



4  
Zejeu  
**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**RECONSTRUCCION DE SISTEMAS  
HIDROTERMALES FOSILES:  
DISTRITOS MINEROS  
DE SOMBRERETE Y LA COLORADA,  
ZACATECAS, MEXICO**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE:  
I N G E N I E R O   G E O L O G O**

**PRESENTA:**

**MARIA DE LOURDES GARCIA COTERO**

**FALLA DE ORIGEN**

**MEXICO, D.F.**

**SEPTIEMBRE 1995**





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
60-I-049

**SRITA. MARIA DE LOURDES GARCIA COTERO**  
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la **Dra. Rosa María Prol Ledesma**, y que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geólogo:

**RECONSTRUCCION DE SISTEMAS HIDROTHERMALES FOSILES: DISTRITOS MINEROS DE SOMBRETE Y LA COLORADA, ZACATECAS, MEXICO**

- I INTRODUCCIÓN**
- II GEOLOGIA GENERAL**
- III ALTERACION HIDROTHERMAL EN SISTEMAS GEOTERMICOS Y YACIMIENTOS EPITERMALES**
- IV CARACTERISTICAS DE LA ALTERACION HIDROTHERMAL EN LOS DISTRITOS MINEROS DE SOMBRETE Y LA COLORADA**
- V RELACION ENTRE LOS PATRONES DE ALTERACION HIDROTHERMAL Y LA MINERALIZACION EN LAS ZONAS DE ESTUDIO**
- VI RECONSTRUCCION DE LOS SISTEMAS HIDROTHERMALES FOSILES DE SOMBRETE Y LA COLORADA**
- VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**
- BIBLIOGRAFIA**
- MAPAS E ILUSTRACIONES**

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

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

Atentamente  
**"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"**  
Ciudad Universitaria, a 23 de mayo de 1995  
EL DIRECTOR

**ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS**

JMCS'RLCR'gtg.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco la supervisión e infinita paciencia que la Dra. Rosa M<sup>ª</sup> Proal Ledesma tuvo durante la elaboración de este trabajo. A los Ingenieros Germán Arriaga García, Carlos Garza González-Vélez, Jorge Nieto Obregón y al Dr. Raymundo Martínez Serrano por sus valiosos comentarios que mejoraron en gran medida éste trabajo.

Al Dr. Michel Dubois por su revisión, ayuda y sugerencias en la parte de inclusiones fluidas.

A la Dra. Ángels Cansels quién llevó a cabo los análisis de difracción de rayos X.

Al Ing. María Victoria Nolasco por la ayuda otorgada en la parte de estratigrafía sedimentaria.

Al M.C Ariel E. Alcántara Eguren por sus comentarios, sugerencias y colaboración prestada en la elaboración de los dibujos y figuras.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la ayuda económica otorgada.

FALLA DE ORIGEN

*Dedico este trabajo a:*

*Tú que eres principio y fin.*

*A mis padres el Sr. Antonio García M. y la Sra. Graciela Cotero A. por el apoyo moral y económico que me brindaron a lo largo de la carrera.*

*A mi hermano Martín que siempre estuvo dispuesto a ayudarme cuando lo necesitaba.*

*A mis queridos hermanos: Martín, Toña, Miguel, Ale, Lupe, Juan, Gloria, Norma y Rubén, con los deseos de que siempre sigan en la lucha por sus ideales.*

*A mi pequeño y amado sobrino Antonio de Jesús.*

**A mis profesores Dr. Jaime Barceló Duarte e Ing. Benjamín Márquez por su ejemplo, apoyo y gran dedicación hacia su profesión.**

**A mi querido profesor Alfonso Gutierréz Ariza, con los cuatro ingredientes que tienden al infinito y con quién siempre estaré en deuda.**

*Con mucho cariño, gratitud y admiración  
a una mujer ejemplar siempre dispuesta a  
dar; la Lic. Griselda Eguren González  
(Mamá Grizzly).*

*Y finalmente con mucho amor a ti,  
mi amigo, compañero y esposo; Ariel.*

## INDICE

### RESUMEN

I. INTRODUCCION	
I.1 Objetivos .....	1
I.2 Localización y vías de acceso .....	1
I.3 Antecedentes .....	1
I.4 Método de Trabajo .....	3
I.5 Clima .....	4
I.6 Flora y Fauna .....	4
II. GEOLOGIA GENERAL	
II.1 Fisiografía .....	5
II.2 Hidrografía .....	5
II.3 Geomorfología .....	5
II.4 Estratigrafía .....	6
II.5 Geología Estructural .....	12
III. ALTERACION HIDROTERMAL EN SISTEMAS GEOTERMICOS Y YACIMIENTOS EPITERMALES	
III.1 Clasificación de yacimientos epitermales..	14
III.2 Alteración hidrotermal .....	15
III.3 Intensidad y rango de alteración .....	16
III.4 Paragénesis de alteración .....	16
III.5 Tipos de alteración hidrotermal .....	17
III.6 Alteración subsuperficial y superficial ..	18
III.7 Alteración hidrotermal y temperatura .....	21
III.8 Alteración hidrotermal y ebullición .....	22
III.9 Alteración hidrotermal y tipo de roca encajonante .....	23
III.10 Alteración hidrotermal y composición del fluido .....	23
III.11 Alteración hidrotermal y permeabilidad ..	24
III.12 Distribución de la alteración hidrotermal en yacimientos epitermales .....	24
IV. CARACTERISTICAS DE LA ALTERACION HIDROTERMAL EN LOS DISTRITOS MINEROS DE SOMBRERETE Y LA COLORADA	
IV.1 Sombrerete	
IV.1.1 Descripción del yacimiento .....	27
IV.1.2 Tipos de alteración .....	27
IV.1.3 Intensidad de alteración .....	29
IV.1.4 Distribución espacial de la alteración ...	30
IV.1.5 Formas de alteración hidrotermal .....	32
IV.1.6 Paragénesis .....	32
IV.1.7 Secuencia general de eventos geológicos...	34
IV.2 La Colorada	
IV.2.1 Descripción del yacimiento.....	34
IV.2.2 Tipos de alteración .....	36
IV.2.3 Intensidad de alteración .....	36
IV.2.4 Distribución espacial de la alteración hidrotermal.....	37



IV.2.5 Formas de alteración hidrotermal .....	39
IV.2.6 Paragénesis .....	39
IV.2.7 Secuencia general de eventos geológicos...	39
<b>V. RELACION ENTRE LOS PATRONES DE ALTERACION HIDROTERMAL Y LA MINERALIZACION EN LAS ZONAS DE ESTUDIO</b>	
V.1 Relación entre alteración y mineralización .	42
V.2 Características de los fluidos mineralizantes	
V.2.1 Composición química .....	42
V.2.2 Origen de la alteración ácido-sulfatada en Sombrerete y Colorada .....	43
V.2.3 Temperatura de emplazamiento .....	48
V.2.4 Procesos de depositación .....	50
V.3 Relación litología-paragénesis de alteración	52
<b>VI. RECONSTRUCCION DE LOS SISTEMAS HIDROTERMALES FOSILES .....</b>	61
<b>VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	
VII.1 Conclusiones.....	64
VII.2 Recomendaciones .....	64
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....</b>	65
<b>ANEXO A</b>	

## INDICE DE FIGURAS

- Figura 1.1* Plano de localización.
- Figura 2.1* Columna estratigráfica de Sombrerete.
- Figura 2.2* Columna estratigráfica de La Colorada.
- Figura 3.1* Modelo genético para vetas de Buchanan.
- Figura 4.1* Mapa geológico de Sombrerete.
- Figura 4.2* Sección idealizada que muestra los conjuntos de alteración en Sombrerete.
- Figura 4.3* Sección idealizada que muestra la distribución de los conjuntos de alteración en la veta Pabellón.
- Figura 4.4* Paragénesis de los eventos mineralizantes en Sombrerete.
- Figura 4.5* Mapa geológico de La Colorada.
- Figura 4.6* Sección idealizada que muestra distribución de los conjuntos de alteración en la veta No conocida.
- Figura 4.7* Paragénesis de los eventos mineralizantes en La Colorada.
- Figura 5.1* Tabla que muestra las características de los fluidos geotérmicos en Sombrerete.
- Figura 5.2* Tabla que muestra las características de los fluidos geotérmicos en La Colorada.
- Figura 5.3* Rangos de temperatura de algunos minerales de alteración encontrados en los sistemas hidrotermales fósiles de Sombrerete y La Colorada.
- Figura 5.4* Gráfica temperatura de homogeneización vs salinidad donde se observan los rangos de  $T_h$  y salinidad de las inclusiones fluidas de Sombrerete (1er. evento)
- Figura 5.5* Gráfica temperatura de homogeneización vs salinidad donde se observan los rangos de  $T_h$  y salinidad de las inclusiones fluidas de Sombrerete (2º evento)

- Figura 5.6 Gráfica temperatura de homogeneización vs salinidad donde se observan los rangos de  $T_h$  y salinidad de las inclusiones fluidas de Sombrerete (3º evento).*
- Figura 5.7 Diagrama de temperatura de homogeneización contra temperatura de fusión de las inclusiones fluidas pertenecientes al primer evento mineralizante en Sombrerete.*
- Figura 5.8 Diagrama de temperatura de homogeneización contra temperatura de fusión de las inclusiones fluidas pertenecientes al segundo evento mineralizante en Sombrerete.*
- Figura 5.9 Diagrama de temperatura de homogeneización contra temperatura de fusión de las inclusiones fluidas pertenecientes al tercer evento mineralizante en Sombrerete.*
- Figura 5.10 Gráfica temperatura de homogeneización vs salinidad donde se observan los rangos de  $T_h$  y salinidad de las inclusiones fluidas de La Colorada.*
- Figura 5.11 Diagrama de temperatura de homogeneización contra temperatura de fusión de las inclusiones fluidas pertenecientes a la muestra C-22.*
- Figura 5.12 Diagrama de temperatura de homogeneización contra temperatura de fusión de las inclusiones fluidas pertenecientes a la muestra C-09.*
- Figura 5.13 Diagrama de temperatura de homogeneización contra temperatura de fusión de las inclusiones fluidas pertenecientes a la muestra C-07.*
- Figura 6.1 Modelo de un sistema geotérmico típico de terrenos volcánicos silícicos.*
- Figura 6.2 Reconstrucción de los sistemas hidrotermales de Sombrerete y La Colorada.*

## RESUMEN.

El objetivo de este trabajo es la reconstrucción paleoambiental de los sistemas geotérmicos que originaron dos yacimientos epitermales. Las zonas de estudio son los distritos mineros de Sombrerete y La Colorada, ambos ubicados en la parte noroccidental del estado de Zacatecas, México.

En ambos distritos se hicieron estudios petrográficos y de difracción de rayos X, para identificar los minerales de alteración, posteriormente se caracterizaron las paragénesis de alteración y la relación espacio-temporal con respecto a los minerales de mena.

Existe un zoneamiento de las paragénesis de alteración el cual varía de acuerdo a la litología dominante. En Sombrerete se distinguen de superficie a profundidad las siguientes zonas de alteración:

Silicificación, alteración argílica avanzada, alteración argílica, alteración filica o propilitica y alteración potásica. La Colorada presenta en las vetas encajonadas en rocas volcánicas el siguiente zoneamiento; alteración potásica, argílica, alteración filica y alteración propilitica. Mientras que para la Chimenea Campaña se tiene del centro hacia el exterior; alteración potásica y argílica avanzada, alteración argílica y alteración filica.

La alteración ácido-sulfatada que presentan las rocas no está asociada a los procesos de mineralización, sino a la oxidación de  $H_2S$  que escapó por los conductos (fallas y chimeneas) durante la actividad hidrotermal.

De acuerdo a las paragénesis de alteración y a las temperaturas reportadas de inclusiones fluidas, se determinaron las características químicas de los fluidos hidrotermales. Además el análisis de los datos ya existentes de inclusiones fluidas muestra que la depositación de sulfuros está relacionada con procesos de mezcla (dilución) y de ebullición de los fluidos hidrotermales.

Tomando en cuenta las paragénesis minerales y el ambiente tectónico en que se presentan los yacimientos, ambos son clasificados como sistemas hidrotermales de baja sulfidación.

## INTRODUCCION

### 1.1 Objetivos

El presente trabajo tiene como objetivos:

1º La determinación de los patrones de alteración hidrotermal presentes en los distritos de Sombrerete y La Colorada, así como su distribución espacio-temporal; 2º El establecimiento de las relaciones paragenéticas entre los minerales de alteración y los minerales de mena y, finalmente; 3º La reconstrucción de los sistemas hidrotermales que dieron origen a ambos distritos.

### 1.2 Localización y vías de acceso

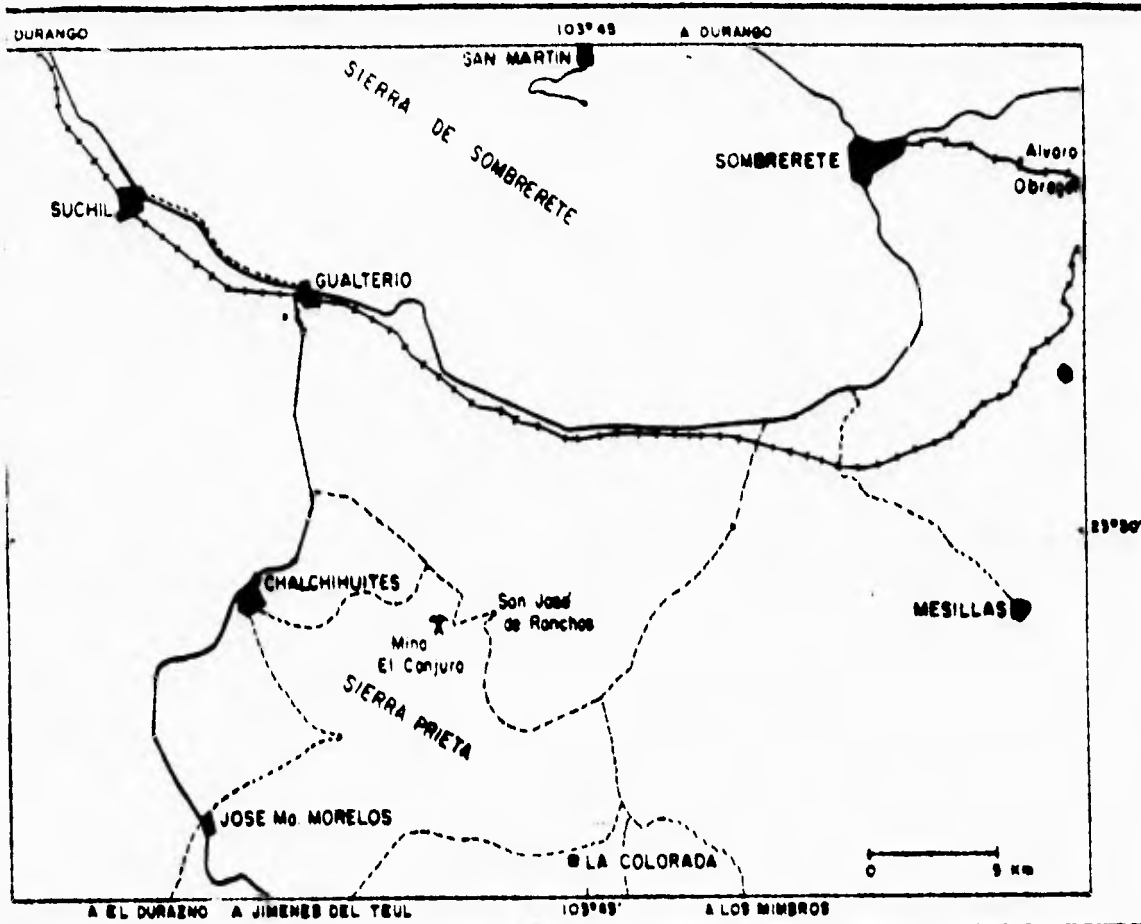
Los distritos mineros de Sombrerete y La Colorada se localizan en la parte noroccidental del estado de Zacatecas cerca del límite con el estado de Durango, a 90.4 km y 94.4 Km de distancia en línea recta respectivamente de la Ciudad de Fresnillo (fig.1.1). Las coordenadas geográficas del Distrito de Sombrerete son 103°37' de longitud W y 23°38' de latitud N, mientras que para el Distrito de La Colorada son 103°45' longitud W y 23°23' latitud N.

A Sombrerete se puede llegar por la carretera N° 45, o por tren. Mientras que para La Colorada, se toma la carretera N° 45, desviándose a la altura de Sombrerete y tomando la carretera pavimentada a Jiménez de Teúl, a 15 kms. aproximadamente se desvía uno por el camino de terracería que conduce a Corrales, 18 kms más adelante se toma otro camino de terracería por 5 kms que llega a La Colorada.

### 1.3 Antecedentes

Entre los trabajos realizados en las áreas de interés, el más antiguo es el de Cervantes (1966) en el cual hace una descripción de los depósitos minerales de la Colorada y su beneficio. Posteriormente Albinson (1985), estudia el zoneamiento térmico y lo relaciona con la distribución mineral en los yacimientos epitermales de Sombrerete, Fresnillo y La Colorada.

Otro trabajo importante es la tesis de Soto (1987) donde propone para La Colorada, la génesis de los cuerpos mineralizados. Este autor determina las relaciones espacio-temporales entre las chimeneas brechadas y los sistemas de vetas del distrito. En 1987, Albinson hace la reconstrucción geológica de las paleosuperficies en los distritos de Sombrerete, Fresnillo y La Colorada. En ese mismo año evalúa el potencial económico del Cordón del Artesano (distrito de Sombrerete). Los resultados obtenidos los reporta en el



"EXPLICACION"

- POBLADO PRINCIPAL
- POBLADO
- CARRETERA
- FERROCARRIL
- ..... BRECHA
- ..... TERRACERIA

Figura 1.1 Plano de localización.

informe geológico hecho para la Compañía Minera Grupo Catorce (GRUCAT). En este trabajo junto con Soto, Albinson define de manera informal varias unidades volcánicas. Más tarde Rentería (1992) como tema de su tesis de maestría, hace un estudio metalogénico de la mina de Sombrerete. En su trabajo además de determinar la paragénesis mineral, hace la interpretación de la evolución del sistema hidrotermal basado en la reconstrucción geológica y en estudios de mineralogía, isotopía e inclusiones fluidas.

#### **1.4 Método de trabajo**

Para cumplir con los objetivos y metas propuestos en el punto 1.1, el trabajo de tesis se dividió en las siguientes etapas:

##### **Recopilación bibliográfica**

En esta etapa se recopilaron los trabajos de investigación existentes, los reportes de los estudios hechos por las compañías mineras Sombrerete y Victoria Eugenia, así como las cartas topográficas elaboradas por INEGI, escala 1:50,000.

##### **Viaje de reconocimiento**

El primer viaje a las zonas de interés consistió en un recorrido de superficie y toma de muestras en los afloramientos con presencia de alteración hidrotermal, en ambos distritos. También se efectuaron varias visitas a las minas, durante las cuales se hizo una recolección de muestras en los niveles en operación.

##### **Análisis petrográfico**

Posteriormente se elaboraron láminas delgadas de las muestras colectadas a las cuales se les hizo un análisis petrográfico para identificar los minerales de alteración y determinar las relaciones paragenéticas entre éstos y con la mineralización. Además se hizo una estimación modal (conteo de puntos) para obtener la intensidad de alteración de la roca encajonante.

##### **Verificación de campo**

Ya procesados los datos y elegidas ciertas zonas de interés se llevó a cabo un viaje de verificación y muestreo.

##### **Difracción de rayos X.**

A todas las muestras colectadas se les mandó analizar por difracción de rayos X, para la identificación de los minerales originados por la alteración hidrotermal, así como tratamiento con etilenglicol y calentamiento de las muestras a 550°C para la identificación de minerales arcillosos.

### Reporte final

Finalmente se presentan los datos ya interpretados y las conclusiones.

## **1.5 Clima**

Sombrerete y La Colorada presentan un clima templado subhúmedo, con lluvias de verano y un porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10.2 mm. El rango de precipitación media anual fluctúa entre 600 y 700 mm; la temperatura media anual es menor de 18°C; está asociado a comunidades vegetativas como el matorral subtropical, el chaparral y el pastizal.

La máxima ocurrencia de lluvia se registra en junio, con un valor que oscila entre 130 y 140 mm. En marzo y abril se presenta la menor incidencia, con un valor inferior a 10 mm. La temperatura máxima fluctúa entre 21 y 22°C, en el mes de junio, la mínima corresponde a enero, con un valor entre 10 y 11°C.

La frecuencia de heladas es de 0 a 60 días al año. Las heladas se presentan en los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero; la máxima incidencia se registra en enero y diciembre; la primera helada se registra habitualmente en septiembre y la última en mayo.

## **1.6 Flora y fauna**

La presencia de las diferentes comunidades vegetales está determinada fundamentalmente por el tipo de clima y de suelo que tiene la zona; en la subprovincia estos factores se traducen en el predominio de matorral desértico micrófilo, que se encuentra distribuido de los 2050 a los 2540 m.s.n.m y cuyos elementos dominantes son: huizache (Acacia spp), nopal duraznillo (Opuntia leucotricha), mezquite (Prosopis spp) y nopal (Opuntia spp) en el estrato superior; y pasto (Bouteloua spp), hierbas anuales, pasto (Muhlenbergia spp), hojaseñ (Flourensia spp), encino (Quercus spp) y enebro (Juniperus spp), en el estrato inferior. En segundo término se encuentra el bosque de encino, distribuido de los 2160 a 2650 m.s.n.m., en tres sistemas de topoformas. Se presentan además bosque de pino, matorral crasicale, chaparral y pastizal natural.

La fauna está representada por especies silvestres de jabalí, liebre, tejón, correcaminos, guajolote, vibora de cascabel y jabalí. Aunque son más importantes por su abundancia las especies introducidas por el hombre tales como el ganado porcino, ovino y bovino.



## GEOLOGIA GENERAL

### 2.1 Fisiografía

El distrito minero de La Colorada está comprendido dentro de la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Occidental, en la Subprovincia Sierras y Llanuras de Durango. Mientras que el distrito minero de Sombrerete se encuentra dentro de la Provincia Fisiográfica de la Mesa Central, Subprovincia de Sierras y Llanos del Norte (INEGI, 1981).

### 2.2 Hidrografía

Según la clasificación de regiones hidrológicas (INEGI, op cit.), los municipios de Sombrerete y La Colorada están dentro de la Región Hidrológica "Ríos Presidio a San Pedro" (N911). En la cuenca del río San Pedro (11A), subcuenca del Río Poanas (11AD). La única corriente de importancia que pasa por esta zona es el Río San Antonio, el cual es alimentado por una serie de arroyos intermitentes.

En La Colorada los arroyos circundantes son: A. la Colorada, A. Candelaria, A. Cerro la Colorada y A. el Rucio. En Sombrerete: A. Presa Grande, A. Tinaja del Muerto, A. Gatuña y A. los Países. En esta área se localiza la presa El Maestranzo o Los Coroneles, y es la única de importancia en la región. Está ubicada en el municipio de Chalchihuites, sobre el arroyo Las Flores y su construcción se terminó en septiembre de 1980.

### 2.3 Geomorfología

La geomorfología en estos distritos, está representada por los sistemas de topofomas denominados sierras altas, sierras altas con mesetas, superficie de meseta pequeña con cañadas, piso amplio de valle, lomerío, lomerío con bajada, bajada aluvial y bajada aluvial con lomeríos (INEGI, op cit.).

La expresión del relieve está íntimamente relacionada con los distintos paquetes litológicos. Las rocas volcánicas por ser más resistentes a la erosión forman sierras alargadas de superficie plana, o grandes cerros de pendientes abruptas y grandes mesas de ignimbritas y riolitas disectadas por cañones profundos. Por otra parte las rocas sedimentarias afloran como planicies extensas o como pequeñas lomas de escasa altura y con pendientes suaves.

Las sierras alargadas se caracterizan por tener una orientación noroeste-sureste y estar separadas por extensos valles intermontanos. Como ejemplo está el Cordón del

Artesano y la Sierra Prieta con elevaciones máximas de 2580 y 3020 msnm respectivamente. La Sierra Prieta, en cuyas faldas se localiza el distrito minero de La Colorada está limitada al oeste por el gran valle de Chalchihuites y Jiménes de Teúl, el cual posiblemente define un graben entre la Sierra Prieta y la Sierra Madre Occidental (Soto, 1987). La parte alta de la sierra es de composición traquítica, con una topografía abrupta y numerosos cantiles, cerros alargados cuyas cimas son muy estrechas. En las faldas de la sierra afloran rocas de composición riolítica que dan origen a cerros y lomeríos con pocos metros de altura que presentan pendientes menos abruptas, así como extensas mesas cuya superficie es casi plana; éstas se encuentran bordeadas por cantiles abruptos producidos por la disección de arroyos que son profundos y estrechos.

Las rocas sedimentarias cretácicas afloran en una franja angosta entre La Colorada y el valle de Chalchihuites en forma de cuchilla que abre hacia el valle. Están cubiertas al oriente por conglomerados calcáreos y traquitas, al poniente presentan un contacto lineal y cortante con las riolitas (Soto, op cit.). Las rocas sedimentarias se presentan como pequeños cerros de pendientes suaves.

El distrito minero de Sombrerete se localiza en un pequeño valle donde afloran calizas, areniscas y lutitas calcáreas, que a veces forman pequeños promontorios con pocos metros de alto y pendientes muy suaves. El distrito minero se encuentra limitado al sur por El Cordón del Artesano y al norte por el Cerro del Sombrerete ambas topofomas constituidas por una serie de flujos lávicos y piroclásticos de composición latítica y andesítica y cuyas alturas respectivamente son de 2580 y 2700 msnm. Los flujos piroclásticos soldados de composición ácida (riolitas, latitas) son más resistentes a la erosión y dan lugar a relieves con fuertes pendientes. Intercalados a estos flujos existen rocas tobáceas más deleznales y de composición intermedia (andesitas) que originan pendientes más suaves (Albinson, 1987a).

Rodeando a estas prominencias topográficas se encuentra una serie de grandes valles intermontanos como son; el valle de San José y Buena Vista al norte, el valle de Suchil al oeste, el valle de Felipe de Angeles al sur y el valle de Ignacio Zaragoza al este.

#### 2.4 Estratigrafía

Ambos distritos presentan un paquete de rocas sedimentarias cretácicas en discordancia angular con un paquete volcánico terciario cuya composición varía de intermedia a ácida (fig.2.1 y fig.2.2).

### Distrito de Sombrerete

El paquete sedimentario lo componen de acuerdo a Albinson, (1987a) y Rentería (1992), del más antiguo al más reciente las siguientes formaciones (fig.2.1):

Formación Cuesta del Cura (Albiano-Cenomaniano). En el área de estudio aflora un paquete de calizas con ocasional presencia de lentes de pedernal en estratos de 10 a 40 cm de espesor y escasos horizontes de lutitas y areniscas interestratificadas. Rentería (op.cit.) pone en duda que este paquete pertenezca a la Fm. Cuesta del Cura debido a su posición estructural. Ya que están sobreyaciendo a rocas más jóvenes pertenecientes a la Formación Caracol-Indidura.

