DE LA ROCA ENCAJONANTE	70
5.1 FLUORESCENCIA DE RAYOS X	70
5.2 DIFRACCIÓN DE RAYOS X	72
6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	74
7 CONCLUSIONES	77
RECOMENDACIONES	78
REFERENCIAS CONSULTADAS	79
ANEXO	I

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1. Ubicación del Estado de Puebla y del Distrito Minero Aire Libre	6
Figura 1.2. Vías de acceso al Distrito Minero Aire Libre	7
Figura 1.3. Provincias fisiográficas Sierra Madre Oriental y Sistema Neovolcánico Transmexicano	9
Figura 2.1. Columna estratigráfica regional del área del Macizo de Teziutlán	15
Figura 2.2. Mapa Geológico del Distrito Minero Aire Libre	17
Figura 2.3. Esquisto de clorita con segregaciones de cuarzo en el arroyo Jardín II	18
Figura 2.4. Esquisto de clorita en muestra de mano	19
Figura 2.5. Esquisto cuarzo-sericítico del socavón Venus	20
Figura 2.6. Esquisto cuarzo-sericítico del socavón Venus en muestra de mano	20
Figura 2.7. Esquisto de moscovita	21
Figura 2.8. Sección geológica A-A'	24
Figura 2.9. Sección geológica B-B'	25
Figura 2.10. Diagrama esterográfico de la foliación del esquisto de clorita	26
Figura 2.11. Diagrama esterográfico de la foliación del esquisto cuarzo - sericítico	26
Figura 2.12. Diagrama esterográfico de la foliación del esquisto moscovita	27
Figura 2.13. Diagrama esterográfico de las direcciones preferenciales de la foliación del Distrito Minero Aire Libre	27
Figura 3.1. Ubicación de muestras	30
Figura 3.2. Fotomicrografía de la muestra ARL-43	31
Figura 3.3. Fotomicrografía de la muestra ARL-50	32
Figura 3.4. Fotomicrografía de la muestra ARL-50	32
Figura 3.5. Fotomicrografía de la muestra ARL-57	33
Figura 3.6. Fotomicrografía de la muestra ARL-66	34
Figura 3.7. Fotomicrografía de la muestra CIR -5	35
Figura 3.8. Fotomicrografía de la muestra CIR -5	35
Figura 3.9. Fotomicrografía de la muestra VNS-3	37
Figura 3.10. Fotomicrografía de la muestra VNS-3	37
Figura 3.11. Fotomicrografía de la muestra VNS-3	38
Figura 3.12. Fotomicrografía de la muestra JAR-2	39
Figura 3.13. Fotomicrografía de la muestra JAR-2	39
Figura 3.14. Fotomicrografía de la muestra JARB-2	40
Figura 3.15. Fotomicrografía de la muestra JARB-2	40
Figura 3.16. Fotomicrografía de la muestra VNS-1	42

Figura 3.17. Fotomicrografía de la muestra VNS-1	42
Figura 3.18. Fotomicrografía de la muestra AUR-44A	43
Figura 3.19. Fotomicrografía de la muestra CIR-1	44
Figura 3.20. Fotomicrografía de la muestra CIR-1	44
Figura 3.21. Fotomicrografía de la muestra P-1	45
Figura 3.22. Fotomicrografía de la muestra P-1	45
Figura 3.23. Diagrama AFM	48
Figura 4.1. Sección geológica C-C'	50
Figura 4.2. Fotografía del cuerpo mineralizado del socavón Venus	51
Figura 4.3. Fotografía y fotomicrografías de la mena negra del cuerpo Venus	53
Figura 4.4. Fotografía y fotomicrografías de la mena amarilla del cuerpo Venus	56
Figura 4.5. Imagen SEM-BSE de la mena amarilla del cuerpo Venus	58
Figura 4.6. Imagen SEM-BSE de la mena amarilla del cuerpo Venus	58
Figura 4.7. Imagen SEM-BSE de la mena negra del cuerpo Venus	58
Figura 4.8. Fotomicrografía del cuerpo de magnetita en Aurora	60
Figura 4.9. Diagrama ternario del sistema Sb-As-Bi	66
Figura 4.10. Número de átomos de Bi vs Sb	67
Figura 4.11. Número de átomos de Bi vs As	67
Figura 4.12. Número de átomos de As vs Sb	68
Figura 4.13. Número de átomos de Bi vs Ag	68
Figura 4.14. Número de átomos de Bi vs Cu	69
Figura 4.15. Número de átomos de Bi vs Hg	69
Figura 5.1. Diagrama de clasificación química	71
Figura 5.2. Diagrama AFM	72
Figura 5.3. Difractograma de la roca encajonante del bajo del cuerpo Venus	73

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 3.1. Valores de Al, Mg y Fe para rocas de composición química pelítica	47
Tabla 4.1. Simbología de minerales	52
Tabla 4.2. Cuadro paragénetico para la mena negra del cuerpo Venus	61
Tabla 4.3. Cuadro paragénetico para la mena amarilla del cuerpo Venus	62
Tabla 4.4. Cuadro paragénetico para el cuerpo de magnetita en Aurora	62
Tabla 4.5. Resultados del análisis de microsonda electrónica	63
Tabla 4.6. Fórmulas para las Tetraedritas-Tenantitas	64

RESUMEN

El presente trabajo corresponde a un estudio geológico del yacimiento de sulfuros masivos vulcanosedimentarios La Aurora, efectuado en la porción nororiental del Estado de Puebla, en el Distrito Minero Aire Libre, el cual forma parte del Municipio de Teziutlán.

La secuencia litoestratigráfica del Distrito Minero Aire Libre comprende una secuencia de rocas metamórficas que se consideran del Paleozoico, las cuales se encuentran cubiertas por rocas Igneas Terciarias de la Faja Volcánica Transmexicana.

El yacimiento La Aurora corresponde a una antigua zona minera que tiene varios cuerpos de sulfuros masivos con valores de cobre – zinc, encajonados en una secuencia vulcanosedimentaria con metamorfismo en facies de esquistos verdes.

Los lentes de sulfuros masivos se encuentran encajonados por esquistos cuarzo - sericíticos al alto y por esquistos de clorita al bajo. La mineralogía de estos lentes consiste en calcopirita, esfalerita y cantidades menores de galena, pirita, sulfosales, bornita y covelita intercrecidas con minerales transparentes (cuarzo y barita).

En base a estudios de microsonda electrónica, se pudo establecer que las sulfosales corresponden con una tetraedrita de bismuto.

La geoquímica de la secuencia litoestratigráfica no había sido estudiada anteriormente, en este trabajo se presentan los resultados de análisis de

elementos mayores y trazas de las rocas encajonantes de los cuerpos mineralizados Aurora, Venus y el socavón Jardín II que dan como resultado rocas de composición química pelítica y básica.

Debido a la asociación mineralógica, al alto contenido de cobre y al tipo de roca encajonante, este yacimiento se puede considerar como una mena amarilla tipo Kuroko.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se ha realizado en el marco del proyecto "Mineralización tipo Sulfuros Masivos Vulcanosedimentarios y sus Controles de Deposición" apoyado por la Dirección General de Apoyo al Personal Académico con número de proyecto IN110199 el cual se desarrolló en conjunto por el Departamento de Recursos Naturales del Instituto de Geofísica y el Departamento de Yacimientos Minerales de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

OBJETIVOS

El objetivo central del presente trabajo es caracterizar mineralógica y químicamente los cuerpos mineralizados Aurora y Venus del yacimiento de sulfuros masivos del Distrito Minero Aire Libre y de su roca encajonante para:

- Definir las características estructurales de las unidades de roca presentes en la zona.
- Definir las relaciones texturales entre las fases identificadas en los cuerpos mineralizados y establecer la secuencia paragenética.
- Reconocer las características mineralógicas y geoquímicas distintivas de este yacimiento con la finalidad de clasificarlo.

PAGINACIÓN DISCONTINUA

MÉTODO DE TRABAJO

Después de establecer los objetivos, se procedió a recabar toda la información disponible relacionada con el área de estudio tanto local como regional mediante la consulta de artículos, publicaciones, informes técnicos, cartografía geológica y topográfica.

Posteriormente se proyectó la visita a la zona del Distrito Minero Aire Libre para realizar el trabajo de campo consistente en el reconocimiento del área, levantamientos geológicos, colecta de muestras y medición de datos estructurales con el fin de obtener la mayor cantidad de información posible para realizar los trabajos de gabinete y laboratorio.

Una vez finalizadas las dos primeras etapas, se continuó con la integración de la información bibliográfica y de campo para realizar los trabajos de geología estructural y análisis de petrografía, minerografía y geoquímica que permitieran caracterizar la secuencia litológica y al yacimiento mineral. Los estudios, análisis y técnicas empleadas son descritos a continuación.

Geología

Los trabajos de geología, consistieron en la elaboración de un mapa de detalle que incluye la topografía y geología del Distrito Minero Aire Libre sobre el cual se han establecido distintas unidades en que localmente se divide la secuencia metamórfica. Además se incluye la información estructural con datos de foliación que fueron procesados para obtener las orientaciones y buzamiento preferencial de las unidades metamórficas, lo cual permitió la construcción de las secciones geológicas que se presentan en este trabajo.

Petrografía y Minerografía

Se prepararon láminas delgadas y superficies pulidas de las rocas colectadas en campo para su estudio mediante microscopía de polarización como técnica de análisis. Por medio de minerografía se identificaron las fases minerales opacas y por petrografía se identificó a los minerales transparentes y alteraciones presentes. Adicional a lo anterior se realizó la toma de fotomicrografías de las asociaciones minerales más representativas con nícoles cruzados así como con luz paralela, aplicando objetivos de 2.5X, 10X, 20X y 50X y un ocular de 10X. El procesamiento de las imágenes se realizó empleando un Analizador de Imágenes *CARL ZEISS* que emplea un microscopio *Axiolab* y el software *AxioVision 3.1* con *Carl Zeiss AxioCam Emulation*, del Departamento de Yacimientos Minerales, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Igualmente se empleó una microsonda electrónica para realizar análisis cuantitativos puntuales de minerales seleccionados y obtener imágenes de SEM-BSE. Para este estudio se contó con el apoyo del Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Depósitos Minerales de la Universidad de Barcelona. El equipo empleado es modelo *CAMECA SX-50*, equipado con cuatro espectrómetros de dispersión de longitud de onda en el laboratorio de los *Serveis Científico-Técnic*s, Universidad de Barcelona.

Geoquímica

Una parte de las muestras fue preparada para realizar estudios de elementos mayores y trazas y de difracción de rayos X. Las rocas fueron preparadas utilizando una trituradora de quijada y un pulverizador en el taller de molienda del Departamento de Minas y Metalurgia de la Facultad de Ingeniería, UNAM. El análisis fue realizado con un espectrómetro de masas secuencial de Fluorescencia

de Rayos X marca *Siemens SRS 3000* en el Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica del Instituto de Geología de la UNAM.

Por último se interpretó la información de campo, petrografía, minerografía y geoquímica a fin de establecer el probable origen de la secuencia litológica.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 LOCALIZACIÓN

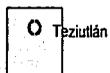
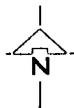
La zona del presente estudio se encuentra ubicada dentro del Distrito Minero Aire Libre en el Municipio de Teziutlán, al norte del Estado de Puebla. Las coordenadas geográficas son 97°23' 15" y 97°26'15" Longitud Oeste y 19° 51' 20" y 19°51' 30" Latitud Norte como se muestra en la Figura 1.1.

1.2 VÍAS DE COMUNICACIÓN Y ACCESO

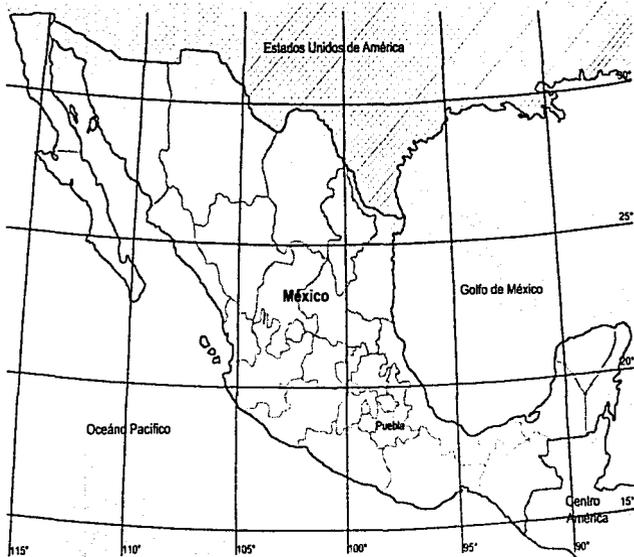
El Estado de Puebla cuenta con una buena infraestructura de carreteras y transporte terrestre que permiten un fácil acceso hasta la población de Aire Libre.

Existen dos opciones para acceder a la zona partiendo desde la Ciudad de Puebla. La primera es a través de la carretera No. 150 para llegar a Tepeaca Acatzingo y continuar por la carretera No. 140 hacia Perote, que comunica con la carretera No. 131 hasta la población de Atzalán donde se toma la desviación a Teziutlán. Desde este lugar la distancia con Aire Libre es de 14 km sobre un camino de terracería que permite el acceso a la zona de estudio.

La segunda opción para acceder al Distrito Minero Aire Libre es por la carretera No. 150 hasta llegar a Amozoc y cambiar a la carretera No. 129, Amozoc-Perote, que pasa por las poblaciones de Tequexquitla, Oriental, Libres. Pasando la Ciudad de Tlatlauquitepec se encuentra la desviación hacia Teziutlán. Estos accesos están ilustrados en la Figura 1.2.



Puebla



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

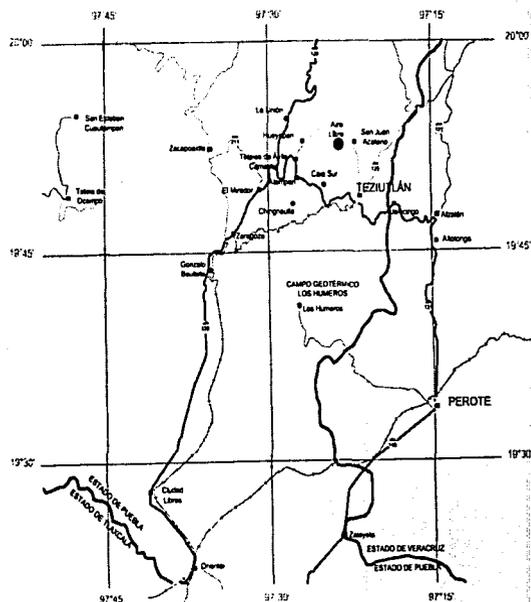


Fig. 1.1. Ubicación del Estado de Puebla y del Distrito Minero Aire Libre

1.3 CLIMA

El clima de la zona se ubica en la transición entre los climas templados de la Sierra Norte de Puebla y los climas cálidos de la Llanura del Golfo de México. El área presenta precipitación pluvial en la mayor parte del año, como consecuencia de la gran cantidad de humedad contenida en la atmósfera, esto provoca que existan ríos y arroyos perennes. Localmente en las partes altas se presenta un clima templado húmedo; temperatura media anual entre 14 y 18 °C; temperatura del mes más frío entre -3 y 18 °C.

En las barrancas y cañadas se presenta un clima semicálido-húmedo con una temperatura media anual superior a 18 °C; precipitación del mes más seco menor de 40 mm; la precipitación total anual oscila de 300 a 2500 mm.

1.4 FISIOGRAFÍA

La región de estudio queda comprendida entre las provincias fisiográficas de la Sierra Madre Oriental y el límite norte del Sistema Neovolcánico Transmexicano descritas por Morán-Zenteno en 1984 (Fig. 1.3).

La provincia de la Sierra Madre Oriental consiste esencialmente en cadenas montañosas de rocas Mesozoicas plegadas, con orientación predominante al noroeste. La altitud media es de 2000 m con valores máximos de 3000 m.

Contiguas a las montañas marginales hay numerosas acumulaciones volcánicas y algunas intrusiones, ambas pertenecen al periodo Terciario y ocupan pequeñas superficies. Todo este conjunto de montañas plegadas y valles escalonados se debe, en apariencia, a una serie de factores complejos que son movimientos diferenciales de bloques en proceso orogénico y posterior a éste, y relleno de depresiones naturales por materiales volcánicos (Morán-Zenteno, 1984).

PROVINCIAS FISIGRÁFICAS

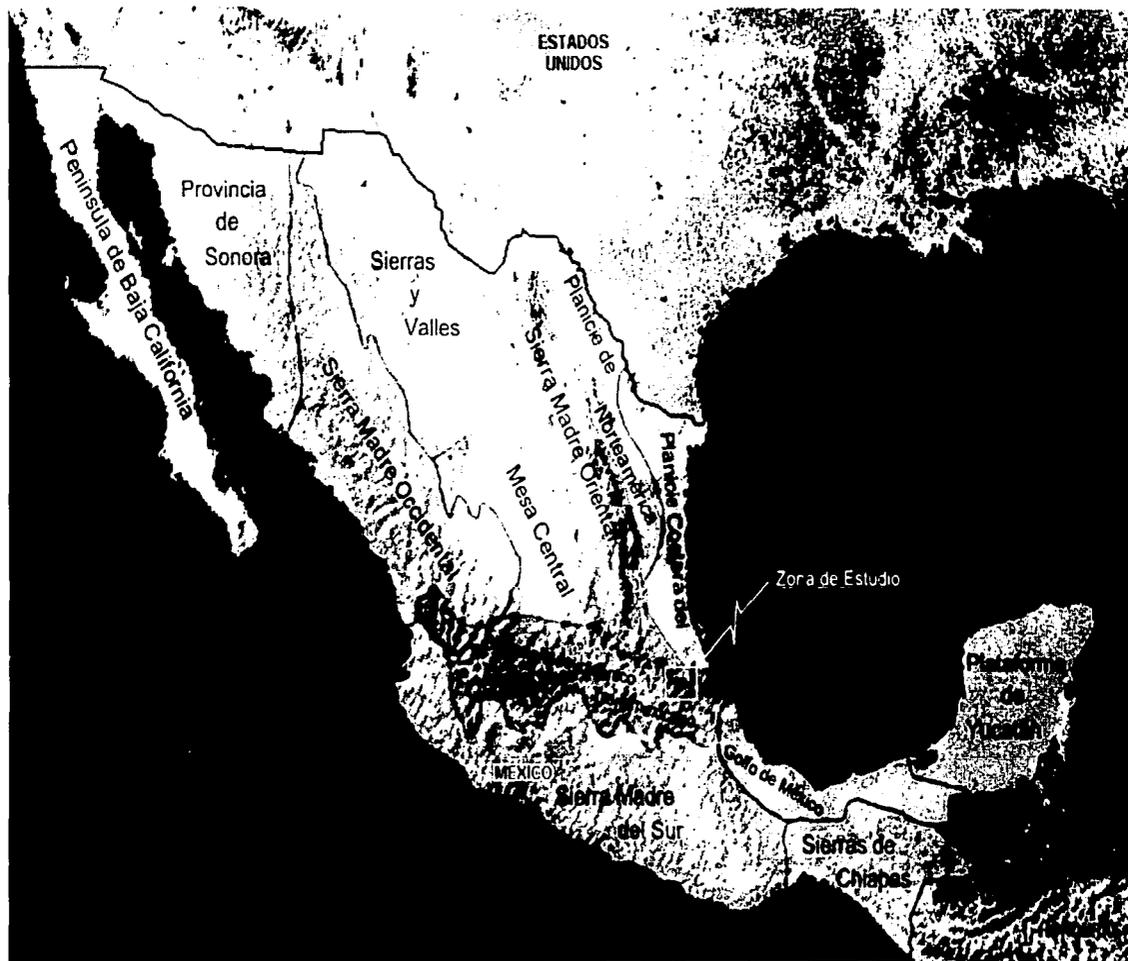


Figura. 1.3. Provincias fisiográficas Sierra Madre Oriental y Sistema Neovolcánico Transmexicano (Morán-Zenteno, 1984).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1.5 HISTORIA DEL DISTRITO MINERO AIRE LIBRE

La siguiente información fue tomada del trabajo realizado por Chavelas Lluck et. al. en 1991.

En el año de 1887, el señor Vicente Lombardo fundó la compañía "The Teziutlan Mining and Smelting Co.", que inició la explotación de la mina "La Valenciana", en el Estado de Guanajuato.

Para el año de 1892 ya se tenía conocimiento del yacimiento que dio origen a la mina La Aurora, la cual fue trabajada con una ley de 10 % de cobre, bajo la dirección de "The Teziutlan Cooper Co". En el año de 1900 se fusionaron ambas empresas y de esta manera se dio inicio a una época de bonanza dentro del distrito.

De 1910 a 1917 la explotación de La Aurora fue suspendida, sin embargo, de 1914 a 1917 se efectuaron estudios que pretendían combinar métodos de beneficio gravimétricos y de flotación, para el mejor aprovechamiento de las menas.

En 1918, "The Teziutlan Cooper Co.", se asoció con los grupos Real del Monte y Pachuca, San Luis Mining y The Fresnillo Company. En 1920, entra en sociedad con la "Mexican Zinc Corporation" y para el periodo de 1925 a 1931 se tuvo una producción de 325 000 toneladas, utilizando el método de flotación selectiva con las siguientes leyes: 1.59 gr/ton Au; 78 gr/ton Ag; 3.2 % de Cu; 12 % de Zn y 1.20 % de Pb.

En el año de 1935, la Compañía Minera Asarco, S.A., se hizo cargo de la explotación de la mina "La Aurora"; tres años más tarde se suspendió la explotación definitivamente.

Desde 1970, Compañía Minera Autlán, S.A. de C.V., es concesionaria de los derechos de exploración. La cual realiza estudios de factibilidad para reanudar la explotación de los cuerpos minerales.

En resumen, los cuerpos principales que se explotaron fueron Aurora, Cometa, Neptuno, El Volcán y La Minerva, de los cuales se estima que produjeron cerca de 2 775 000 toneladas de mineral, con leyes atractivas de cobre, zinc y plata.

El primer cuerpo que se conoció, fue el cuerpo Aurora el cual tuvo una ley promedio de 10 % de cobre. No se conoce más información con respecto a este cuerpo; sin embargo, se estima que produjo cerca de 325 000 toneladas de mineral. En los alrededores de la mina el horizonte mineralizado presenta un espesor de 0.4 m y ley media de 3.48 % de cobre, 6.2 % de zinc, 2.2. % de plomo, 3.2 gr/ton de oro y 113.3 gr/ton de plata.

Las reservas que llegaron a presentar los diferentes cuerpos son: Cometa con más de 800 000 toneladas de mineral con una ley aproximada entre 6 y 10 % de cobre; el cuerpo Volcán excedió probablemente las 500 000 toneladas con una ley aproximada de 85 gr/ton de plata, 3.5 % de cobre, 12 % de zinc y 1.2 % de plomo; y el cuerpo Minerva en el orden de las 650 000 toneladas, con leyes promedio semejantes a las del cuerpo Volcán.

1.6 INVESTIGACIONES GEOLÓGICAS PREVIAS DE LA ZONA DEL MACIZO DE TEZIUTLÁN

Los primeros trabajos publicados Gómez Valle (1958) clasifica a las rocas metamórficas del Macizo de Teziutlán como pizarras esquistosas y esquistos de clorita con sericita. Quezadas Flores (1961) correlaciona a rocas metamórficas del Macizo de Teziutlán con las encontradas en el basamento de la Cuenca Tampico-

Misantla. En 1965, Viniegra reporta para la cuenca Tampico-Misantla granitos, granodioritas, tonalitas, dioritas y gabros.

En 1972, López Ramos hace una recopilación de la información geológica de 130 pozos de la zona de Poza Rica y determina que son los gneises y esquistos el segundo grupo de rocas más abundantes de las muestras del subsuelo. Posteriormente Ruiz Sainz (1978) fecha por el método K-Ar, esquistos de moscovita y cuarzo colectados a lo largo de la carretera Tlatlauquitepec-Mazatepec y obtiene una edad de 207 ± 17 M.a. Esta edad es interpretada como el último evento metamórfico que sufrió la secuencia.

En 1986 Zamorano Montiel presenta un informe de estudios locales en el área del Distrito Minero Aire Libre y propone un origen vulcanogénico para el yacimiento La Aurora. Segura Calderón en 1990 describe a las rocas metamórficas como una secuencia de esquistos pelíticos, cuarzofeldespáticos y básicos, a la cual denominó Serie de Esquistos Xucayucan.

Chavelas Lluck et. al., (1991) describen las características geológicas del yacimiento mineral del Distrito Minero de Aire Libre, para evaluar su potencial minero. La mineralización de cobre-zinc del yacimiento La Aurora proviene de una secuencia vulcanosedimentaria y esta alojada en un paquete metamórfico que corresponde al Pérmico.

Castro Mora (1993) describe el yacimiento La Aurora, alojado en un paquete metamórfico de edad Pérmico. El paquete metamórfico consiste de esquistos cuarzo-sericiticos y metandesitas; la mineralización sigue un control litológico estando delimitada por la metandesita al alto y por el esquistos al bajo

Angeles Moreno y Sánchez Martínez, (2002) realizan estudios de estratigrafía y geología estructural de las rocas metamórficas de la región del Macizo de

Teziutlán y redefinen dichas rocas en dos subunidades: Complejo Milonítico Xucayucan y Complejo Milonítico la Soledad.

CAPÍTULO 2

MARCO GEOLOGICO LOCAL

INTRODUCCIÓN

El área de estudio tiene la peculiaridad de estar situada entre los límites de la Faja Volcánica Transmexicana y la Sierra Madre Oriental. Cabe señalar que las características geológicas son complejas dado que mientras estas provincias geológicas corresponden, con rocas ígneas la primera y con rocas sedimentarias la segunda, el objeto de investigación es la unidad de rocas metamórficas el cual contiene además un cuerpo mineral de origen vulcanosedimentario.

Las rocas ígneas y metamórficas que afloran en la zona de estudio son consideradas como parte del complejo basal, con edades que varían desde el Pérmico Tardío al Reciente (Gómez-Valle, 1968).

Algunas de estas rocas están cubiertas por rocas sedimentarias continentales del Triásico Superior y del Jurásico Inferior y Medio, y otras rocas sedimentarias marinas del Jurásico Superior y del Cretácico. La intensa actividad ígnea casi exclusivamente volcánica, está representada con gran amplitud en toda la región al parecer se inició a fines del Mioceno hasta el Reciente, enmascarando los rasgos estratigráficos y estructurales de las rocas subyacentes.

Una propuesta de la columna estratigráfica de la región dada por Segura en 1990 se presenta en la Figura 2.1.

COLUMNA ESTRATIGRÁFICA REGIONAL.
ZONA DE TEZIUTLÁN-ZACAPOAXTLA, PUEBLA.

PERIODO	EPOCA	EDAD	UNIDAD	LITOLOGIA
CUATERNARIO	HOLOCENO		Aluvión	Cenizas volcánicas de composición basáltica, andesítica-dacítica y riolítica.
	PLEISTOCENO		Riolita Oyameles	Serie de rocas volcánicas de composición riolítica
TERCIARIO	PLIOCENO		Fm. Teziutlán	Flujos piroclásticos de composición riolítica
	MIOCENO		Andesitas Alsesecca	Derrames andesíticos volcánicos intercalados con tobas y aglomerados
	OLIGOCENO			Andesita de color gris oscuro con fenocristales claros de plagioclasas
	EOCENO			
	PALEOCENO			
CRETACICO	TARDÍO	MAASTRICHTIANO	Fm. Mendez	Secuencia rítmica de lutitas y margas de color verde
		CAMPANIANO		
		SANTONIANO	Fm. San Felipe	Calizas arcillosas con intercalaciones de bentonita verde
		CONIACIANO	Fm. Agua Nueva	Calizas grises con intercalaciones de lutitas negras
		TURONIANO		
	TEMPRANO	CENOMANIANO	Fm. Tamaulipas Superior	Calizas arcillosas de color gris
		ALBIANO		
		APTIANO	Fm. Tamaulipas Inferior	Calizas densas de grano fino con estratos ondulados
		BARREMIANO		
		HAUTERVIANO		
		VALANGINIANO		
	BERRIASIANO			
	TITONIANO			
JURÁSICO	TARDÍO	KIMMERIDGIANO	Fm. Pimienta	Calizas de color gris oscuro, calizas arcillosas y dolomías
		OXFORDIANO	Fm. Taman	Calizas negras intercaladas con lutitas negras
		CALLOVIANO		
	MEDIO	BATHONIANO	(A) Fm. Cahusas	(A) Secuencia de conglomerados, areniscas, con clastos de andesitas
		BAJOCIANO		
		ALENIANO	(B) Fm. Tenexcate	(B) Secuencia de conglomerados, areniscas, con clastos de riolitas
		TOARCIANO		
	TEMPRANO	PLIENSBACHIANO	Fm. Huayacocotla	Secuencia de areniscas grises, lutitas negras con amonites y limolitas
		SINEMURIANO		
		HETTANGIANO		
TRIÁSICO	TARDÍO	NORIANO	Complejos Miocénico Xucayucan y La Soledad	Secuencia metamórfica de metabasaltos, metasedimentos, diques metariolíticos.
		CARNIANO		
	MEDIO	LA DINIANO		
		ANISIANO		
PERMICO	TEMPRANO	SCYTRIANO	Complejo Metamórfico del Distrito Minero Aire Libre	Secuencia metamórfica de esquistos de clorita, moscovita y cuarzo sericiticos.
	TARDÍO			
CARBONIFERO	TARDÍO			
	TEMPRANO			

Figura 2.1 Columna estratigráfica regional del área del Macizo de Teziutlán (Segura et. al, 1990).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.1 GEOMORFOLOGÍA

La región se caracteriza por una morfología compleja, los rasgos del relieve son el resultado de la acción de los procesos geológicos exógenos (intemperismo), sobre las estructuras de origen endógeno (eventos volcánicos y movimientos tectónicos).

El rango altitudinal de la región estudiada varía de 1600 a 1880 msnm siendo el punto más alto el cerro Pico del Águila. Las secuencias volcánicas terciarias forman extensas mesetas que rellenaron paleorelieves formados en las rocas metamórficas. El relieve que predomina es el modelado por corrientes fluviales y por acumulaciones piroclásticas. El drenaje que se observa es de tipo dendrítico.

2.2 UNIDADES LITOLÓGICAS

La Figura 2.2 corresponde al plano geológico obtenido en este estudio donde se distinguen las distintas unidades de la secuencia metamórfica que aflora en el Distrito Minero Aire Libre.

2.2.1 ROCAS METAMÓRFICAS

Las rocas metamórficas del Distrito Minero Aire Libre, comprenden esencialmente una secuencia de esquistos pelíticos y lentes de esquistos básicos, afectados por metamorfismo regional. Estas rocas se dividen para este estudio tomando como base tres unidades las cuales son: esquistos de clorita, esquistos cuarzo-sericítico y esquistos de moscovita. Estas unidades afloran hacia el occidente y suroeste de la Planta Minera con una distribución aproximada de 2 km².

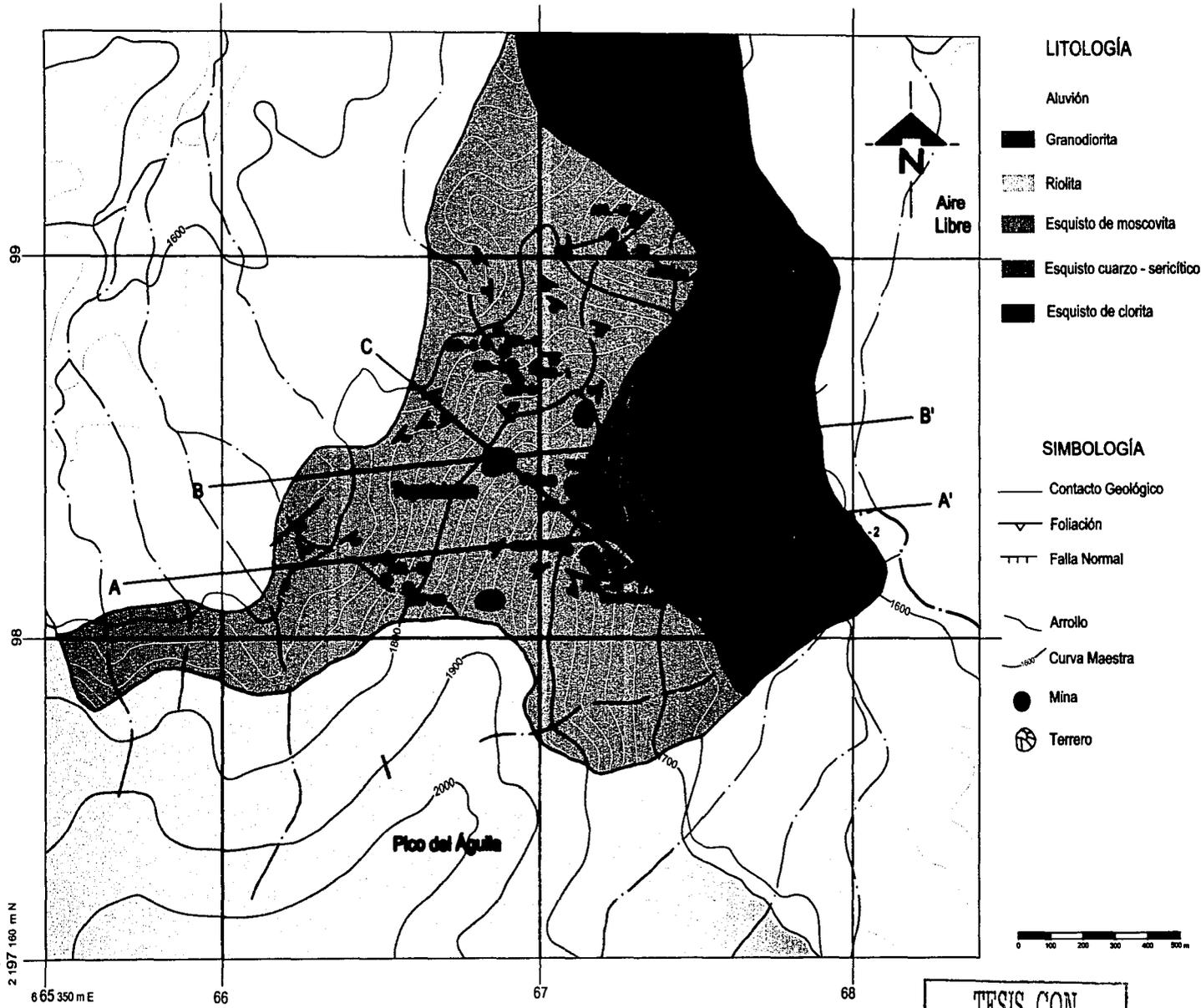


Figura 2.2. Mapa Geol3gico del Distrito Minero Aire Libre

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ESQUISTO DE CLORITA

El esquistos de clorita presenta color pardo a la intemperie y tonos de verde claro a verde intenso al fresco. Presentan textura foliada y son observables minerales de cuarzo anhedral, micas y pirita diseminada. Representan más del 35% de la litología de la unidad que aflora, abarcando un área de aproximadamente 700 m².

Esta unidad aflora en la cercanía de la Planta Minera y sobre el arroyo Jardín II, donde aparecen vetas de cuarzo en forma de lentes o en los planos de foliación formando segregaciones, con espesores aproximados de 5 cm, algunos boudines de cuarzo llegan a tamaños promedios de 20 cm como se muestra en la Figura 2.3.

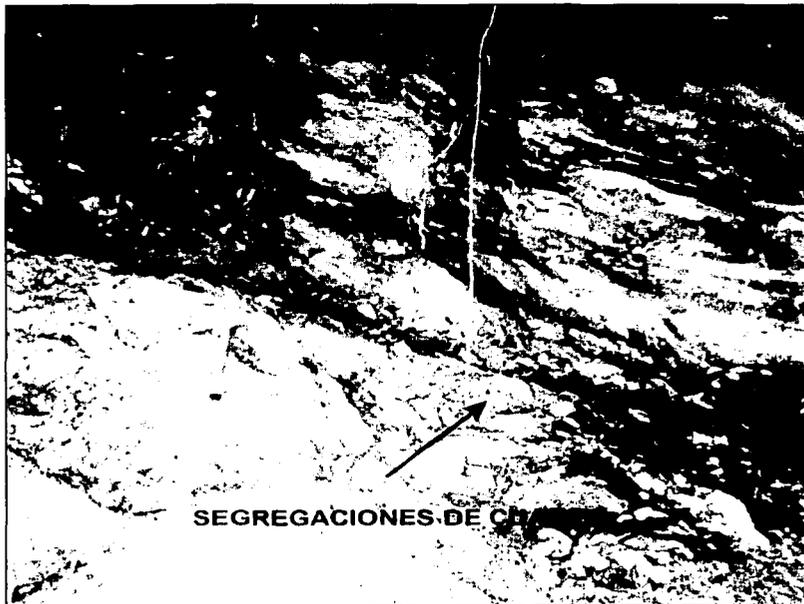


Figura 2.3. Esquistos de clorita con segregaciones de cuarzo en el arroyo Jardín II

En muestra de mano se observa un microplegamiento de la esquistosidad original, que ha producido crenulación. Esta roca corresponde a la parte del bajo del socavón conocido localmente como Venus (Figura 2.4).



Figura 2.4. Fotografía de la muestra de mano del esquistos de clorita.

ESQUISTO CUARZO - SERICÍTICO

Las rocas que forman esta unidad presentan color verde y tonalidades rojizas a la intemperie como se aprecia en la Figura 2.5 y verde claro al fresco, textura foliada y composición mineral de cuarzo, feldespato y sulfuros diseminados. El esquistos cuarzo - sericítico aflora en un área de aproximadamente 200 m² que representan más del 10 % de la litología superficial de la unidad.

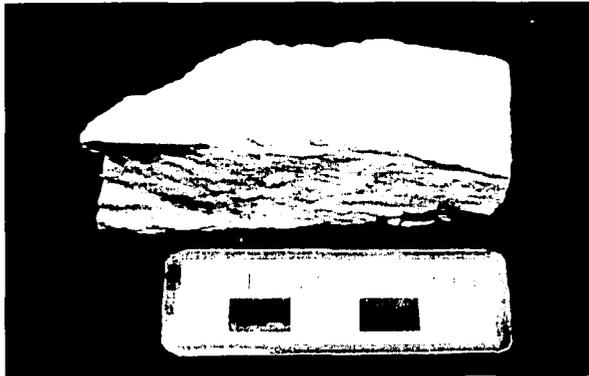
En muestra de mano esta roca presenta cuarzo, bornita y pirita diseminada como se observa en la Figura 2.6.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Figura 2.5 Esquisto cuarzo sericitico con sulfuros diseminados ubicada en el socavón Venus.

Esta roca corresponde a la roca encajonante de la parte del alto del socavón Venus.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 2.6. Fotografía de la muestra de mano del esquisto de cuarzo sericitico.

ESQUISTO DE MOSCOVITA

Esta unidad presenta color verde a pardo a la intemperie y verde al fresco (Figura 2.7). Su mineralogía se compone principalmente por mica, feldespato y cuarzo. Las rocas presentan una textura foliada y afloran en un área aproximada de 1200 m² que representan más del 60 % de la litología de la unidad.

Estas rocas afloran hacia el noroeste y suroeste del poblado de Tepetzintan. Se encuentran en contacto con rocas ígneas extrusivas de composición riolítica, las cuales yacen discordantemente sobre las rocas metamórficas del basamento.



Figura 2.7 Esquisto de moscovita.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Estos esquistos de moscovita han sido intrusionados por cuerpos ígneos de composición granodiorítica.

Las unidades de rocas mencionadas anteriormente forman parte de una secuencia vulcanosedimentaria afectada por metamorfismo regional de bajo grado.

2.2.2 ROCAS ÍGNEAS

La zona de estudio esta rodeada por extensos afloramientos de rocas ígneas, en su mayoría de origen extrusivo. Estas rocas corresponden a la Faja Volcánica Transmexicana.

Las rocas ígneas que afloran en el Distrito Minero Aire Libre se describen a continuación.

RIOLITA

Esta roca corresponde a una serie de derrames de composición intermedia, localizados principalmente en la periferia suroeste de la Planta Minera y en el cerro Pico de Águila.

La riolita presenta una amplia gama de colores y tonos en la matriz, siendo el más común el pardo rosado. La roca es casi completamente vítrea y la parte vesicular está hematizada. Esta roca presenta una textura fluidal. Los fragmentos líticos observables son de la misma composición riolítica.

Yañez-García, 1982, cita que estos derrames son considerados eventos del Plioceno Superior – Pleistoceno Inferior.

GRANODIORITA

La granodiorita presenta un color gris claro, es compacta porfídica con fenocristales incluidos de feldespato, cuarzo y minerales máficos. También se aprecian escasos cristales de magnetita y hematita. Estos cuerpos intrusivos se encuentran emplazados en diques y troncos dentro la unidad metamórfica de los esquistos de moscovita, y algunos diques en el esquistos cuarzo sericítico (Chavelas Lluck, et. al., 1991).

2.3 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Se han reportado dos eventos que afectaron a la zona siendo el primero uno de tipo compresivo que originó fallas inversas con orientación N – NE y buzamiento al SE de edad laramídica (Castro Mora, 1993). Este evento provoca plegamiento NW – SE en la unidad metamórfica.

El segundo evento correspondió al Oligoceno provocando esfuerzos de tipo tensional dando origen a fallamiento normal con orientación E – W (Viniegra, 1966), siendo este tipo de estructuras las que afectaron en su mayor parte al cuerpo mineral.

La secuencia litológica de la zona de estudio está dominada por la unidad metamórfica y por los emplazamientos ígneos intrusivos y extrusivos. Mientras que las riolitas y tobas dominan la parte sur, la unidad metamórfica aflora al centro norte del Distrito Minero Aire Libre y es en este donde se encuentra toda la mineralización. Por otra parte los cuerpos intrusivos esencialmente en forma de diques granodioríticos se encuentran afectando al cuerpo metamórfico. La construcción de las secciones geológicas que se presentan en las Figuras 2.8 y 2.9 se realizó para ilustrar la forma en que se encuentran dispuestas las tres subunidades metamórficas.