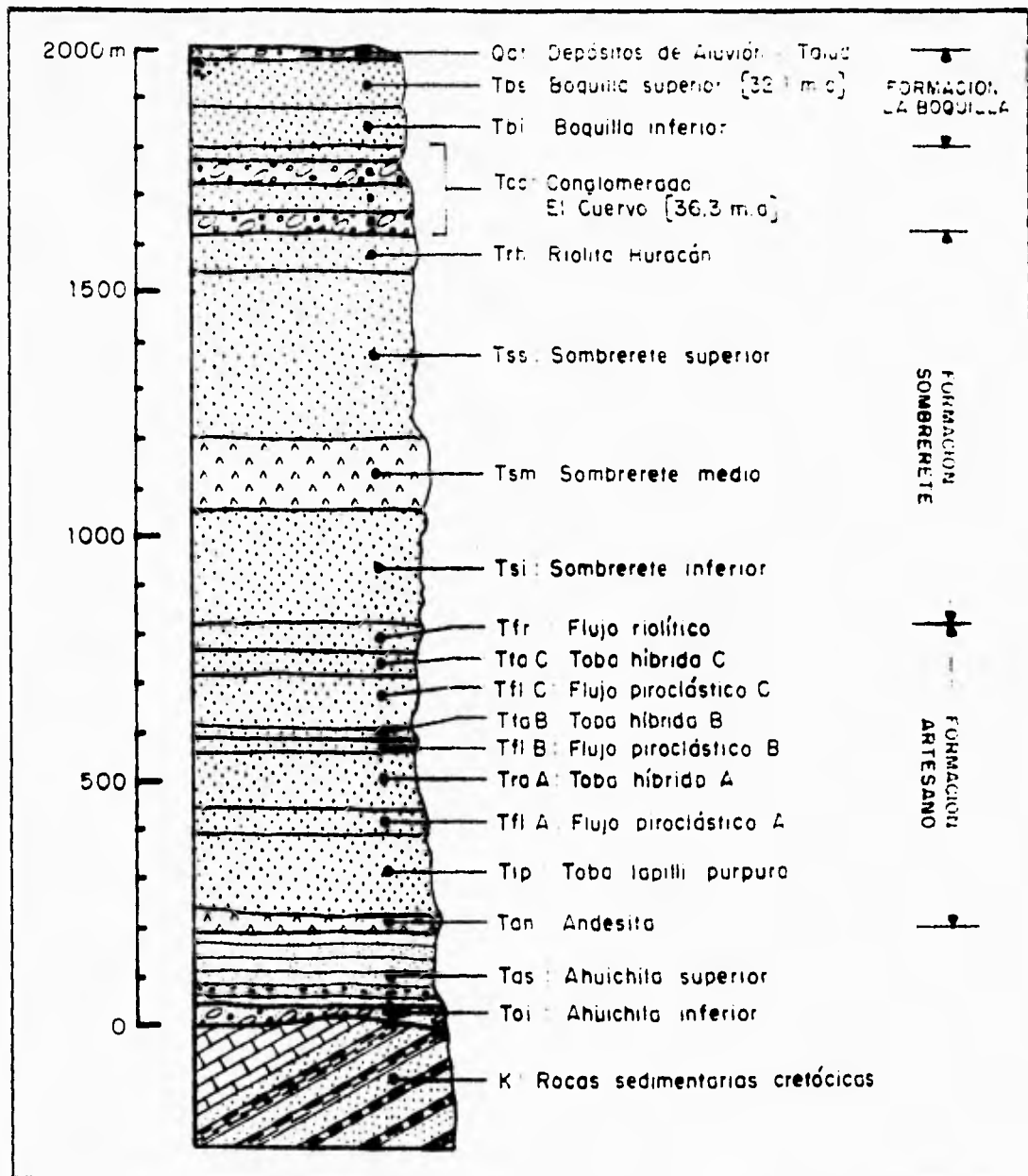
Formaciones Caracol-Indidura (Cenomaniano Superior-Santoniano) afloran al este y sureste de Sombrerete, subyaciendo discordantemente al paquete volcánico. Están constituidas por lutitas negras carbonosas con intercalaciones de lutitas y areniscas calcáreas, y algunos paquetes de areniscas formadas por terrígenos volcánicos.

Formación Ahuichila (Cretácico Superior-Eoceno). En el área de estudio se presenta como cuerpos lenticulares sobreyaciendo en discordancia angular a las rocas cretácicas. Esta formación tiene dos miembros que presentan marcadas diferencias por lo que se ha subdividido en Ahuichila Inferior y Ahuichila Superior:

a) Ahuichila Inferior (Tai).- Consiste en un conglomerado mal clasificado, integrado por fragmentos de calizas, escaso pedernal negro y algunos fragmentos de andesita propilitizada. El tamaño de los fragmentos varía de 4 mm a 25 cm, la matriz es menor al 10 %. Los fragmentos varían de subangulosos a redondeados, predominando los últimos. El espesor máximo de este miembro es de 40 m.

b) Ahuichila Superior (Tas).- Sobreyace concordantemente a los conglomerados calcáreos. En el área del Cerro de Sombretillo aflora una secuencia de 150 m de una secuencia de rocas lodosas y conglomerados. Los estratos de conglomerados están constituidos por fragmentos de lutitas y de calizas, todos ellos con una redondez que varía de subangulosa a subredondeada, el espesor de estas capas es de 10 a 30 cm. Los conglomerados disminuyen hacia la cima y aparecen las rocas lodosas, las cuales están formadas por partículas del tamaño de limos que presentan coloración rojiza, y presentan intercalaciones de tobas de grano fino.

La secuencia volcánica es la siguiente según Albinson (1987a) y Rentería (1992):



**Figura 2.1** Columna estratigráfica de Sombreroete (tomada de Rentería, 1992).

Formación Artesano. Llamada de manera informal Grupo Artesano por Albinson (1987a) y posteriormente, también de manera informal Fm. Artesano por Renteria (op cit), la constituyen 9 paquetes volcánicos, cuyos nombres fueron dados de manera informal por Albinson (op.cit.) compuestos por andesitas, latitas y riolitas. Las nueve unidades son de la más antigua a la más reciente: andesitas, tobas lapilli púrpura, flujo latítico A, toba andesítica A, flujo latítico B, toba andesítica B, flujo latítico C, toba andesítica C y flujo riolítico.

Formación Sombreroete. Dividido en 4 miembros:

Miembro Sombreroete Inferior.- En este miembro se agrupa una secuencia compleja de paquetes volcánicos de composición riolítica, latítica y andesítica, con texturas diversas.

Miembro Sombreroete Medio.- Este nombre se le dió a un paquete lenticular de derrames andesíticos con textura porfídica.

Miembro Sombreroete Superior.- Paquete de tobas líticas y de cristales, con numerosos horizontes de brecha volcánica de fragmentos riolíticos.

Miembro Riolitas Huracán. Las rocas de este miembro son depósitos piroclásticos riolíticos, que contienen cristales de cuarzo angulosos y fragmentos de pómez.

Formación El Cuervo. Se encuentra integrada por conglomerados en la base y tobas en la cima, su espesor varía de 0 a 180 m. Los conglomerados están formados por fragmentos riolíticos que varían de 0 a 40 cm y provienen de la formación Sombreroete, principalmente del miembro Riolita Huracán. Ocasionalmente exhibe fragmentos de andesitas, presenta un matriz arcillo-arenosa menor al 15 %. Los fragmentos están mal clasificados y varían de angulosos a subredondeados.

Formación La Boquilla. La formación Sombreroete incluyendo los remanentes de Riolitas Huracán, están separados de la formación La Boquilla por un periodo de erosión significativo, que originó los conglomerados de la formación El Cuervo. La formación La Boquilla se divide en dos miembros llamados informalmente Boquilla Inferior y Boquilla Superior, ambos miembros constituidos por rocas piroclásticas.

a) Boquilla Inferior (Tbi).- La litología de este miembro consiste en una serie de flujos piroclásticos de color rosado, con un marcado lineamiento de flujo originado por la deformación de los fragmentos líticos de pómez, con cristales de cuarzo, plagioclasa y sanidino, el tamaño de todos ellos varía de 0.3 a 1 mm.

Algunos horizontes piroclásticos, en donde predominan los fragmentos líticos, se presentan de manera esporádica en la base de la columna y se incrementan hacia la cima. El espesor varía de 50 a 80 m, hacia el norte se adelgaza mientras que hacia el sur el espesor se incrementa. Las relaciones estratigráficas de Boquilla inferior son concordantes con las rocas que la encajonan, sus principales afloramientos se encuentran hacia el sur y suroeste de la zona de estudio.

b) Boquilla Superior (Tbs).- El miembro Boquilla Superior corresponde a la cima de la columna estratigráfica descrita para el área de Sombrerete.

Esta litología sobreyace de manera concordante a Boquilla Inferior, presentando en su base un paquete de tobas poco soldadas, la restante litología pertenece a un flujo piroclástico soldado con un alto contenido de cristales inmersos en una matriz vítrea fluidal, los minerales observados son cuarzo, plagioclasa, sanidino, hornblenda y biotita, el tamaño de los cristales varía de 0.5 a 3 mm. El espesor promedio es de 100 m, presentando un mayor espesor hacia el sur.

Sus afloramientos se extienden desde el sur del Cordón del Artesano hasta la Sierra de Chapultepec, la cual dista 10 km al sur del área de estudio.

### Distrito de La Colorada

De acuerdo a Soto (1987), el paquete sedimentario está compuesto por las siguientes formaciones (fig.2.2):

Fm. Cuesta del Cura (Albiano-Cenomaniano). Aflora en el área de Recompensa y se extiende por varios kilómetros hacia el noroeste, está constituida por calizas de origen marino con lentes y bandas de pedernal, y presenta algunos horizontes arcillosos. Estas rocas han sufrido deformaciones intensas.

Formación Indidura (Cenomaniano-Turoniano Superior). Los afloramientos se inician hacia el este del área de Recompensa, formada por areniscas, lutitas y limolitas intercaladas con estratos de calizas arcillosas, sobreyacen en concordancia a la Formación Cuesta del Cura y son cubiertas en la cercanía de la Mina Candelaria por rocas más jóvenes.

Formación Ahuichila (Eoceno). Las rocas que constituyen esta formación afloran como una franja angosta que bordea y delimita a las rocas cretácicas al este y noreste sobre las que descansa discordantemente. Su litología consiste en un conglomerado de cantos de caliza y pedernal negro, su matriz es escasa y de textura arenosa. No se observa el miembro

inferior que aflora en Sombrerete. El origen de estas rocas es continental.

El paquete volcánico lo forman según Soto (1987):

a) Un paquete de rocas traquíticas, con un espesor mínimo de 580 m y tentativamente correlacionable con la Serie Volcánica Inferior de la Sierra Madre Occidental (Fredickson, 1974). Las traquitas descansan en concordancia transicional sobre los conglomerados calcáreos. En la base del paquete la textura es volcanoclástica y se intercalan algunos lentes de conglomerados calcáreos, que hacia la cima cambian a depósitos piroclásticos. Estas rocas afloran ampliamente en todo el distrito y en ellas se encajona gran parte de las vetas y brechas mineralizadas del área de Candelaria y Campaña.

b) Un conglomerado traquítico con matriz areno-limosa de espesor reducido, localizado en la parte sur del distrito, sobreyace en discordancia a las traquitas y presenta intensa argilización y silicificación.

c) Rocas riolíticas en discordancia sobre las traquitas o sobre los conglomerados, se extienden hacia el sur conformando la mayor parte de los afloramientos de la Sierra Madre Occidental. La textura del paquete riolítico es de toba de cristales y flujos piroclásticos.

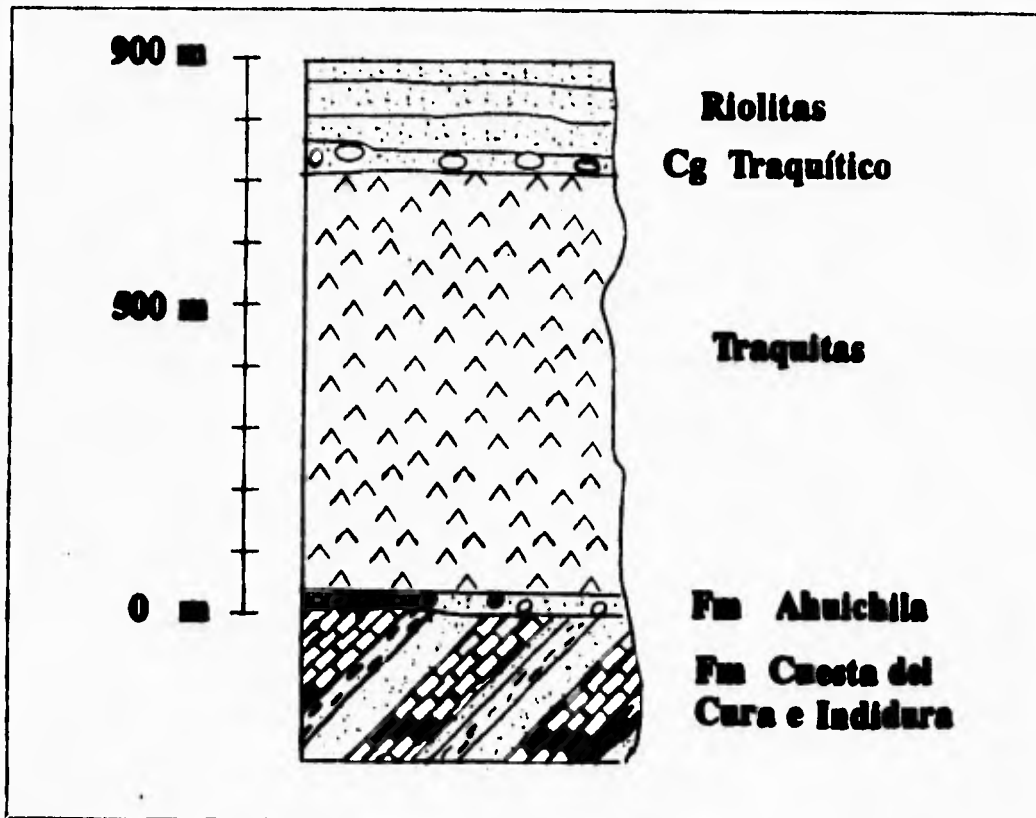
## 2.5 Geología estructural

### Sombrerete

Las rocas sedimentarias cretácicas muestran evidencias de una fuerte deformación que se observa tanto en superficie como en las obras mineras subterráneas, ya que muestran una gran cantidad de pliegues de pequeña escala y fallas de poco desplazamiento (Rentería, 1992). Esta deformación se asocia a una fuerte compresión originada durante la Orogenia Laramide. Durante el terciario prevalecieron esfuerzos tensionales que originaron el fallamiento en bloques y el basculamiento de estos hacia el suroeste (Albinson, 1987a). Las estructuras más importantes son las fallas Huracán, Alvaro Obregón y de Wisser, todas ellas con una orientación NW 50°-60° SE con 60° de inclinación SW (Rentería, 1992).

### La Colorada

Al igual que en Sombrerete, la Colorada muestra una fuerte deformación representada por el fracturamiento y plegamiento del paquete sedimentario cretácico, el cual muestra pliegues



**Figura 2.2** Columna estratigráfica de la Colorado (fuente Soto, 1987).



cuyos planos axiales se orientan al noreste-suroeste (Soto, 1987). También hay evidencias de esfuerzos distensionales orientados al noroeste-sureste ocurridos posteriormente al depósito de traquitas y anteriores a las riolitas, los cuales originaron un sistema de fallas conjugadas de rumbo noreste-suroeste donde se alojaron las vetas del distrito (Soto op cit.). Un desplazamiento máximo de 220 m ocurrió en la falla No Conocida, que es la falla más persistente del Distrito, ya que tiene de 4 a 5 km de longitud (Andrade et al, 1988). El movimiento sobre el plano de las fallas basculó los paquetes de roca 20° a 30° hacia el noreste (Andrade, op cit.)

## **ALTERACION HIDROTHERMAL EN CAMPOS GEOTERMICOS Y YACIMIENTOS EPITERMALES**

### **3.1 Clasificación de yacimientos epitermales.**

El nombre yacimiento epitermal fué asignado por Lindgren (1933) para describir aquellos depósitos metálicos (Au, Ag, Pb, Zn, Cu) hidrotermales los cuales exhiben texturas que sugieren temperaturas de formación de 50 a 200°C y profundidades menores a 2 Km. En la actualidad los estudios de inclusiones fluidas y alteración hidrotermal indican que estos depósitos se forman a más de 300°C (Simmons, 1994).

Los estudios hechos por Hayba y colaboradores (1985), mostraron que existen dos tipos de yacimientos epitermales a los cuales llama **adularia-sericita** y **ácido-sulfatados**. Esta subclasificación la hacen de acuerdo a la mineralogía de las vetas así como a la mineralogía de alteración. La mineralogía de los depósitos tipo adularia-sericita esta caracterizada por la presencia de vetas de adularia y de sericita y por la ausencia de la paragénesis enargita + pirita ± covelita. En este tipo de depósitos predomina la alteración sericítica. Los depósitos ácido-sulfatados están caracterizados por la ocurrencia de vetas con presencia de enargita + pirita ± covelita. La adularia y la clorita están ausentes o rara vez presentes. La alteración asociada con la mineralización es una paragénesis argílico avanzada.

Posteriormente Berger y Henley (1989) modifican el nombre de los yacimientos anteriores y los llaman **tipos adularia-sericita** y **alunita-caolinita** (±pirofilita). Estas dos subclases son también conocidas como **tipos de baja y de alta sulfidación** respectivamente (Hedenquist, 1987; White y Hedenquist, 1990).

Los términos **baja y alta sulfidación** se usan para indicar el estado de oxidación-reducción (redox) del azufre presente en el fluido mineralizante:

**Baja sulfidación** (baja oxidación del  $S_2$ ) .- El azufre en los fluidos está en forma de sulfuro ( $H_2S$ ) con una valencia de -2. Esto es característico de fluidos hidrotermales con un pH de casi neutro a neutro.

**Alta sulfidación** (alta oxidación del  $S_2$ ) .- El azufre de los fluidos está en forma de sulfato ( $SO_2$ ) con una valencia de +4; esto es característico de fluidos con un pH ácido.

Los yacimientos epitermales son producto de la actividad hidrotermal relacionada con vulcanismo a poca profundidad (<2km.) y bajas temperaturas (50°-300°C). La mayoría de los depósitos se presentan como relleno de vetas silíceas.

fisuras irregularmente ramificadas, enrejado de vetillas (stockwork), chimeneas brechadas, relleno de vesículas y diseminaciones (Gilbert & Park, 1986).

### 3.2 Alteración Hidrotermal.

La alteración hidrotermal es un proceso que ocurre como resultado de la interacción agua-roca. La extensión de la alteración (o reacción) depende de la temperatura existente en el sitio de alteración, la duración del proceso de alteración, de la porosidad y de la permeabilidad de la roca encajonante.

Existe un amplio rango de minerales hidrotermales reconocidos en campos geotérmicos activos, algunos son raros como la buddingtonita, otros, por ejemplo la aegirina y la lepidolita no se espera que ocurra en estos ambientes. Los más comunes son:

#### Carbonatos

Calcita, aragonita, siderita

#### Sulfatos

Anhidrita, alunita, natroalunita, barita

#### Sulfuros

Pirita, pirrotita, marcasita, esfalerita, galena, calcopirita

#### Oxidos

Hematita, magnetita, leucoxeno, diáspora

#### Fosfatos

Apatita

#### Haluros

Fluorita

#### Nesosilicatos

Titanita, granate, epidota

#### Inosilicatos

Tremolita, actinolita

#### Filosilicatos

Illita, biotita, pirofilita, clorita, grupo del caolín, motmorillonita, prehnita

#### Tectosilicatos

Adularia, albita, cuarzo, cristobalita, mordenita, laumontita, wairakita.

En yacimientos epitermales la alteración de la roca encajonante ha sido reconocida durante muchos años como una herramienta valiosa en la exploración. Los halos de alteración están más ampliamente distribuidos y son mucho más fáciles de localizar que los cuerpos mineralizados relacionados a ellos. En general el análisis de los minerales de alteración es un medio sumamente valioso tanto en la exploración, como para entender varios aspectos de la ocurrencia y génesis de los yacimientos minerales (Gilbert & Park, 1986).

### 3.3 Intensidad y Rango de Alteración

La intensidad de alteración,  $I_a$  (Browne, op cit.), es una medida de cuánto ha reaccionado una roca para producir nuevos minerales. Por ejemplo una unidad de volumen de roca que no ha sido afectada por soluciones hidrotermales tiene intensidad de alteración igual a cero ( $I_a = 0.00$ ), mientras que otra en la cual todas las fases primarias han sido reemplazadas tiene una intensidad de alteración del 100% (ejemplo  $I_a = 1.00$ ). La intensidad de alteración puede ser estimada por un contador de puntos con un microscopio o usando una técnica de difracción de rayos x semicuantitativa. La intensidad no tiene que ver con la identidad de los minerales formados sólo con su abundancia total.

El rango de alteración, depende de la identidad de los nuevos minerales y está basado en terminos de su significado en condiciones de superficie. Es un parámetro menos objetivo y empírico que la intensidad y deriva del examen microscópico y macroscópico asistido por difracción de rayos x, el análisis térmico diferencial, o algunas otras técnicas instrumentales. La adularia, por ejemplo, tiene un alto rango de alteración considerando la permeabilidad (Browne, op cit.) y la epidota un alto rango de temperatura. Es posible, por lo tanto obtener rocas que tienen una mineralogía sintomática de alto rango (con respecto a la permeabilidad o a la temperatura) pero baja intensidad (en zonas impermeables con alta temperatura) y otras de bajo rango pero alta intensidad, generalmente donde prevalecen condiciones de alta permeabilidad y baja temperatura.

### 3.4 Formas de alteración hidrotermal.

Deposición directa.- Este tipo de alteración es muy común, y la mayoría de los minerales encontrados en campos geotérmicos pueden depositarse directamente de la solución, siempre y cuando la roca huésped presente caminos a lo largo de los cuales los fluidos mineralizados puedan moverse. Estos caminos pueden ser juntas, fallas, fracturas hidráulicas, inconformidades, cavidades, poros y fisuras. Minerales como la clorita, illita, adularia, pirita, pirrotita, hematita, wairakita, fluorita, laumontita, mordenita, prehnita y epidota, se han observado en lugares donde solamente pudieron haber sido depositados directamente de un fluido. El cuarzo, la calcita y la anhidrita forman vetas y relleno de cavidades. En chimeneas y canales de descarga también se depositan calcita, aragonita y sílice.

Reemplazamiento.- Muchas rocas contienen minerales primarios los cuales son inestables en un ambiente geotérmico, y estos

tienen tendencia a ser reemplazados por nuevos minerales que son estables, o por lo menos metaestables bajo las nuevas condiciones. El grado de este reemplazamiento es altamente variable y depende de la permeabilidad. Donde el reemplazamiento no es completo, el equilibrio fluido-mineral no es alcanzado y las reacciones son preservadas o congeladas en núcleos, capaces de ser vistas donde la intensidad es menor a 1.00. En reservorios compuestos por rocas volcánicas es generalmente fácil distinguir entre los minerales primarios y secundarios (hidrotermales) pero es muy difícil donde se presentan rocas sedimentarias o metamórficas de bajo grado, la razón es que muchos de los minerales primarios formadores de estas rocas (ej. calcita, cuarzo, feldspatos, prehnita, illita, epidota, etc...) son además estables en ambientes geotérmicos, donde las aguas alcalino-cloruradas son comunes.

Disolución.- Este proceso tiene lugar en las márgenes del campo geotérmico o más allá de estas márgenes. Se presenta donde el vapor condensado, acidificado por la oxidación del  $\text{CO}_2$  y del  $\text{H}_2\text{S}$  ataca a las rocas disolviendo los minerales primarios, sin que se lleve a cabo un reemplazamiento en los vacíos producidos.

### **3.5 Paragénesis de alteración hidrotermal**

Las principales paragénesis de alteración y asociaciones encontradas en rocas aluminosilicatadas se describen a continuación.

#### Alteración Potásica

La alteración potásica es especialmente común e importante en porfidos y sistemas epitermales, y ocurre en zonas de alta temperatura (Pirajno, 1992). Los minerales característicos de esta alteración son feldespato potásico y biotita en porfidos, y adularia en sistemas epitermales. La alteración potásica generalmente está acompañada por sulfuros (calcopirita, pirita, molibdenita) y está formada como reemplazamiento de las plagioclasas y silicatos máficos, a temperaturas de 600-450°C. Las paragénesis comunes son; feldespato potásico-biotita-cuarzo, feldespato potásico-clorita, feldespato potásico-biotita-magnetita. Así como cantidades variables de otros minerales tales como albita y sericita, generalmente con trazas de algunas sales de calcio características como minerales accesorios; anhidrita, apatito, fluorita, calcita o calcita de sideromagnesio, apatito y ocasionalmente rutilo.

### Alteración Filica

Es así nombrada por el predominio del filosilicato sericita. Esta alteración está tipificada por la paragénesis cuarzo, sericita, pirita. Las fases minerales generalmente asociadas son feldespato potásico, caolinita, calcita, biotita, rutilo, anhidrita y apatito. Esta alteración grada al tipo potásico por el incremento en las cantidades de feldespato potásico y/o biotita y al tipo argílico por el incremento en las cantidades de los minerales arcillosos. La alteración filica es muy común en sistemas hidrotermales.

### Alteración Propilitica

La alteración propilitica está caracterizada por la adición de  $H_2O$  y  $CO_2$ , y localmente  $S$ . Los minerales típicos son epidota, clorita, carbonatos, albita, feldespato potásico y pirita. En algunas zonas es común encontrar sericita, óxidos de hierro, montmorillonita y zeolitas. La alteración propilitica tiende a ser más pervasiva hacia las zonas internas de un depósito epitermal.

### Alteración Argilica

La alteración argilica está caracterizada por la formación de minerales arcillosos debido al intenso metasomatismo del  $H^+$  (disolución ácida), a temperaturas entre 100 y 300°C. La silicificación es importante en este tipo de alteración y la asociación dominante comprende cuarzo, caolinita, montmorillonita y sericita.

La disolución de los aluminosilicatos puede resultar en un enriquecimiento de sílice, de tal manera que la alteración argilica puede gradar a material rico en sílice. Los minerales arcillosos reemplazan principalmente a las plagioclasas y a los silicatos máficos (hornblenda, biotita). Además el alofano reemplaza a las fases aluminosilicatadas. El feldespato potásico se reporta como una fase metaestable.

### Alteración Argilica Avanzada

La alteración argilica avanzada es debida al intenso ataque ácido, y más o menos completa la disolución de iones alcalinos. Hay una total destrucción de las fases de silicatos máficos y feldespatos. La dickita, caolinita, pirofilita, barita, alunita y diáspora son fases minerales típicas de este tipo de alteración. Además pueden presentarse sulfuros, topacio, turmalina y arcillas amorfas. Los sulfuros presentes incluyen covellita, digenita y enargita. La disolución a más de 300°C produce un conjunto que contiene pirofilita, andalucita, topacio, cuarzo y pirita. Otras asociaciones minerales pueden incluir cantidades menores de sericita, diáspora, caolinita, rutilo, anhidrita, corindón, zunyita, durmortierita y cloritoide. Las arcillas amorfas (ej. alofano) son comunes en un

ambiente supergénico). La alteración argílica avanzada es encontrada en pórfidos, en las zonas internas de vetas (de metales base y metales preciosos) hidrotermales, y principalmente en sistemas epitermales de alta sulfidación. La alteración ácido-sulfatada (o alunitica) es parte de la alteración argílica avanzada. Los minerales del grupo de la alunita incluyen alunita, natroalunita (el Na reemplaza al K), y jarosita (el Fe reemplaza al Al). Acompañando a éstos minerales están la caolinita, sericita, pirita, barita, hematita, calcedonia y ópalo.

### **3.6 Alteración sub-superficial y superficial**

La alteración superficial refleja la composición de los fluidos hidrotermales. Los manantiales alcalino-clorurados generalmente depositan sínter de sílice amorfo y los manantiales bicarbonatados generalmente depositan calcita o aragonita. La mineralogía superficial común producida por gases volcánicos ácidos y condensados es mucho más complicada, pero generalmente incluye sulfatos (especialmente alunita, natroalunita y yeso), caolin, pirita, óxidos de hierro, sulfuros, mercurio, sulfuros de arsénico y residuos silíceos.

#### Sínter de sílice y residuos silíceos.

El término "Sínter de sílice" se usa para describir los depósitos silíceos formados por el enfriamiento del fluido hidrotermal al llegar a la superficie. Es un proceso distinto a la silicificación de una roca, ya que éste último toma lugar principalmente en la superficie. La formación de sínter también es diferente a la formación de los residuos silíceos.

#### **Sínter de sílice**

Estos depósitos generalmente se forman debido al enfriamiento de aguas alcalino-cloruradas con un pH cercano al neutro, también precipita de aguas alcalino-cloruradas mezcladas con aguas ácido-sulfatadas. El sínter es amorfo e hidratado pero puede cristalizar y deshidratarse al mismo tiempo, para formar otros minerales. Generalmente es blanco, sin embargo puede presentar algún color: café pálido, naranja, gris, negro (como la obsidiana), rosa y rojo. Comúnmente es duro y denso aunque en algunos lugares se presenta esponjoso y poroso. Dependiendo del régimen de flujo existente presenta las siguientes estructuras: bandeamiento, geiserita, terrazas, rizaduras y dunas, prominencias y salpicaduras.

### **Residuos silíceos**

Los residuos silíceos se forman sobre el nivel del agua alcalino-clorurada en las zonas de vapor. El vapor geotérmico es acompañado invariablemente por una pequeña proporción de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$ ; el último se oxida, generalmente cerca de la superficie a  $\text{H}_2\text{SO}_4$  produciendo una fuerte acidez que inmediatamente ataca a las rocas encajonantes. Sin embargo, no toda la roca encajonante es disuelta o reemplazada, así el silice sobreviviente forma depósitos residuales. Es difícil de reconocer ya que no presenta texturas características como el sinter, no obstante, a veces presenta un bandeamiento local; este es aparente, por ejemplo, donde los depósitos estratificados tales como la tefra son atacados, su estratificación sobrevive en una pseudoforma. Es frágil pero ocasionalmente puede formar depósitos duros semejantes a resinas. Los residuos silíceos van acompañados invariablemente por otros minerales, usualmente un sulfato y caolín.

### Depósitos y cráteres hidrotermales (freáticos).

Las erupciones de vapor que incluyen tefra juvenil son llamadas erupciones hidrotermales (Muffler et al., 1971), erupciones freáticas, o volcanes de lodo (White, 1955). Estas son características del comportamiento periódico de muchas áreas fumarólicas (Wohletz, 1992). Las erupciones forman cráteres pequeños, generalmente con un diámetro de varios cientos de metros, el cual está rodeado por depósitos de caída, de surge y de brecha compuestos de detritos líticos. Estas erupciones toman lugar en un punto donde el ascenso convectivo de los fluidos geotérmicos es impedido por una capa relativamente impermeable llamada "capa de roca" (Facca y Tonani, 1967). La capa de roca se forma cuando la permeabilidad de la roca es sellada por la precipitación de sólidos de los fluidos geotérmicos. La presión de vapor de un fluido geotérmico recibe contribuciones parciales significativas de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$ . Debido a que los dos gases formados tienen temperaturas de sublimación más bajas que el agua, pueden incrementar la presión de vapor por ascenso a varias decenas de bares más que el agua pura para una temperatura dada (Kieffer, 1982; Nelson y Giles, 1985). Cuando la expansión del fluido sobrepresurizado se inicia por el rompimiento de la capa de roca o el fracturamiento hidráulico ó sísmico, la erupción se inicia como una onda de vapor que se propaga hacia abajo hasta el fluido y acelera el vapor y el fluido hacia afuera del conducto. Los depósitos de eyección de estas erupciones pueden extenderse a más de un kilómetro del centro del cráter. La mayoría de los depósitos de brechas freáticas son masivos, pero pueden estar estratificados y pueden presentar estratificación gradada y dunas de surge piroclásticas. Los depósitos masivos consisten de tefra angular pobremente clasificada



con un tamaño de submilímetros hasta bloques de varios metros de diámetro en una matriz lodosa. Casi todo el lapilli y los bloques están alterados hidrotermalmente y/o silicificados; el vidrio ha sido alterado a arcillas o a cuarzo hidrotermal y los componentes cristalinos y líticos son reemplazados por arcillas, pirita, clorita y otros minerales hidrotermales. Muchos de los clastos líticos retienen sus texturas y pueden contener varias generaciones de fracturas, llenadas con minerales hidrotermales, que se formaron in situ durante explosiones hidrotermales anteriores (Nairn y Solia, 1980). Los cráteres freáticos y sus depósitos son indicadores indiscutibles de la presencia de un sistema hidrotermal de alta temperatura (Wohletz, 1992).

### 3.7 Alteración Hidrotermal y Temperatura

Los minerales proveen información sobre su temperatura de formación, éstos (con pocas excepciones) contienen en su estructura iones (OH) o  $n\text{-H}_2\text{O}$ , dentro de estos minerales se incluyen algunas arcillas, zeolitas, prehnita y anfíboles.

#### Minerales Arcillosos

##### Grupo del caolín

Donde las aguas ácidas interactúan con la roca encajonante o depositan caolín, puede haber un cambio de caolinita y haloisita a dickita, el cual ocurre a una temperatura por debajo de los  $120^\circ\text{C}$ , ésta es reemplazada por pirofilita a temperaturas mayores a los  $250^\circ\text{C}$  (Browne, 1990).

##### Grupo de la clorita

Los minerales del grupo de la clorita son muy comunes y están esparcidos ampliamente en los campos geotérmicos activos, muestran un amplio rango en composición, sin embargo no está relacionada con la temperatura. No obstante Kristmannsdottir (1977) ha demostrado que las esmectitas de Reykjanes, Islandia, están presentes como una fase discreta donde las temperaturas son menores a  $200^\circ\text{C}$ ; se encuentran azarosamente estratificadas con clorita donde las temperaturas tienen un rango de variación entre  $200^\circ\text{C}$  y  $270^\circ\text{C}$ , pero por arriba de los  $270^\circ\text{C}$ , la clorita es el único mineral arcilloso presente.

##### Montmorillonita e illita.

La montmorillonita es estable a los  $140^\circ\text{C}$  y la illita a temperaturas superiores a los  $220^\circ\text{C}$ ; dentro de este intervalo comúnmente ocurren illita y montmorillonita

interestratificadas, las proporciones de los miembros finales cambian con la temperatura (Browne, op cit.).

### Biotita

Este mineral es un constituyente primario común en muchos campos geotérmicos pero es raro como mineral hidrotermal. Sin embargo ocurre en forma de cristales de color café pálido en Ngawha y en Tongonan, Nueva Zelanda (ambas ocurrencias donde la temperatura es superior a los 220°C) y en las partes más calientes (>325°C) del yacimiento de Cerro Prieto (Browne y Gardner, 1982; Reyes y Tolentino, 1981). En Salton Sea y los Humeros (Martínez Serrano R., comunicación personal).

### Silicatos cálcicos y minerales relacionados

La formación de zeolitas depende principalmente de la temperatura, por esta razón representan una guía muy útil para conocer la temperatura de depositación en un yacimiento. Hay un grupo de zeolitas que ocurren a bajas temperaturas (<110°C). Entre los minerales que precipitan a altas temperaturas la epidota parece ser la guía más confiable y consistente, apareciendo primero a 250°C en muchos campos, independientemente de la litología de la roca huésped. Algunas variaciones existen con relación a la prehnita (>220°C en Nueva Zelanda comparada con >300°C en Cerro Prieto), debido a diferencias en el pH y el contenido de calcio de los fluidos circulantes (Browne, op.cit.).

## **3.8 Alteración Hidrotermal y ebullición**

### Presión

Comparadas con los ambientes metamórficos, las presiones de los fluidos en áreas geotérmicas, en el fondo del pozo perforado, son bajas y raramente exceden los 200 bares. El principal efecto de la presión en la alteración hidrotermal es un control indirecto sobre la profundidad a la cual la ebullición tiene lugar.

### Ebullición

La ebullición tiene un efecto decisivo sobre la química de un fluido y éste es reflejado en la depositación de minerales hidrotermales que precipitan al mínimo cambio en las condiciones del fluido. La pérdida de una pequeña cantidad de vapor, además remueve una alta proporción de gases disueltos especialmente H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>. La pérdida de dióxido de carbono es especialmente importante ya que causa la precipitación de calcita y el líquido remanente llega a ser más alcalino.

La ebullición es en sí misma un proceso limitante, por lo menos localmente, pues ocasiona la pérdida de temperatura y

la reducción en la permeabilidad debido a la depositación mineral.

#### Reconocimiento de zonas de ebullición

Las zonas de ebullición, por lo menos donde circulan los fluidos a grandes profundidades del tipo alcalino-clorurados, aproximadamente neutros, pueden ser reconocidas por:

- a) Vetas de adularia formadas debido a la llegada de líquido más alcalino.
- b) Cristales de calcita depositados debido a la pérdida del CO<sub>2</sub> (no enfriamiento); este tipo de calcita casi siempre tiene forma hojosa (Tulloch, 1982).
- c) Inclusiones de vapor y de dos fases fluidas presentes en la misma muestra.

### **3.9 Alteración hidrotermal y tipo de roca encajonante.**

La mineralogía inicial de las rocas encajonantes parece tener un efecto pequeño sobre los minerales de alteración que ocurren en las zonas de descarga.

A bajas temperaturas la naturaleza del material original claramente tiene influencia sobre el producto de alteración. Las zeolitas altamente silíceas como la mordenita, son comunes en los campos riolíticos de Yellowstone y Nueva Zelanda, por el contrario las zeolitas poco silíceas como la chabasita, thomsonita, esolecita, ocurren en basaltos de Islandia y andesitas de Kamchatka.

Además la cantidad de un mineral formado puede reflejar la naturaleza de la roca original. Por ejemplo la cantidad de calcita hidrotermal es muy grande en Kizildere y Ngawha (Nueva Zelanda) donde las rocas encajonantes incluyen calizas.

### **3.10 Alteración hidrotermal y composición del fluido**

La estrecha relación entre la composición del fluido y la mineralogía hidrotermal es vista en la alteración superficial. La anhidrita y otros sulfatos comunmente se forman donde los fluidos circulan en presencia de sulfatos (ej. Las Filipinas y algunos sistemas con agua de mar).

La mica de litio (lepidolita) ha sido observada en perforaciones someras en Yellowstone donde actualmente precipita de aguas con alto contenido de flúor (~30 ppm) y una relación "extraordinariamente alta" de litio a potasio (Barger et al., 1973). Otros ejemplos son los depósitos de fluorita en Olkaria y datolita en Larderello, donde los fluidos son ricos en flúor y boro respectivamente. Las cantidades de dióxido de carbono y ácido sulfúrico disueltos

en los fluidos del reservorio, tienen un efecto muy directo y extenso sobre las rocas ocasionando la precipitación de sulfuros y carbonatos.

Otra conclusión importante sobre el efecto de la composición del fluido en la alteración hidrotermal es que la concentración absoluta de constituyentes disueltos es mucho menos importante que las relaciones de las actividades de los principales iones. Esto está demostrado por el hecho de que las salmueras altamente salinas de Salton Sea (250,000 ppm aprox.) reaccionan con las rocas del reservorio para producir un arreglo consistente en cuarzo, calcita, epidota, feldespatos potásicos, albita, mica potásica, y clorita; éste es además el arreglo mineral en equilibrio en partes calientes (260°C) de varios campos geotérmicos donde los fluidos alterantes están muy diluidos (<3000 ppm).

### **3.11 Alteración hidrotermal y permeabilidad**

Las reacciones minerales raramente son isoquímicas y la alteración extensiva así como la hidratación necesitan gran porosidad para llevarse a cabo. En muchos casos el dióxido de carbono y las especies sulfurosas que provienen de las soluciones pueden ser agregadas a las rocas.

En las rocas de baja permeabilidad el equilibrio entre los minerales y los fluidos del reservorio es raramente alcanzado. Los minerales primarios o el vidrio pueden persistir a altas temperaturas. Por otra parte el marcado zoneamiento de los minerales hidrotermales en torno a los canales de flujo en varios campos geotérmicos japoneses muestra el claro control estructural de la alteración y demuestra como la intensidad y el tipo de alteración reflejan la permeabilidad. La permeabilidad de las fisuras como canales de flujo en Wairakei, Broadlands, Waioatapu, Kawerau (todos en Nueva Zelanda) y Tongonan (Filipinas) está caracterizada por vetas de adularia generalmente ocurriendo junto con cuarzo y calcita.

### **3.12 Distribución de la alteración hidrotermal en yacimientos epitermales.**

Los yacimientos epitermales tipo "bonanza", se caracterizan por su gran permeabilidad, originada por la presencia de fallas y de zonas de fractura. Las zonas de alteración son muy amplias y complejas por el hecho de que existe, a veces una zona de ebullición que va retrocediendo. En algunos distritos la alteración se extiende casi hasta la superficie, como se muestra en el modelo de Buchanan (fig.3.2). En general, se presenta una zona de feldespato estable a profundidad, como una paragénesis adularia-albita. Como el modelo lo indica, la alteración generalmente se

ensancha hacia arriba y hacia afuera de las vetas. La clorita es uno de los minerales más abundantes en rocas encajonantes de yacimientos epitermales en andesitas. Las paredes de las rocas son extensa y pervasivamente cloritizadas para formar una paragénesis propilítica. La sericita es más abundante en latitas y riolitas, pero aún en estas rocas una delgada zona propilítica puede presentarse en las margenes del yacimiento. En general rocas encajonantes más félsicas tienen cocientes clorita-sericita más altos. Otros minerales de alteración como cuarzo, alunita, zeolitas, calcedonia, ópalo, calcita y otros carbonatos se presentan a lo largo de las vetas. La argilización puede estar ampliamente distribuida en las paredes de las rocas; entre los numerosos minerales silicatados, pueden estar presentes la nacrita, dickita, caolinita, pirofilita, illita y montmorillonita. Los minerales productos de alteración en depósitos someros, comunmente son de grano fino y difíciles de separar para su identificación. Los minerales diagnósticos son las arcillas, pirofilita, sericita, y clorita en las rocas alteradas, y cuarzo localmente amatista, opalino o calcedónico en las vetas.

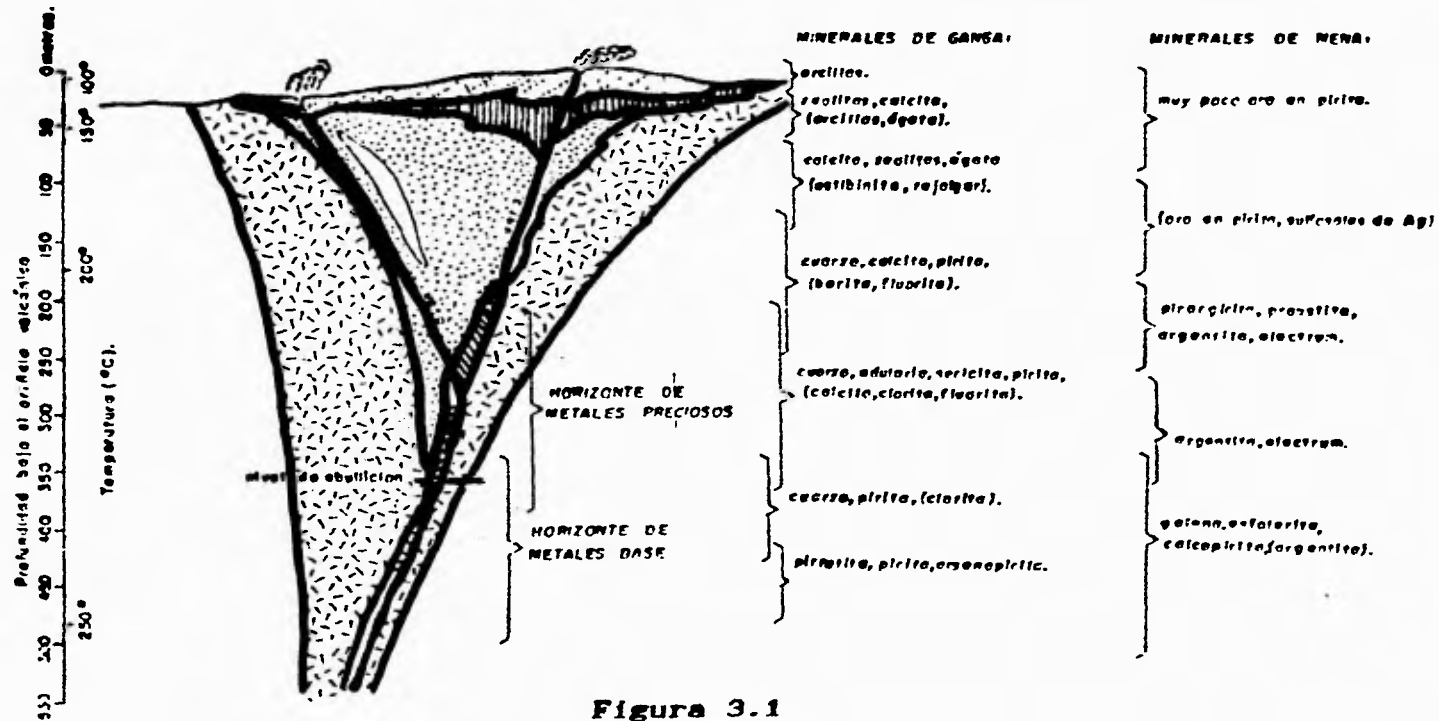


Figura 3.1

MODELO GENETICO PARA VETAS DE Au-Ag Y SU RELACION CON VETAS DE METALES BASE. (Buchanan, L.J., 1981).

-  Resaca silíceo: Apatita, cristobalita, amonita y  $M_2S$ .
-  Illita y calcedonia en los niveles más altos, pasando a sericita y adularia a profundidad.
-  Azufre, calcita, pirita; muchas veces se prolonga a profundidad a lo largo de la veta en forma de halo de calcita.
-  Silicificación; generalmente con adularia y/o nitrita en menor cantidad.
-  Propilíticas: clorita, illita, carbonatas, piro, y arsenoclasita, con un incremento de sulfuros a profundidad.
-  Adularización con poco o nada siliceo arriba del nivel de abstinencia y a profundidad aumenta la siliceo.

## **CARACTERISTICAS DE LA ALTERACION HIDROTHERMAL EN LOS DISTRITOS DE SOMBRERETE Y COLORADA**

### **4.1 Sombrerete**

#### **4.1.1 Descripción del yacimiento**

El Distrito minero de Sombrerete está formado en su base por rocas sedimentarias y su cima por grandes paquetes de rocas volcánicas. El paquete superior de rocas volcánicas aflora al sur del distrito, en ésta zona se encuentra una antigua mina de mercurio. Es importante la presencia de dos cuerpos de "jasperoides", así como de un cuerpo de "jasperoides" brechado.

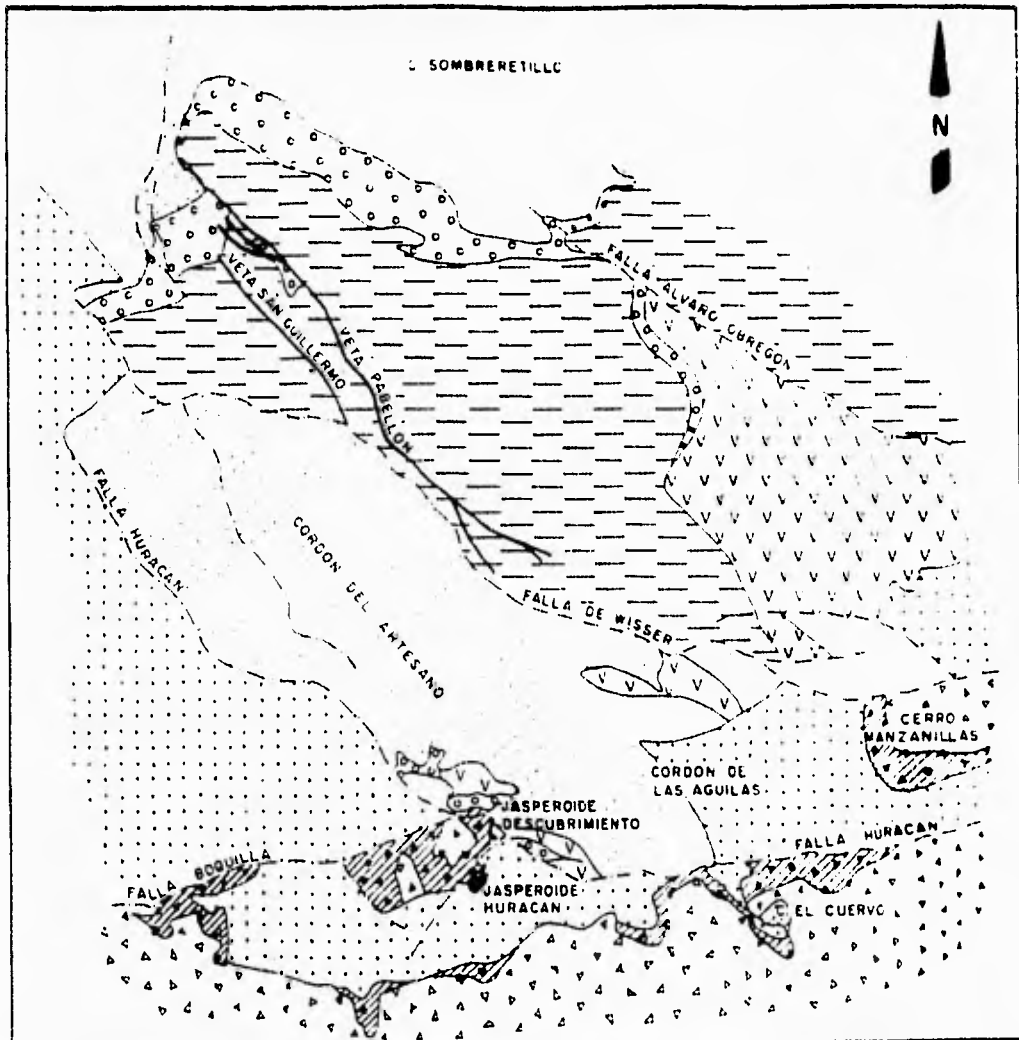
La parte baja del sistema está al norte del distrito y en ella se aloja la mineralización. El yacimiento lo forman una serie de vetas, los cuerpos mineralizados de mayor importancia en este distrito son la Veta Pabellón y la Veta San Guillermo (fig.4.1). Esta última es un desplazamiento que se origina al alto de la Veta Pabellón a una profundidad de 685 metros (Rentería op cit). Las vetas tienen orientación noroeste-sureste con echados al suroeste. El espesor de la Veta Pabellón varía de 1 a 10 m, con un espesor promedio de 2.5 m y para la Veta San Guillermo el espesor promedio es de 75 cm (Rentería, op cit.). Las vetas se alojan en la secuencia alternante de lutitas y areniscas de las formaciones Caracol-Indidura (fig.4.1).

Existen otras vetas de menor extensión que afloran en el paquete volcánico. Dichas vetas son: veta la Ranita, veta la Mariposa, veta Maria Isabel y veta Sorpresa, las cuales no han sido explotadas .

#### **4.1.2 Paragénesis de alteración en Sombrerete**

Las paragénesis de alteración se determinaron por estudios petrográficos y de difracción de rayos x, de roca total. Para identificar los diferentes tipos de minerales arcillosos, se hizo un tratamiento especial. Primero se molió la roca, hasta un tamaño menor a 1 mm, después se separaron de la roca únicamente los minerales arcillosos por decantación. Posteriormente los minerales se calentaron con y sin etilenglicol a temperaturas de 500°C.

Las paragénesis de alteración se distribuyen de tal manera, que varían conforme disminuye o aumenta la distancia a las vetas y también ocurre lo mismo con respecto a la profundidad (zoneamiento). Una de las razones de este zoneamiento la constituye la composición de los paquetes litológicos donde se alberga la mineralización, así pues, rocas de composición ácida dan como resultado el predominio



E X P L I C A C I O N

	FORMACION BOQUILLA
	FORMACION CONG. EL CUERVO
	FORMACION SOMBRETE
	FORMACION ARTESANO

	ANDESITA (MIEMBRO BASAL DE LA FORMACION ARTESANO)
	F. AHUICHILA
	SEDIMENTOS CRETACICOS

SIMBOLOGIA

	VEA
	FALLA
	JASPEROIDE

Figura 4.1 Mapa de geológico de Sombrerete (Tomado de Rentería, 1992)



de sericita, mientras que rocas de composición intermedia se enriquecen en clorita. Las rocas sedimentarias por otra parte, son pobres en estos minerales. Ellas alojan en cambio, calcita, cuarzo y dolomita. Las paragénesis de alteración identificados en Sombrerete son:

**1) Alteración potásica**

Este tipo de alteración se caracteriza por la paragénesis adularia + muscovita + pirita  $\pm$  calcita  $\pm$  dolomita + esfena.

**2) Alteración filica**

Está representada por la paragénesis sericita + calcita + cuarzo + pirita  $\pm$  clorita.