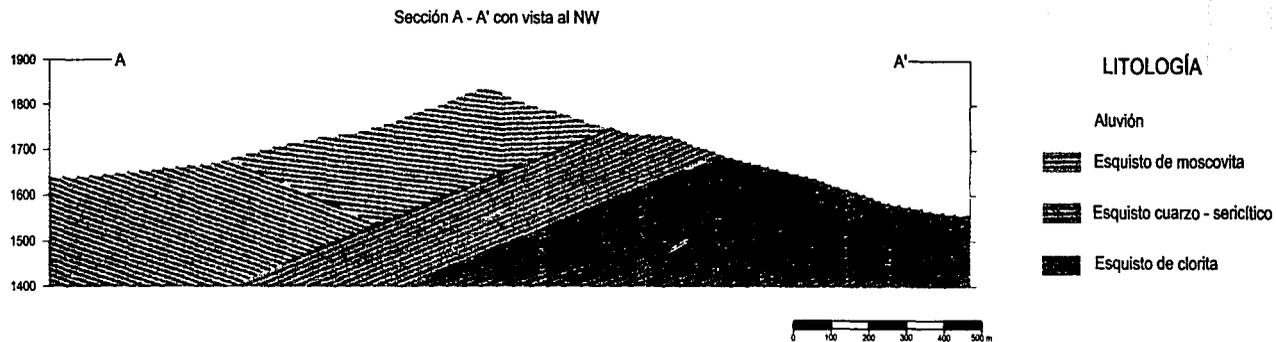


Figura 2.8. Secci3n geol3gica A - A'. Unidades metam3rficas de la secuencia litoestratigr3fica del Distrito Minero Aire Libre.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

hr6

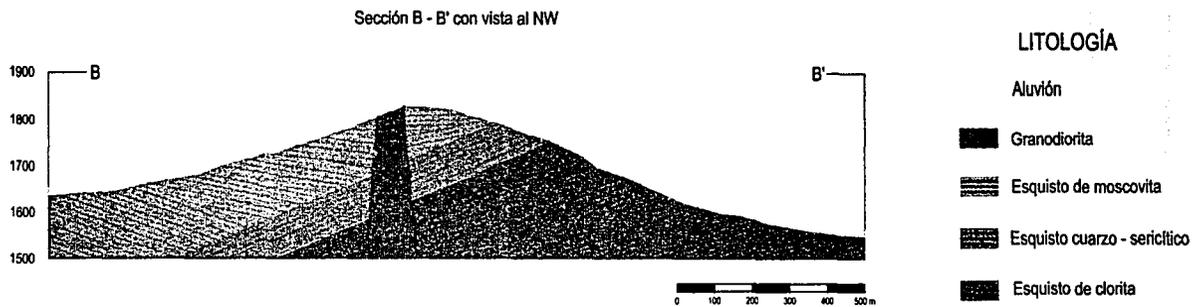


Figura 2.9. Sección geológica B - B'. Muestra las tres unidades metamórficas y uno de los cuerpos intrusivos que cortan a la secuencia litoestratigráfica del Distrito Minero Aire Libre.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

El esquistos de clorita aflora el este de la mina La Aurora en la parte baja del cerro Pico del Águila presenta una foliación preferencial con rumbo NW – SE y buzamiento al SW en su parte sur, y con rumbo NE – SW y buzamiento al NW en su parte norte, presentándose en ambos casos un buzamiento general hacia el W (Figura 2.10).

El esquistos cuarzo – sericítico aflora en la parte central del Distrito Minero, y su foliación presenta una orientación preferencial de N - S buzando hacia el W como se aprecia en la Figura 2.11.

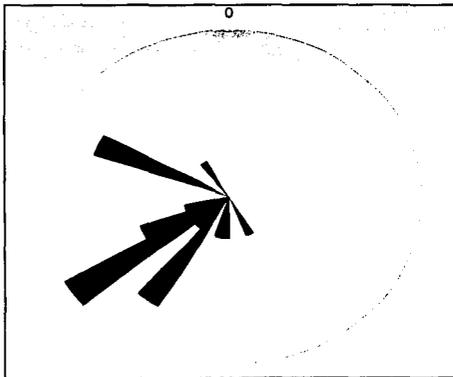


Figura 2.10. Diagrama estereográfico que muestra las direcciones preferenciales del buzamiento de la foliación del esquistos de clorita.

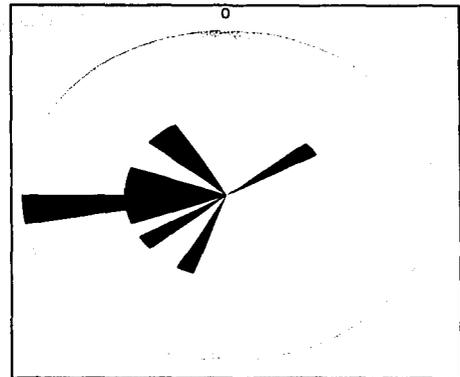


Figura 2.11. Diagrama estereográfico que muestra las direcciones preferenciales del buzamiento de la foliación del esquistos cuarzo – sericítico.

La tercera unidad metamórfica que corresponde con el esquistos de moscovita que aflora en la mayor parte de la secuencia metamórfica y domina la parte oeste del Distrito Minero. Este paquete es el que más se encuentra afectado por los cuerpos intrusivos granodioríticos. Sus orientaciones preferenciales de foliación son más variadas; al norte con orientación NW - SE con buzamiento al SW, mientras que al

sur contrario a la parte norte se orientan en dirección SW - NE buzando al SE aunque se llegan a presentar también en las demás direcciones como se aprecia en la Figura 2.12.

El total de los datos estructurales de foliación presentados en el diagrama estereográfico de la Figura 2.13 indican una orientación preferencial de la secuencia metamórfica en dirección NW - SE con buzamiento al SW.

Figura 2.12. Diagrama estereográfico que muestra las direcciones del buzamiento de la foliación del esquistos de moscovita.

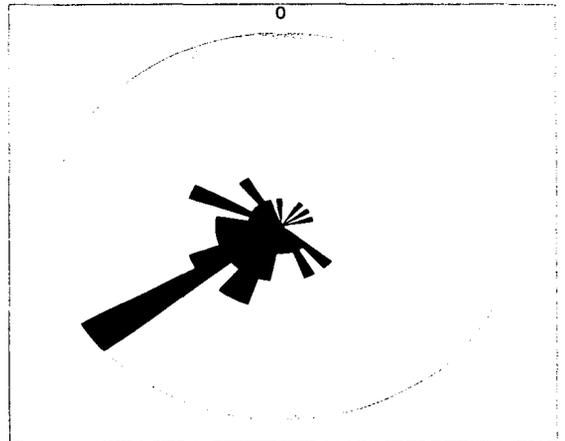
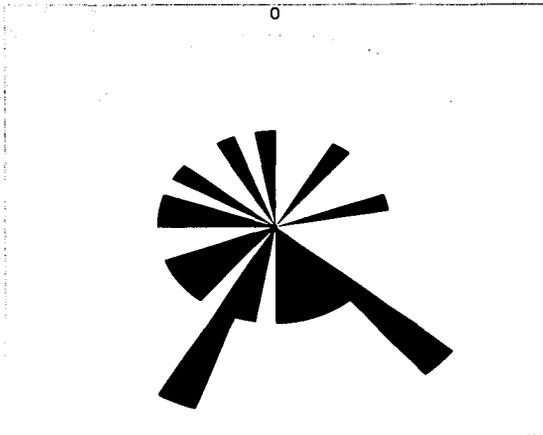


Figura 2.13. Diagrama estereográfico que muestra las direcciones preferenciales del buzamiento de la foliación de la unidad metamórfica del Distrito Minero de Aire Libre.



CAPÍTULO 3

PETROGRAFIA DE LA SECUENCIA LITOLÓGICA DE LA ZONA

Las condiciones metamórficas a las que fue sometida la zona, se han determinado en base al estudio de la mineralogía y las relaciones texturales observadas en secciones delgadas. Las secciones delgadas analizadas con microscopio petrográfico presentan semejanza en la mineralogía, variando sólo en proporción de fases minerales y su arreglo textural.

La unidad metamórfica o complejo basal del Distrito Minero Aire Libre está compuesta principalmente por **esquistos de moscovita**, **esquistos de clorita** y en menor cantidad por **esquistos cuarzo - sericíticos** y presencia de lentes de esquistos de composición básica. Los primeros representan más del 60 % de la litología de la unidad.

En la Figura 3.1 se señala la ubicación de las muestras recolectadas en campo.

3.1 ESQUISTO DE MOSCOVITA

Estas rocas se observan intensamente deformadas, están compuestas esencialmente de moscovita con algunos porfidoblastos de cuarzo.

La foliación tiende a adaptarse en torno a los porfidoblastos, lo que indica una deformación posterior a su crecimiento.

La foliación es muy acentuada gracias a la disposición paralela (o casi) de los cristales de moscovita, además se observa una diferenciación metamórfica

evidenciada por láminas de sectores paralelos a la foliación, unos son más ricos en cuarzo y otros en micas. Como mineral accesorio se presenta pirita.

Los esquistos de moscovita desarrollan textura milonítica. Los granos de cuarzo, de mayor tamaño presentan bordes saturados y extinción ondulante atestiguando una fragmentación seguida de una recristalización sintectónica.

En este paquete de roca, las micas se orientan preferentemente y resultan alineadas perpendicularmente a la dirección de máxima compresión.

A continuación se presenta el estudio petrográfico de las muestras más representativas de la unidad.

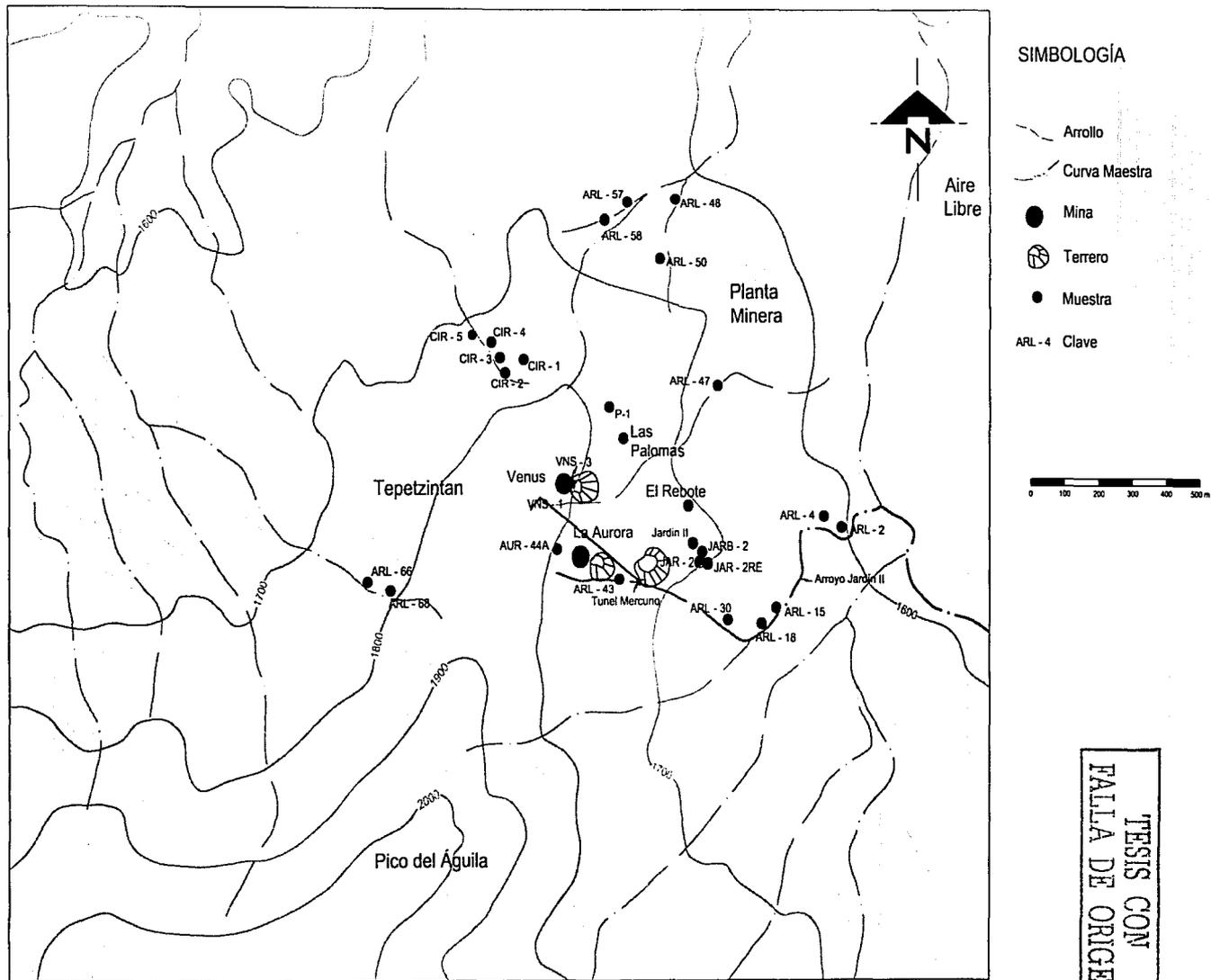


Figura 3.1. Ubicación de muestras

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Clave de la muestra: ARL- 43

Esquisto de moscovita

1. Descripción Megascópica

Roca de color pardo amarillento oxidada de textura foliada constituida por moscovita, cuarzo anhedral y sulfuros diseminados.

2. Descripción Microscópica

Esta roca tiene una foliación muy marcada debido a la orientación de láminas de mica (moscovita). Los minerales dominantes son moscovita, cuarzo, feldespato potásico y clorita que desarrollan textura milonítica. Presencia de porfidoblastos, policristalinos de cuarzo.

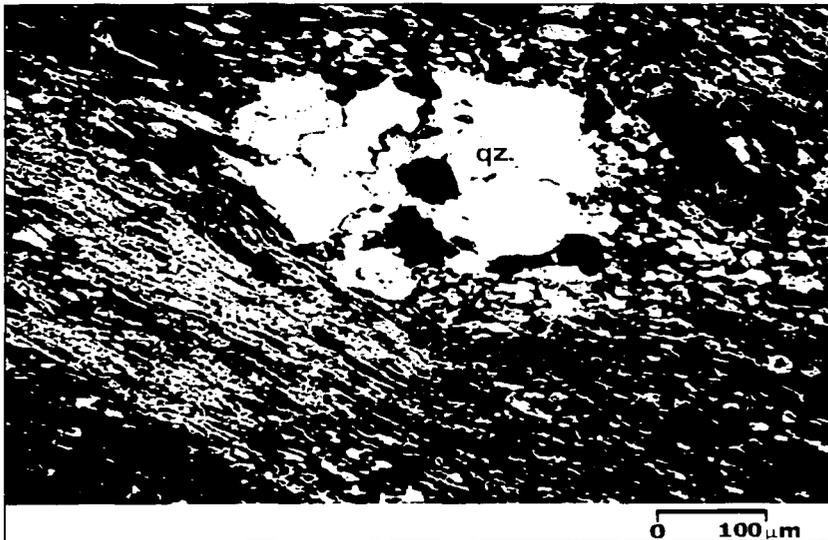


Figura 3.2. Fotomicrografía de un esquisto de moscovita con cuarzo fracturado con extinción ondulante.

Clave de la muestra: ARL- 50**Esquisto de moscovita****1. Descripción Megascópica.**

Roca foliada de color pardo, con moscovita y abundantes segregaciones de cuarzo.

2. Descripción Microscópica.

Roca de textura lepidoblástica, los colores brillantes de birrefringencia de esta roca se deben, esencialmente, a la alta proporción de moscovita.

Al parecer hay un microplegamiento de la esquistosidad original, según la cual los minerales estaban alineados, ha producido una crenulación.

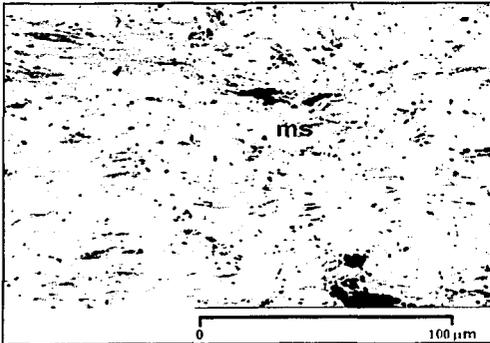


Figura 3.3. Fotomicrografía sin analizador muestra una roca constituida por moscovita, clorita, cuarzo

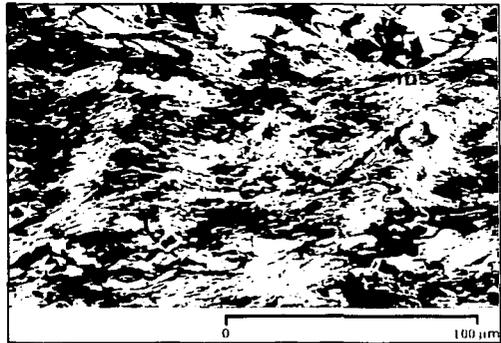


Figura 3.4. Fotomicrografía con nicoles cruzados. La roca desarrolla textura de crenulación.

Clave de la muestra: ARL - 57

Esquisto de moscovita

1. Descripción Megascópica

Roca de color pardo amarillento de textura foliada constituida por moscovita y cuarzo anhedral.

2. Descripción Microscópica

Esta roca desarrolla textura milonítica, presenta un mosaico mineral constituido por moscovita, feldespato potásico y cuarzo este último con extinción ondulante. Se distinguen sectores paralelos a la foliación, unos son más ricos en micas y otros en cuarzo.

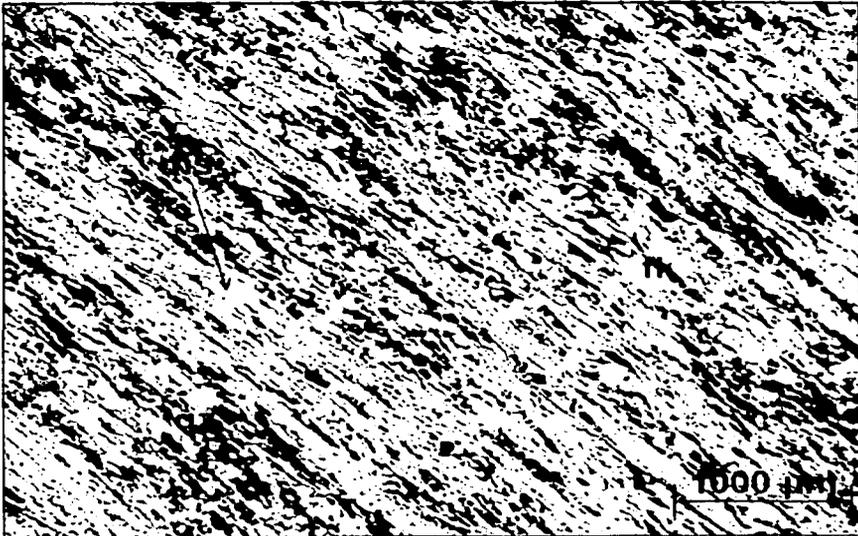


Figura 3.5. Fotomicrografía de un esquisto de moscovita.

Clave de la muestra: ARL - 66

Esquisto de moscovita

1. Descripción Megascópica

Roca de color pardo amarillento de textura foliada constituida por moscovita, cuarzo anhedral y biotita.

2. Descripción Microscópica

Esta roca tiene una foliación muy marcada debido a la alineación de láminas de mica (moscovita y biotita). Los minerales dominantes son moscovita, cuarzo, plagioclasas y biotita alterada a clorita. Esta roca desarrolla textura milonítica.

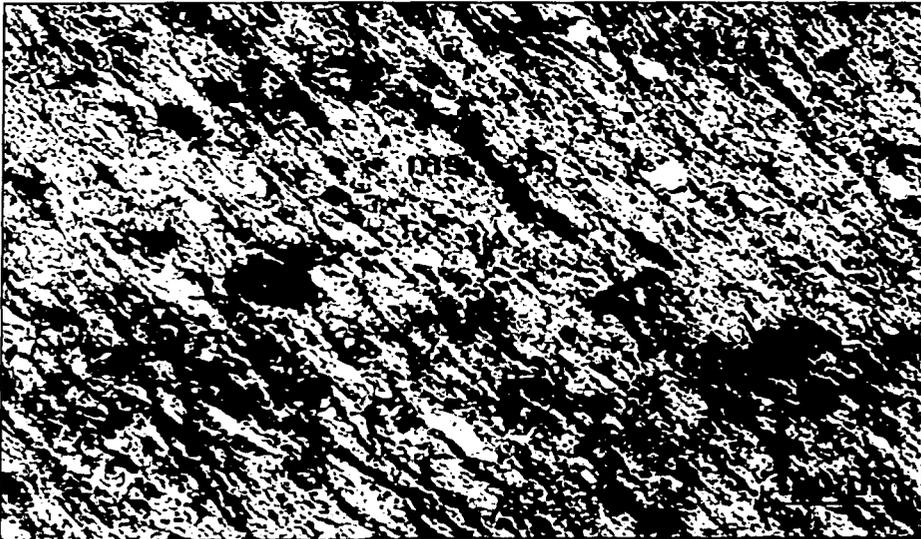


Figura 3.6. Fotomicrografía de un esquisto de moscovita con cuarzo fracturado.