**3) Alteración propilitica**

Caracterizada por:  
clorita + calcita + cuarzo + pirita

**4) Alteración argílica**

Se observa principalmente en el paquete volcánico y se presenta como:  
caolinita + illita  $\pm$  esmectita  $\pm$  vermiculita.

**5) Alteración argílica avanzada**

Se presenta cerca de los jasperoides y está representada por alunita + caolinita  $\pm$  vermiculita  $\pm$  esmectita.

**6) Dolomitización**

El paquete sedimentario además de las paragénesis mencionadas anteriormente presenta dolomitización, tanto la calcita que compone la roca como la alojada en las vetas ha recristalizado como dolomita, dolomita barroca o ankerita.

**7) Silicificación.**

Se presenta como cuarzo y como calcedonia rellenando huecos y cavidades. También como sobrecrecimientos de cristales de cuarzo en rocas sedimentarias (areniscas).

**4.1.3 Intensidad de alteración**

La intensidad de alteración (Ia) de las rocas encajonantes se obtuvo por medio del conteo de puntos. Para tal propósito, se contaron 1000 puntos por cada lámina delgada. Se utilizaron para este inciso muestras tanto de mina como de superficie que mostraban algún grado de alteración (para ver la ubicación de las muestras remitase al anexo B).

Las rocas sedimentarias tuvieron una intensidad de alteración relativamente baja comparadas con la de las rocas volcánicas. Las rocas sedimentarias muestran intensidades de alteración en un rango de 0.1 a 0.3. Pero hasta de 0.9

cuando están cercanas a las vetas. Por su parte las rocas volcánicas muestran en su mayoría, intensidades de alteración que oscilan entre 0.8 hasta 0.99. Las la más bajas que presentan son de 0.4.

#### **4.1.4 Distribución espacial de las paragénesis de alteración.**

##### **Rocas volcánicas**

##### **Alteración superficial**

Las rocas que componen la parte superior del yacimiento, y principalmente el paquete riolítico que lo corona presentan fuerte silicificación, la roca está completamente sustituida por silice el cual se presenta como cuarzo criptocristalino en la roca y como calcedonia en huecos y cavidades.

La alteración argílica se encuentra a lo largo de todo el paquete litológico. Es importante en las rocas volcánicas, ya que aparece con mucha frecuencia y abundancia. En rocas volcánicas se presenta en forma de manchones de poca extensión, comprendiendo áreas de 1 x 1 m, hasta de 6 x 10 m aprox. En los lugares donde la alteración aparece a lo largo de varios metros de roca, se puede apreciar una gradación de roca completamente sana a roca totalmente alterada.

La paragénesis de alteración argílica avanzada aparece únicamente en la zona comprendida entre los dos cuerpos de jasperoides.

A lo largo de las vetas Mariposa y la Ranita se observa fuerte silicificación y argilización en la roca encajonante.

##### **Alteración subsuperficial**

Para obtener las paragénesis de alteración, se hizo el análisis petrográfico y de rayos x de muestras de los barrenos mariposa 1, 2 y 3. Además de las muestras analizadas de la mina, ver fig.4.2.

De superficie a profundidad se tiene el siguiente zoneamiento:

0 - 150 metros.- Silicificación la cual se presenta con alteración argílica ó argílica avanzada.

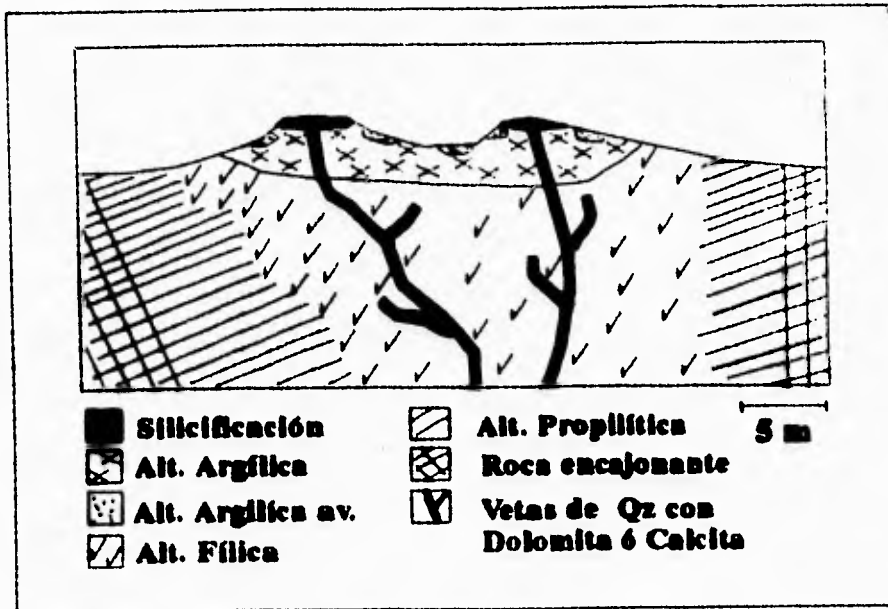
151 - 320 metros.- En este intervalo hay alteración filica ó propilítica.

320 - 360 metros.- Dolomitización y argilización ó argilización con alteración potásica.

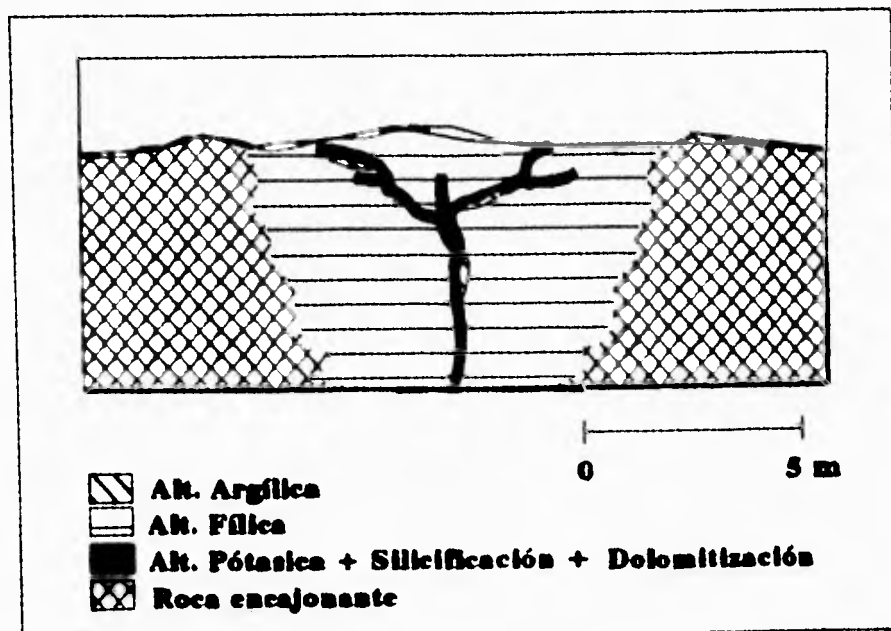
##### **Rocas Sedimentarias**

##### **Alteración superficial**

En superficie, a lo largo de la veta Pabellón, se encuentran principalmente silicificación y dolomitización.



**Figura 4.2** Sección idealizada que muestra los conjuntos de alteración en Sombrerete.



**Figura 4.3** Sección idealizada que muestra la distribución de los conjuntos de alteración en la veta Pabellón.

La alteración potásica está restringida únicamente a ciertas partes de la veta. Y las paragénesis de alteración argílica y filica se presentan de manera local, donde hay areniscas.

#### Alteración subsuperficial

La parte inferior del yacimiento la cual se encuentra dentro de la secuencia sedimentaria presenta la siguiente distribución de las paragénesis de alteración:

Hacia el centro del yacimiento se presenta alteración potásica, alojada en las vetas. Conforme se incrementa la distancia al centro del yacimiento en forma horizontal y vertical, la alteración potásica desaparece quedando en su lugar alteración filica (fig.4.3). Las rocas presentan cierto grado de metamorfismo originado por la acción de los fluidos hidrotermales con la roca encajonante, observándose al microscopio como alineamientos de muscovita.

#### **4.1.5 Formas de alteración hidrotermal**

##### Reemplazamiento

Las rocas riolíticas que coronan al yacimiento han sufrido una fuerte silicificación, los minerales primarios han sido completamente reemplazados y en su lugar se pueden observar crecimientos de cuarzo, ópalo y calcedonia.

Al microscopio, el reemplazamiento que presentan las rocas sedimentarias, está representado por cristales de calcita que han sido reemplazados por adularia como pseudomorfos y por sobrecrecimientos de cristales de cuarzo.

##### Precipitación directa

Además del reemplazamiento que han sufrido las rocas, se observan pequeños depósitos discontinuos de cuarzo opalino, a lo largo de vetas que afloran en rocas volcánicas. En las rocas sedimentarias, donde aflora la veta Pabellón se depositaron cristales de cuarzo y pirita.

#### **4.1.6 Paragénesis**

Este trabajo no contempla estudios mineralográficos para la identificación de minerales opacos. Por lo que se hará referencia a los trabajos ya existentes.

La mineralización consiste en cantidades variables de ganga, sulfuros y sulfosales. Estos se depositaron a lo largo de fallas y fracturas que presentan varios eventos de reactivación. Por lo tanto, los minerales a veces se presentan como fragmentos de brechas.

Las rocas exhiben tres etapas de depositación. La primera etapa es en cuanto a minerales económicos la más importante

ETAPA subetapa	I			II		III	
	1	2	3	x		x	
cuarzo	x			x		x	
clorita	x			x		x	
adularia	x			x		x	
fluorita	x			x		x	
calcita	x			x		x	
pirita	x			x		x	
arsenopirita	x			x		x	
pirrotita	x			x		x	
galena	x			x		x	
cubanita	x			x		x	
calcopirita	x			x		x	
freibergita	x			x		x	
pirargirita	x			x		x	
esfalerita	x			x		x	
estibinita	x			x		x	
alunita	x			x		x	
caolinita	x			x		x	
calcedonia	x			x		x	
montmorillon	x			x		x	
sericita	x			x		x	

Figura.4.4 Diagrama paragético generalizado, que muestra las relaciones temporales entre los minerales de mena y los minerales de alteración (Modificado de Rentería, 1992).

ya que sólo en ella ocurrió la precipitación de sulfuros y sulfosales (Rentería, op cit.).

Durante la primera etapa se depositaron sulfuros, sulfosales, cuarzo y calcita. Los sulfuros y sulfosales ocurren como formas cristalinas, las especies identificadas son; pirita, arsenopirita, galena, calcopirita y esfalerita, además trazas de pirrotita, cubanita y estibinita (Rentería, op cit.).

En la segunda etapa se depositan únicamente pirita, cuarzo y calcita. Finalmente en la última etapa se tiene cuarzo, calcita y dolomita barroca (Folk, 1977) ó dolomita "silla de montar" (Radke y Mathis, 1980), ver fig.4.4.

#### **4.1.7 Secuencia general de fenómenos geológicos.**

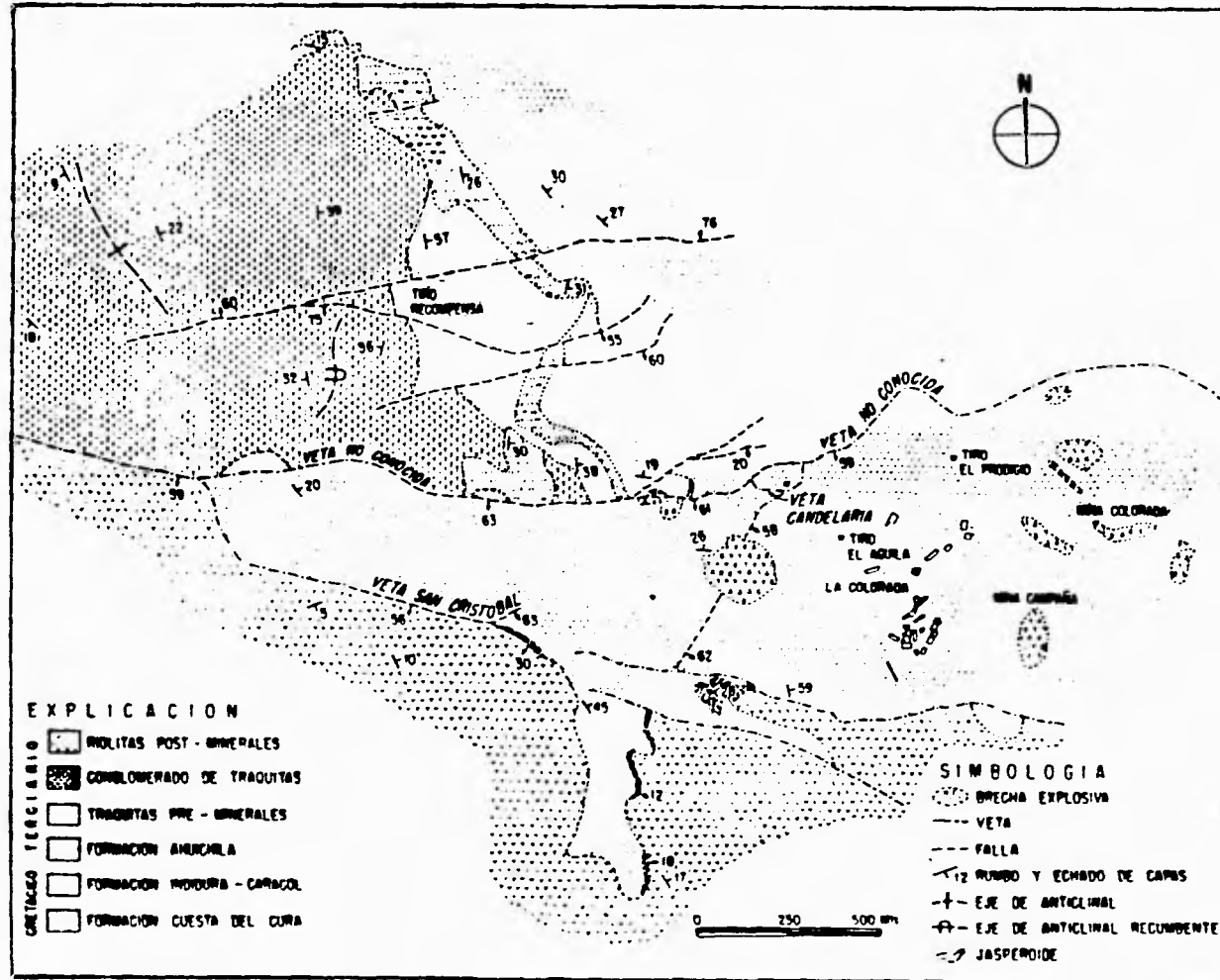
El análisis petrográfico de las rocas sedimentarias reveló, que éstas estuvieron sometidas a esfuerzos tectónicos que provocaron por lo menos tres etapas de fracturamiento o de reactivación de fallas.

El primer evento que se registra es la recristalización de las rocas. Las areniscas presentan fragmentos de moluscos y cámaras de globigerinidos recristalizadas. Después viene una primera etapa de fracturamiento donde se puede observar la depositación de sulfuros, sulfosales, cuarzo y calcita. Se produce un segundo evento de fracturamiento que provoca el brechamiento de la veta, (al microscopio se observa como la depositación de fragmentos de roca mineralizados dentro de las fracturas) con posterior depositación de pirita, cuarzo y calcita. Posteriormente las rocas son dolomitizadas, ya que la calcita depositada recristaliza como dolomita. En el último evento de fracturamiento se produce otro brechamiento de la veta con depositación de cuarzo y principalmente calcita. Nuevamente hay otro proceso de dolomitización (la calcita depositada en este evento muestra dolomitización). Las distintas etapas de mineralización originaron un metamorfismo de bajo grado, que se observa como desarrollo y alineamiento de muscovita.

## **4.2 La Colorada.**

### **4.2.1 Descripción del yacimiento**

El yacimiento de La Colorada, al igual que el de Sombrerete está constituido en su base por un paquete de rocas sedimentarias y en su cima por rocas volcánicas. El paquete sedimentario se presenta en la parte noroeste del distrito, el paquete volcánico en la parte noreste y sur. La parte noreste del distrito, puede ser a su vez subdividida en dos zonas: la zona noroeste caracterizada por la presencia de vetas, y la zona sureste donde se encuentran una serie de



**Figura 4.5 Mapa geológico de La Colorada (Tomado de Albinson, 1987)**

*chimeneas brechadas (fig.4.5). Las chimeneas más importantes por su tamaño son Candelaria, Bronzuda, Campaña y Colorada. Las dos últimas son las únicas que se explotan. Las estructuras brechadas están relacionadas con la actividad magmático-hidrotermal.*

*Dentro de las vetas más importantes están la veta No Conocida, veta Candelaria, veta N°2 y la veta Recompensa. Todas alojadas en rocas volcánicas, excepto veta Recompensa encajonada en calizas, ésta última se bifurca dando lugar a las vetas Palomas y Amolillo.*

#### **4.2.2 Paragénesis de alteración en La Colorada**

*Al igual que en Sombrerete se analizaron un promedio de 150 muestras con petrografía y difracción de rayos x. Estas muestras provienen de los niveles en operación de la mina así como de superficie (anexo B).*

*Las paragénesis presentes en La Colorada son:*

##### **1) Alteración potásica**

*Se caracteriza por:*

*feldespato potásico + muscovita + cuarzo ± barita ± siderita ± calcita ± rodocrosita ± cerusita.*

##### **2) Alteración filica**

*La paragénesis está formada por:*

*serícita + cuarzo + pirita + esfena ± leucoxeno.*

##### **3) Alteración argílica**

*Caracterizada por:*

*caolinita + esmectita ± vermiculita ± illita.*

##### **4) Alteración argílica avanzada**

*alunita + caolinita ± natroalunita ± illita*

##### **5) Alteración Propilítica**

*Compuesta por:*

*clorita + calcita + pirita*

##### **6) Dolomitización**

*Presente principalmente en el paquete sedimentario como dolomita, dolomita barroca o ankerita.*

##### **5) Silicificación**

*En huecos y cavidades crecimientos euhedrales de cristales de cuarzo. Cristobalita reemplazando a otros minerales.*



#### **4.2.3 Intensidad de alteración**

Las rocas en este distrito han reaccionado altamente con los fluidos mineralizantes, lo cual se refleja en su intensidad de alteración. La intensidad de alteración de las rocas en superficie tiene valores que van de  $I_a = 0.8$  hasta  $I_a = 0.98$  a profundidad las rocas encajonantes tienen una intensidad de alteración que oscila entre  $I_a = 0.9$  hasta  $I_a = 0.99$ .

#### **4.2.4 Distribución espacial de las paragénesis de alteración.**

Al igual que en Sombrerete, los dos distintos paquetes de rocas (sedimentarias y volcánicas) exhiben paragénesis de alteración muy diferentes.

En las rocas sedimentarias se observa silicificación y alteración potásica en vetas. Mientras que a lo largo de todo el distrito, en rocas volcánicas se presenta la alteración argílica. Al sur de la zona donde las traquitas se ponen en contacto con las riolitas, hay silicificación y alteración argílica avanzada. Lo mismo ocurre en vetas y chimeneas donde además aparece el paragénesis potásico, a profundidad aparece únicamente en las chimeneas.

##### En vetas

##### Vetas No Conocida y Candelaria.

Las vetas alojadas en rocas volcánicas, presentan del centro de la veta hacia afuera el siguiente zoneamiento:

Alteración potásica en la veta y conforme aumenta la distancia aparece la alteración argílica, después la alteración filica y por último la roca encajonante, ver fig.4.6.

##### Vetas Palomas y Canoas

Estas vetas alojadas en rocas sedimentarias, presentan alteración potásica y silicificación. La roca está dolomitizada localmente y también de manera local hay zeolitas.

##### En chimenea Campaña.

En superficie la cima de la chimenea presenta dos zonas con diferentes paragénesis de alteración. La zona norte muestra la paragénesis potásica junto con alteración argílica avanzada y silicificación. La parte sur en cambio muestra silicificación y la paragénesis filica.

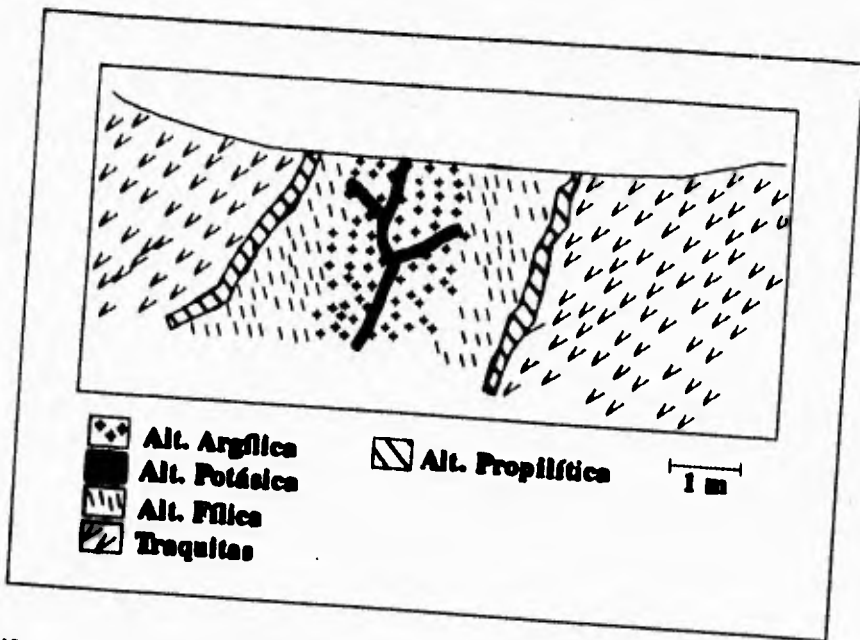


Figura 4.6 Sección idealizada que muestra distribución de los conjuntos de alteración en la veta No Conocida.

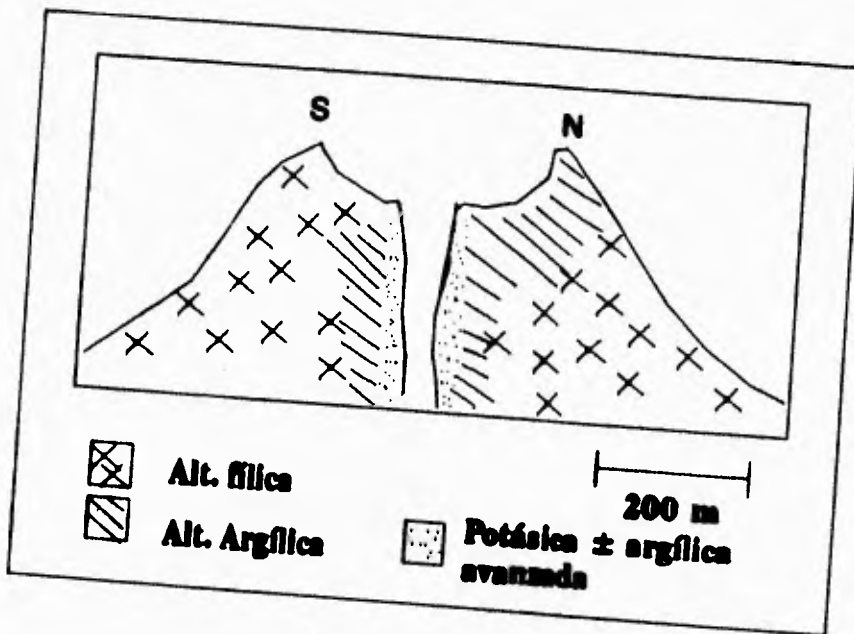


Figura 4.7 Sección idealizada que muestra distribución de los conjuntos de alteración en la chimenea Campaña.

*En un corte transversal, se observa la paragénesis potásica y argílica en la parte central de la chimenea seguidas por la paragénesis filica y en la cima alteración filica y argílica avanzada, fig.4.7.*

#### **4.2.5 Formas de alteración hidrotermal**

##### **Precipitación directa**

*La depositación directa en las rocas se observa como:*

- 1) Cristales de cuarzo en huecos y cavidades.*
- 2) Sobrecrecimientos de cristales de cuarzo.*
- 3) Cementación con cuarzo y calcita en las brechas de las chimeneas.*

##### **Reemplazamiento**

- 1) En rocas sedimentarias la calcita ha sido reemplazada por dolomita cerca de las vetas y en las vetas mismas.*
- 2) La dolomita, a su vez ha sido reemplazada por calcita.*
- 3) Los anfíboles y piroxenos de las rocas volcánicas han sido reemplazados por cristobalita .*

##### **Disolución**

*Los vapores ácidos que salieron por las chimeneas han provocado disolución de la roca, ya que se encuentran cristales corroidos.*

#### **4.2.6 Paragénesis.**

*La mineralización del sistema de vetas es muy similar a la de algunas chimeneas (Soto, 1987).*

*Se registran cuatro etapas de mineralización. La primera sólo deposita calcita. En la segunda y tercera que son las principales, se depositan calcita, cuarzo, sulfuros y sulfosales de plata. La segunda etapa consistió en un cuarzo criptocristalino y blanco acompañado por adularia y sulfuros de plomo, zinc, fierro y cobre que se depositan en vetas, mientras que para las chimeneas se deposita pirita, bornita, galena, calcopirita, esfalerita y sílice criptocristalino (Soto, op cit.). La tercera etapa consiste en cuarzo cristalino transparente, amatista y blanco acompañado por argentita, sulfosales de plata, pirita y plata nativa que se deposita en vetas, mientras que en chimeneas únicamente se deposita cuarzo cristalino, y amatista (Soto, op cit.).*

*En la cuarta y última etapa sólo se identificó calcita (fig.4.8).*

ETAPA		I	II			III	
			1	2			
subetapa	x		x		x		
	x		x		x		
pirita	x		x-----		x		
calcopirita	x		x-----	---	x		
esfalerita	x		x-----		x		
galena	x		x-----		x		
argentita	x		x	---	x		
sulfosales Agx	x		x		x		
estromeyerita	x		x-		x		
plata nativa	x		x	---	x		
Qz cripto.	x		x-----	---	x-----		
Qz crist.	x		x	---	x		
barita	x		x	---	x		
adularia	x		x	---	x		
feldespato-k	x		x		---x		
sericita	x-----		x		x		
caolinita	x		---x-----		x-----		
alunita	x		---x-----		x-----		
montmorillon.x	x		---x-----		x-----		
calcita	x		---x-----		x-----		
clorita	x---		x		x		

**Figura.4.8 Diagrama paragético generalizado, que muestra las relaciones temporales entre los minerales de mena y los minerales de alteración (Modificado de Soto, 1987).**

#### **4.2.7 Secuencia general de fenómenos geológicos.**

Las rocas sedimentarias exhiben por lo menos tres periodos de fracturamiento.

El primer evento que se registra es un periodo de fracturamiento. Posteriormente se deposita en las fracturas calcita. Hay después una dolomitización de la roca, ya que tanto la calcita que está en las fracturas como la que constituye a los organismos, es reemplazada por dolomita. Por otra parte la actividad hidrotermal origina la formación de chimeneas brechadas. Sigue otra etapa de fracturamiento o de reactivación (este fracturamiento corta a la veta anteriormente formada), con depositación de calcita, cuarzo y sulfuros de plomo, zinc y cobre en chimeneas y vetas. Se inicia otra reactivación de las fallas con la depositación mineral de cuarzo, plata, pirita y sulfosales de plata, que corta la anterior mineralización de las vetas. Finalmente se registra otro evento de fracturamiento o reactivación con la última mineralización que deposita calcita principalmente y cuarzo (al microscopio este evento se caracteriza por pequeñas fracturas que cortan las brechas de las anteriores reactivaciones, y donde han precipitaron calcita y cuarzo). La mineralización se llevó a cabo como una serie de eventos intermitentes. Esto se puede ver en lámina delgada como el crecimiento de cristales que dejan su contorno antiguo como marca, se detiene su crecimiento y al estar en contacto otra vez con fluidos hidrotermales, éstas precipitan y los cristales vuelven a crecer. Registrandose otra vez el contorno antiguo. Durante y después del último evento de mineralización, sigue un proceso de recristalización de las rocas sedimentarias que provoca la dedolomitización de las mismas. Lo anterior se determinó por la presencia de calcita como pseudomorfo de dolomita.

## **RELACION ENTRE LOS PATRONES DE ALTERACION HIDROTHERMAL Y LA MINERALIZACION EN LAS ZONAS DE ESTUDIO**

### **5.1 Relación entre alteración y mineralización.**

#### **Sombrerete**

Los eventos mineralizantes han provocado la alteración de la roca encajonante, la cual muestra un zoneamiento de las paragénesis de alteración.

La mineralización está estrechamente relacionada con la alteración potásica, ya que ambas se han depositado como fases contemporáneas a lo largo de fracturas y cavidades. La alteración filica y propilitica también son contemporáneas a la mineralización y éstas aparecen en la roca encajonante reemplazando a las fases primarias. Las paragénesis argílica y argílica avanzada, no están relacionadas propiamente con las etapas de mineralización, sino con la oxidación de  $H_2S$  que se ha separado de los fluidos geotérmicos en ebullición.

#### **La Colorada**

En el distrito minero de La Colorada es evidente la estrecha relación que existe entre la alteración potásica y la mineralización, éstas ocurren a lo largo de fracturas, cavidades y como cementante entre los fragmentos de roca brechados. Igual que en Sombrerete las paragénesis de alteración filica y propilitica se encuentran en la roca encajonante y en los fragmentos de roca brechados que rellenan vetas y chimeneas. Ambas son anteriores a la mineralización y a la alteración potásica. Las paragénesis de alteración argílica y argílica avanzada a pesar de localizarse a profundidad en chimeneas, no parecen estar asociadas a la mineralización, y si a las erupciones hidrotermales que provocaron la formación de cuerpos brechados.

### **5.2 Características de los fluidos mineralizantes**

#### **5.2.1 Composición química**

La silicificación de rocas en superficie como resultado de la reacción con los fluidos hidrotermales en descarga, es un indicador de la existencia de aguas alcalinas. Por otra parte, la existencia de arcillas y principalmente de minerales como la alunita y natroalunita indican la presencia de fluidos más profundos de composición ácido-sulfatada (Rye et al, 1992). La presencia de alteración ácido-sulfatada únicamente en superficie, en Sombrerete. 0

en chimeneas y superficie en Colorada, pero no en vetas, indican que su depositación no está relacionada con el evento mineralizante. Las tablas 5.1 y 5.2 muestran las características de los fluidos hidrotermales.

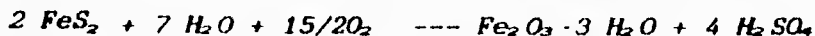
### 5.2.2 Origen de la alteración ácido-sulfatada en Sombrerete y Colorada.

Rye y colaboradores (1992) mencionan la existencia de tres tipos de ambientes que pueden originar la alteración ácido-sulfatada. Estos son:

#### Ambiente supergénico

La alteración ácido-sulfatada es en el caso de un ambiente supergénico, producto del intemperismo de los depósitos ricos en sulfuros. La paragénesis resultante contiene alunita, caolinita desordenada, halloisita y ocasionalmente alófano. También se presentan óxidos de hierro como hematita, goethita y jarosita. Generalmente la alteración aparece como una capa controlada topográficamente que además subyace a un gossan. Si el protoyacimiento está controlado por vetas, la alteración puede aparecer como cortinas que corren hacia abajo de la estructura por distancias verticales mayores a los cientos de metros. Cuando es acompañada por enriquecimiento supergénico, la alteración está generalmente asociada con sulfuros de cobre, tales como calcocita, digenita o djurleita, crisocola, turquesa, etc. La alunita supergénica, típicamente ocurre como disseminaciones en la roca argilizada y como vetillas criptocristalinas delgadas que cortan zonas argilizadas y ocasionalmente roca no alterada o protoyacimiento.

El ácido sulfúrico requerido para la alteración ácido-sulfatada en el ambiente supergénico es producido por la oxidación de sulfuros, principalmente pirita. La oxidación de pirita es un proceso complejo, pero una reacción sumaria representativa para producir una fase óxido de hierro hídrico puede ser descrita como:



Ya que las texturas, mineralogía, y frecuentemente la forma de las zonas de alteración ácido-sulfatada es similar a aquella formada en ambientes calentados por vapor sobreyacentes y marginales a sistemas hidrotermales de circulación profunda, la distinción entre los dos es algunas veces difícil de hacer. La presencia de un gossan y el enriquecimiento secundario subyacente son las únicas características de sistemas supergénicos. Cuando la edad K-Ar de la alunita es significativamente menor que la del protoyacimiento, es generalmente un indicador confiable de un origen supergénico.

**TESIS SIN PAGINACION**

**COMPLETA LA INFORMACION**



Secuencia de los fluidos	Tipos de fluido	T°C inferida	pH	Conjunto mineral de alteración
Aguas alcalino-cloruradas Estado principal de deposición de cuarzo	alcalino-clorurado profundo y mezcla con aguas subterráneas que crea fluidos clorurados diluidos	> 250	cercano al neutro	cuarzo predominante, adularia, calcita
		250-200	cercano al neutro a ácido	illita, clorita, pirita
Aguas alcalino-cloruradas tardías Deposición de cuarzo	alcalino-clorurado profundo y mezcla con aguas subterráneas	< 200	cercano al neutro a alcalino	cuarzo predominante, calcita, pirita
Aguas alcalino-cloruradas tardías Deposición de calcita	alcalino-clorurado profundo y mezcla con aguas subterráneas	≈ 180	cercano al neutro a alcalino	calcita predominante, cuarzo
Aguas ácido-sulfatadas	agua sulfatada cercana a la superficie	≈ 150	ácido	alunita, caolinita, esmectita

TABLA 5.1 Características de los fluidos hidrotermales del sistema geotérmico de Sombrerete

Secuencia de los fluidos	Tipos de fluido	T°C inferida	pH	Conjunto mineral de alteración
<b>Aguas alcalino-cloruradas tempranas</b> Deposición de calcita	alcalino-clorurado profundo	> 300	cercano al neutro a alcalino	principalmente calcita
<b>Aguas alcalino-cloruradas principales</b> Estado principal de deposición de cuarzo	alcalino-clorurado profundo y mezcla con aguas subterráneas que crean fluidos clorurados diluidos	280-260  < 260	cercano al neutro  cercano al neutro a ácido	cuarzo principalmente adularia, calcita  illita, pirita, sericita
<b>Aguas alcalino-cloruradas tardías</b> Deposición de calcita	alcalino-clorurado profundo y mezcla con aguas subterráneas que crean fluidos clorurados diluidos	≈ 200	cercano al neutro a alcalino	calcita principalmente
<b>Aguas ácido-sulfatadas</b>	agua sulfatada cercana a la superficie	< 180	ácido	alunita, caolinita, jarosita natroalunita, esmectita

TABLA 5.2 Características de los fluidos hidrotermales que actuaron en el sistema geotérmico de La Colorada

### Ambiente calentado por vapor

Los ambientes calentados por vapor ocurren en las porciones superiores de los sistemas hidrotermales. Las zonas de alteración ácido-sulfatada producidas por agua calentada por vapor pueden o no sobreyacer a la mineralización depositada a niveles más profundos en el sistema. Las características mineralógicas y forma de las zonas de alteración ácido-sulfatada producidas por estas aguas son similares a aquellas producidas por procesos supergénicos y la distinción es difícil de hacer. Como opuesto a un ambiente supergénico, en aguas calentadas por vapor el  $H_2S$  es aportado por la fase de vapor, la cual es producto del proceso de ebullición y al oxidarse, cuando se mezcla con aguas ricas en oxígeno se forma  $H_2SO_4$ . Lo anterior se puede describir por la reacción resumida como:



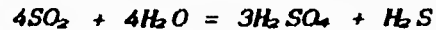
Además esta reacción puede tener lugar en o por arriba del nivel freático y por lo tanto a temperaturas que no exceden los  $100^\circ C$ , las aguas cargadas en  $H_2SO_4$  pueden descender a profundidades donde se encuentran temperaturas más altas. Atributo, no necesariamente universal es la presencia de residuos silíceos, un zoneamiento hacia abajo de alunita pasando por caolinita a una paragénesis de alteración propilitica ó argílica. La ausencia de un protoyacimiento suficientemente grande que provea de las cantidades mínimas requeridas de  $H_2S$ , y la ausencia de enriquecimiento secundario pueden ser criterios útiles para distinguir ambientes supergénicos de los calentados por vapor.

### Ambiente hidrotermal magmático

Desde un punto de vista amplio, el ambiente de vapor hidrotermal magmático incluye todos los sistemas hidrotermales que son manejados por calor magmático y tienen componentes magmáticos significativos en sus fluidos hidrotermales. En el ambiente ácido-sulfatado hidrotermal magmático se forman los depósitos llamados ácido-sulfatados (Hedenquist, 1987), ó alunita-kaolinita (Berger & Henley, 1989).

La alteración ácido-sulfatada en ambientes hidrotermales magmáticos generalmente está controlada por fracturas, y se puede observar un zoneamiento de la alteración fuera de la veta. En este ambiente la disolución de bases puede ser tan intensa, de manera que el aluminio es removido permitiendo un núcleo de sílice granular rodeado por zonas sucesivas de cuarzo-alunita, cuarzo-caolinita, y alteración argílica, los cuales gradúan a roca propilitizada. La alteración ácido-sulfatada también se desarrolla en taponos volcánicos porfiríticos o domos, el núcleo de sílice además contiene

porfiríticos o domos, el núcleo de sílice además contiene huecos producidos por la disolución de fenocristales (generalmente feldespatos alcalinos) lo que da lugar al término "vuggy silica". La pirita diseminada es un acompañante común, particularmente en zonas ricas en sílice. La pirofilita y ocasionalmente diáspora pueden aparecer en la paragénesis de alteración. La alteración generalmente es precedida por una paragénesis de mena que incluyen pirita + enargita-luzonita ± covelita la cual a profundidad, puede gradar a una paragénesis predominante de tetraedrita-tenantita y calcopirita. El azufre nativo es común. En sistemas ácido-sulfatados hidrotermales magnéticos el ácido sulfúrico es producido por la desproporción de  $SO_2$  con decremento de la temperatura, de acuerdo a la siguiente reacción:



De acuerdo a las características de los yacimientos estudiados (baja sulfidación), hay dos posibles orígenes de la alteración ácido-sulfatada.

- a) Alteración supergénica
- b) Ambiente calentado por vapor

El origen de este tipo de alteración, en los distritos de Sombrerete y Colorada, es por oxidación atmosférica del  $H_2S$  en un ambiente calentado por vapor. Las cantidades necesarias de  $H_2S$  fueron aportadas a través de las erupciones hidrotermales. Durante estas explosiones ocurre la ebullición de fluidos profundos donde una buena cantidad de agua se convierte en vapor, y otros constituyentes volátiles tales como  $CO_2$  y  $H_2S$ , inicialmente disueltos en la fase líquida son preferencialmente particionados dentro de la fase gaseosa (Fournier, 1985). Los vapores al escapar por los conductos interaccionan con las aguas superficiales que son ricas en oxígeno disuelto, por lo que el  $H_2S$  se oxida y forma  $H_2SO_4$  con la posterior alteración ácido-sulfatada.

La aseveración anterior se fundamenta en:

- 1) La ausencia de gossans en los distritos
- 2) La presencia de cuerpos fuertemente silicificados (jasperoides).
- 3) La presencia de un zonedamiento de acuerdo a la paleotopografía y
- 4) Ausencia de enriquecimiento secundario.

### 5.2.3 Temperatura de emplazamiento

#### Datos de inclusiones fluidas

Albinson (1987b) informa que las temperaturas de depositación varían de 200 a 250°C en Sombrerete y en La Colorada llegan a alcanzar más de 300°C.

Rentería (op cit.) señala temperaturas de homogeneización en un rango que va de 155°C a 310°C y salinidades de 0.5 a 14 % para la salinidad expresada en peso equivalente de NaCl (1ª etapa mineralizante). Y temperaturas de 180 a 250°C con salinidades de 2 a 9 % en peso eq. de NaCl, para la última etapa.

Sin embargo Solís-Pichardo y colaboradores (1992) mencionan temperaturas de homogeneización de 200°C y algunas hasta de 260°C, las cuales corresponden a salinidades muy bajas (0 a 4 % peso eq. de NaCl)

#### Paragénesis de alteración

Las temperaturas en sistemas geotérmicos activos, pueden ser inferidas por la presencia de ciertos minerales arcillosos hidrotermales dependientes de la temperatura (Browne, 1990). En sistemas hidrotermales fósiles (yacimientos minerales) se puede de igual manera inferir la temperatura a la cual se encontraban los fluidos hidrotermales al momento de la depositación mineral. Lo anterior se logra basándose en la presencia de los minerales hidrotermales dependientes de la temperatura que presenta el yacimiento.

La montmorillonita es estable aproximadamente a los 140°C y la illita por arriba de los 220°C en sistemas activos (Browne, op cit). Sin embargo hay otros minerales como la clorita con rangos de temperaturas mucho más grandes, mayores a 300°C. Considerando la presencia de los minerales anteriormente mencionados en los yacimientos estudiados (fig.5.3), se infiere que las temperaturas de emplazamiento, para Sombrerete y La Colorada oscilaron entre 140°C y 300°C, el cual es un rango muy grande. Sin embargo se puede hacer más corto con los datos de inclusiones fluidas.

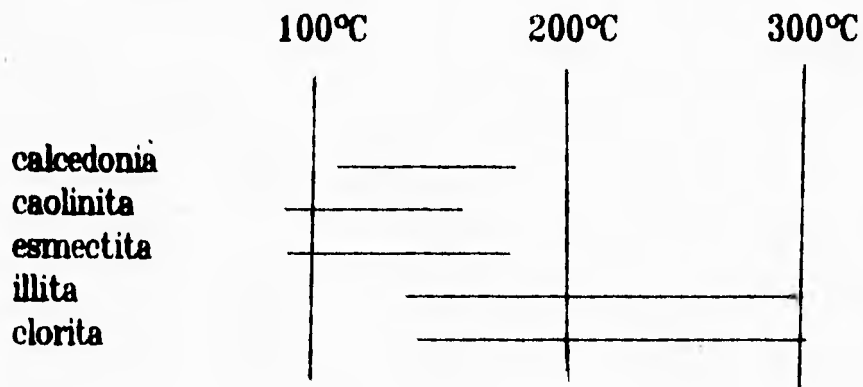


figura 5.3 Diagrama que muestra la estabilidad de diferentes minerales sensibles a la temperatura.

#### 5.2.4 Procesos de depositación.

Los datos de inclusiones fluidas representados en los diagramas de temperatura de homogeneización ( $T_h$ ) contra temperatura de fusión ( $T_f$ ), o  $T_h$  contra profundidad, son útiles para interpretar los procesos que están actuando en un sistema hidrotermal activo (Hedenquist et al, 1992) y que inducen la depositación mineral. Esta información se puede extrapolar a sistemas hidrotermales fósiles para conocer los procesos que actuaron y dieron origen al yacimiento mineral. Tales procesos son la mezcla (por ejemplo dilución con aguas meteóricas) y la ebullición del fluido geotérmico con la consecuente pérdida de gases disueltos, principalmente de  $CO_2$ .

Para obtener información sobre los procesos que ocasionaron la depositación de la mineralización en las zonas de estudio, se analizaron los datos de inclusiones fluidas obtenidos por Albinson (1987), Rentería (1992) y Solís-Pichardo, et al. (1992).

Los autores anteriores trabajaron con inclusiones fluidas primarias, además pseudosecundarias en el caso de Albinson. Las inclusiones en los tres casos fueron observadas en cuarzo, calcita y esfalerita. Y se colectaron en superficie así como en los niveles que estaban en operación.

Rentería (op.cit) observa tres tipos de inclusiones en su trabajo:

1) Inclusiones de dos fases (líquido-vapor). Son las más abundantes, en ellas la fase líquida es la dominante y representa un 75 a 85 % del volumen total de la inclusión. Todas ellas homogeneizan a la fase líquida.

2) Inclusiones ricas en vapor. En estas inclusiones el vapor es la fase dominante dentro de la inclusión, representa un 75 % del volumen total.

3) Inclusiones ricas en líquido (monofásicas). En estas inclusiones el líquido es la única fase visible. Se presenta generalmente en grupos de inclusiones, algunas de ellas del tipo 1 exhibiendo proporciones variables de la relación líquido-vapor.

Como se puede observar en los diagramas de  $T_h$  vs  $T_f$  (donde están graficados el rango de temperatura de homogeneización contra el rango de salinidad de cada muestra) del área de Sombrerete (fig.5.4, 5.5 y 5.6), la distribución de los datos es muy parecida para los tres eventos. La distribución de los datos graficados para los eventos uno y dos, sugiere una curva de ebullición, cuya base es complicada indicando que los procesos actuados fueron la mezcla y la ebullición. Posiblemente los fluidos mineralizantes se mezclaron con aguas meteóricas, ya que se observa una disminución de temperatura y salinidad en las gráficas (fig.5.7 y 5.8), lo

que sugiere la presencia de un fluido con menor temperatura y salinidad. Los datos del tercer evento, no forman la curva de ebullición, ellos en cambio se distribuyen a lo largo de una curva casi recta (fig.5.6 y fig.5.9). El análisis de éstos datos indica la ausencia de ebullición y la dilución del fluido hidrotermal, probablemente con aguas meteóricas. De las gráficas indicadas también se puede concluir que la temperatura a la cual se inició la depositación mineral fué aproximadamente de 200°C. Mientras que la dilución disminuye la temperatura a 180°C-150°C. Temperaturas mostradas por las inclusiones fluidas en muestras de superficie (jasperoides).

Para la Colorada, desafortunadamente los autores señalan datos de manera global, y no separan las inclusiones fluidas de acuerdo a las distintas etapas de mineralización. Sin embargo el análisis de los pocos datos existentes, indica que al igual que en Sombrerete fueron la ebullición y la dilución los principales procesos mineralizantes (fig.5.10).

En la fig.5.11 se puede observar que los datos de las inclusiones fluidas en la muestra C-22, sugieren la presencia de 2 procesos; dilución y ebullición. En la muestra C-09 hay una amplia distribución de  $T_h$  y  $T_f$ , indicándonos que hubo entrampamiento de las dos fases durante la ebullición y que, las inclusiones tienen proporciones variables de la relación líquido-vapor. Lo cual se traduce en un rango sumamente amplio de temperaturas de homogeneización (fig.5.12).

La muestra C-07 presenta dos poblaciones de datos, por lo que se infiere la presencia de dos fluidos con salinidades distintas en las inclusiones (fig.5.13).

La ebullición ha sido documentada en otros sistemas epitermales y ha sido considerada como el proceso principal que controla la depositación mineral (Kamilli y Ohmoto, 1977; Buchanan, 1981; Smith et al., 1982).

La evidencia de condiciones de ebullición durante la depositación de soluciones de cuarzo y calcita sugiere que condiciones similares prevalecieron durante los episodios de depositación de sulfuros y sulfosales (Simmons, 1988). Sin embargo la dilución también es un proceso importante, ya que actúa como el mecanismo principal que dió origen a la depositación tardía de calcita.

En ambos distritos hay inclusiones que muestran salinidades hasta de 14 % en peso equivalente de NaCl. Para explicar esta salinidad así como los procesos de ebullición y mezcla y las diferentes etapas de depositación, se propone el siguiente modelo:

La ebullición del fluido hidrotermal origina la formación de dos fases; una líquida y otra gaseosa. La fase gaseosa escapa continuamente dejando una fase líquida con mayor concentración de sales minerales. De la fase líquida ocurre

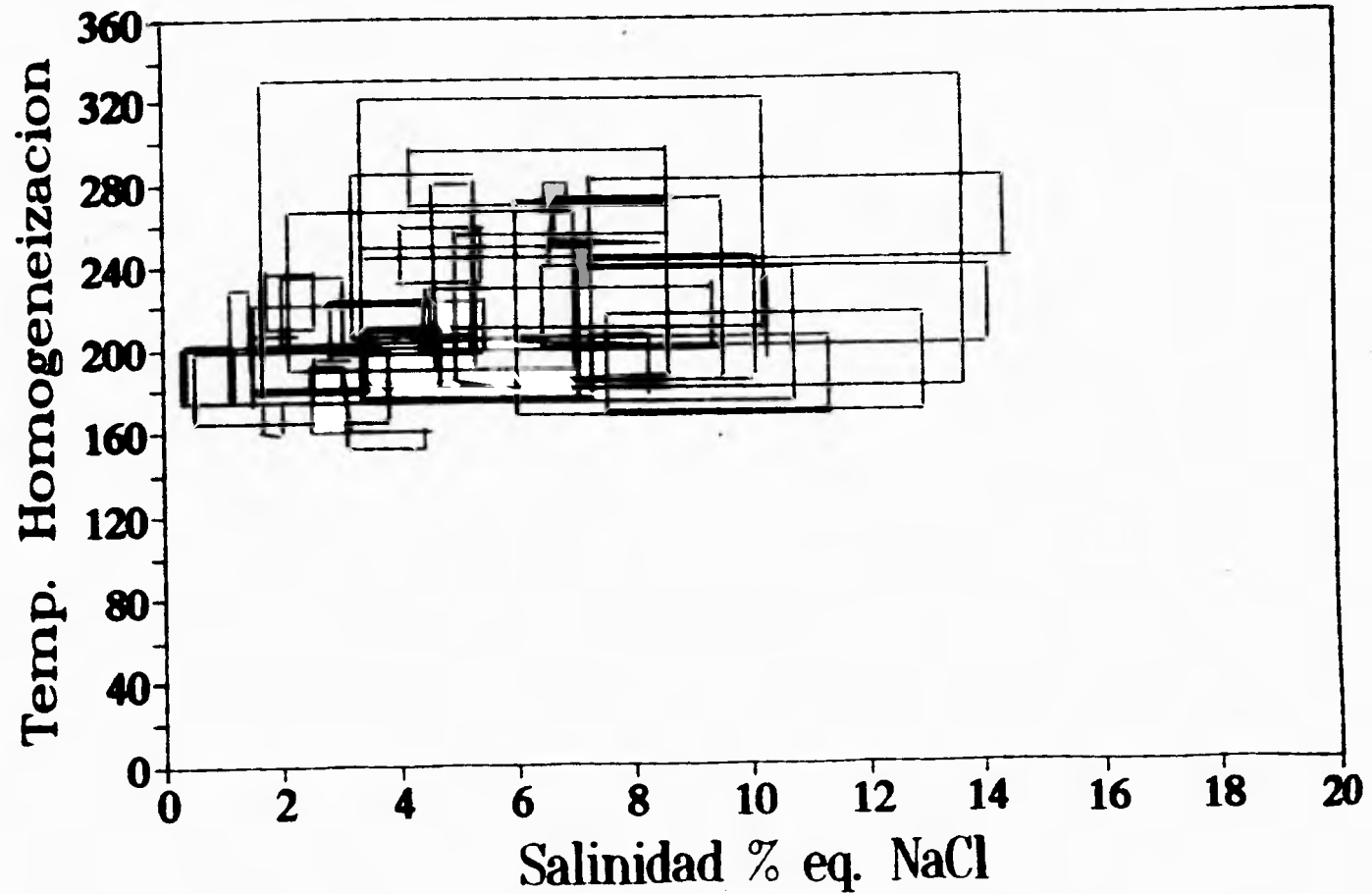


la precipitación de sulfuros, sulfosales y cuarzo principalmente. Mientras que la fase gaseosa asciende y se condensa e interactúa con las aguas freáticas ricas en oxígeno, produciendo la depositación de calcita y la formación de la alteración ácido-sulfatada anteriormente discutida (fig.6.2).