Clave de la muestra: CIR - 5

Esquisto de moscovita

1. Descripción Megascópica.

Roca color verde - amarillento, constituida por cristales de cuarzo anhedral intercrecidos con micas, de textura foliada. No hay presencia de minerales opacos en esta roca.

2. Descripción Microscópica.

Roca constituida por un mosaico de moscovita con porfidoblastos de cuarzo, desarrolla textura milonítica, los colores brillantes de birrefringencia se deben, esencialmente, a la alta proporción de moscovita.



Figura 3.7. Fotomicrografía sin analizador. Roca constituida por moscovita, clorita, cuarzo.

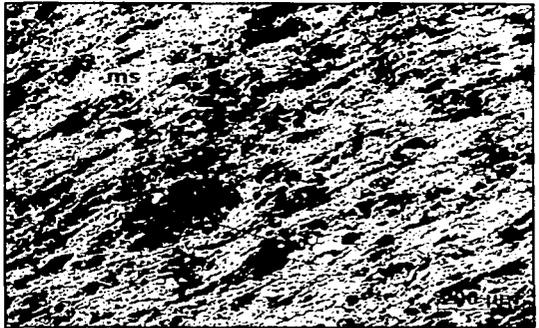


Figura 3.8. Fotomicrografía con nicols cruzados. Porfidoblastos de cuarzo con extinción ondulante.

3.2 ESQUISTO DE CLORITA

La mayoría de estas rocas forman agregados microcristalinos de clorita con moscovita.

Los minerales incoloros presentes en esta roca son el cuarzo y la albita en parte sericitizada. Las plagioclasas presentan un maclado no muy visible debido a que la roca es criptocristalina. Como minerales accesorios se encuentra la pirita con forma ehedral, de sección cuadrada que corta a la foliación.

Estas rocas presentan textura milonítica y lepidoblástica. Se observa el desarrollo de crenulaciones las cuales está acompañada con frecuencia, por una segregación mineral intensa concentrándose el cuarzo en las charnelas de los micropliegues y los filosilicatos en sus flancos (Yardley, 1990).

Sin embargo dentro de esta misma unidad metamórfica hay lentes de esquistos de clorita con presencia de epidota y actinolita que desarrollan textura nematoblástica.

Las siguientes rocas son las más representativas de esta unidad; dentro de este paquete se localiza la roca encajonante correspondiente al bajo (VNS-3) del socavón Venus.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Clave de la muestra: VNS - 3

Esquisto de clorita

1. Descripción Megascópica

Roca de color verde con tonalidades ocreas causadas por oxihidróxidos de Fe (lepidocrocita) de textura foliada constituida por moscovita, cuarzo anhedral y pirita.

2. Descripción Microscópica

Roca presenta un mosaico clorita, cuarzo, moscovita y biotita, alterada a clorita. Esta roca desarrolla textura milonítica y segregaciones de cuarzo, los minerales de alta birrefringencia corresponden a escamas de sericita diseminada.

Estas secciones fueron cortadas paralelas a los planos de foliación.

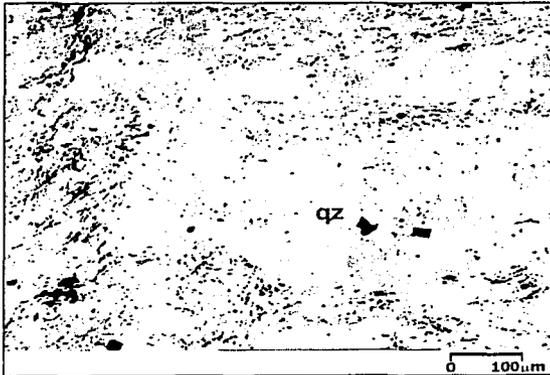


Figura 3.9. Fotomicrografía sin analizador. Roca constituida por clorita, cuarzo, moscovita y biotita.

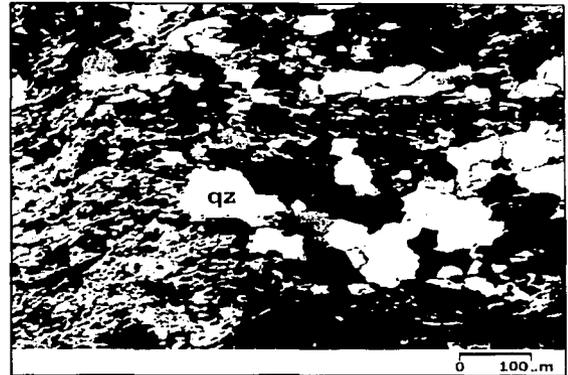


Figura 3.10. Fotomicrografía con nicols cruzados. Escamas de sericita diseminada.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Clave de la muestra: VNS - 3

Esquisto de clorita

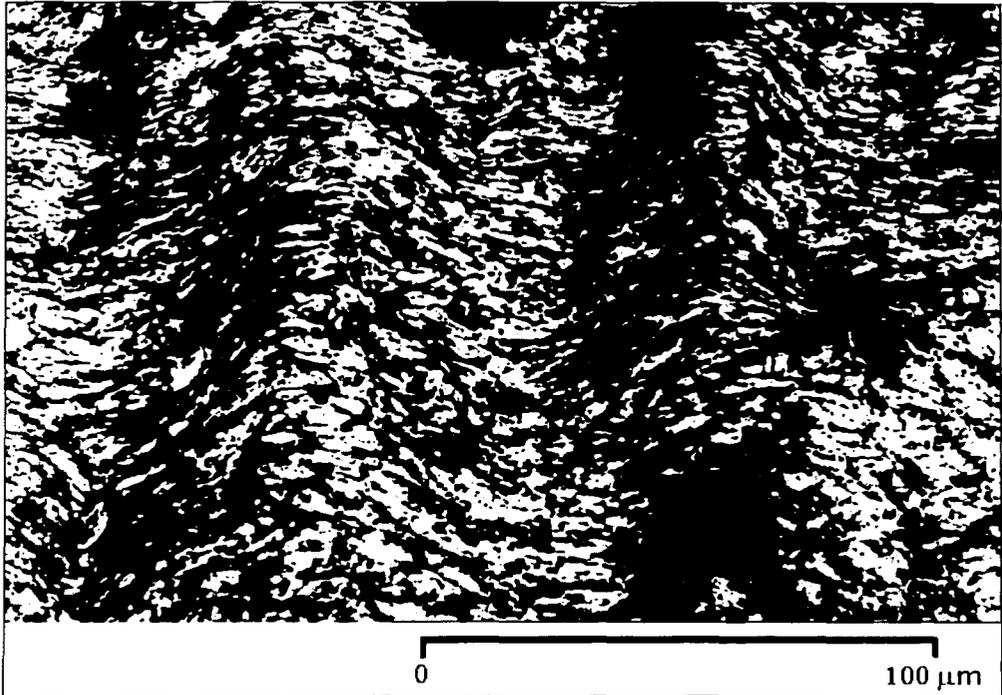


Figura 3.11. Fotomicrografía de sección perpendicular al plano de foliación, desarrollan textura de crenulación. Las foliaciones tectónicas están plegadas, frecuentemente, por foliaciones posteriores; hay formación de micropliegues o crenulaciones.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Clave de la muestra: JAR - 2

Esquisto de clorita

1. Descripción Megascópica

Roca de color verde con tonalidades ocreas causadas por oxihidróxidos de Fe (lepidocrocita) de textura foliada constituida por clorita, cuarzo anhedral y sulfuros diseminados.

2. Descripción Microscópica

Esta roca presenta un mosaico clorita, cuarzo y feldespato potásico, como minerales accesorios biotita y minerales opacos. Esta roca desarrolla textura lepidoblástica.

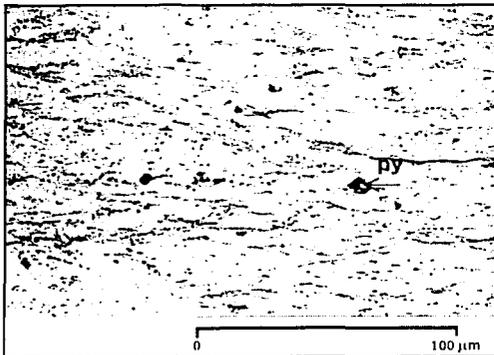


Figura 3.12. Fotomicrografía sin analizador. Roca constituida por clorita, cuarzo y minerales opacos (pirita).

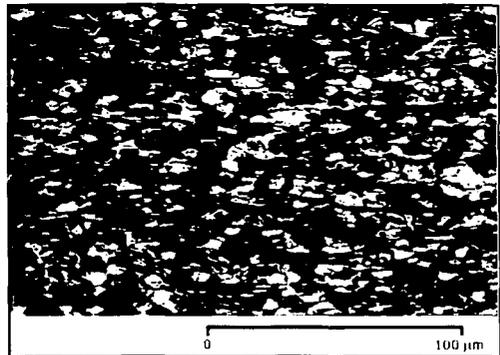


Figura 3.13. Fotomicrografía con nicoles cruzados. Escamas de clorita diseminada.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Clave de la muestra: JARB - 2

Esquisto de clorita

1. Descripción Megascópica

Roca de color verde con tonalidades ocre originados por oxihidróxidos de Fe (lepidocrocita) de textura foliada constituida por clorita, cuarzo anhedral.

2. Descripción Microscópica

Esta roca presenta un mosaico clorita, cuarzo y plagioclasa, como minerales accesorios biotita y minerales opacos. Esta roca desarrolla textura lepidoblástica.

La clorita es abundante y presenta bajos colores de birrefringencia.

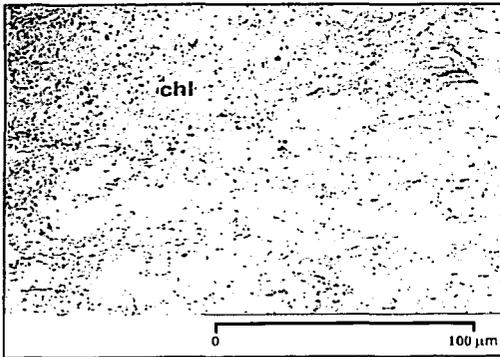


Figura 3.14. Fotomicrografía sin analizador. Roca constituida por clorita, cuarzo.

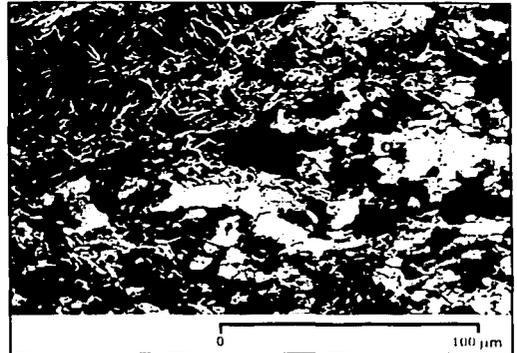


Figura 3.15. Fotomicrografía con nicoles cruzados. Escamas de clorita diseminada.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.3 ESQUISTO CUARZO - SERICÍTICO

Rocas formadas esencialmente por cuarzo en porfidoblastos, plagioclasa (andesina) finamente cristalizada, y escamas diseminadas de sericita y clorita como minerales principales. Como minerales accesorios biotita y piritita.

El cuarzo es frecuente en la matriz; estas rocas desarrollan textura porfidoblástica.

Esta unidad corresponde con la roca encajonante al alto de los cuerpos mineralizados Aurora (AUR – 44A) y del socavón Venus (VNS – 1).

A continuación se presenta el estudio petrográfico de las muestras más representativas del esquisto cuarzo-sericítico.

Clave de la muestra: VNS - 1**Esquisto cuarzo - sericítico****1. Descripción Megascópica**

Roca de color verde claro de textura foliada constituida por vetas de cuarzo anhedral con minerales opacos como pirita y bornita.

2. Descripción Microscópica

Esta roca presenta un mosaico cuarzo, andesina y escamas de sericita diseminadas, como minerales accesorios biotita y cristales euhedrales a subhedrales de pirita diseminados. Esta roca desarrolla textura milonítica.

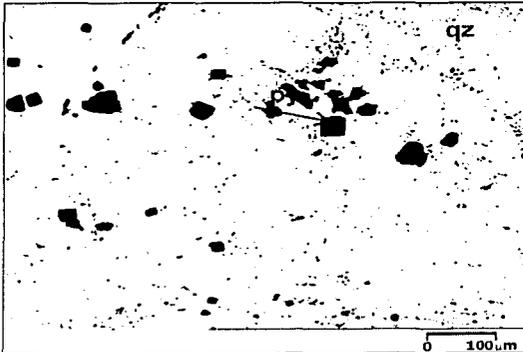


Figura 3.16. Fotomicrografía sin analizador. Roca constituida por cuarzo y cristales de pirita diseminados.

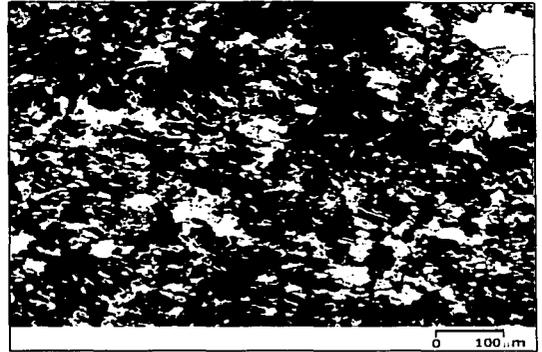


Figura 3.17. Fotomicrografía con nicoles cruzados. Escamas de sericita diseminada.

TESIS CON
FALLA DE ...

Clave de la muestra: AUR - 44A

Esquisto cuarzo - sericítico

1. Descripción Megascópica

Roca de color verde con tonalidades ocres originados por oxihidróxidos de Fe (lepidocrocita) de textura foliada constituida por cuarzo anhedral, clorita y sulfuros diseminados.

2. Descripción Microscópica

Esta roca presenta un mosaico de minerales criptocristalinos como vetillas de cuarzo, andesina, moscovita y escamas de sericita diseminadas. Desarrollando textura milonítica. Como minerales accesorios pirlita y magnetita

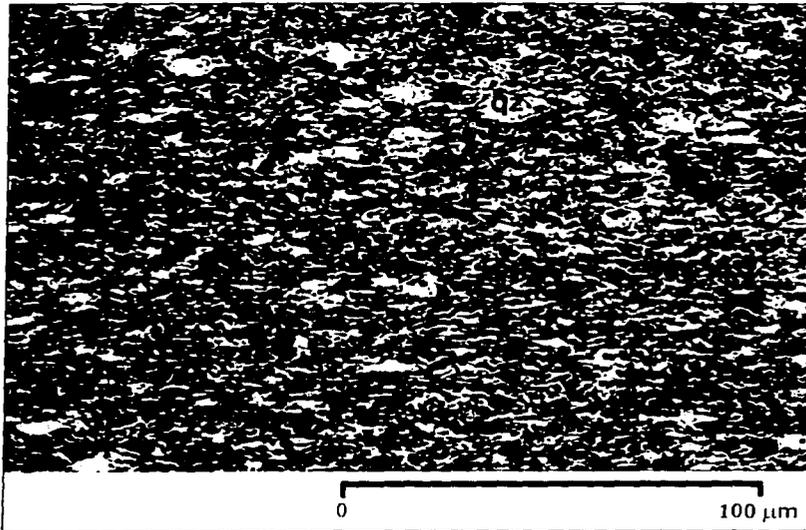


Figura 3.18. Fotomicrografía de un esquisto cuarzo – sericítico.

Clave de la muestra: CIR - 1

Esquisto cuarzo - sericítico

1. Descripción Megascópica

Roca de color verde de textura foliada constituida por clorita y fenocristales de cuarzo anhedral.

2. Descripción Microscópica

Esta roca presenta un mosaico de cuarzo con extinción ondulante, andesina, moscovita, clorita y escamas de sericita diseminadas. Desarrollando textura milonítica.

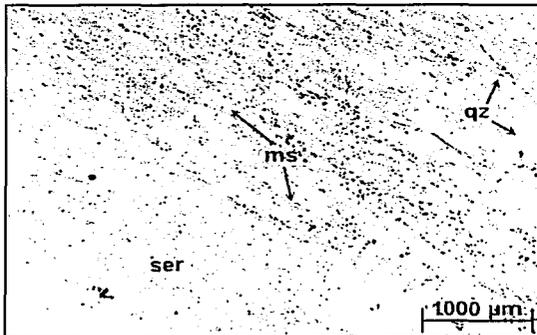


Figura 3.19. Fotomicrografía sin analizador.
Esquisto cuarzo – sericítico.

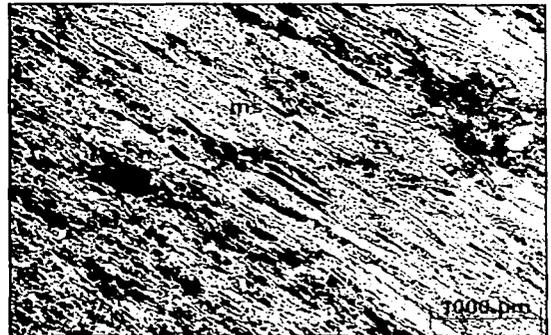


Figura 3.20. Fotomicrografía con nicoles cruzados. Escamas de sericita diseminada con horizontes de moscovita y porfidoblastos de cuarzo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Clave de la muestra: P - 1**Esquisto cuarzo - sericítico****1. Descripción Megascópica**

Roca de color verde - amarillento de textura foliada constituida por clorita y fenocristales de cuarzo anhedral.

2. Descripción Microscópica

Esta roca presenta un mosaico de cuarzo con extinción ondulante, plagioclasa andesina, moscovita, clorita y escamas de sericita diseminadas. Desarrollando textura milonítica. La clorita, incolora, es abundante y presenta bajos colores de birrefringencia.

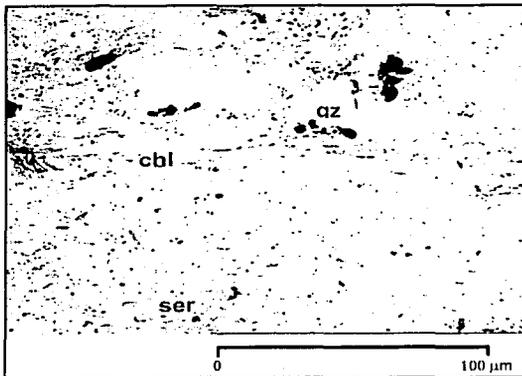


Figura 3.21. Fotomicrografía sin analizador. Esquisto cuarzo - sericítico.

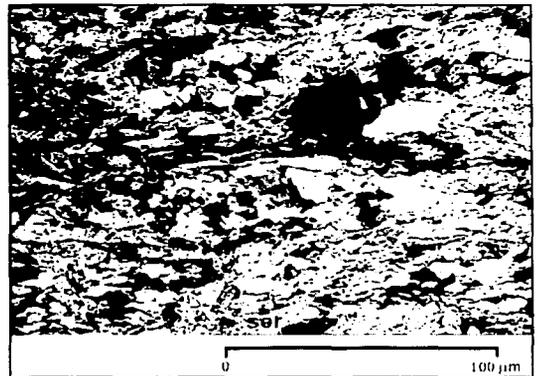


Figura 3.22. Fotomicrografía con nicoles cruzados. Escamas de sericita diseminada con cuarzo y horizontes de moscovita.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Las anteriores características petrológicas sugieren que estas rocas están afectadas por un metamorfismo regional de facies de esquistos verdes, en la zona de la clorita.

En el anexo se presenta el complemento del estudio petrográfico de los tres paquetes metamórficos que conforman a la secuencia litoestratigráfica.

3. 4 METAMORFISMO DE LA SECUENCIA PELÍTICA.

La mayoría de las rocas que constituyen a la zona de estudio esta conformada por esquistos de moscovita, por lo cual se utilizo el diagrama AFM para mostrar las asociaciones minerales en rocas pelíticas de acuerdo a la composición química.

La composición química de las rocas pelíticas se puede representar en un sistema de 6 componentes: $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO} - \text{FeO} - \text{K}_2\text{O} - \text{H}_2\text{O}$ (sistema **KFMASH**, Spear, 1995). Para este trabajo se utilizó el subsistema $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO} - \text{FeO} - \text{K}_2\text{O}$.

El diagrama AFM tuvo el propósito de estimar las condiciones metamórficas a partir de los minerales coexistentes.

Las formulas utilizadas para el cálculo de la posición de los minerales en el diagrama AFM fueron las siguientes:

$$A = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3 - 3\text{K}_2\text{O}}{\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{K}_2\text{O} + \text{MgO} + \text{FeO}}$$

$$M = \frac{\text{MgO}}{\text{MgO} + \text{FeO}}$$

$$F = \text{FeO}$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Las muestras de esquistó que se caracterizaron para este estudio fueron VNS – 1, JAR – 2RE, AUR – 44A.

La Tabla 3.1 muestra los resultados obtenidos del cálculo de los componentes de las muestras mencionadas anteriormente. Este cálculo se llevó a cabo utilizando el análisis de los elementos mayores (Tabla 1 Anexo).