### **5.3 Relación litología-paragénesis de alteración**

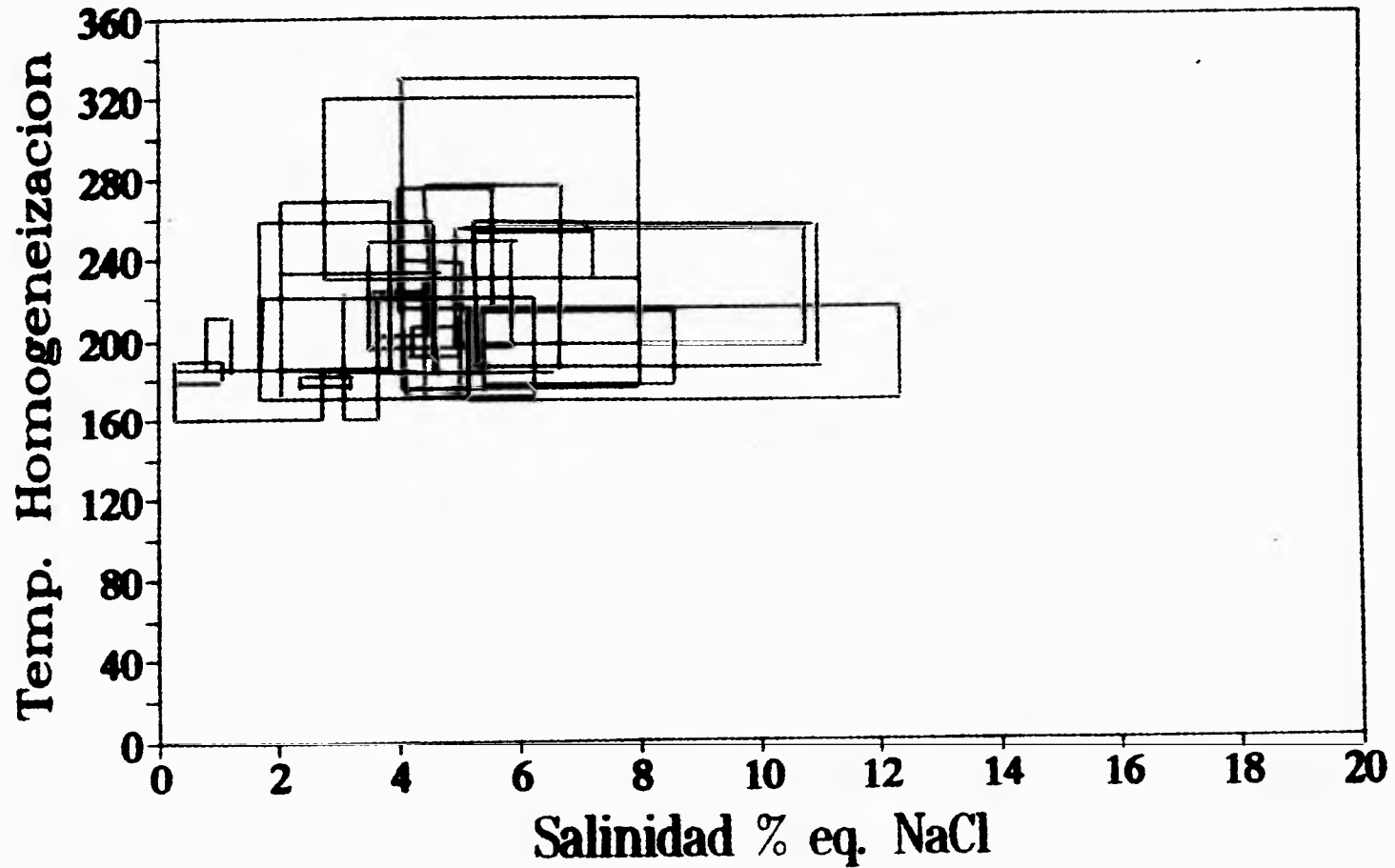
El papel que juega la composición de la roca encajonante es importante para determinar que paragénesis de alteración se presenta. Las paragénesis de alteración varían de paquete a paquete. Mientras que en el paquete sedimentario hay predominio de alteración filica, silicificación y dolomitización, en el paquete volcánico domina la alteración argílica y la argílica avanzada. Además en el paquete volcánico de Sombrerete (en andesitas) es importante la alteración propilítica, mientras que en la Colorada la alteración filica (en traquitas) es la principal en cuanto a su abundancia.

### Datos Renteria



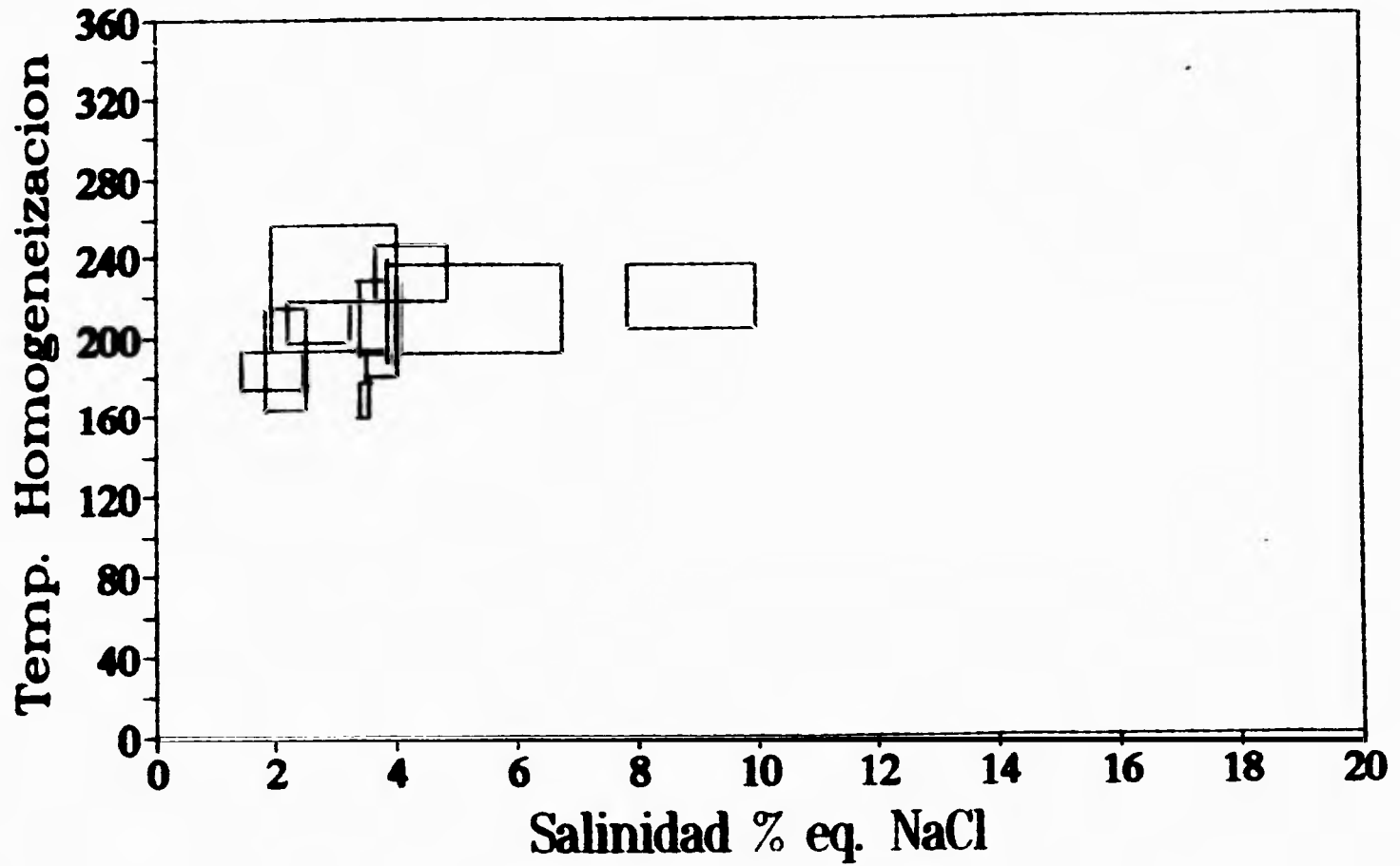
**Figura 5.4** Diagrama que muestra los rangos de temperatura de homogeneización contra salinidad de las inclusiones fluidas pertenecientes al primer evento mineralizante en Sombrerete (datos de Rentería).

### Datos Renteria



**Figura 5.5** Diagrama que muestra los rangos de temperatura de homogeneización contra salinidad de las inclusiones fluidas pertenecientes al segundo evento mineralizante en Sombrerete (datos de Rentería).

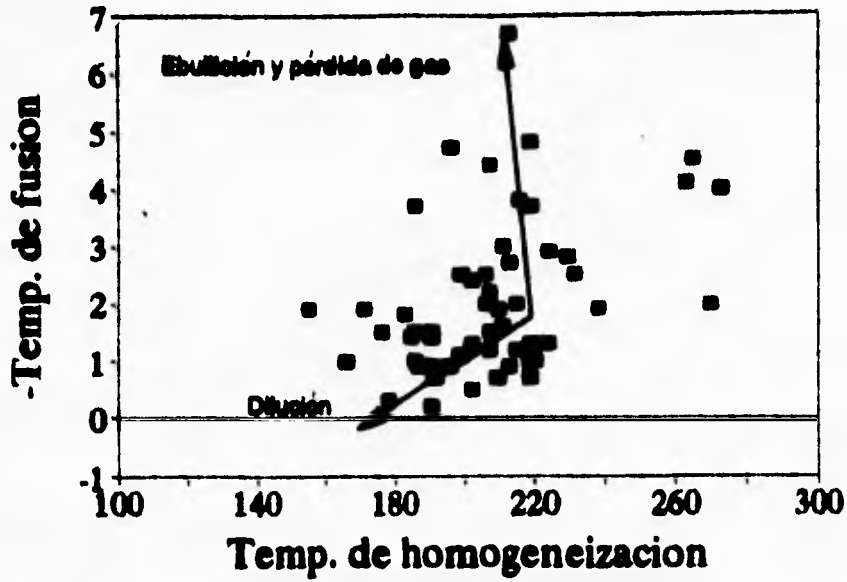
### Datos Renteria



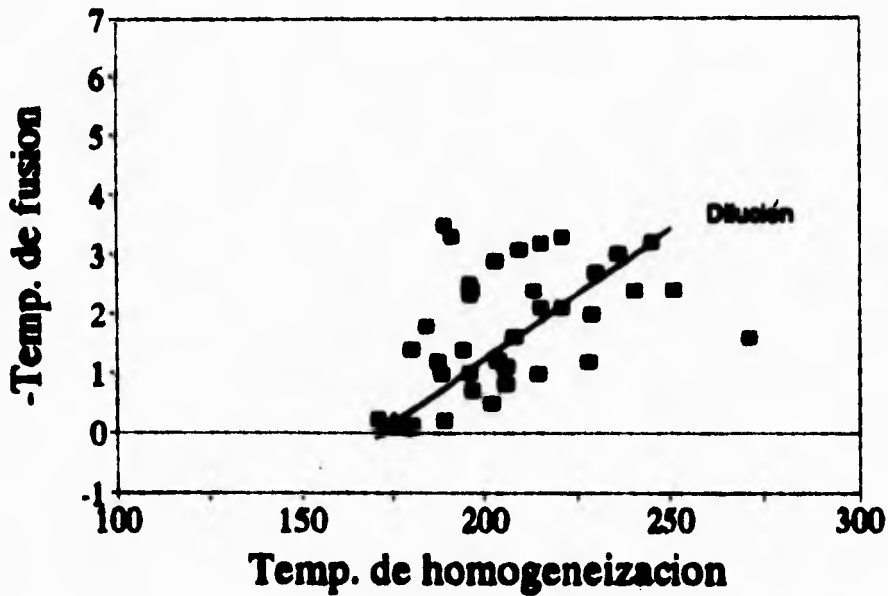
**Figura 5.6** Diagrama que muestra los rangos de temperatura de homogeneización contra salinidad de las inclusiones fluidas pertenecientes al tercer evento mineralizante en Sombrerete (datos de Rentería).

**TESIS SIN PAGINACION**

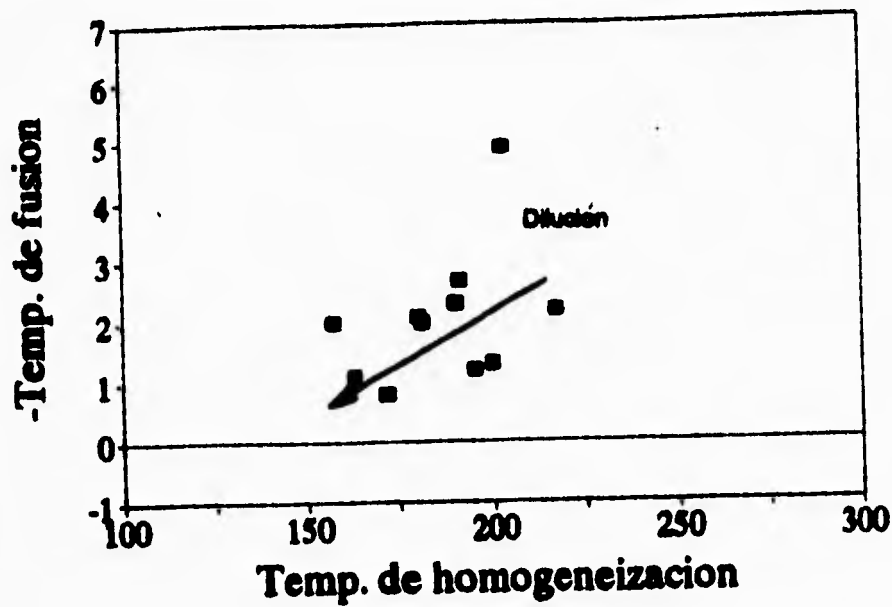
**COMPLETA LA INFORMACION**



**Figura 5.7** Diagrama de temperatura de homogeneización contra temperatura de fusión de las inclusiones fluidas pertenecientes al primer evento mineralizante en Sombrerete (datos de Rentería).

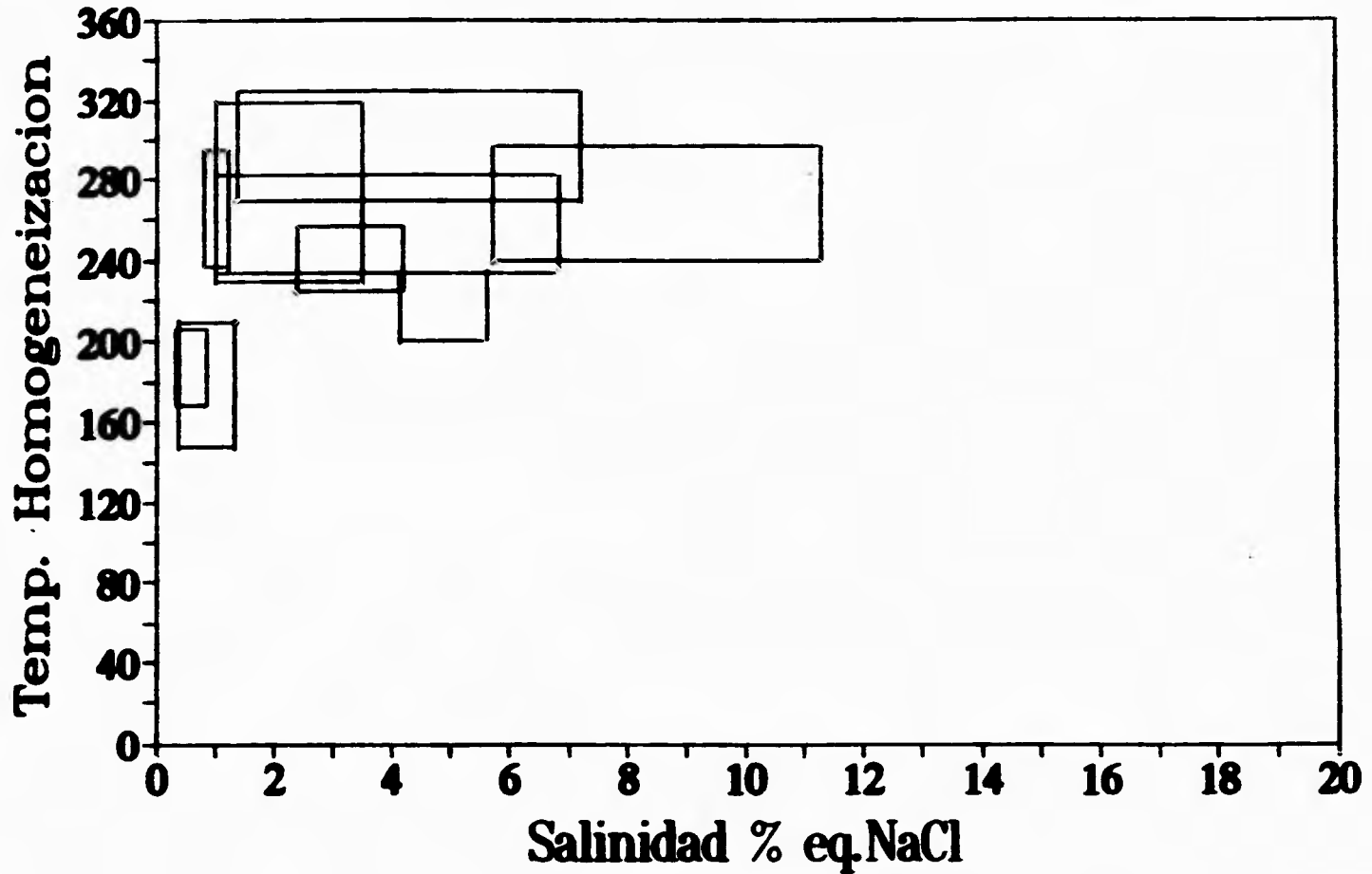


**Figura 5.8** Diagrama de temperatura de homogeneización contra temperatura de fusión de las inclusiones fluidas pertenecientes al segundo evento mineralizante en Sombrerete (datos de Rentería).



**Figura 5.9 Diagrama de temperatura de homogeneización contra temperatura de fusión de las inclusiones fluidas pertenecientes al tercer evento mineralizante en Sombrero (datos de Rentería).**

### Datos Albinson



**Figura 5.10 Diagrama que muestra los rangos de temperatura de homogeneización contra salinidad de las inclusiones fluidas pertenecientes a los eventos mineralizantes en La Colorada (datos de Albinson)**



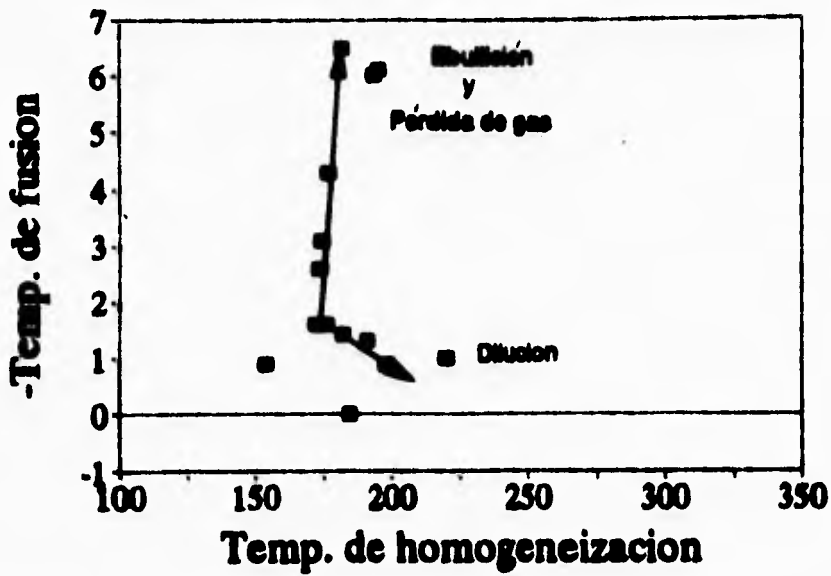


Figura 5.11 Diagrama de temperatura de homogeneización contra temperatura de fusión de las inclusiones fluidas pertenecientes a la muestra C-22 (datos de Solís et al).

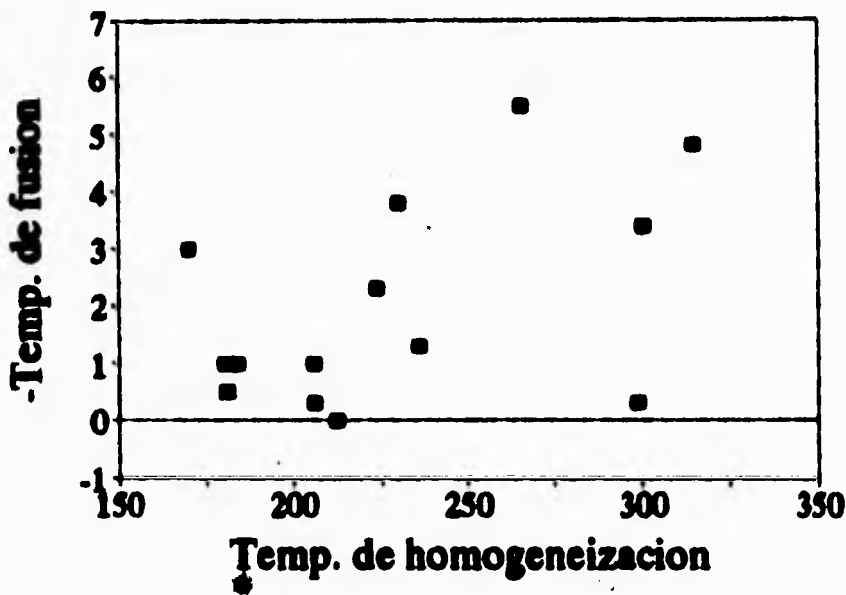
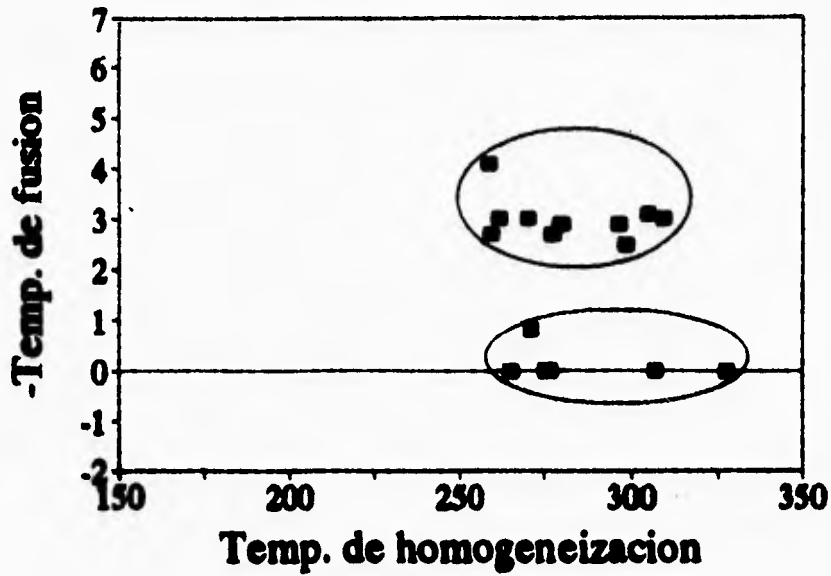


Figura 5.12 Diagrama de temperatura de homogeneización contra temperatura de fusión de las inclusiones fluidas pertenecientes a la muestra C-09 (datos de Solís et al).



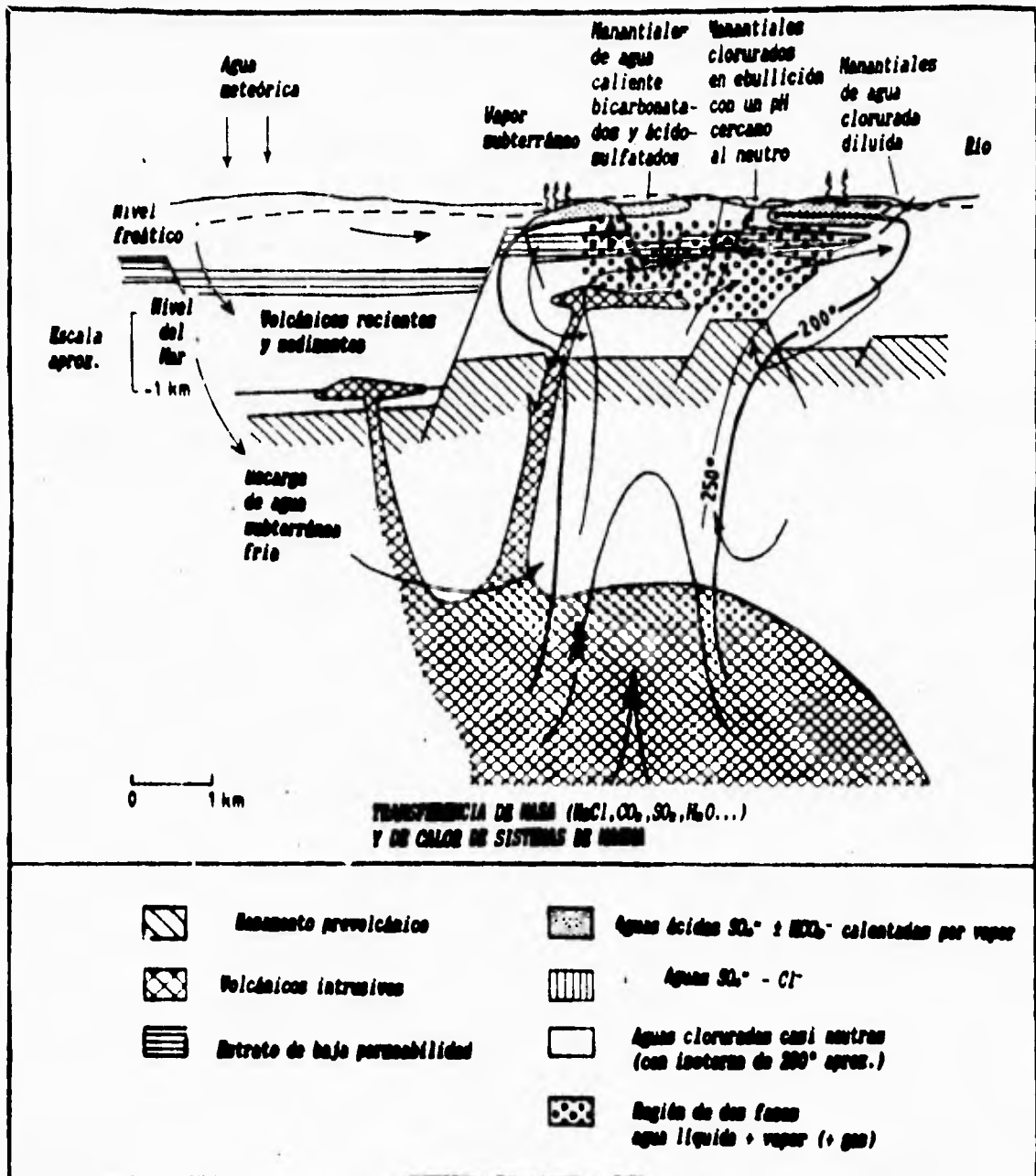
**Figura 5.13** Diagrama de temperatura de homogeneización contra temperatura de fusión de las inclusiones fluidas pertenecientes a la muestra C-07 (datos de Solis et al).

## **RECONSTRUCCION DE LOS SISTEMAS HIDROTERMALES FOSILES DE SOMBRERETE Y LA COLORADA.**

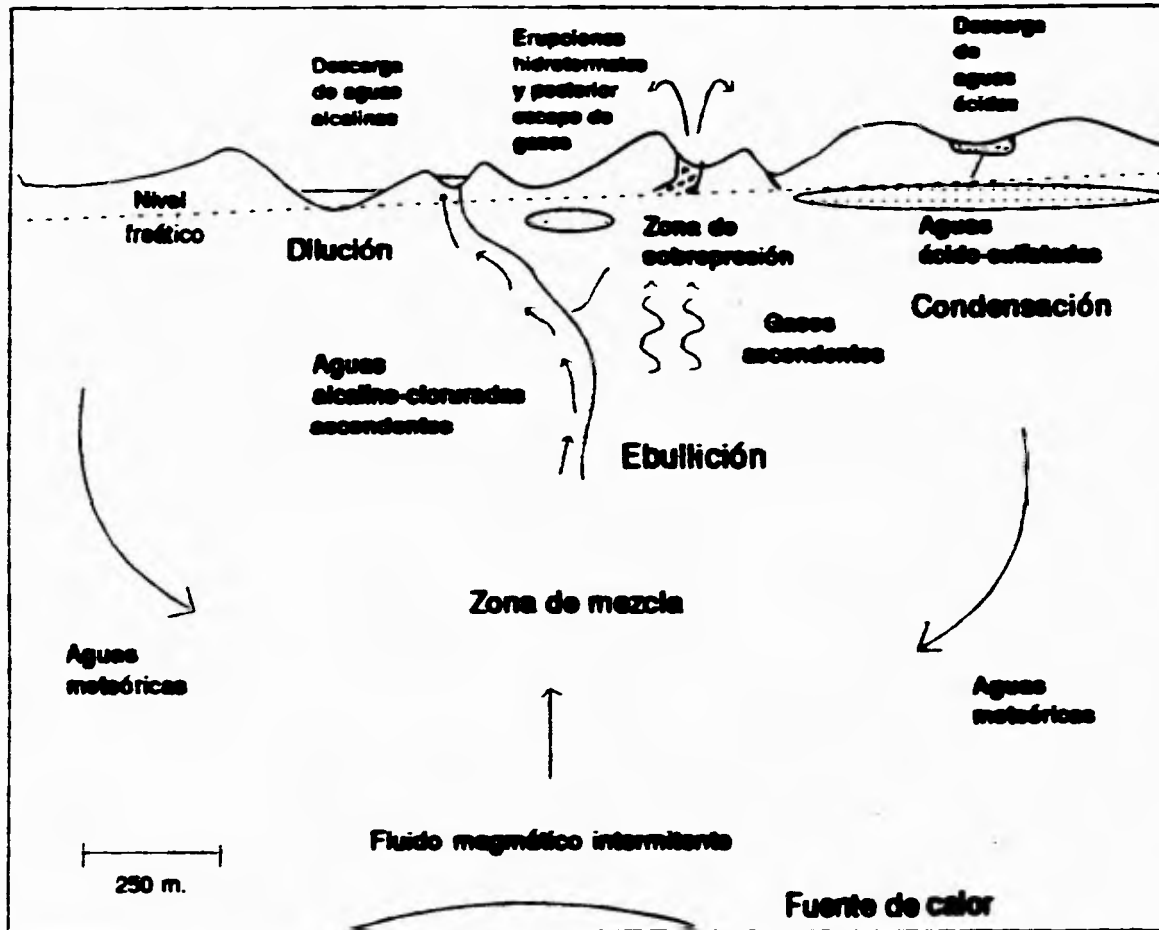
Debido a las características (paragénesis de alteración, relieve, mineralización, etc.) que presentan los yacimientos epitermales de Sombrerete y La Colorada, estos corresponden a dos sistemas geotérmicos típicos de terrenos volcánicos silícicos semejantes al de la Zona Volcánica de Taupo, en Nueva Zelanda (fig.6.1).

Considerando la presencia de cuerpos brechados, de cuerpos fuertemente silicificados, de la distribución de la alteración y de los datos de inclusiones fluidas; la reconstrucción de los sistemas hidrotermales de Sombrerete y La Colorada considera:

Descargas de aguas alcalino-cloruradas a una temperatura de 100°C a 180°C en superficie. La cercanía a superficie de aguas ácido-sulfatadas que interactúan con el oxígeno atmosférico y/o con aguas subsuperficiales ricas en oxígeno. La presencia de salmueras metalíferas que fueron inyectadas en un sistema hidrotermal preexistente donde circulaban fluidos diluidos, saturados en sílice, fig.6.2. En general, el sistema hidrotermal establecido es similar al modelo esquemático para el campo geotérmico de Broadlands, Nueva Zelanda (Giggenbach, 1981), en el cual los fluidos diluidos provienen de aguas meteóricas de convección profunda, mientras que las salmueras provienen de una fuente magmática a profundidad. Una sobrepresurización de los sistemas debido a la presencia de gases como  $CO_2$  y  $H_2S$  ocasionó erupciones hidrotermales. Una vez en las fallas y chimeneas, el intervalo de temperaturas de 200° a 300°C fué particularmente favorable para una depositación de sulfuros de plata, plomo y zinc como respuesta a la ebullición y consecuente pérdida de gas. Esta depositación se llevó a cabo durante múltiples estados de actividad hidrotermal. Cuando el pulso magmático disminuyó, las soluciones diluidas entraron a los conductos y llenaron los espacios vacíos remanentes con cuarzo y calcita. El último estado de depositación de calcita marca la terminación de los eventos formadores de los yacimientos.



**Figura 6.1 Modelo de un sistema geotérmico típico de terrenos volcánicos silícicos (Tomado de Henley y Ellis, 1983).**



**Figura 6.2** *Reconstrucción de los sistemas hidrotermales de Sombrero y La Colorada.*

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

### 7.1 Conclusiones:

Los sistemas Hidrotermales de Sombrerete y La Colorada dieron origen a dos yacimientos epitermales de baja sulfidación, con una conjunto de alteración argílica avanzada posterior a la mineralización.

La mineralización está relacionada espacial y temporalmente con la alteración potásica.

Los procesos que originaron la depositación mineral fueron: En Sombrerete la ebullición y la dilución con aguas meteóricas en el evento uno y dos y la dilución también con aguas meteóricas en el evento tres. Mientras que en La Colorada fueron la dilución y la ebullición con la consecuente pérdida de CO<sub>2</sub>.

La mineralización ocurrió a través de una serie de inyecciones de salmuera periódicas a los sistemas hidrotermales.

Las temperaturas de depositación mineral, según datos de inclusiones fluidas y minerales de alteración tienen un rango de 200° a 300°C.

El origen del subconjunto ácido-sulfatado es por oxidación en un ambiente calentado por vapor.

### 7.2 Recomendaciones:

#### Sombrerete

- La zona de mayor interés por las estructuras que presenta es el Cordón del Artesano, ya que existen cuerpos brechados y gran alteración. Se recomienda hacer barrenaciones profundas y análisis químicos.

#### La Colorada

- Se recomienda hacer barrenaciones en la zona sur, contacto traquitas-riolitas cerca de los cuerpos silicificados, la presencia de alteración argílica avanzada en este sitio, indica la existencia de conductos de escape de gases que podrían estar mineralizados.

### REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Albinson, T.F., 1987a, Informe geológico y evaluación del potencial económico del Cordón del Artesano. Distrito Sombrerete, Zac. GRUCAT, inédito.

Albinson, T.F., 1987b, Reconstrucción Geológica de paleosuperficies en los distritos de Sombrerete, Colorada y Fresnillo, Estado de Zacatecas; en Memorias de la XVIII Convención Nacional de la Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, A.C., Tomo I, Geología, Acapulco, Guerrero.

Albinson T.F., 1985, Zoneamientos térmicos y su Distribución de Mineral en algunos yacimientos epitermales en México. Memoria de la XVI Convención de la AIMMG, pag. 19.

Andrade, A., Yañez, A., Soto, M., 1988, La Colorada en: Minas Mexicanas, tomo 4. Soc. of Econ. Geol.

Barger, K.E, Beeson, M.H, Fournier, R.O and Muffler L.J.P. 1973, Present day deposition of lepidolite from thermal waters at Yellowstone National Park, American Mineralogist, 58, 901-904.

Berger, A.R. and Henley, R.W., 1989, Advances in the understanding of epithermal gold-silver deposits, with special reference to the western United States, Monografía 6 Econ. Geol., p.405-423.

Browne, P.R.L. and Ellis, A.J., 1970, The Ohaki Broadlands hydrothermal area, New Zealand: Mineralogy and related geochemistry. Amer.J.Sci. 269, p.79-131.

Browne, P.R.L. and Garner, M.W., 1982, Subsurface alteration at the Ngawha geothermal field: a progress report. Proceedings of the Pacific geothermal conference, Part 1.

Browne, P.R.L., 1990, Hidrotermal alteration and Geothermal Systems, course notes, New Zealand.

Browne, P.R.L., Roedder, E., Wodzicki, A., 1976, Comparative study of past and present geothermal waters, from a study of fluid inclusions, Broadlands field, New Zealand. Proc. Intl.Symp. on Water-Rock Interaction. Prague, 1974, 140-149.

Buchanan, L.J., 1981., Precious metal deposits associated with volcanic environments in the southwest: Geol. Soc. Arizona Digest, v.14, p. 237-261.

Cervantes, M.E., 1966, Mineral de la Colorada. *Asoc. de Ings. de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México*, nº39, IV trimestre, p.59-72.

Drummond, S.E. and Ohmoto, H., 1985, Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems: *Rev. Econ. Geology.*, v.80, p. 126-147.

Elders, W.A., Hoagland, J.R., y Williams, A.E., 1981, Distribution of hydrothermal mineral zones in the Cerro Prieto geothermal field of Baja California, Mexico, *Geothermics*, 10, 245-253.

Facca, G and Tonani, F., 1967, The self-sealing geothermal field. *Bull. of Volcanol.* 30, p.271-273.

Fredrickson, G., 1974, Geology of the Mazatlan Area, Sinaloa, Western Mexico; Unpl. Phd. Thesis. University of Texas at Austin.

Folk, R.L., 1977, Peculiar forms of diagenetic carbonate from hypersaline and cave deposits, ancient to recent (abs); *Newsletter West Texas Geol. Society*, November, p.11

Giggenbach, W.F., 1980, Geothermal gas equilibria. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, v.44, p.2021-2032.

Giggenbach, W.F., 1981, Geothermal mineral equilibria, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, v.45, nº3, p 393-410.

Fourier, R.O., 1985, The behavior of silica in hydrothermal solutions. *Reviews in Econ. Geol.*, v.2, p.45-61.

Giggenbach, W.F., 1981, Geothermal mineral equilibria. *Geochem. et Cosmochem. Acta*, v.45, p.393-410.

Giggenbach, W.F. and Stewart, M.K. 1982, Process controlling the isotopic composition of steam and water dischargers from steam vents and steam heated pools in geothermal areas. *Geothermics*, v.11, p.71-80.

Giggenbach, W.F., 1986, The use of gas chemistry in delineating the origin of fluids discharged over the Taupo Volcanic Zone. *Intl. Volcanological Congress, Proc. of Symp.5, Hamilton, New Zealand*, 47-50.

Giggenbach, W.F., 1988, Geothermal solute equilibria: Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, v.52, p.2749-2765.

Giggenbach, W.F., 1989, Proces controlling the CO<sub>2</sub> and Cl contents of thermal dischargers from the Taupo-Rotorua volcanic-magmatic-hydrothermal system. *Proc. Sixth Intl.Symp. on Water-Rock Interaction, Malvern*, 259-262.



Gilbert, J.M. & Park, C.F., 1986, *The Geology of ore deposits*. W.H. Freeman and Co., New York.

Hayba D.O., Bethke P.M., Heald P., and Foley N.K., 1985, *Geologic, mineralogic, and geochemical characteristics of volcanic-hosted epithermal precious-metal deposits*, in *Geology and Geochemistry of epithermal systems*, chapter 7, *Reviews in Economic Geology*, vol.2. Society of Economic Geologists.

Hedenquist, J.W., 1985, *Effect of CO<sub>2</sub> on freezing point depression measurements of fluid inclusion: Evidence from active geothermal system and implications for epithermal ore deposition*. *Econ. Geol.*, v.80, p.1379-1406.

Hedenquist, J.W., 1986, *Geothermal systems of the Taupo Volcanic Zone, New Zealand; their characteristic and relation to volcanism and mineralization*. In Smith, I.E.M. (ed), *Late Cenozoic Volcanism in New Zealand*. Roy. Soc. N.Z. Bull., 23, p.134-168.

Hedenquist, J.W., 1987, *Mineralization associated with volcanic-related hydrothermal systems in the Circum-Pacific basin*; en M.K. Horn (ed) *Transaction of the 4th Circum-Pacific Conference on Energy and Resources*.

Hedenquist, J.W., 1990, *The thermal and geochemical structure of the Broadlands-Ohaaki geothermal system, New Zealand*. *Geothermics*, 19, p.151-185.

Hedenquist, J.W., Reyes A.G., Simmons S.F. and Taguchi S., 1992, *The thermal and geochemical structure of geothermal and epithermal systems: A framework for interpreting fluid inclusion data*. *Eur. J. Mineral.*, 4, 989-1015.

Henley, R.W. and Ellis, A.J., 1983, *Geothermal systems, ancient and modern*: *Earth Sci. Rev.*, v.19, p.1-50.

Henley, R.W., Truesdell, A.H., Barton, P.B., Jr., and Whitney, J.A., 1984, *Fluid-mineral equilibria in hydrothermal systems*: *Rev. Econ. Geology*, v.1, 267 p.

Henley, R.W., 1985, *The Geothermal framework for epithermal systems*: *Rev. Econ. Geology*, v.2, p 1-24.

Henley, R.W., Hedenquist, J.W., Roberts, P.J., 1986, *Guide to the active epithermal (geothermal) systems and precious metal deposits of New Zealand*: *Mon. Ser. Mineral Deposits*, v.26, 211 p.

INEGI, 1981, *Síntesis Geográfica de Zacatecas*. Secretaria de Programación y Presupuesto (SPP), México D.F.

- Kamilli, R.J., and Ohmoto, H., 1977, Paragenesis, zoning, fluid inclusion, and isotopic study of the Finlandia vein, Colqui district, Central Peru: *Rev. Econ. Geology.*, v.72, p.950-982.
- Kieffer, S.W., 1982, Dynamics and thermodynamics of volcanic eruptions: implication for the plumes on Io. In: D. Morrison (Ed), *Satellites of Jupiter*. Univ. Arizona Press, Tucson.
- Kristmannsdottir, H., 1977, Types of clay minerals in hydrothermally altered basaltic rocks, Reykjanes, Iceland, *Jokull*, 26, 30-39.
- Le Pichon, X., Francheteau, J. y Bonin, J., 1973. *Plate Tectonics. Developments in Geotectonics 6*, Elsevier, Amsterdam, 300 pp.
- Lindgren, W., 1933, *Mineral Deposits: Mc Graw Hill Book Co.* 4th edition: 930 pp.
- Mitchell, A.H.G. y Garson, M.S., 1981. *Mineral Deposits and Global Tectonic Settings*. Academic Press, London, 405 pp.
- Muffler, L.J., White, D.E., Truesdell, A.H., 1971, Hydrothermal explosion craters in Yellowstone National Park. *Geol. Soc. Am. Bull.* 82, p.723-740.
- Nairn, I.A. and Solia, W., 1980, Late Quaternary hydrothermal explosion breccias at Kawerau geothermal field, New Zealand. *Bull. Volcanol.* 43, p.1-13.
- Nelson, C.E. and Giles, D.L., 1985, Hydrothermal eruption mechanism and hot spring gold deposits. *Econ. Geol.* 80, p.1663-1639.
- Pirajno, F., 1992, *Hydrothermal Mineral Deposits*. Springer-Verlag. pp.695.
- Radke, B.M. and Mathis, R.L., 1980, On the formation and occurrence of saddle dolomite. *Jour. of Sedim. Petrology*, v.50, n°4, p.1149-1168
- Rentería, T.D., 1992, *Estudio metalogenético de la mina Sombrerete en Zacatecas, México*. Tesis de Maestría UNAM, inédita.
- Reyes, A.G and Tolentino, B.S, 1981, The distribution of alteration mineral in Phillipines geothermal areas. Presentado en ASCOPE meeting, Manila.
- Rye R.O, Bethke P.M., Wasserman M.D., 1992, The stable geochemistry of acid sulfate alteration, *Rev. Econ. Geol.*, vol 87, n° 2, p.225-262.

Simmons, S. 1994, Short course notes: Volcanic-hosted epithermal deposits and their explorations models, Instituto de Geofísica, UNAM. México D.F..

Simmons, S.F., Gemmell, J.B., and Sawkins, F.J., 1988, The Santo Niño Silver-Lead-Zinc Vein, Fresnillo District, Zacatecas, Mexico: Part II. Physical and Chemical Nature of Ore-Forming Solutions. *Rev. Econ. Geol.*, v.83, p.1619-1641.

Smith, D.M., Jr., Albinson, T.A., and Sawkins, F.J., 1982, Geologic and fluid inclusions studies of the Tayoltita silver-gold vein deposits, Durango, México: *Rev. Econ. Geology*, v.77, p.1120-1145.

Solis-Pichardo G., Prol-Ledesma R.M. and García-Cotero M.L. 1992, Hydrothermal alteration and fluid inclusion data in the district of Sombrerete and Colorada, Mexico. Fourth Biennial Pan-American Conference on Research on fluid inclusions. Abstracts.

Soto, M. Martín. 1987, Relaciones en espacio y tiempo entre chimeneas y vetas del Distrito Minero de la Colorada, Zac. Tesis Profesional UNAM, inédita.

Tulloch, A.J., 1982, Mineralogical observations on carbonate scaling in geothermal wells at Kawerau and Broadlands. *Proceeding of the Pacific Geothermal Conference, Part 1*, 131-134.

White, D.E., 1955, Thermal springs and epithermal ore deposits: *Econ. Geol. 50th Anniversary Vol.*: 99-154.

White, N.C. and Hedenquist, J.W., 1990, Epithermal environments and styles of mineralization: variations and their causes, and guidelines for exploration. *Jour. Geochem. Expl.*, v.36, 445-474. Elsevier Sci. Pub., Amsterdam.

Wohletz, K.H., 1992, *Volcanology and Geothermal Energy*. Univ. of California Press, Oxford, England.

**TESIS SIN PAGINACION**

**COMPLETA LA INFORMACION**

**ANEXO A**

**DISTRITO MINERO DE SOMBRERETE**

**Minerales de alteración presentes en las muestras colectadas en superficie**

Muestra	Qz	Cal	Pir	Clor	Ill	Fd-K	Musc	Ser	GC	GE	Bar	Esf	Leuc	Op	Coed	Dol	Hem	G-L	Ank	Sulf	Al
SS-24	X	X	X	X	X		X														
SS-25	X	X	X			X	X		X			X			X			X			
SS-26	X	X	X		X		X	X	X				X				X		X		
SS-27	X		X		X			X	X												
SS-28	X	X	X													X	X				
SS-29	X	X	X													X					X
SS-30	X		X		X	X	X		X	X			X		X						X
SS-31	X											X		X	X		X	X		X	
SS-32	X		X		X			X	X		X	X			X				X		
SS-33	X		X									X	X		X		X	X			
SS-34	X	X	X	X	X		X	X				X	X				X				
SS-35	X								X						X						
SS-36	X								X				X				X				X
SS-37				X			X										X				
SS-38	X	X	X		X			X				X	X				X			X	
SS-39	X					X															
SS-40	X	X	X	X	X	X			X			X									X
SS-41	X				X		X									X	X				
SS-42	X		X						X			X	X				X	X			
SS-43	X				X	X									X						
SS-44	X	X			X																

Qz=cuarzo, Cal=calcita, Pir=pirita, Clor=clorita, Ill=illita, Fd-k=feldspato potasio, Musc=muonovita, Ser=sericita, GC=grupo de la caolinita, GE=grupo de la esmectita, Bar=barita, Esf=esfena, Leuc=leucoseno, Op=opalo, Coed=calcedonia, Dol=dolomita, Hem=hematita, G-L=goethita-limonita, Ank=ankerita, Sulf=sulfuros (marcosita o esferita o galena), Al=alunita.

Las siguientes muestras presentan ademàs: SS-36=vermiculita, SS-38=domonita y SS-42=rodocrosita y lepidocrosita.

**NUMERO MINERO DE SOMBRERETE**

Minerales de alteración presentes en las muestras colectadas de las barreras Miripom 1, 2 y 3.

Muestra	Qz	Cal	Pir	Clor	Mi	Fd-K	Musc	Ser	GC	GE	Era	Esf	Leuc	Coad	Dol	Hem	G-L	Ank	Sulf
1M-01	X		X	X	X				X							X		X	
1M-02	X	X	X		X		X		X	X								X	
1M-03	X	X	X		X			X	X			X						X	X
1M-04	X	X	X		X		X	X	X			X	X		X			X	X
1M-05	X	X			X			X	X		X				X				
1M-06				X	X				X						X	X			
1M-07	X		X		X				X			X			X	X			
1M-08	X	X	X	X	X		X	X	X	X		X		X		X	X		
2M-01	X	X			X			X	X	X									X
2M-02	X	X	X	X			X	X	X	X		X	X			X		X	
2M-03	X		X		X				X			X		X	X	X			X
2M-04	X		X	X	X	X		X	X	X		X						X	
2M-05	X		X	X	X	X		X	X	X		X	X	X		X			
2M-06	X	X	X	X	X		X		X	X		X	X				X	X	X
2M-07	X	X	X	X	X	X	X		X						X				X
3M-01	X			X					X				X		X				X
3M-02	X	X	X	X					X			X						X	X
3M-03	X	X	X	X	X				X	X		X						X	
3M-04	X		X		X		X		X	X		X			X	X			
3M-05	X	X	X		X		X		X	X						X		X	
3M-06	X		X	X	X				X			X	X					X	
3M-07	X	X	X		X				X				X			X		X	
3M-08	X	X	X						X	X				X					X

Qz=cuarzo, Cal=calcita, Pir=pirita, Clor=clorita, Mi=ilita, Fd-K=feldspato potásico, Musc=moscovita, Ser=sericita, GC=grupo de la caulinita, GE=grupo de la esmectita, Era=esferita, Esf=esfena, Leu=leucocena, Gal=galena, Coad=calcocena, Dol=dolomita, Hem=hematita, G-L=goethita, Ank=ankerita, Sulf=sulfuros no identificados.

**DISTRITO MINERO DE SOMBRERETE**

**Minerales de alteración presentes en las muestras colectadas dentro de la mina (Veta Pabellón)**

Muestra	Qz	Cal	Pir	Clor	Mi	Ft-K	Musc	Ser	GC	GE	Eta	Esf	Leuc	Gal	Coed	Dol	Hem	G-L	Ank	Sulf
S-01	X		X			X	X	X			X	X	X		X					X
S-01B	X		X	X	X		X	X	X			X								
S-02	X	X	X													X				X
S-03	X	X	X			X	X					X	X							X
S-04	X	X	X				X	X												
S-05	X	X	X													X				X
S-06	X	X	X												X	X				
S-07	X	X	X			X	X					X								X
S-08	X	X	X			X		X			X	X		X	X		X			X
S-09	X		X	X	X		X		X			X								X
S-10	X	X	X		X			X	X	X	X	X				X	X			
S-12	X		X		X	X		X	X	X	X	X	X				X		X	
S-13	X	X	X					X			X	X		X			X	X		
S-14	X	X	X		X		X		X										X	X
S-15	X		X					X								X			X	
S-16	X		X			X		X			X									
S-16B	X	X	X		X		X					X	X				X			
S-17	X		X	X	X		X		X		X	X							X	
S-18	X	X	X			X			X		X			X			X			
S-19		X			X							X				X				
S-20	X	X	X			X	X		X		X									
S-21		X	X			X	X					X				X				
S-22	X	X	X	X	X		X		X											

Qz=cuarzo, Cal=calcita, Pir=pirita, Clor=clorita, Mi=ilita, Ft-k=feldspato potásico, Musc=moscovita, Ser=sericita, GC=grupo de la oncolita, GE=grupo de la esmectita, Eta=esferita, Esf=esfena, Leu=leucosano, Gal=galena, Coed=calcocena, Dol=dolomita, Hem=hematita, G-L=goethita limonita, Ank=ankerita, Sulf=sulfuros no identificados



**DISTRITO MINERO DE SOMBRERETE**

**Minerales de alteración presentes en las muestras colectadas dentro de la mina (Veta Pabellón)**

Muestra	Qz	Cal	Pir	Clor	Mi	Fd-K	Musc	Ser	GC	GE	Eta	Esf	Leuc	Gal	Coed	Dol	Hem	G-L	Ank	Sulf
S-22B	X	X	X	X	X	X		X	X						X		X			
S-22C	X		X		X											X				
S-23	X	X	X	X	X			X	X		X	X				X				X

Qz=cuarzo, Cal=calcita, Pir=pirita, Clor=clorita, Mi=ilita, Fd-k=feldespato potásico, Musc=moscovita, Ser=sericita, GC=grupo de la caolinita, GE=grupo de la esmectita, Eta=esfalerita, Esf=esfena, Leu=leucoseno, Gal=galena, Coed=calcocelina, Dol=dolomita, Hem=hematita, G-L=goethita limonita, Ank=ankerita, Sulf=sulfuros no identificados.

**DISTRITO MINERO DE LA COLORADA**  
**Minerales de alteración presentes en las muestras colectadas en superficie.**

Muestra	Qz	Cal	Pir	Clor	Ill	Pd-K	Musc	Ser	GC	GE	Eta	Esf	Leuc	Coed	G-L	Dol	Alu	Jar	Hem	Sulf
SC-01	X					X			X											
SC-02	X		X			X			X			X								
SC-03	X				X			X			X		X				X			X
SC-04	X				X		X	X				X	X							
SC-05	X				X							X								
SC-06	X		X		X	X	X		X			X			X					
SC-07	X				X							X			X					X
SC-08	X	X	X	X	X				X				X		X				X	X
SC-09	X	X							X						X				X	
SC-10	X	X	X				X		X							X				X
SC-11	X	X	X						X			X							X	X
SC-12	X		X						X	X		X	X						X	X
SC-13	X							X	X			X	X	X	X				X	X
SC-14	X								X						X		X			
SC-15	X	X							X						X		X		X	
SC-16	X	X							X				X	X	X		X			
SC-17	X		X		X		X	X	X	X		X	X				X		X	
SC-18	X				X		X		X	X	X	X								X
SC-19	X			X	X				X	X						X		X		
SC-20	X				X				X			X	X							
SC-21	X				X		X	X					X	X				X		
SC-22	X	X						X			X		X	X	X					
SC-23	X	X																		

Qz=cuarzo, Cal=calcita, Pir=pirita, Clor=clorita, Ill=illita, Pd-k=feldespato potásico, Musc=muscovita, Ser=sericita, GC=grupo de la cohnita, G-E=grupo de la esmectita, Eta=enslerita, Esf=esfena, Leu=leucoseno, Coed=calcedonia, G-L=goethita-limonita, Dol=dolomita, Alu=alunita, Jar=jarosita, Hem=hematita, Sulf=sulfuros no identificados.

**DISTRITO MINERO DE LA COLORADA**

Minerales de alteración presentes en las muestras colectadas en superficie.

Muestra	Qz	Cal	Pir	Ill	Fd-K	Musc	Ser	GC	GE	Gal	Eta	Baf	Leuc	Cri	G-L	Dol	Alu	Hem	Sulf	Ank	Sid
SC-24	X	X	X	X		X	X	X					X	X	X	X		X	X		
SC-25	X	X	X				X	X	X		X	X				X	X	X			
SC-26	X			X			X		X			X	X					X		X	
SC-27	X	X		X			X	X		X			X	X			X	X			X
SC-28	X				X			X		X	X			X			X	X			
SC-29	X	X					X			X	X			X				X			
SC-30	X			X	X			X						X			X				

Qz=cuarzo, Cal=calcita, Pir=pirita, Ill=illita, Fd-k=feldespato potasico, Musc=muscovita, Ser=sericita, GC=grupo del caolin, Gal=galena, GE=grupo de la esmectita, Eta=estalerita, Baf=basfena, Leu=leucoseno, Cri=cristobalita, G-L=gastita-limonita, Dol=dolomita, Alu=alunita, Hem=hematita, Ank=ankerita, Sid=siderita, Sulf=sulfuros no identificados.