Muestra	A	M	F
VNS – 1	-1.18	0.93	0.01
JAR – 2RE	0.18	0.71	0.06
AUR – 44	-0.07	0.78	0.04

Tabla 3.1 Valores de Al, Mg y Fe para rocas de composición química pelítica.

La Figura 3.23 ilustra la traza de los minerales que corresponden a la zona de la clorita. Los resultados obtenidos en el análisis por Fluorescencia de Rayos X de las muestras indican un contenido en Al de medio a alto.

Uno de los propósitos del diagrama AFM es ilustrar los efectos de las sustituciones Fe – Mg en los minerales componentes de las pelitas.

Numerosos estudios de metamorfismo de rocas pelíticas muestran el orden decreciente del Fe/Mg en minerales metamórficos como sigue:

Alto Fe / Mg → Bajo Fe / Mg
 Granate > Estaurolita ≥ Cloritoide > Biotita ≥ Clorita > Cordierita > Talco

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

El metamorfismo del Distrito Minero Aire Libre, corresponde a un metamorfismo de bajo grado, en facies de esquistos verdes, compuesto principalmente por **clorita + feldespato potásico + moscovita** con temperaturas alrededor de 300°C.

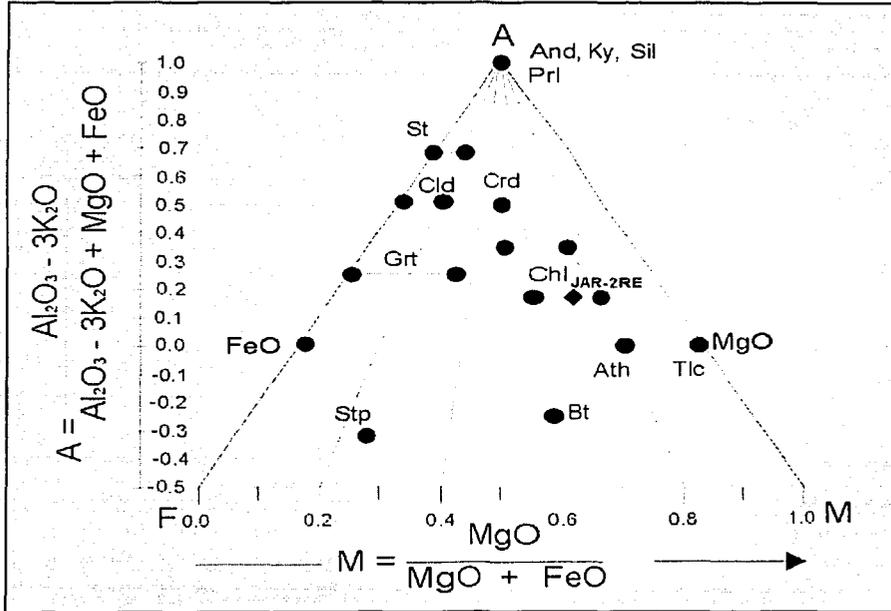


Figura 3.23. Diagrama AFM ilustra la posición de los minerales más comunes de esquistos pelíticos y representando el campo donde caen las muestras analizadas del Distrito Minero Aire Libre.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO 4

MINERAGRAFIA DE LOS CUERPOS DE SULFUROS AURORA Y VENUS

4.1 FORMA Y ESTRUCTURA DEL YACIMIENTO

En el yacimiento de sulfuros masivos de Aire Libre se reconocen varios cuerpos mineralizados con valores de cobre – zinc, encajonados en una secuencia vulcanosedimentaria metamorfoseada a facies de esquistos verdes.

El cuerpo mineralizado más importante en volumen y contenido mineral, conocido como Aurora, corresponde a un lente aproximadamente de 40 cm de espesor máximo, constituido por un mosaico de magnetita y cantidades menores de pirita diseminada.

El cuerpo Aurora se presenta en forma de lentes concordantes a los planos de foliación, con una orientación preferencial E - W (Castro Mora, 1993). La Figura 4.1, ilustra la forma y estructura del cuerpo mineralizado en el interior de la mina (Chavelas Lluck et. al, 1991).

El cuerpo mineralizado Venus se localiza en un pequeño socavón, el lente mineralizado tiene dimensiones de 15 cm de espesor (Figura 4.2), constituidos por un mosaico de esfalerita y calcopirita, y cantidades menores de galena, pirita y bornita.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Sección C - C' con vista al NE

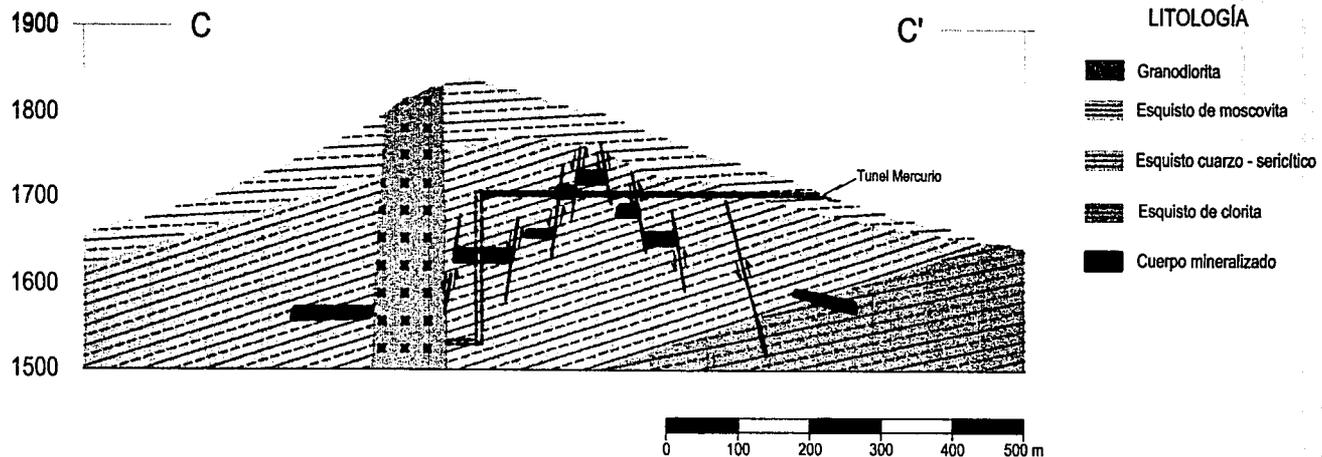


Figura 4.1. Sección esquemática transversal C - C' mostrando la litología y horizontes mineralizados del cuerpo Aurora (Modificado de Chavelas et. al., 1991).

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN



Figura 4.2. Fotografía del cuerpo mineralizado en el socavón Venus
(Cortesía Ing. José de Jesús Huezco)

4.2 MINERALOGÍA.

De acuerdo a la clasificación empleada por Sato en 1974 para los yacimientos del tipo sulfuros masivos vulcanosedimentarios, en el cuerpo mineralizado se puede apreciar dos tipos diferentes de mena: mena negra y mena amarilla, que se aplica al yacimiento de Aire Libre.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A continuación se describe detalladamente las menas del cuerpo mineralizado Venus, empleando la simbología de la Tabla 4.1.

4.2.1 MENA NEGRA

Esta asociación se caracteriza por presentar color gris oscuro, constituida esencialmente por esfalerita, galena y cantidades menores de pirita.

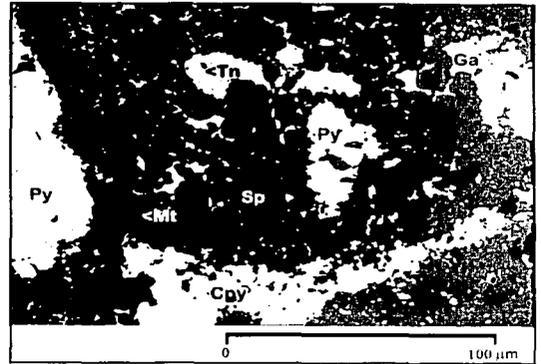
La mena presenta un mosaico de minerales en forma de Islas y Continentes formadas por esfalerita, galena, pirita, sulfosales de bismuto, calcopirita y minerales transparentes como barita y cuarzo anhedral. Los cristales de pirita son anhedrales cortados por calcopirita incluidos en un mar de esfalerita. Las sulfosales de bismuto se alojan en la galena. La Figura 4.3 muestra las fotomicrografías de los minerales opacos de la mena negra del cuerpo Venus.

MINERAL	SÍMBOLO
Galena	Ga
Esfalerita	Sp
Calcopirita	Cpy
Pirita	Py
Tetraedrita de Bismuto	Tn
Bornita	Bn
Covelita	Cv
Minerales Transparentes	Mt

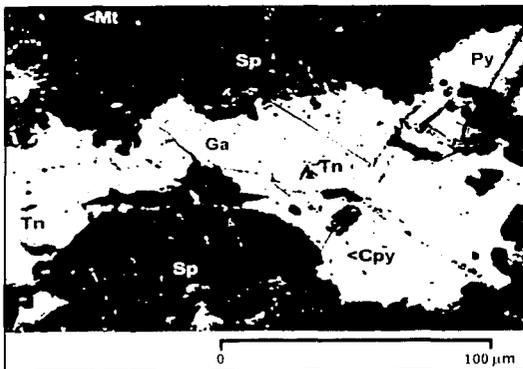
Tabla 4.1. Simbología de los minerales utilizados en este trabajo.



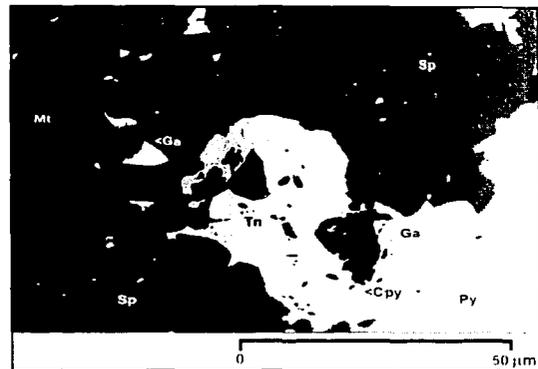
a



b



c



d

Figura 4.3. Fotografía (a), roca de color gris oscuro de textura de grano fino del cuerpo mineralizado Venus, constituida de esfalerita y galena. Fotomicrografía (b), textura de mares e islas, cristales de pirita anhidrales diseminados incluidos en un mar de esfalerita. Fotomicrografía (c), el mineral que se aprecia en el centro corresponde a un tetrahedrita de bismuto, se presenta como intercrecimientos mutuos con galena. Fotomicrografía (d), calcopirita en bordes y fracturas, las tetrahedritas de bismuto son rodeadas por galena, incluidas en un mar de esfalerita.

- **ANÁLISIS MINERAGRÁFICO**

MINERALOGÍA: Resumen del estudio minerográfico representativo para muestras de la mena negra del cuerpo mineralizado Venus.

MINERAL	CARACTERÍSTICAS
Esfalerita	Forma parte del mosaico mineral, no presenta reflexiones internas. Los cristales de esfalerita son mixtos asociados con el mineral transparente como inclusiones.
Galena	Son cristales anhedrales, mixtos con tetraedritas de bismuto, calcopirita y mineral transparente como inclusiones. La galena aparece reemplazando a las tetraedritas de bismuto. Presenta textura de golfos en los cuales se alojan las tetraedritas.
Pirita	Son cristales anhedrales diseminados con fases de mineral transparente, escasos cristales se encuentran como inclusiones amiboideas dentro de la esfalerita y en contacto con la galena.
Calcopirita	Mineral que se encuentra en vetillas y por lo general se presenta cortando a la pirita.
Tetraedrita de bismuto	Cristales anhedrales con intercrecimientos mutuos con galena.
Mineral transparente	Asociado a toda la fase mineral, rellenando fracturas o como inclusiones. Corresponde con cuarzo anedral y cristales subhedrales de barita*.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4.2.2 MENA AMARILLA

El nombre que se le ha dado a esta mena es por su color en muestra de mano, típicamente de color amarillo - gris y tornasolado. Esta asociación esta básicamente constituida por calcopirita, galena, bornita, covelita y cuarzo.

La mena presenta textura masiva con bandas de tendencia monomineral con predominio de calcopirita y con bornita en fracturas y/o superficie.

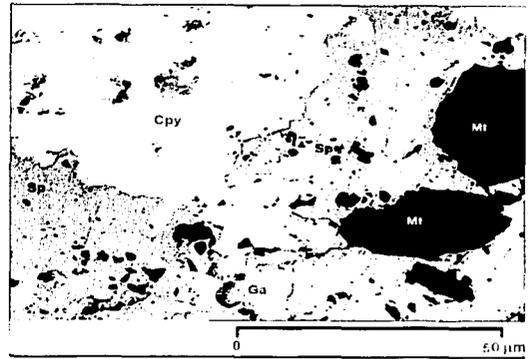
Se aprecia un importante evento de alteración supergénica evidenciado por bordes de reacción y diseminaciones de malaquita y vetillas de bornita que cortan al cuerpo mineral cerca de la superficie. Además se reconoce la presencia de oxihidróxidos de Fe (Lepidocrocita).

Esta mena desarrolla textura de mares e islas, y se puede apreciar un mosaico de calcopirita, esfalerita, galena, sulfosales de bismuto, pirita, bornita, covelita y minerales transparentes. Estos minerales se encuentran incluidos en un mar de calcopirita.

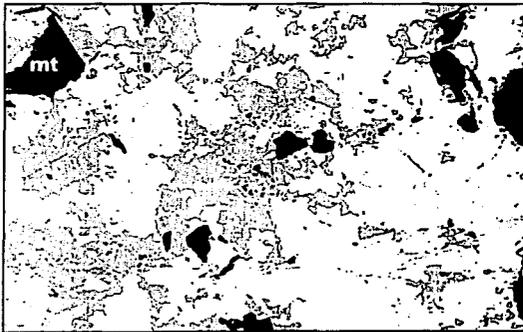
La Figura 4.4, muestra imágenes de los minerales opacos de la mena amarilla del cuerpo Venus.



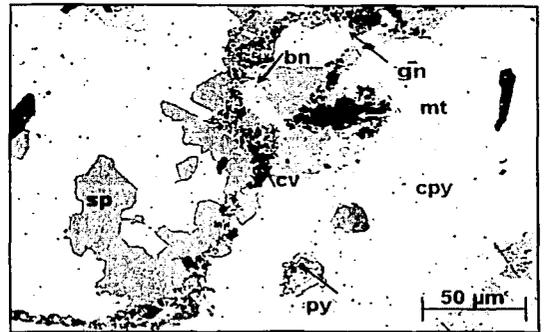
a



b



c



d

Figura 4.4. Fotografía (a), roca de color de color amarillo - gris y tornasolado de textura de grano fino del cuerpo mineralizado Venus, constituida de calcopirita y esfalerita. Fotomicrografía (b), textura de mares e islas, cristales de galena anhedrales diseminados incluidos en un mar de esfalerita. Fotomicrografía (c), calcopirita con inclusiones de escalerita, la cual presenta textura de golfos que incluyen a la galena. Fotomicrografía (d), minerales supergénicos de covelita y bornita en bordes difusos y agregados.

• ANÁLISIS MINERAGRÁFICO

MINERALOGÍA: Resumen del estudio minerográfico representativo para muestras de la mena amarilla del cuerpo mineralizado Venus.

MINERAL	CARACTERÍSTICAS
Calcopirita	Se presenta en cristales anhedrales, formando un mosaico asociado a la esfalerita. Presenta inclusiones de cristales anhedrales de pirita.
Pirita	Son escasos los cristales, se encuentran como inclusiones amiboideas y anhedrales, incluidos en la calcopirita.
Esfalerita	Forma parte del mosaico mineral asociado a la galena y al mineral transparente. También se presenta como inclusiones en calcopirita, presentando texturas de golfos con galena.
Galena	Cristales monofásicos y bifásicos con textura de golfos donde se aloja la tetraedrita de bismuto.
Tetraedrita de bismuto	Cristales anhedrales en contacto con la galena, desarrolla textura de caries.
Bornita	Se encuentra como mineral traza en bordes y fracturas esencialmente como agregados y diseminados.
Covelita	Bordes difusos y agregados diseminados asociado a la calcopirita.
Mineral transparente	Se presenta como inclusiones en cristales de esfalerita y corresponde al cuarzo anhedral y a la barita* asociado a toda la fase mineral.

*La barita fue reportada en el análisis de microscopio electrónico y del cual se presentan las imágenes SEM-BSE (Figuras 4.5, 4.6 y 4.7).

MICROSCOPIO ELECTRÓNICO

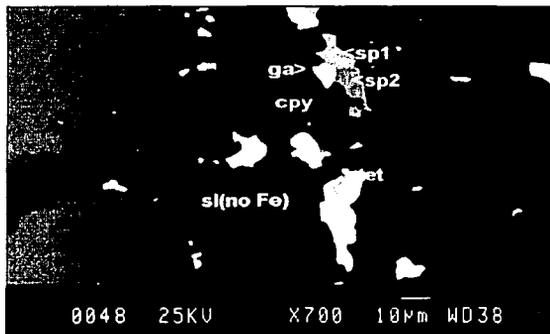
**Clave de la muestra: IG99-1B**

Figura 4.5. Imagen SEM – BSE. Cristales de Calcopirita (cpy), Galena (ga), Esfalerita (sp).

Roca perteneciente a la mena amarilla del Cuerpo Venus.

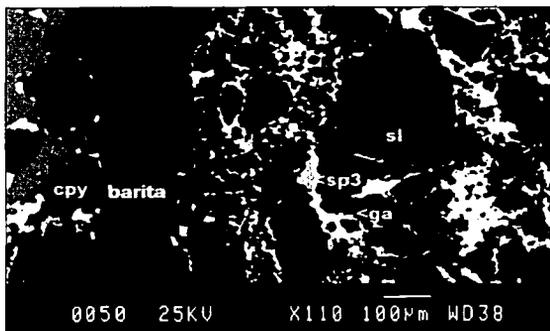
**Clave de la muestra: IG99-1D**

Figura 4.6. Imagen SEM - BSE. Cristales de Calcopirita (cpy), Galena (ga), Esfalerita (sp) y Barita (Ba).

Roca perteneciente a la mena amarilla del Cuerpo Venus.

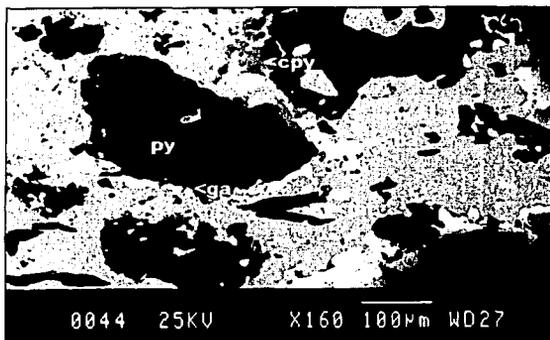
**Clave de la muestra: VNS2-B**

Figura 4.7. Imagen SEM - BSE. Cristales de Calcopirita (cpy), Galena (ga), Pirita (py), Barita (ba) y Tetraedrita-Tennantita (tet). Roca perteneciente a la mena negra del Cuerpo Venus.

A continuación se describe detalladamente el cuerpo mineralizado **Aurora**.

4.2.3 CUERPO DE MAGNETITA

Esta asociación se caracteriza por presentar color gris oscuro, constituida esencialmente por magnetita y cantidades menores de pirita.

El cuerpo presenta un mosaico de minerales en forma de Mares e Islas formadas por magnetita, pirita diseminada y minerales transparentes. La pirita se presenta como cristales euhedrales y anhedrales cortados por minerales transparentes incluidos en un mar de esfalerita. La Figura 4.8, muestra la fotomicrografía de los minerales opacos del cuerpo Aurora.

- **ANÁLISIS MINERAGRÁFICO**

MINERALOGÍA: Resumen del estudio minerográfico representativo del cuerpo de magnetita.

MINERAL	CARACTERÍSTICAS
Magnetita	Forma parte del mosaico mineral y corresponde al primer mineral de Fe que se formó, se presenta en cristales euhedrales y masivos en forma de mares, asociado con mineral transparente, presentando textura lamelar.
Goethita-Limonita	Se encuentra en los bordes asociados al mineral transparente, como producto de alteración de óxidos de Fe, es muy escaso y se presenta como agregados diseminados.

MINERAL	CARACTERÍSTICAS
Pirita	Cristales euhedrales y anhedrales. Los cristales bifásicos, presentan fases de minerales transparentes.
Minerales Transparentes	Cristales anhedrales de cuarzo asociado a todas las fases minerales presente.

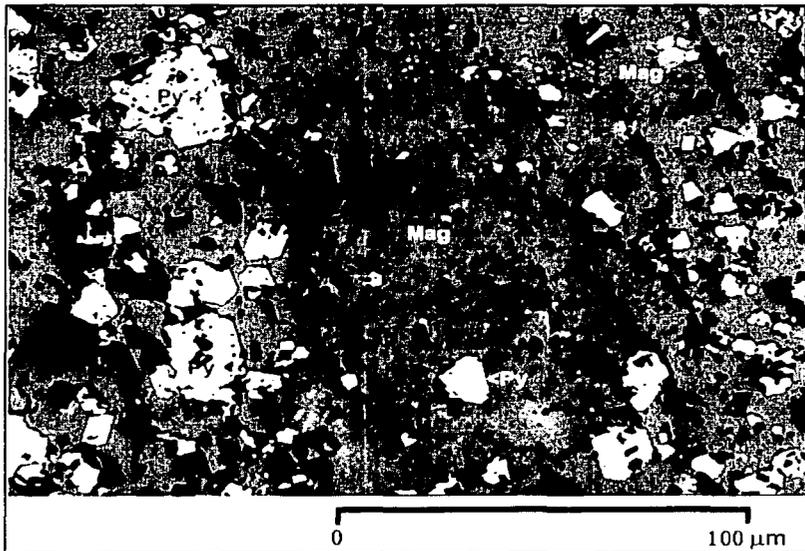


Figura 4.8. Fotomicrografía donde se observa un mosaico de magnetita, pirita diseminada y mineral transparente.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4.3 PARAGÉNESIS

De acuerdo a la información obtenida de las observaciones realizadas con microscopía de polarización de las asociaciones minerales de los cuerpos mineralizados del yacimiento vulcanosedimentario Aire Libre, se ha establecido la secuencia paragenética, considerando las texturas observadas de: mosaico de minerales, inclusiones de un mineral en otro y el relleno de fracturas.

Para la mena negra los resultados se presentan en la Tabla 4.2. La mineralización consta de 4 eventos diferentes, entre las que sobresalen dos etapas principales en las que se generan las menas más importantes de este depósito.

Mineral \ Fase	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4
Pirita	██████████	██████████		
Tetraedrita de Bismuto	██████████			
Galena		██████████		
Esfalerita		██████████	██████████	
Calcopirita			██████████	██████████
Minerales transparentes	██████████	██████████	██████████	██████████

Tabla 4.2. Cuadro paragenético para la mena negra del cuerpo Venus.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Para la mena amarilla, las evidencias texturales permiten identificar 4 eventos diferentes de mineralización. Los resultados se presentan en la Tabla 4.3.

Mineral \ Fase	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4
Pirita	—————			
Calcopirita		—————	—————	
Galena		—————	—————	
Esfalerita		—————	—————	
Tetraedrita de Bismuto			—————	
Bornita				—————
Covelita				—————
Minerales transparentes	—————	—————	—————	—————

Tabla 4.3. Cuadro paragenético para la mena amarilla del cuerpo Venus.

Mineral \ Fase	Fase 1	Fase 2	Fase 3
Magnetita	—————	—————	
Pirita		—————	
Goethita-Limonita			—————
Minerales Transparentes	—————	—————	—————

Tabla 4.4. Cuadro paragenético para el cuerpo de magnetita del cuerpo Aurora.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4.4 ANÁLISIS DE TETRAEDRITA-TENANTITA

De acuerdo a las observaciones en el microscopio mineragráfico, se seleccionaron cristales de tetraedrita – tenantita para su análisis cuantitativo mediante microsonda electrónica.

La tetraedrita ocurre en cristales de tan solo unos cuantos milímetros en intercrecimientos con galena en la mena negra, y con calcopirita en la mena amarilla.

Una generación más tardía de tetraedrita – tenantita aparece en forma de pequeños cristales menores a 0.1 mm.

En este estudio se obtuvieron los análisis cuantitativos, que se muestran en la Tabla 4.5.

ANÁLISIS	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ELEMENTO	wt %	wt %	wt %	wt %	wt %	wt %	wt %	wt %	wt %
S	20.943	18.419	25.408	25.234	22.770	23.166	23.384	24.921	24.958
Sb	6.378	4.655	6.375	7.080	8.681	8.748	9.985	7.208	7.161
As	4.605	2.248	11.198	10.256	4.414	4.396	4.802	9.618	10.306
Bi	15.079	12.754	8.731	9.371	19.552	18.662	16.209	9.956	9.566
Cu	28.883	17.051	38.382	37.922	34.731	35.026	35.788	37.789	38.396
Ag	0.119	0.242	0.000	0.084	0.258	0.336	0.266	0.038	0.025
Zn	7.829	5.446	8.814	8.668	8.735	8.532	8.872	8.669	8.737
Fe	0.903	0.486	0.888	0.928	0.553	0.507	0.587	0.780	0.992
Hg	0.106	0.052	0.071	0.184	0.000	0.151	0.093	0.149	0.018
Pb	14.431	42.117	0.176	0.107	0.124	0.044	0.140	0.000	0.076
TOTAL	99.276	103.470	100.043	99.834	99.818	99.568	100.126	99.128	100.235

Tabla 4.5. Resultado del análisis.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En base a estos datos se obtuvieron las fórmulas de las sulfosales que se presentan en la Tabla 4.6, y que corresponden a la **Serie de Tetraedrita - Tenantita**.

ANÁLISIS	FÓRMULAS
1	(Cu _{9.764} Fe _{0.161} Pb _{0.004} Zn _{2.312} Hg _{0.013} Ag _{0.055}) _{12.30} (Sb _{1.273} As _{1.039} Bi _{1.582}) _{3.89} S _{12.797}
2	(Cu _{9.804} Fe _{0.183} Pb _{0.012} Zn _{2.362} Hg _{0.008} Ag _{0.043}) _{12.41} (Sb _{1.428} As _{1.116} Bi _{1.350}) _{3.89} S _{12.694}
3	(Cu _{9.828} Fe _{0.231} Pb _{0.000} Zn _{2.191} Hg _{0.012} Ag _{0.006}) _{12.26} (Sb _{0.979} As _{2.122} Bi _{0.787}) _{3.88} S _{12.844}
4	(Cu _{9.862} Fe _{0.290} Pb _{0.006} Zn _{2.181} Hg _{0.001} Ag _{0.004}) _{12.34} (Sb _{0.960} As _{2.245} Bi _{0.747}) _{3.95} S _{12.703}
5	(Cu _{8.783} Fe _{0.312} Pb _{1.346} Zn _{2.314} Hg _{0.010} Ag _{0.021}) _{12.78} (Sb _{1.012} As _{1.188} Bi _{1.394}) _{3.59} S _{12.619}
6	(Cu _{6.128} Fe _{0.199} Pb _{4.643} Zn _{1.902} Hg _{0.006} Ag _{0.051}) _{12.92} (Sb _{0.873} As _{0.685} Bi _{1.394}) _{2.95} S _{13.118}
7	(Cu _{9.775} Fe _{0.257} Pb _{0.014} Zn _{2.182} Hg _{0.006} Ag _{0.000}) _{12.23} (Sb _{0.847} As _{2.419} Bi _{0.676}) _{3.94} S _{12.823}
8	(Cu _{9.750} Fe _{0.271} Pb _{0.008} Zn _{2.166} Hg _{0.015} Ag _{0.013}) _{12.22} (Sb _{0.950} As _{2.237} Bi _{0.733}) _{3.92} S _{12.857}
9	(Cu _{9.743} Fe _{0.177} Pb _{0.011} Zn _{2.381} Hg _{0.000} Ag _{0.043}) _{12.35} (Sb _{1.271} As _{1.050} Bi _{1.668}) _{3.98} S _{12.657}

Tabla 4.6. Fórmulas obtenidas.

Por su contenido en Bi-As-Sb, la tetraedrita – tenantita tardía corresponde a una tetraedrita – tenantita de bismuto y presenta contenidos constantes de wt% de Ag, y el Zn predomina sobre el Fe (Tabla 4.5).

En base a la estructura de la tetraedrita – tenantita propuesta por Wuensch (1964) y por otros autores, se sugieren las siguientes formulas generales para la **Serie de Tetraedrita – Tenantita**.

- Charlat y Levy (1974, 1975)



- Johnson et al. (1986)



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- Mozgova y Tzepin (1983) formulan el grupo fahlore y diferencian 5 términos extremos para la serie:

Tetraedrita	$M_{12}(Sb \geq 3...)_4S_{13}$
Tenantita	$M_{12}(As \geq 3...)_4S_{13}$
Anivita	$M_{12}(Bi \geq 3...)_4S_{13}$
Goldfieldita	$M_{12}(Te \geq 3...)_4S_{13}$
Freibergita	$M_2(Ag \geq 4...)_{10}Sb_4S_{13}$

Los análisis obtenidos implican que la sulfosal del cuerpo mineralizado Venus corresponde a una **Tetraedrita de Bismuto**, de fórmula:



En el diagrama ternario de la Figura 4.9, se establece una comparación con 33 depósitos de diferentes tipos de mineralización los cuales han reportado análisis con concentraciones de Bi > 0.1 wt. %. De los 33 depósitos reportados, 16 se localizan en la antigua Comunidad de Estados Independientes; 10 en Bulgaria; 3 en Eslovaquia; y 1 en Alemania, Yugoslavia, Portugal y Estados Unidos respectivamente, destacando el yacimiento de mercurio de Moschellandsberg, Alemania (Krupp, 1989). Todos estos yacimientos fueron reportados por Breskovska y Tarkian en 1994.

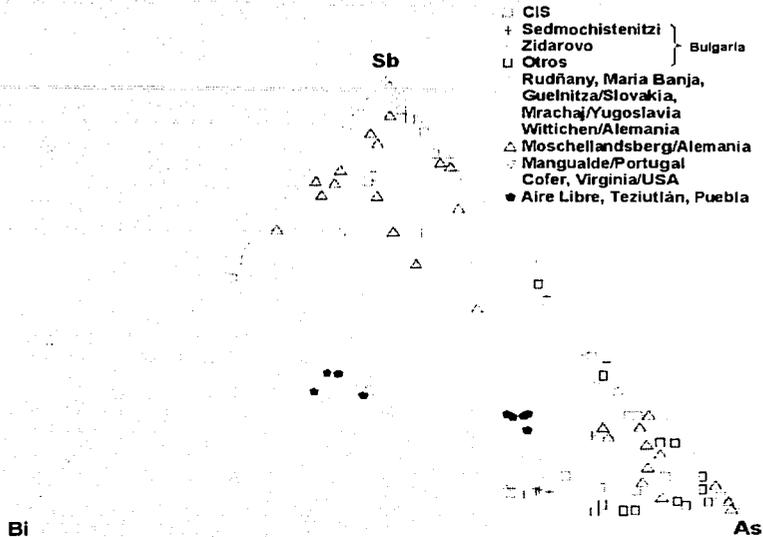


Figura 4.9. Diagrama ternario del sistema Sb-As-Bi para minerales de la serie Tetraedrita – Tenantita.

Se observa que la mayor parte de los yacimientos conocidos son más ricos en Sb y As que en Bi, sin embargo, para el yacimiento vulcanosedimentario Aire Libre, el enriquecimiento en Bi es significativo.

La temperatura de formación de la tetraedrita se encuentra por debajo de los 271°C, la cual es la temperatura de cristalización del Bi (Oen y Kieft, 1976). Los diagramas de la Figura 4.10 a la Figura 4.15, muestran las relaciones que existen entre el Bi y otros elementos como Cu, Ag, Hg, Zn.

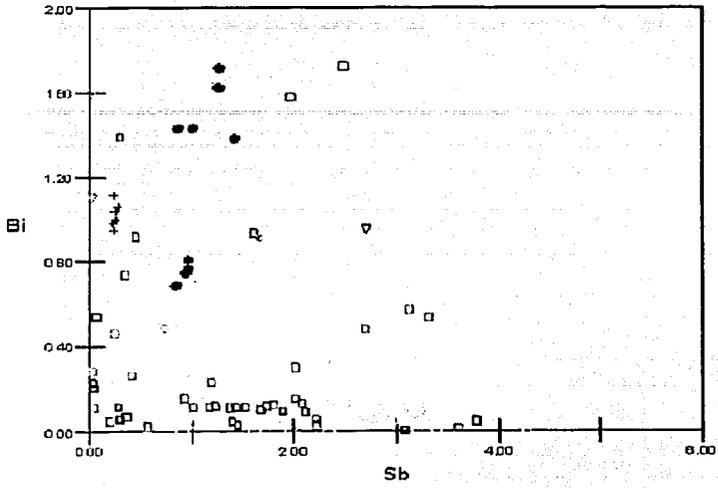


Figura 4.10. Número de átomos de Bi vs Sb en cristales de Tetraedrita - Tenantita.

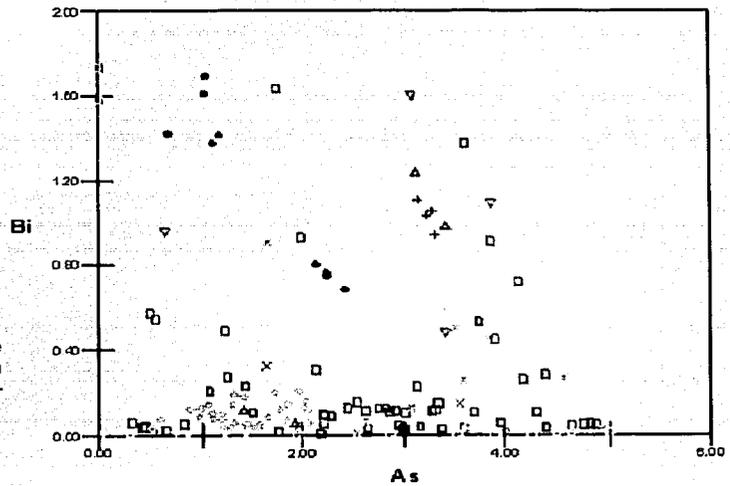


Figura 4.11. Número de átomos de Bi vs As en cristales de Tetraedrita - Tenantita.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

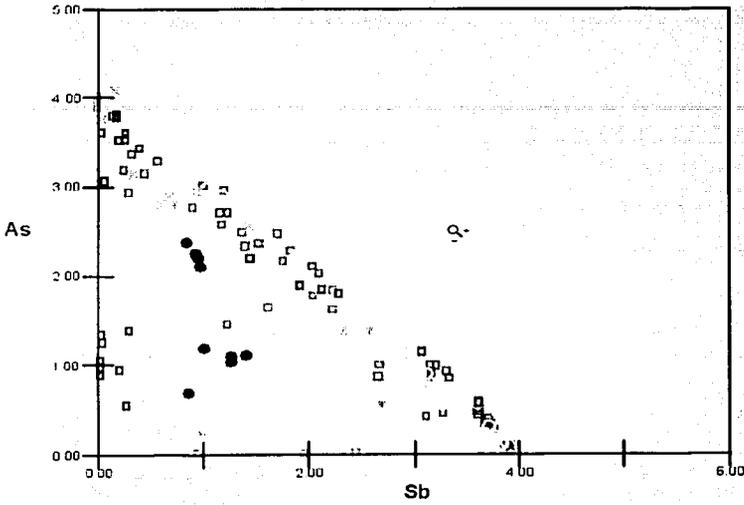


Figura 4.12. Número de átomos de As vs Sb en cristales de Tetraedrita - Tenantita.

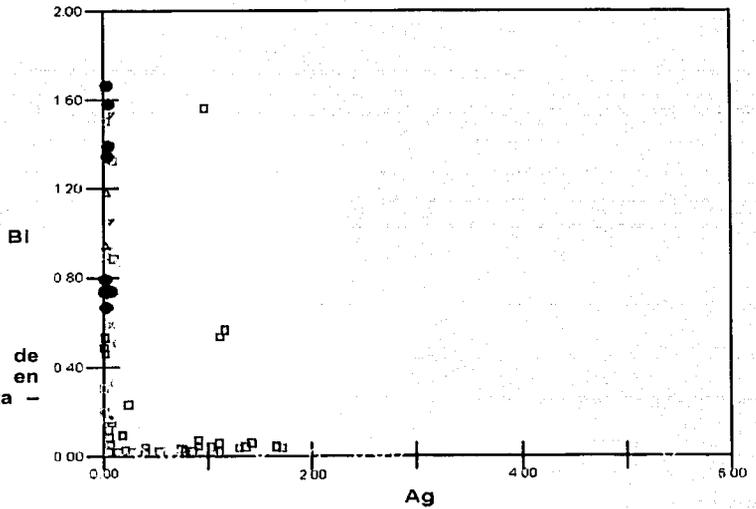


Figura 4.13. Número de átomos de Bi vs Ag en cristales de Tetraedrita - Tenantita.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

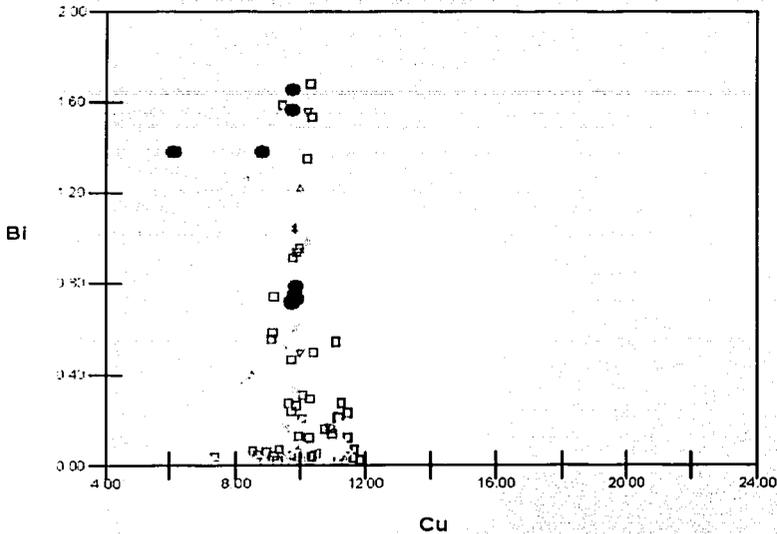


Figura 4.14. Número de átomos de Bi vs Cu en cristales de Tetradrita - Tenantita.

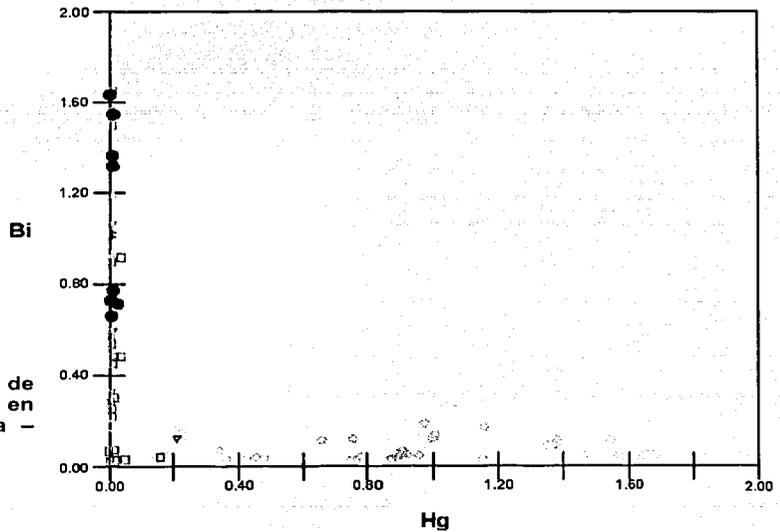


Figura 4.15. Número de átomos de Bi vs Hg en cristales de Tetradrita - Tenantita.

CAPÍTULO 5

GEOQUIMICA DE LA ROCA ENCAJONANTE

En este capítulo se presentan los resultados y la interpretación de los análisis geoquímicos en roca total aplicados a las muestras VNS - 3 y JARB - 2 que corresponden a lentes de composición básica, la primera del socavón Venus y la segunda del socavón Jardín II.

La técnica analítica empleada en este trabajo fue la Fluorescencia de Rayos X (FRX) para determinar los elementos mayores y traza en muestras de roca total cuyos valores se encuentran en las Tablas 1, 2 y 3 del Anexo.

Para la muestra VNS - 3 se realizó un estudio de Difracción de Rayos X (DRX) para la identificación de los tipos de clorita.

5.1 FLUORESCENCIA DE RAYOS X

Con base en las concentraciones de elementos mayores y traza las muestras de esquisto de composición básica VNS - 3, JARB - 2 y CIR - 1, se graficaron en el diagrama de clasificación química de Nb/Y - Zr/TiO₂ (Winchester y Floyd, 1976).

La comparación de las muestras del Distrito Minero Aire Libre con las del Complejo Milonítico Xucayucan se establece en el diagrama Nb/Y - Zr/TiO₂, Figura 5.1.

Las muestras del Complejo Milonítico Xucayucan presentan composiciones que van de basáltica a andesítica; mientras que las del Distrito Minero Aire Libre tienen tendencia a composiciones de basalto alcalino. El que se encuentren alejadas de las del Complejo Milonítico Xucayucan, podría deberse que los elementos

mayores se movilizaron como consecuencia del mayor grado de alteración de estas últimas. Las rocas de aire Libre presentan concentraciones empobrecidas de Y y de Nb, y un enriquecimiento de FeO.