DISTRITO MINERO DE LA COLORADA

Minerales de alteración presentes en las muestras colectadas dentro de la mina (Veta No Conocida)

Muestra	Qz	Cal	Pir	Clor	Ill	Fd-K	Musc	Ser	GC	GE	Eta	Hem	Leuc	Gal	Fluo	Dol	Bar	Sid	Ank	Sulf
C-01	X	X	X		X		X											X		X
C-02	X																	X		
C-03	X	X	X		X								X					X		
C-04	X		X		X								X							
C-05	X		X		X	X		X		X		X	X		X					
C-06	X				X	X			X					X					X	
C-07	X	X	X				X		X		X			X				X		X
C-08	X	X	X				X				X							X		
C-09	X	X	X				X	X			X				X		X	X		X
C-10	X		X															X		
C-11	X	X	X		X		X	X										X		
C-12	X	X	X		X	X	X	X		X	X			X				X		X
C-13	X	X	X		X	X				X									X	
C-14	X		X			X		X	X	X	X	X		X			X			
C-15	X	X	X					X			X			X						
C-16	X		X		X	X		X			X									
C-17	X		X		X	X	X	X	X	X	X	X					X			X
C-18	X		X		X	X	X	X	X	X	X						X			X
C-19	X		X		X	X	X	X		X		X	X							
C-20	X	X	X		X	X	X	X			X	X				X	X			
C-21	X		X		X	X	X	X	X		X	X					X			
C-22	X	X	X	X	X	X	X	X			X						X			X
C-23	X		X		X	X	X	X	X		X	X	X							

Qz=cuarzo, Cal=calcita, Pir=pirita, Clor=clorita, Ill=illita, Fd-k=feldespatos potásico, Musc=muscovita, Ser=sericita, GC=grupo de la caolinita, GE=grupo de la esmectita, Eta=esferita, Hem=hematita, Leu=leuconeno, Gal=galena, Coed=calcocedrita, Dol=dolomita, Hem=hematita, G-I=goethita limonita, Ank=ankerita, Sulf=sulfuros no identificados.

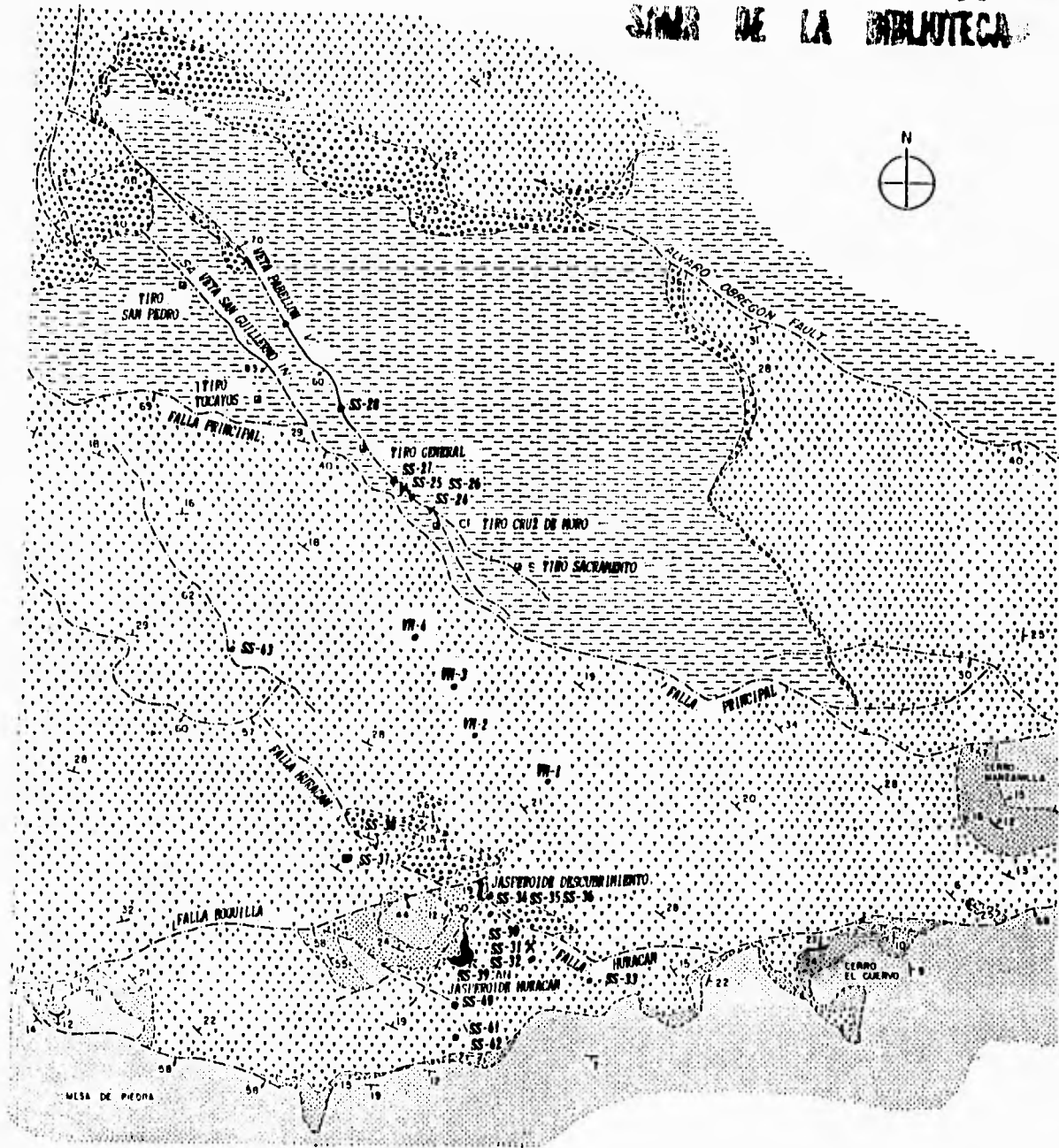
DISTRITO MINERO DE LA COLORADA

Minerales de alteración presentes en las muestras colectadas dentro de las minas (Veta No Conocida y Recompensa).







Muestra	Qz	Cal	Pir	Clor	Ill	Fd-K	Musc	Ser	GC	GE	Eta	Esf	Leuc	Gal	Rod	Dol	Bar	Jer	L-G	Sulf
C-24	X		X		X	X	X				X	X	X							
C-25	X	X	X		X	X	X	X			X	X								X
C-26	X		X		X	X	X	X			X	X		X						X
C-27	X		X	X				X		X									X	
C-28	X	X	X			X										X				
C-29	X	X	X						X	X	X					X	X			
C-30	X		X					X			X			X	X					
C30B	X		X		X		X		X		X			X	X	X				
C-31	X	X	X				X				X				X					
C-32	X	X	X					X	X			X								
C-33	X	X	X				X									X				
C-34		X	X			X	X	X				X		X						X
C-35	X		X			X	X				X	X				X				
C-36	X		X			X			X			X	X					X	X	
C-37	X		X			X			X		X	X								
C-38	X		X		X	X			X											
C-39	X		X			X			X											
C-40	X		X								X	X		X					X	X
C-41A	X		X			X			X											
C-41B	X		X		X	X			X					X						
C-42	X		X						X			X							X	
C-43	X		X		X				X			X	X						X	
C-44	X		X		X		X					X	X		X		X			X

Qz=cuarzo, Cal=calcita, Pir=pirita, Clor=clorita, Ill=illita, Fd-K=feldespato potásico, Musc=muscovita, Ser=sericita, GC=grupo de la caolinita, GE=grupo de la esmectita, Eta=esferita, Esf=esfena, Leu=leucoseno, Gal=galena, Rod=rodocrosita, Dol=dolomita, Bar=barita, Jer=jarosita, G-L=goethita-limonita, Sulf=sulfuros no identificados. Las siguientes muestras además presentan: C-27=vermiculita, C-28=cerusita, ramdorita, carlinita, C-25=anglesita, C-31=kutnohorita, C-34=cerusita, C-44=alunita.

ESTA TESTA NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA



**EXPLICACION**

-  RIOLITAS
-  JASPEROID
-  FURNACION LA BOQUILLA
-  ANDESITAS - LATITAS - RIOLITAS
-  FURNACION ANICHILA
-  FURNACION CARACOL-INDIOLA

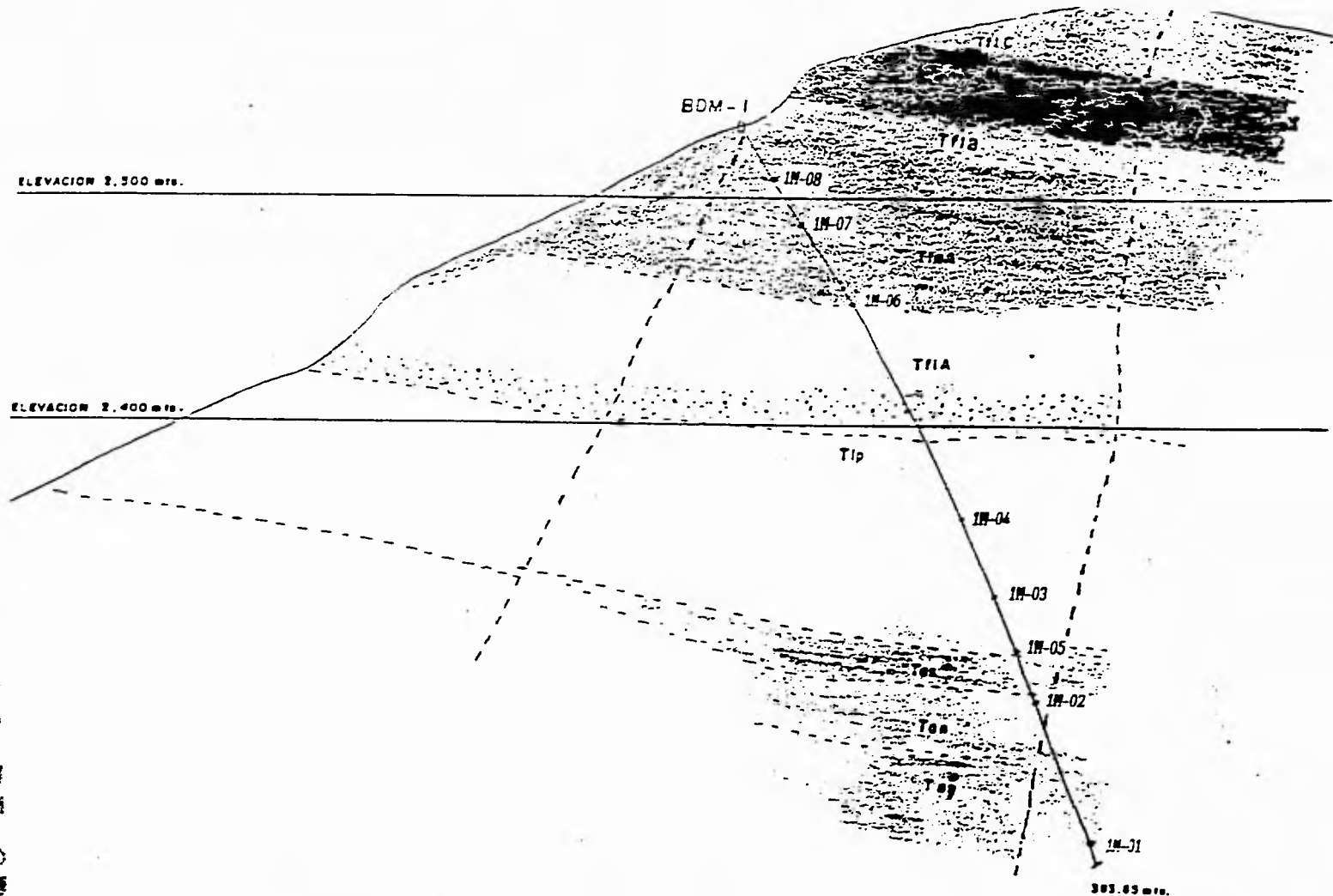
**SIMBOLOS**

-  VITA
-  FALLA
-  INCLINACION Y BUNDO DE LOS ESTRATOS



(Modificado de Albinson, 1957)

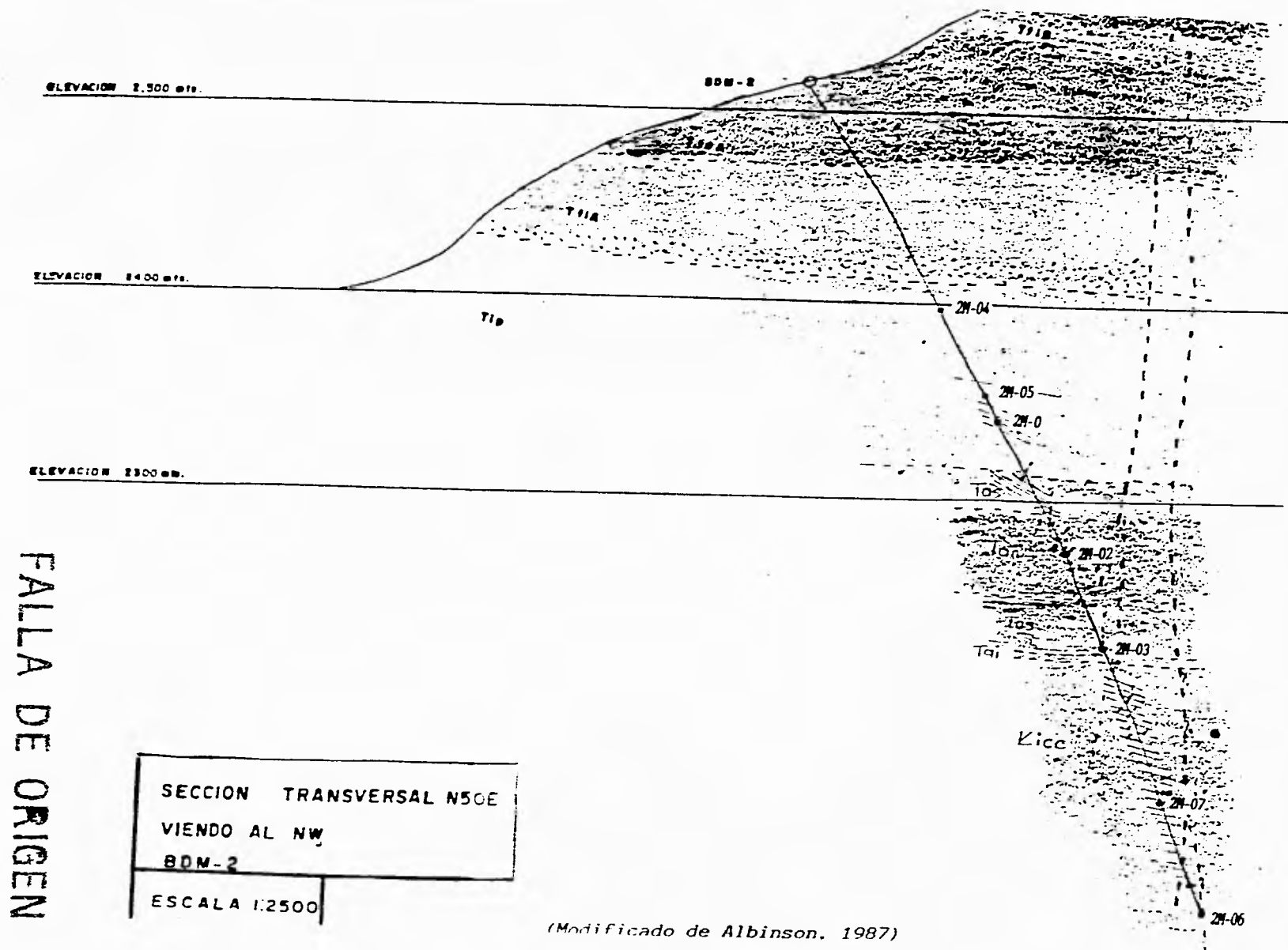
FALLA DE ORIGEN



SECCION TRANSVERSAL N 56° E VIENDO AL NW  
BDM - 1

ESCALA 1: 2.500

(Modificado de Albinson, 1987)

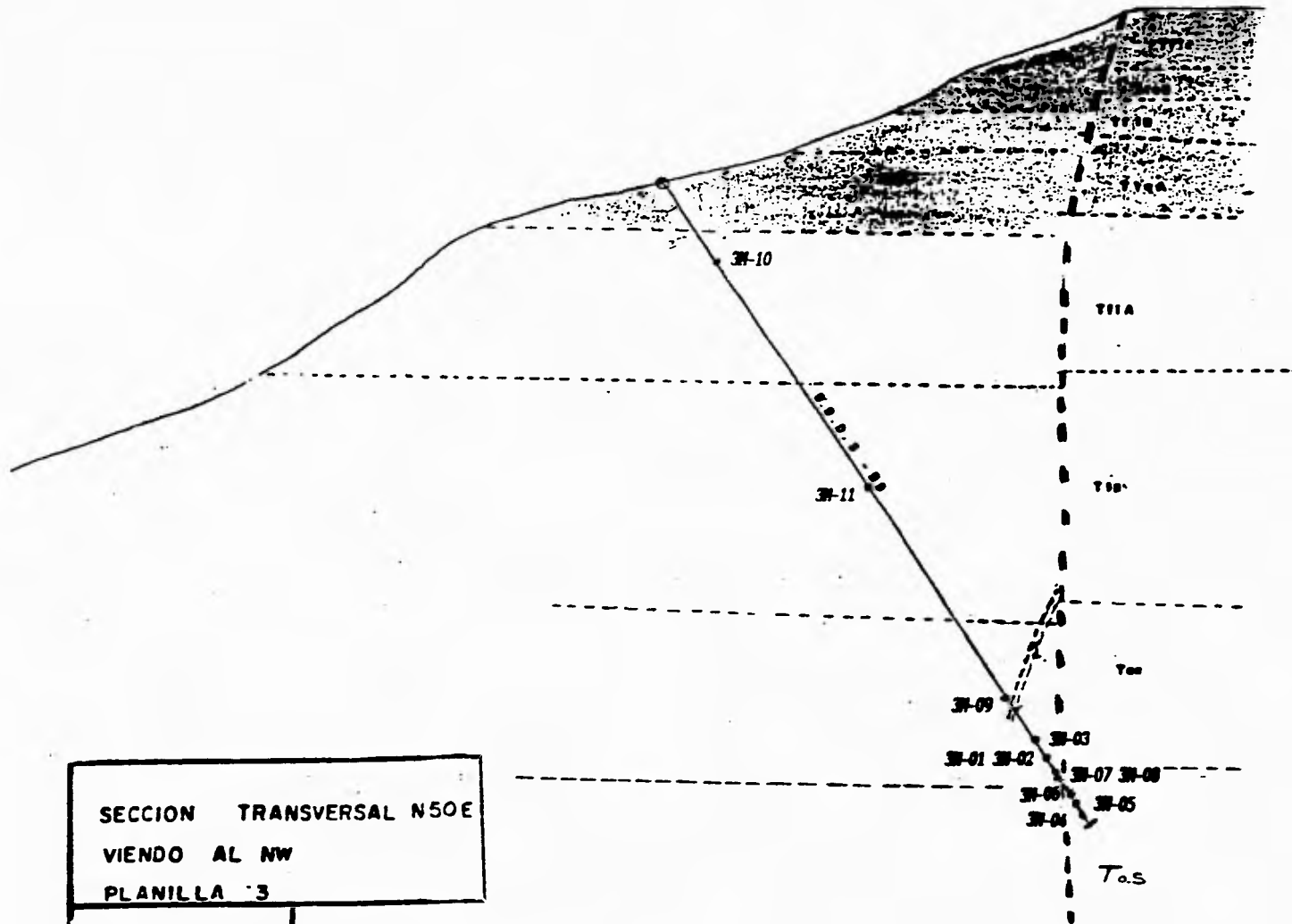


FALLA DE ORIGEN

SECCION TRANSVERSAL N50E  
 VIENDO AL NW  
 BDM-2  
 ESCALA 1:2500

(Modificado de Albinson, 1987)

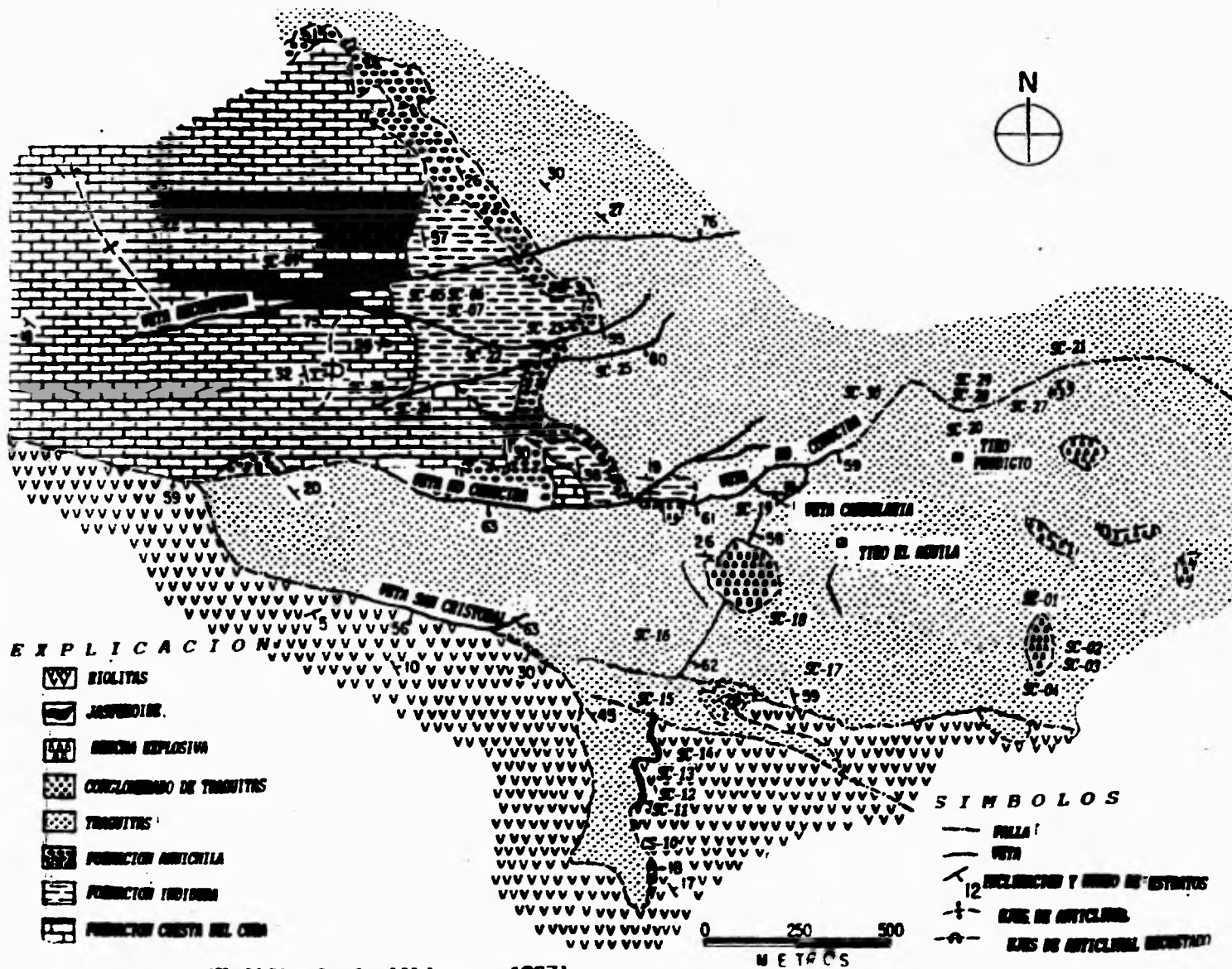


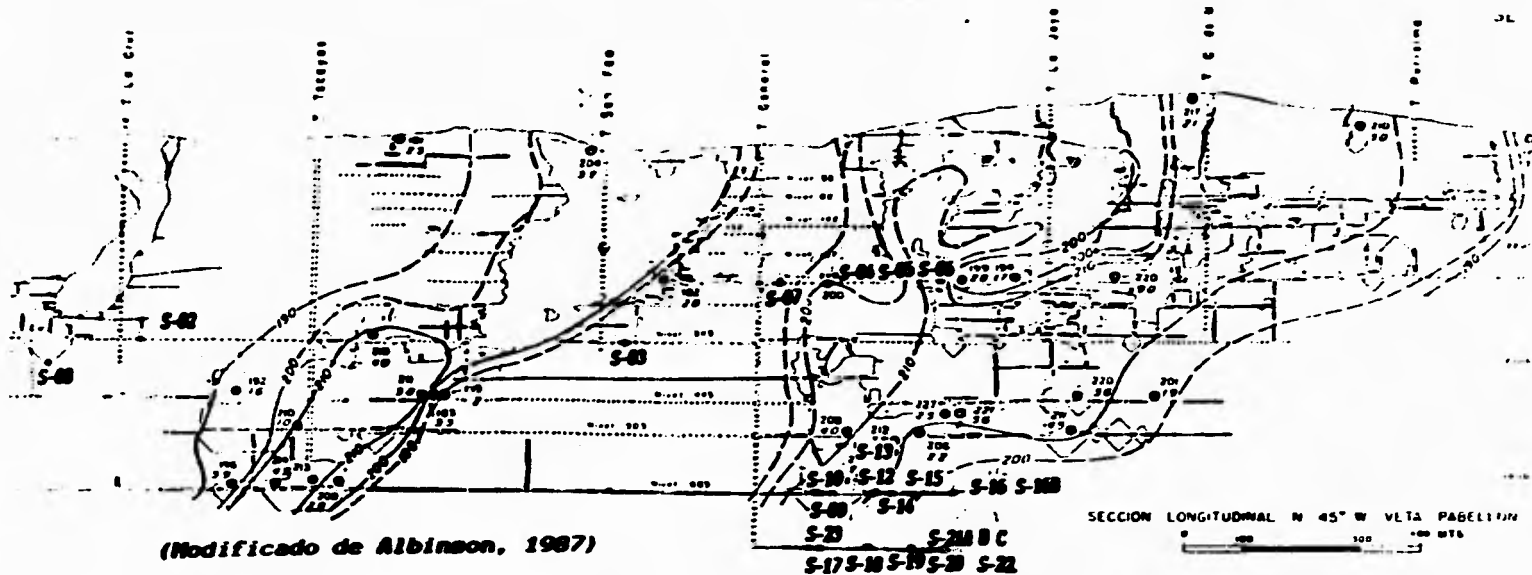


SECCION TRANSVERSAL N50E  
 VIENDO AL NW  
 PLANILLA 3

ESCALA 1:2500

(Modificado de Albinson, 1987)





FALLA DE ORIGEN