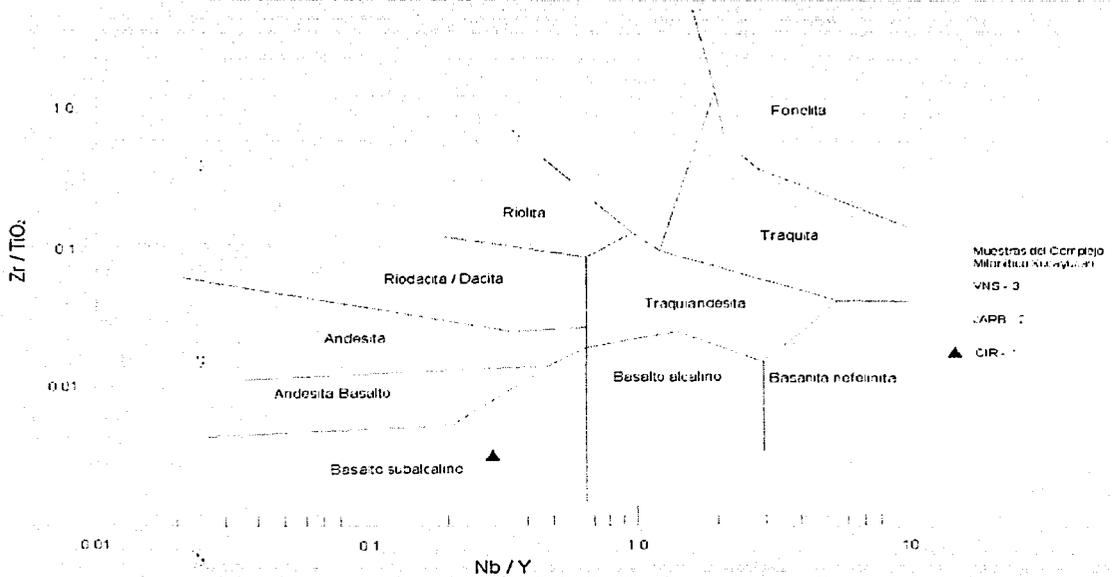


Figura 5.1. Diagrama de clasificación química.

La Figura 5.2 esquematiza la serie magmática a la que pertenecen las rocas del Complejo Milonítico Xucayucan y del Distrito Minero Aire Libre. A partir del diagrama AFM, se concluye que los basaltos y andesitas están asociados con magmas de naturaleza toleítica a calcialcalina.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

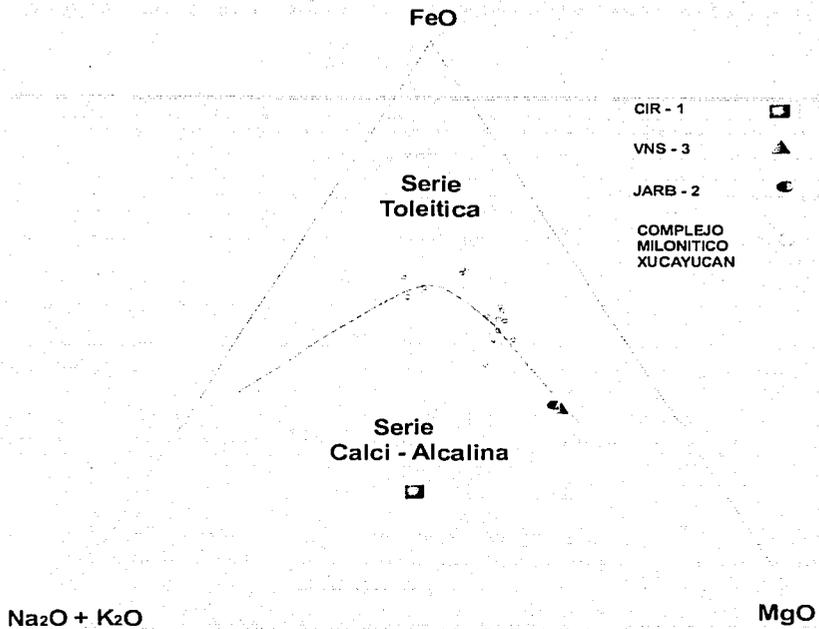


Figura 5.2. Diagrama AFM muestra el limite entre el campo calcialcalino y toleítico (Irving y Baragar, 1971).

5.2 DIFRACCIÓN DE RAYOS X.

El análisis de DRX se realizó en un agregado orientado de la muestra VNS-3 (esquisto de clorita), para la identificación de las fases minerales. El difractograma de la Figura 5.3, muestra que los picos más intensos corresponden al Clinocloro

$Mg_5Al(Si_3Al)O_{10}(OH)_8$ e Illita de acuerdo a los valores establecidos en la Tabla 4 y 5 del Anexo.

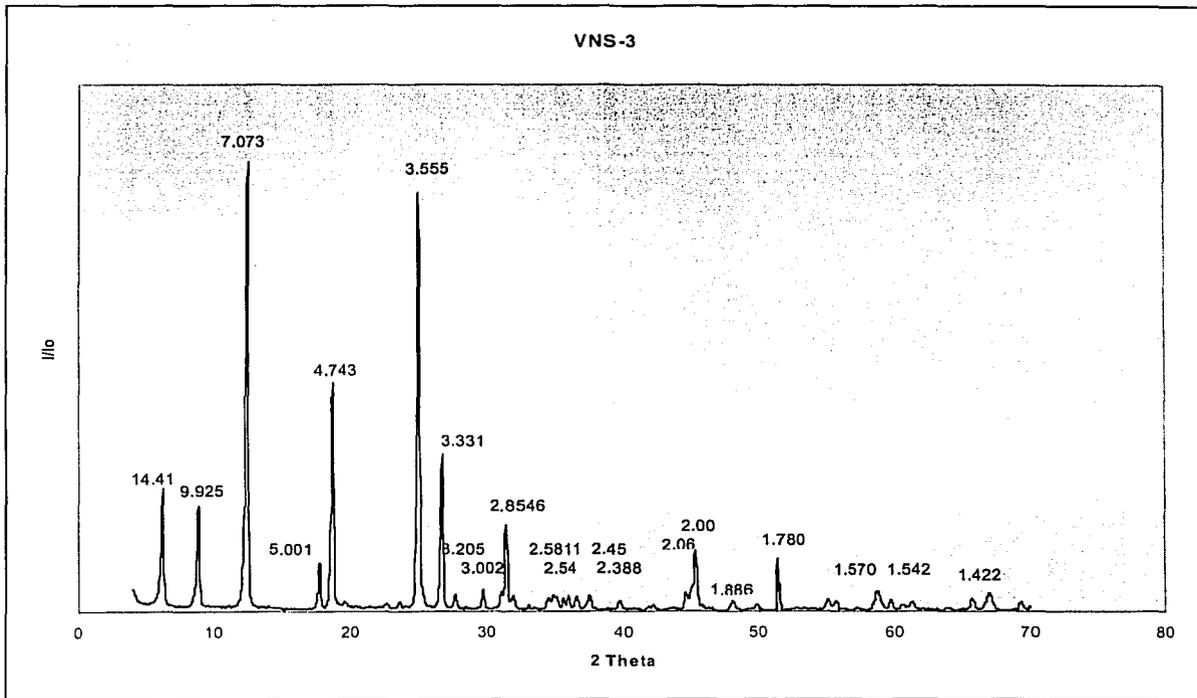


Figura 5.3. Difractograma de la roca encajonante del bajo del cuerpo Venus

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO 6

DISCUSION DE RESULTADOS

El metamorfismo impuesto a esta secuencia mineralizada y a su roca encajonante impide establecer de manera categórica la naturaleza del protolito de estas rocas.

En base a los estudios petrográficos y geoquímicos de la secuencia vulcanosedimentaria metamorfoseada probablemente los protolitos fueron los siguientes: lutitas, areniscas, emplazamientos volcánicos de composición basáltica – andesítica.

El yacimiento La Aurora se presenta con forma de delgados cuerpos lenticulares concordantes a los planos de foliación, compuestos principalmente por calcopirita y esfalerita como minerales predominantes y cantidades menores de galena. Los minerales presentes en cantidades menores son sulfosales ricas en bismuto, bornita y covelita. La serie tetraedrita – tenantita rica en bismuto para los yacimientos de sulfuros masivos vulcanosedimentarios están asociadas particularmente con rocas de composición félsica (Höy, 1991). En el cuerpo mineralizado Aurora, la magnetita es abundante con pirita diseminada. Los minerales de ganga más comunes son cuarzo y barita. Para los cuerpos mineralizados Aurora y Venus la barita es escasa.

Las características geológicas de este yacimiento son complejas, debido a que se encuentra enmascarado por fenómenos metamórficos y tectónicos y sólo en algunas ocasiones se preserva la secuencia encajonante. Esto hace intrínsecamente difícil el encontrar y reconocer las características propias de este depósito.

Sin embargo debido a que el área de estudio presenta similitudes con el Complejo Milonítico Xucayucan como metamorfismo dinámico, edades Permo – Triásicas obtenidas por Ruiz Sainz (1978) y una secuencia vulcanosedimentaria en esquistos de composición química pelítica y básica originada aparentemente en un contexto tectónico de arco volcánico (Angeles y Sánchez, 2002), se ha correlacionado que la unidad metamórfica del Distrito Minero Aire Libre ocurrió en un ambiente similar.

El Distrito Minero Aire Libre esta conformado por esquistos miloníticos de clorita, moscovita y esquistos cuarzo – sericíticos cuya asociación litológica representó una secuencia vulcanosedimentaria, con derrames de composición basáltico - andesítica y cierta influencia de sedimentos cuarzo – feldespáticos.

El estudio petrográfico de la secuencia litoestratigráfica del yacimiento La Aurora y su roca encajonante, indica que ésta se encuentra conformada por unidades metamórficas de esquistos de composición química pelítica y básica; y de acuerdo a la mineralogía, la roca encajonante correspondiente al alto presenta minerales como cuarzo, andesina y sericita característicos de rocas volcánicas de composición intermedia.

De acuerdo con todas las características mencionadas anteriormente existen elementos que permiten considerar al yacimiento La Aurora como tipo Kuroko.

Las sulfosales presentes se han clasificado dentro de la serie tetraedrita – tenantita, correspondiendo a una tetraedrita de bismuto.

Es importante señalar que la mayor parte de los yacimientos que contienen tetraedritas de bismuto son ricos en arsénico y antimonio. Esto conlleva a que el bismuto está siendo sustituido por ambos elementos, sin embargo, para el yacimiento La Aurora, la tetraedrita presenta enriquecimiento en bismuto. Cabe

destacar que la tetraedrita de bismuto se ha encontrado en pegmatitas y muy pocas en yacimientos de sulfuros masivos. Sin embargo al evaluar nuestros datos de estas tetraedritas los átomos presentes en los elementos de la tetraedrita de bismuto presentan patrones similares con los yacimientos reportados por Breskovska y Tarkian en 1994.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES

Los depósitos de sulfuros masivos del Distrito Minero Aire Libre corresponden a un yacimiento tipo vulcanosedimentario o vulcanogénico (VMS) de Cu – Zn (Ba-Pb-Bi). El cual se encuentra encajonado en una secuencia vulcanosedimentaria con metamorfismo en facies de esquistos verdes.

Existen elementos para considerar al yacimiento *La Aurora* como tipo Kuroko, debido a la asociación mineralógica y que el manto mineralizado se encuentra encajonado por horizontes de secuencias pelíticas y por rocas de composición félsica a intermedia asociados con lentes de esquistos de composición básica.

Los minerales de mena son: calcopirita, esfalerita, galena y en menores cantidades una tetraedrita con contenidos inusualmente altos de Bi. Los minerales de ganga identificados son: cuarzo, sericita, illita, clorita y barita para los cuerpos mineralizados.

En el cuerpo Aurora se tiene una cantidad considerable de magnetita y pirita disseminada y su roca encajonante corresponde a un esquisto de sericita.

En el cuerpo Venus, la mineralización se encuentra delimitada por esquisto de cuarzo - sericítico al alto y al bajo por un esquisto de clorita.

Se diferenciaron cuatro fases de mineralización siendo de importancia económica la segunda y tercera lo cual implica que el sistema estuvo activo durante un periodo importante de tiempo durante el cual emanaban al fondo marino soluciones ricas en cobre y zinc a partir de las cuales precipitaron los sulfuros.

RECOMENDACIONES

En el presente trabajo se caracterizo la mineralogía y geoquímica de los cuerpos de sulfuros masivos del Distrito Minero Aire Libre.

Sería de suma importancia realizar trabajos de geología estructural y estratigrafía adicionales que permitan abordar el estudio de la evolución tectónica de la zona, lo cual daría la posibilidad de reconocer el ambiente de formación de la mineralización y ayudaría a establecer posibles zonas favorables para la prospección de yacimientos similares al oriente de México.

REFERENCIAS CONSULTADAS

Angeles, M. E. y Sánchez M. S. 2002. **Geología, Geoquímica y Geología Estructural de las Rocas del Basamento del Macizo de Teziutlán, Estado de Puebla.** Tesis Profesional, Ingeniero Geólogo, Facultad de Ingeniería, UNAM. 141p.

Breskovska, V. y Tarkian, M. 1994. **Compositional Variation in Bi-bearing Fahlores.** N.Jb. Miner. Mh., Stuttgart. H. 5, p.230-240.

Castro Mora, J. 1993. **El Yacimiento La Aurora, Distrito Minero Aire Libre, Municipio de Teziutlán, Puebla.** Consejo de Recursos Minerales, Informe Técnico, 16p.

Charlat, M. y Levy, C. 1974. **Substitutions Multiples Dans la Serie Tennantite – Tetraedrite.** Bull. Soc. Franc. Miner. Crist. 97, p.241 – 250.

Charlat, M. y Levy, C. 1975. **Influence Des Principales Substitutions Sur Les Proprietes Optiques Dans La Serie Tennantite – Tetraedrite.** Bu-II. Soc. Franc. Miner. Crist. 98, p.152 – 158.

Chavelas Lluc, F., Flores Ayala, M., Gómez Alvarado, L. A., Monroy Espinoza, J. L. y Rosales Mejía, S. G. 1991. **Geología y Prospección Minera en el Área "Aire Libre", Municipio de Teziutlán, Puebla.** Tesis Profesional, Ingeniero Geólogo, Facultad de Ingeniería, UNAM, 91p.

Gómez Valle, R. 1958. **Estudio Geológico para el Proyecto Hidroeléctrico del Río Apulco, Puebla.** Tesis Profesional, Ingeniero Geólogo, Facultad de Ingeniería, UNAM, 98p.

Höy, T. 1991. **Volcanogenic Massive Sulphide Deposits in British Columbia: in Ore Deposits, Tectonics and Metallogeny in the Canadian Cordillera.** British Columbia of Energy, Mines and Petroleum Resources. Paper 1991-4, p.89-123.

Irvine, T. N., y Baragar, W. R. A. 1971. **A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks.** Earth Sci., 8, p.523 – 548.

Johnson, N. E., Craig, J. R. y Rimstidt, J. D. 1986. **Compositional Trends in Tetrahedrite.** Can. Miner. 24, p.385 – 397.

Krupp, R. E. 1989. **Paragenesis and Conditions of Formation of the Moschellandberg Mercury Deposit, SW Germany.** Miner. Deposita. 24, p.69 - 76.

Quezadas Flores, A. G. 1961. **Las Rocas del Basamento de la Cuenca Tampico Misantla.** Tesis Profesional, Ingeniero Geólogo, Facultad de Ingeniería, UNAM, 68p.

López Ramos, E. 1972. **Estudio del Basamento Ígneo y Metamórfico de las Zonas Norte y Poza Rica.** Bol. Asoc. Mex. Geol. Petrol. V 24, p. 265-301.

Morán – Zenteno, D.1984. **Geología de la República Mexicana.** Secretaría de Programación y Presupuesto, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 82p.

Mozgova, N. N. y Tzepin, A. I. 1993. **Fahlores (Peculiarity of the Chemical Compositions and Properties)**. Moskow, Nauka, 280p.

Oen, I. S., y Kieft, C. 1976. **Bismuth-Rich Tennantite and Tetrahedrite in the Mangualde Pegmatite, Viscu District, Portugal**. N. Jb. Miner. Mh. Stuttgart. H. 2, p.94-96.

Ruiz Sainz P. 1978. **Estudio radiométrico de las rocas ígneas y metamórficas del Prospecto Villa Juárez-Tlapacoyan (Estados de Puebla y Veracruz)**. Proyecto C-1076-IMP-1978. PEMEX, 51 p.

Sato, T. 1974. **Distribution and Geological Setting of the Kuroko Deposits**. Soc. Mining Geologists Japan., Spec. Issue 6, p.1-9.

Segura Calderón, H. 1990. **Estudio Geológico de Prefactibilidad del Sistema Hidroeléctrico Atexcaco. Puebla, México**. Comisión Federal de Electricidad, 124p.

Spear, F. S., 1995. **Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths**. Mineralogical Society of America, Washington, p. 337-391

Viniegra, O. F. 1965. **Geología del Macizo de Teziutlán y de la Cuenca Cenozoica de Veracruz**. Bol. Asoc. Mex. Geol. Petrol. V. 17, 7-12, p. 100-135.

Winchester, J. A., y Floyd, P. A. 1976. **Geochemical Magma type Discrimination; Application to Altered and Metamorphosed Basic Igneous Rocks**. Earth Planet. Sci. Lett., 28, p.459 – 469.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Wuensch, B. J. 1964. **The Crystal Structure of Tetrahedrite, $\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$** , Z.Krist 119, p.437 – 453.

Yañez García, C. y García Durán, S. 1982. **Exploración de la Región Geotérmica Los Humeros – Las Derrumbadas. Estados de Puebla y Veracruz.** Comisión Federal de Electricidad, 96p.

Yardley, B. W. D., MacKenzie, W. S. y Guilford, C. 1990. **Atlas of Metamorphic Rocks and their Textures.** Longman Scientific and Technical, 120p.

Zamorano Montiel, G. 1986. **Informe sobre los estudios preliminares en el área de Teziutlán, Puebla.** Consejo de Recursos Minerales, Informe Técnico, 11 p.

REFERENCIAS CARTOGRÁFICAS.

INEGI, **Carta Topográfica 1:50,000.** Hoja Teziutlán, E14B15 Puebla.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

ANEXO

Clave de la muestra: ARL - 2

Esquisto de clorita

1. Descripción Megascópica

Roca de color pardo amarillento de textura foliada constituida por mica, segregaciones de cuarzo anhedral y cristales de euhedrales de pirita.

2. Descripción Microscópica

Roca intensamente deformada compuesta de clorita, moscovita y cuarzo. La foliación es muy acentuada debido a la disposición paralela de las moscovitas. Esta roca desarrolla textura milonítica.

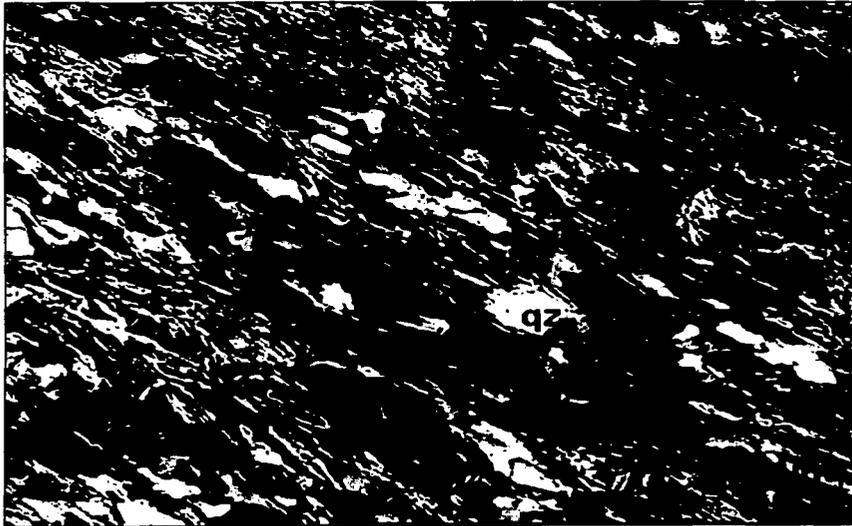


Figura 1. Fotomicrografía de un esquisto de clorita.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Clave de la muestra: ARL - 4

Esquisto de clorita

1. Descripción Megascópica

Roca de color pardo amarillento de textura foliada constituida por moscovita, vetillas de cuarzo anhedral y minerales opacos con tonalidades ocreas originadas por oxihidróxidos de Fe (lepidocrocita).

2. Descripción Microscópica

Esta roca presenta un mosaico de clorita, feldespato potásico y cuarzo con extinción ondulante. Desarrollando textura milonítica.



Figura 2. Fotomicrografía de un esquisto de clorita con porfidoblastos de cuarzo.

Clave de la muestra: ARL - 15

Esquisto de clorita

1. Descripción Megascópica

Roca de color verde-amarillento de textura foliada constituida por clorita, cuarzo anhedral y minerales de habito fibroso de color verde.

2. Descripción Microscópica

Roca que presenta un mosaico de epidota, clorita, cuarzo y tremolita-actinolita, desarrollando textura nematoblástica. La epidota presenta un color amarillo o amarillo verdoso con buena exfoliación. El relieve de la epidota queda de manifiesto respecto al cuarzo. La tremolita-actinolita presenta un marcado pleocroismo alterandose a clorita.

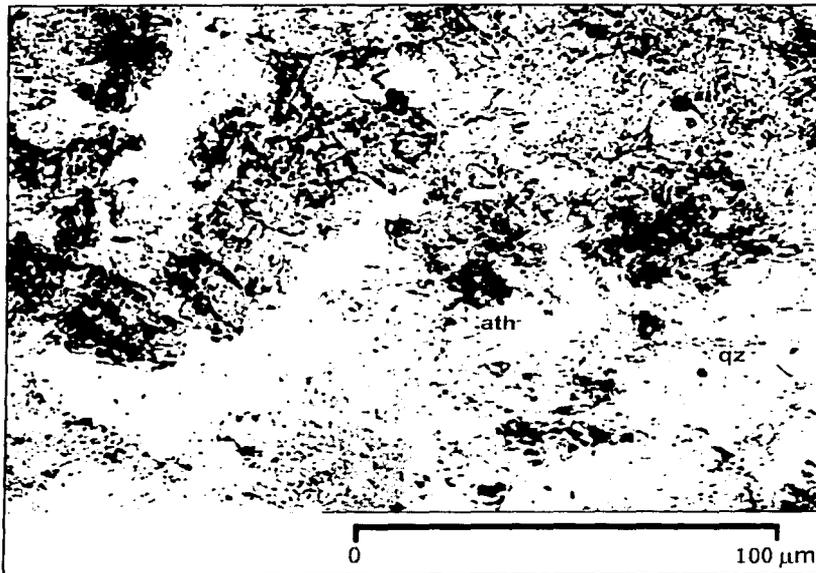


Figura 3. Fotomicrografía de un esquisto verde.

Clave de la muestra: ARL - 18

Esquisto de clorita

1. Descripción Megascópica

Roca de color pardo amarillento de textura foliada constituida por clorita, cuarzo anhedral, epidota y minerales opacos.

2. Descripción Microscópica

Esta roca presenta un mosaico de clorita, epidota, cuarzo y feldespato potásico, como minerales accesorios minerales opacos. La epidota presenta un color amarillo o amarillo verdoso con buena exfoliación. El relieve de la epidota queda de manifiesto respecto al cuarzo. Esta roca desarrolla textura milonítica.

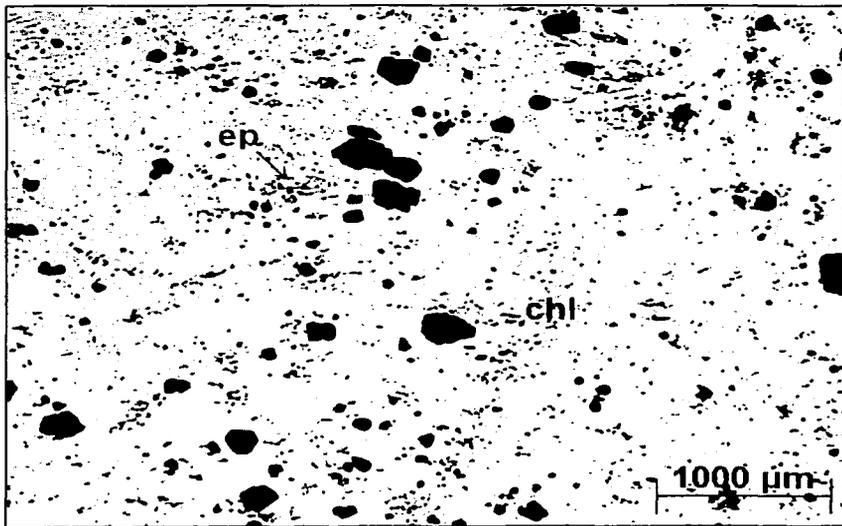


Figura 4. Fotomicrografía de un esquisto verde.

Clave de la muestra: ARL - 30

Esquisto de clorita

1. Descripción Megascópica

Roca de color verde de textura foliada constituida por clorita, epidota, cuarzo anhedral y minerales opacos (pirita).

2. Descripción Microscópica

Esta roca presenta un mosaico de clorita, epidota, cuarzo y feldespato potásico, como minerales accesorios pirita. La epidota presenta un color amarillo o amarillo verdoso con buena exfoliación. El relieve de la epidota queda de manifiesto respecto al cuarzo. Esta roca desarrolla textura nematoblástica.

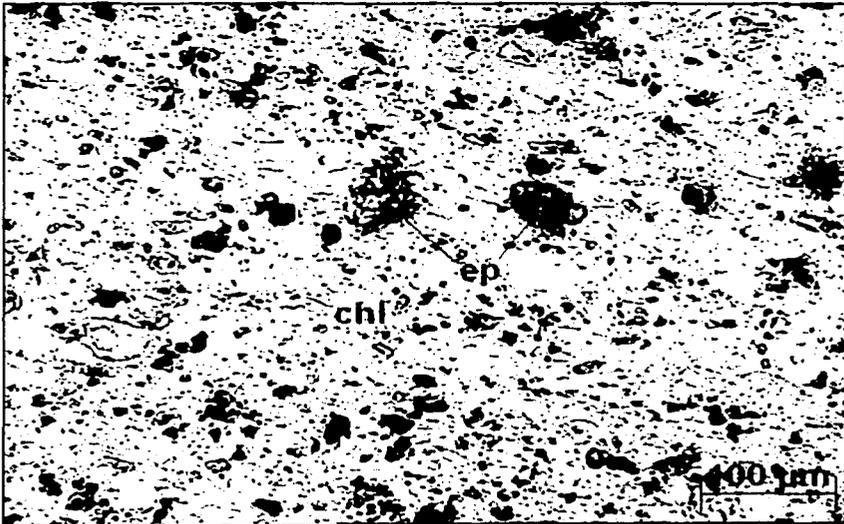


Figura 5. Fotomicrografía de un esquisto verde.

Clave de la muestra: ARL - 47

Esquisto de clorita

1. Descripción Megascópica

Roca de color verde amarillento de textura foliada constituida por clorita, moscovita, cuarzo anhedral.

2. Descripción Microscópica

Esta roca desarrolla textura milonítica, presenta un mosaico mineral constituido por clorita, moscovita, feldespato potásico y porfidoblastos de cuarzo con extinción ondulante. Se distinguen sectores paralelos a la foliación, unos son más ricos en micas y otros en cuarzo.

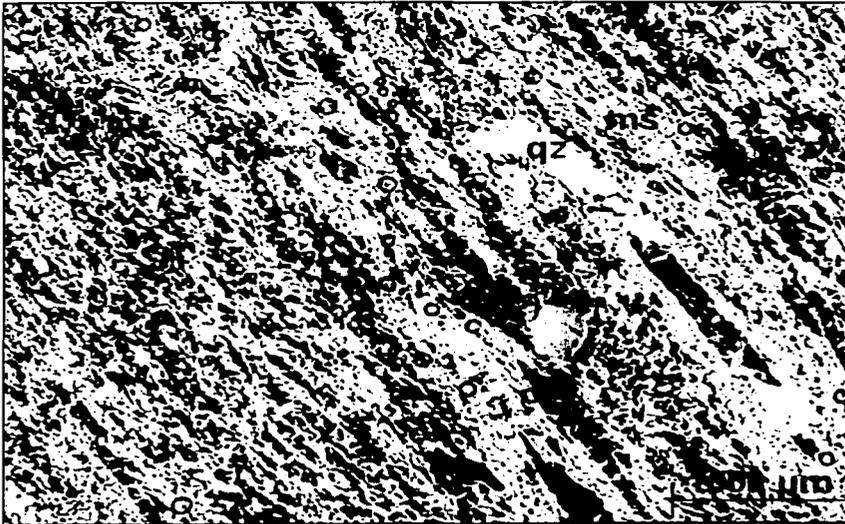


Figura 6. Fotomicrografía de un esquisto de clorita constituida por moscovita, cuarzo y feldespato potásico.

Clave de la muestra: ARL – 48

Esquisto cuarzo - sericítico

1. Descripción Megascópica

Roca de color pardo de textura foliada constituida por cuarzo anhedral y plagioclasa. Con alteración a arcilla.

2. Descripción Microscópica

Esta roca desarrolla textura lepidoblástica, presenta un mosaico mineral constituido por cuarzo, oligoclasa - andesina y escamas de sericita disemina.



Figura 7. Fotomicrografía de un esquisto cuarzo sericítico con escamas de sericita diseminada y cuarzo con extinción ondulante.

Clave de la muestra: ARL - 68

Esquisto de clorita

1. Descripción Megascópica

Roca de color verde de textura foliada constituida por clorita.

2. Descripción Microscópica

Roca que presenta un mosaico de epidota, clorita y cuarzo desarrolla textura nematoblástica. La epidota presenta un color de amarillo a amarillo verdoso con buena exfoliación.

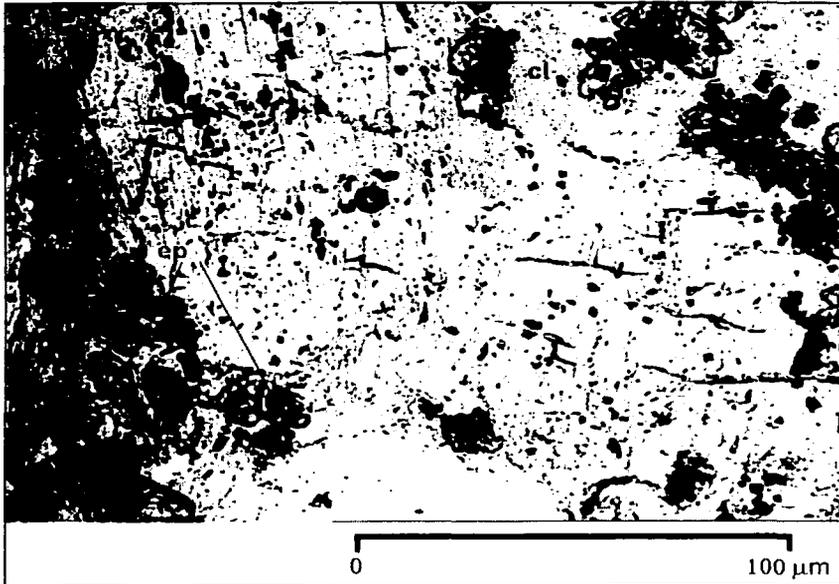


Figura 8. Fotomicrografía de un esquisto de clorita con epidota.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Clave de la muestra: JAR – 2RE**Esquisto de clorita****1. Descripción Megascópica**

Roca de color verde con tonalidades ocres conferidas por oxihidróxidos de Fe (lepidocrocita) de textura foliada constituida por moscovita, cuarzo anhedral y sulfuros diseminados.

2. Descripción Microscópica

Esta roca presenta un mosaico clorita, cuarzo y feldespato potásico, como minerales accesorios biotita y minerales opacos. Esta roca desarrolla textura milonítica.

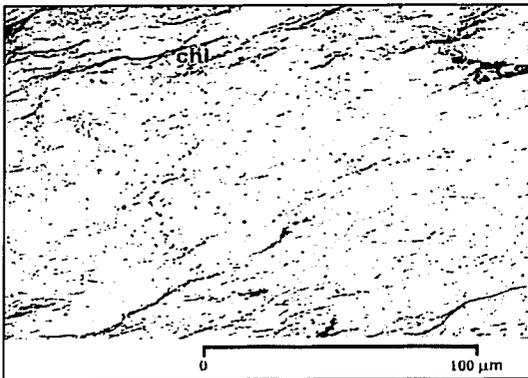


Figura 9a. Fotomicrografía sin analizador. Roca constituida por clorita y cuarzo.

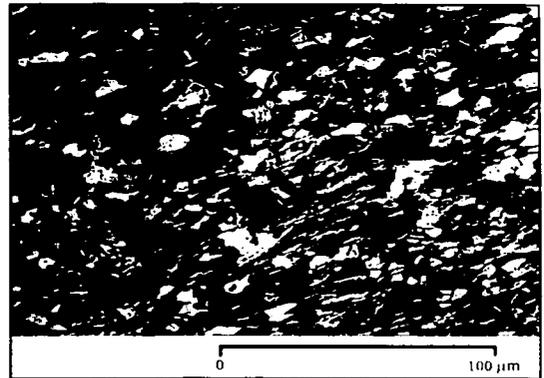


Figura 9b. Fotomicrografía con nicoles cruzados. Escamas de clorita diseminada.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Clave de la muestra: CIR – 3**Esquisto cuarzo - sericítico****1. Descripción Megascópica**

Roca de color verde de textura foliada constituida por fenocristales de cuarzo anhedral y plagioclasa.

2. Descripción Microscópica

Esta roca tiene una foliación muy marcada debido a la alineación de láminas de mica (moscovita). Los minerales dominantes son cuarzo, feldespato potásico, andesina, moscovita y sericita, desarrolla textura milonítica. Los colores de alta birrefringencia corresponden a la moscovita. Se distinguen sectores paralelos a la foliación, unos son más ricos en micas y otros en cuarzo.

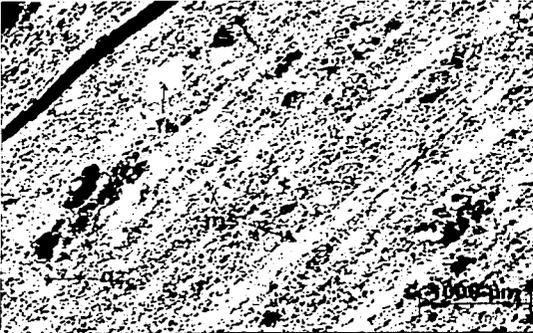


Figura 10a. Fotomicrografía con nicoles cruzados. Esquisto cuarzo-sericítico constituido por un mosaico mineral de moscovita, feldespato potásico y cuarzo este último con extinción ondulante.

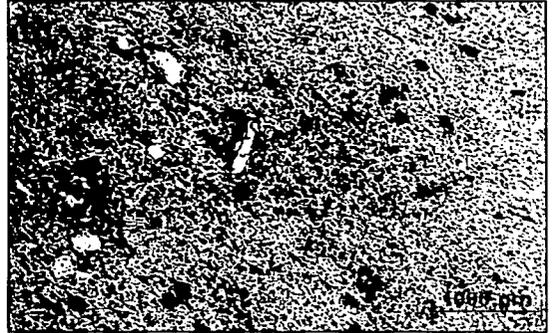


Figura 10b. Fotomicrografía con nicoles cruzados. Escamas de sericita diseminada y plagioclasa andesina.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Clave de la muestra: CIR – 4

Esquisto de clorita

1. Descripción Megascópica

Roca de color verde de textura foliada constituida por clorita y fenocristales de cuarzo anhedral.

2. Descripción Microscópica

Esta roca desarrolla textura milonítica, presenta un mosaico mineral constituido por clorita y cuarzo con extinción ondulante.

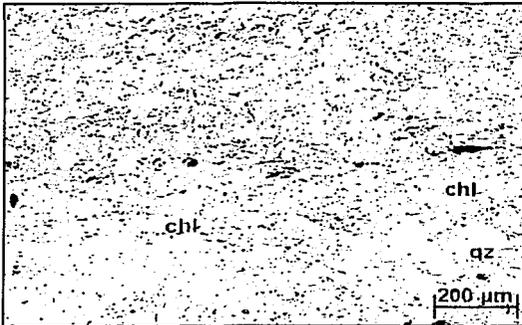


Figura 11a. Fotomicrografía sin analizador. Roca constituida por clorita y cuarzo.

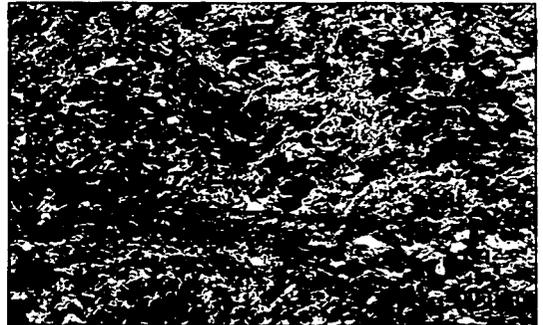


Figura 11b. Fotomicrografía con nicoles cruzados. Escamas de clorita diseminada.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Clave de la muestra: CIR – 6

Esquisto cuarzo - sericítico

1. Descripción Megascópica

Roca de color verde - amarillento con tonalidades ocreas causadas por oxihidróxidos de Fe (lepidocrocita) de textura foliada constituida por cuarzo anhedral y mica.

2. Descripción Microscópica

Esta roca tiene una foliación muy marcada debido a la alineación de láminas de mica (moscovita). Roca criptocríсталina con cuarzo, feldespato potásico, moscovita y sericita, desarrolla textura milonítica. Los feldespatos potásicos alterandose a arcilla.

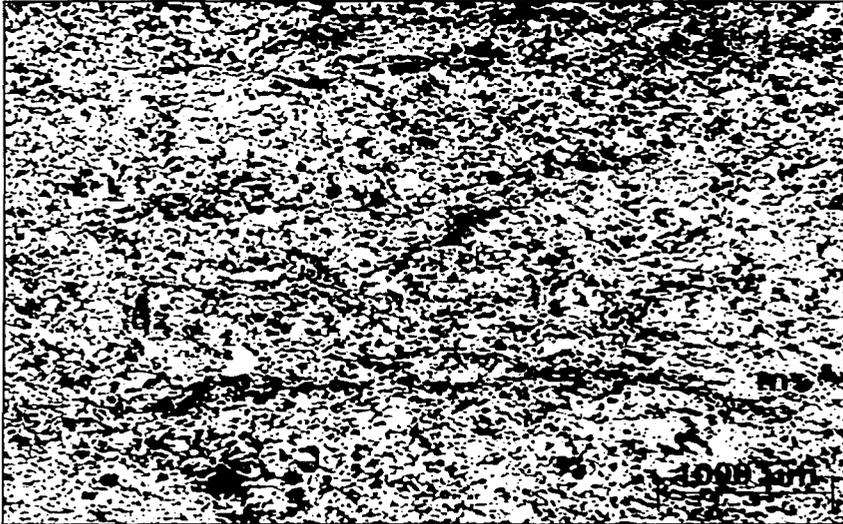


Figura 12. Fotomicrografía de un esquisto cuarzo-sericítico.

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PXC	SO ₃	suma
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
VNS-1	44.8	0.61	29.0	3.64	0	3.00	0.012	0.288	10.3	0	6.35	1.94	99.94
VNS-3	34.48	1.29	23.99	15.23	0.25	13.44	0.14	0.13	4.03	0.13	7.6	0	100.71
CIR-1	55.74	0.63	21.85	4.67	0.06	5.79	0.21	0.52	5.95	0.14	4.92	0	100.48
JARB-2	56.63	0.64	16.43	8.96	0.37	9.21	0.021	0.021	2.98	0.04	5.29	0	100.59
JAR-2RE	71.01	0.66	10.63	6.76	0.27	5.74	0.003	0	1.85	0.04	3.55	0	100.51
AUR-44A	63.1	1.15	14.6	6.77	0	5.29	0.38	0.16	4.83	0.12	3.19	0.3	99.89

Tabla 1 Análisis de elementos mayores

	Rb	Sr	Ba	Y	Zr	Nb	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Th	Pb
	μg ⁻¹													
VNS-1	321	41	14950	< 0.5	2124	11	39	< 3	< 3	< 0.5	1324	9791	< 3	359
VNS-3	162	17	3854	< 0.5	90	2	74	25	23	< 0.5	50	727	< 3	110
CIR-1	177	22	1816	24	250	7	121	47	8	< 0.5	60	384	10	36
JARB-2	99	9	1829	< 0.5	79	1	243	111	18	< 0.5	128	672	< 3	< 5
JAR-2RE	64	6	1720	9	58	1	194	60	11	< 0.5	94	367	< 3	8
AUR-44A	155	26	4842	11	518	16	109	90	4	< 0.5	253	532	< 3	278

Tabla 2 Análisis de elementos trazas

	FeO
	%
VNS-1	0.38
VNS-3	8.81
CIR-1	2.56
JARB-2	6.18
JAR-2RE	4.23
AUR-44A	2.71

Tabla 3 Análisis de FeO

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Mg ₃ Al ₂ (Si ₄ Al) ₂ O ₁₀ (OH) ₂	Clinocloro	d A	Int	hkl	d A	Int	hkl
		14.3	65	001	1 4040	13	0110
		7.16	100	002			
		4.77	70	101			
		4.61	7	110			
		3.58	60	004			
		2.862	35	032			
		2.587	9	124			
		2.544	18	211			
		2.447	16	211			
		2.386	11	105			
		2.263	9	106			
		2.076	3	134			
		2.044	13	126			
		2.009	20	215			
		1.886	7	232			
		1.827	6	136			
		1.742	3	240			
		1.727	3	242			
		1.668	5	153			
		1.572	16	235			
		1.5384	6	218			
		1.5080	2	252			
		1.4640	3	109			
		1.4311	6	324			
		1.4150	3	1010			

Tabla 4. Clinocloro

1.3(K,Na) ₂ O 0.6(Mg,Fe)O 3.3(FeAl) ₂ O ₃ 16(SiAl) ₂ O ₂ 5H ₂ O Illita	d A	I/I ₁	hkl	d A	I/I ₁	hkl
	9.9	80	002	1.345	50B	335
	4.9	60	004	1.297	60	400
	4.46	100	110	1.269	40	402
	4.29	40	111	1.245	50	0.0.16
	4.11	40	022			
	3.88	60	113			
	3.65	50	023			
	3.36	100	006			
	3.10	50B	025, 115			
	2.86	60B	115			
	2.57	100	202			
	2.45	50	202, 133			
	2.39	60	204, 133			
	2.24	50	221			
	2.14	60	206, 043			
	1.992	60	0.0.10			
	1.94	40	206			
	1.650	60B	2.0.10 312			
	1.500	80	60, 331			

Tabla 5. Illita

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN