



EL SABER DE MIS HIJOS  
HARÁ MI GRANDEZA

# UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISION DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

MAESTRIA EN CIENCIAS GEOLOGIA

**Geología y Mineralización del depósito de Todos Santos (Pb-Zn-Ag-barita):**

**Un yacimiento de reemplazamiento (*Carbonate-Replacement Deposit*)**

**en el Municipio San Pedro de la Cueva, Sonora, México**

## TESIS

Que para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias-Geología

PRESENTA:

**VIVIAN RUIZ MENDOZA**

DIRECTOR: **DR. EFRÉN PÉREZ-SEGURA**

Hermosillo, Sonora, México

2011.

# Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

## CONTENIDO

Resumen .....	vi
1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Localización y acceso al área de estudio .....	1
1.2 Objetivos .....	4
1.3 Método de trabajo .....	4
2 MARCO GEOLÓGICO .....	6
2.1 Geología regional.....	6
2.1.1 Paleozoico.....	6
2.1.2 Mesozoico.....	6
2.1.3 Terciario.....	7
2.1.4 Reciente .....	7
2.2 Geología local.....	9
2.2.1 Paleozoico.....	9
2.2.2 Mesozoico.....	12
2.2.3 Terciario.....	16
2.2.4 Reciente .....	17
2.2.5 Relación estructural entre la secuencia paleozoica y las rocas volcánicas de la Formación Tarahumara.....	20
3 EL YACIMIENTO DE TODOS SANTOS (Pb-Zn-Ag-barita).....	23
3.1 Antecedentes.....	23

3.2	Descripción de la mineralización en el depósito Todos Santos.....	24
3.2.1	Manto I.....	24
3.2.2	Manto II .....	27
3.2.3	Manto III.....	28
3.2.4	El Puerto .....	29
3.3	Geofísica.....	30
3.4	Mineralogía y secuencia paragenética .....	32
3.4.1	Análisis al microscopio electrónico de barrido.....	37
3.4.2	Secuencia paragenética .....	39
3.5	Inclusiones Fluidas .....	40
3.5.1	Microtermometría .....	40
3.5.2	Equipo microtermométrico utilizado .....	40
3.5.3	Petrografía de las Inclusiones Fluidas.....	41
3.5.4	Resultados microtermométricos.....	43
3.6	Isótopos estables .....	46
3.6.1	Resultados de análisis isotópicos .....	46
3.7	Discusión de resultados .....	48
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	51
5	BIBLIOGRAFÍA .....	53

ANEXOS .....	56
Anexo I .....	57
Anexo II .....	59
Anexo III.....	67

## ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1. Localización y acceso al área de estudio Todos Santos,.....	1
Figura 2 Delimitación del área de estudio Todos Santos y ubicación geográfica .....	2
Figura 3. Vista panorámica viendo hacia el suroeste del área de estudio Todos Santos. ....	3
Figura 4. Mapa geológico generalizado del área delimitada.....	8
Figura 5. Fotografía mirando hacia al sureste del paquete de rocas paleozoicas que afloran en el área de estudio,.....	9
Figura 6. a) Calizas masivas con bandas y lentes de pedernal de color negro,.....	10
Figura 7. a) Foto de coral rugoso solitario de la Familia Lophophilidium de edad Pensilvánico-Pérmico,.....	11
Figura 8. Vista panorámica hacia el noroeste del área Todos Santos,.....	12
Figura 9. a) Foto de andesitas tomada en el borde de la presa El Novillo,.....	12
Figura 10. Fotomicrografía de la muestra TS-17b brecha andesítica,.....	13
Figura 11. Dique (monzonítico) con una orientación E-W, .....	14
Figura 12. Contacto discordante entre el conglomerado polimíctico de la Formación Báucarit.....	14
Figura 13 Contacto por falla (línea roja) entre el conglomerado polimíctico de la Formación Báucarit y andesitas..	15
Figura 14. Formación Báucarit las líneas negras marcan los horizontes areno-arcillosos, .....	16
Figura 15 a) Contacto entre travertino y rocas volcánicas de la Formación Tarahumara, .....	17
Figura 16. Geología local del área de estudio Todos Santos,.....	18
Figura 17. Contacto entre la Formación Tarahumara y las rocas paleozoicas, .....	20
Figura 18. Sección geológico-estructural A-A', donde se muestra el contacto cabalgante entre las dos unidades.....	21
Figura 19. Sección B-B', muestra la zona del Manto II y El Puerto .....	21
Figura 20. Sección geológico-estructural C-C' área de la cañada del arroyo El Potrero, .....	22
Figura 21. a)Se observan los horizontes de lutita-limo arcillosa con vesículas de gas tensionales,.....	22

Figura 22. Foto tomada cerca de la obra El Pilar, caliza masiva de plataforma con horizontes de areniscas, .....	25
Figura 23. Calizas estratificadas intercaladas con horizontes de areniscas. ....	25
Figura 24. Zona del Manto I, parte de la obra minera El Murciélago, .....	26
Figura 25. Zona del Manto II Tiro Principal,.....	27
Figura 26. a) Zona mineralizada Manto III, obra minera El Echadero.. ....	28
Figura 27. Parte del cuerpo mineralizado El Puerto, se observan .....	29
Figura 28. Muestra las zonas de Mantos I, II, III y el cuerpo mineralizado El Puerto,.....	31
Figura 29. Fotomicrografía de la sección pulida TS-22, se observa galena al centro y esfalerita,.....	32
Figura 30. Fotomicrografía de la sección pulida TS-24, se observa el contacto entre la galena y la ganga,.....	33
Figura 31. a) Fotomicrografía de la sección pulida TS-24A, se observa galena, esfalerita y pirita, .....	34
Figura 32. Fotomicrografía sección pulida TS-25, se observa galena anhedral y subhedral.....	34
Figura 33. Fotomicrografía sección pulida TS-26, se observa galena que se introduce dentro de la ganga .....	35
Figura 34. Fotomicrografía de la sección pulida TS-28, se observa al centro tetrahedrita dentro de galena .....	35
Figura 35. a) Fotomicrografía de la sección pulida TS-02, se observa como la galena se introduce en la ganga,.....	36
Figura 36. Espectro del análisis analizado con el microscopio electrónico del los elementos indicados.....	37
Figura 37. Imagen obtenida con el microscopio electrónico de barrido de la sección pulida TS-28, . ....	38
Figura 38. Secuencia paragenética del depósito Todos Santos, .....	39
Figura 39. Platina Linkam modelo TMS 94 instalada al microscopio Leitz, .....	40
Figura 40. Muestra 04-20 inclusión fluida trifásica acuo-carbonosa H <sub>2</sub> O-CO <sub>2</sub> , Pérez-Segura (2006).....	41
Figura 41. Muestra 04-20, Inclusiones fluidas dentro de barita, el tamaño varia de 6µm a 25µm, .....	42
Figura 42. Histograma de temperatura de homogenización (Th) en relación con la frecuencia, .....	44
Figura 43. Diagrama que muestra las mediciones efectuadas por Pérez-Segura (2006).....	44
Figura 44. Relación entre la temperatura de homogenización (Th) contra la salinidad (%en peso NaCl eq), .....	45
Figura 45. Datos isotópicos del O para los diferentes tipos de aguas y reservorios naturales.....	47
Figura 46. Diagrama donde se representan los rangos de temperaturas de homogenización (T <sup>o</sup> h) contra los valores de plata [Ag (g/t)].....	49
Figura 47. a) Modelo generalizado Tipo Manto (Nelson, 1991) b) Modelo generalizado para yacimientos de alta temperatura relacionados con intrusiones ígneas (Harmmarstrom, 2002). ....	50
Figura 48. La Sección D-D' (ver Figura 4, Mapa geológico generalizado) .....	50

## TABLAS

Tabla 1. Datos de coordenadas de localización del área de estudio. ....	2
Tabla 2. Geología local del área de estudio y correlación estratigráfica de la plataforma carbonatada en las áreas Minas de Barita y sierra Santa Teresa.....	19
Tabla 3. Datos obtenidos del microscopio electrónico (primera y segunda columna) y valores calculados para obtener la fórmula simplificada del mineral estudiado. ....	37
Tabla 4. Resumen de los resultados microtermométricos de las mediciones obtenidas de las dos muestras.....	43
Tabla 5. Relación de muestras utilizadas para isótopos estables.....	46

## Resumen

El área de estudio Todos Santos se localiza en el Municipio de San Pedro de la Cueva, en la porción centro-oriental del Estado de Sonora, a una distancia de 181 km en línea recta al este de la ciudad de Hermosillo.

La fisiografía del área de estudio corresponde a la parte noreste de la Sierra Santo Niño, perteneciente a la Subprovincia Fisiográfica de Sierras y Valles Paralelos, tiene una dirección NW-SE y está constituida por rocas sedimentarias (calizas y lutitas) e intrusiones dioríticas y graníticas.

La geología local dentro del área de estudio está representada por rocas carbonatadas del Paleozoico superior, rocas volcánicas andesíticas que se correlacionan con la Formación Tarahumara, un conglomerado polimíctico de la Formación Báucarit, y en las partes bajas donde desembocan los arroyos, se tienen depositados aluviales del Reciente.

Dentro del área de estudio se tiene a la asignación minera (del Servicio Geológico Mexicano) Todos Santos, en esta se encuentran dos zonas de mineralización conocidas con los siguientes nombres: Mantos I, II y III y El Puerto.

Estos yacimientos se han clasificado como de reemplazamiento, ya que se encuentran hospedados en la secuencia de rocas carbonatadas del Paleozoico superior. La mineralización está constituida principalmente por plomo-zinc-plata-cobre y barita, con minerales presentes de galena, esfalerita, menor calcopirita y tetrahedrita rica en plata y como minerales ganga barita y sílice.

En ambas zonas se tiene una alta resistividad, lo que se interpreta como de alta silicificación, que corresponde a una alteración silíceo que se observa en una franja con un rumbo NE-SW (Reyes S, 1997) y la alteración propilítica (epidota, clorita, pirita, calcita) en las rocas volcánicas andesíticas.

En este estudio se midieron inclusiones fluidas dentro del mineral de barita donde se encontraron inclusiones pseudosecundarias sobre los planos de cruceo y secundarias cortando a dichos planos. Este tipo de inclusiones corresponden a inclusiones secundarias bifásicas con contenido acuoso ( $H_2O$ ) e inclusiones trifásicas con contenido acuoso-carbonosas ( $H_2O-CO_2$ ) aunque solo se pudieron observar las últimas ya que fue imposible medirlas por el tamaño menor de  $6\mu m$ , que presentan.

Esto indica que donde se encuentran los yacimientos circularon dos tipos de fluidos uno con una composición de  $CO_2$  circulando a temperaturas entre los  $310-330^\circ C$  y otro con fluidos acuosos circulando a temperatura entre  $110^\circ-290^\circ C$ .

También se realizaron análisis isotópicos con muestras que contenían S y O, pero los resultados no fueron los más representativos ya que los datos dan valores de desequilibrio. Pero el estudio realizado por Pérez-Segura en el 2006, reporta un valor de  $\delta^{18} O_{H_2O}=6.95$ , donde concluye que este valor podría corresponder a una agua en equilibrio con una fuente magmática, lo cual se puede relacionar con los cuerpos intrusivos presentes en el área.

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Localización y acceso al área de estudio

El área de estudio Todos Santos se localiza en el Municipio de San Pedro de la Cueva, en la porción centro-oriental del Estado de Sonora, a una distancia de 181 km en línea recta al este de la ciudad de Hermosillo, las coordenadas geográficas son 29°07'30" latitud norte y 109°35'36" latitud oeste.

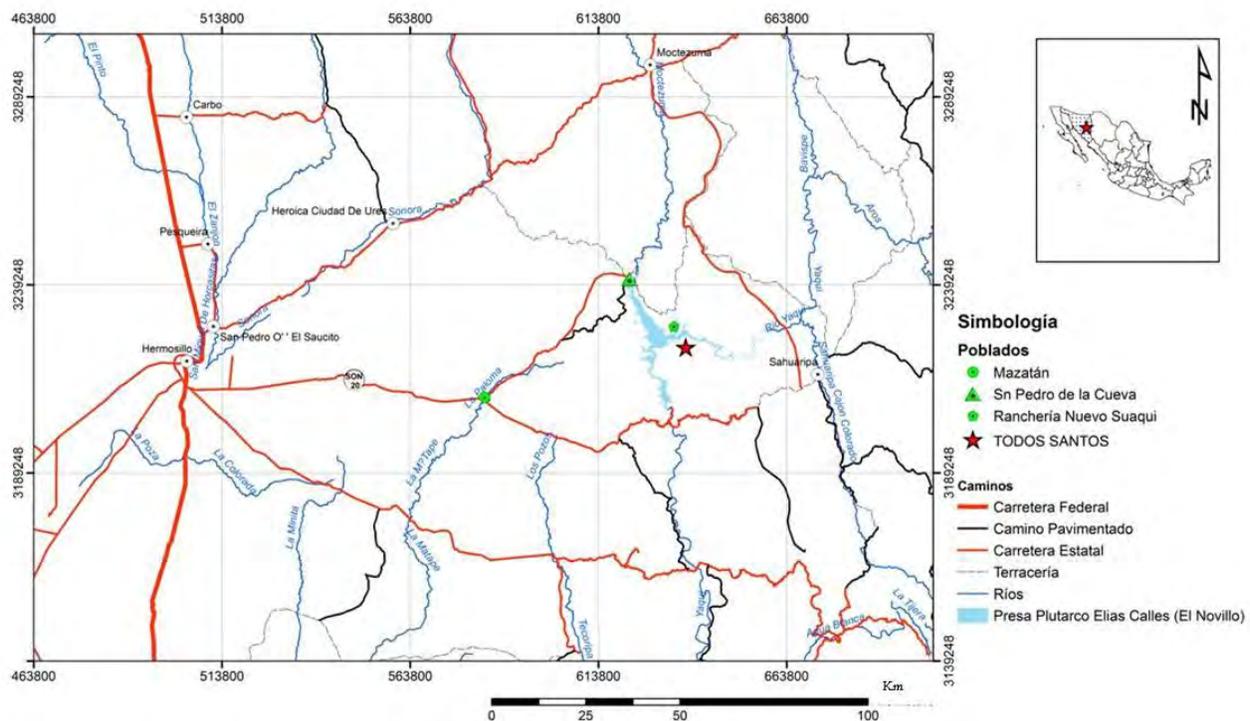


Figura 1. Localización y acceso al área de estudio Todos Santos, Municipio de San Pedro de la Cueva, Sonora, México.

El acceso al área de estudio Figura 1 se realiza a través de la carretera estatal No. 20 saliendo de la ciudad de Hermosillo-Sahuaripa, que conduce al poblado de Mazatán, de aquí, se continúa con dirección al poblado de Villa Pesqueira (Mátape), pasando por el poblado Nácori Grande, siguiendo ese mismo camino, se llega al poblado de San Pedro de la Cueva, en la entrada de este poblado se toma a mano izquierda un puente que conduce a la Ranchería Nuevo Suaqui, que se encuentra al margen de la presa Plutarco Elías Calles (El Novillo) Figura 1. De aquí se tiene que tomar una panga para atravesar la presa, y desembarcar en La Peñita al NW del cerro Buenavista en la margen sur de la presa. Posteriormente se caminan 2.5 km por una vereda con dirección al sur para el rancho Todos Santos; a 500 m del rancho se encuentra la asignación minera Todos Santos.

El área de estudio está delimitada por los vértices, que se indican en la Tabla 1; tiene una extensión de 18.22 km<sup>2</sup> y una altitud promedio de 1040 msnm. Al norte del área de estudio se encuentra parte de la Presa Plutarco Elías Calles, al este el río Yaqui y al sur el cerro Todos Santos, que constituye parte de la sierra Santo Niño. (Figura 2)

Coordenadas Geográficas		Coordenadas UTM	
Latitud Norte	Longitud Oeste	(m) Este	(m) Norte
29°08'45"	109°36'43"	635,000	3,225,000
29°08'45"	109°34'15"	639,000	3,225,000
29°06'17"	109°36'43"	635,000	3,220,400
29°06'17"	109°34'15"	639,000	3,220,400

Tabla 1. Datos de coordenadas de localización del área de estudio.

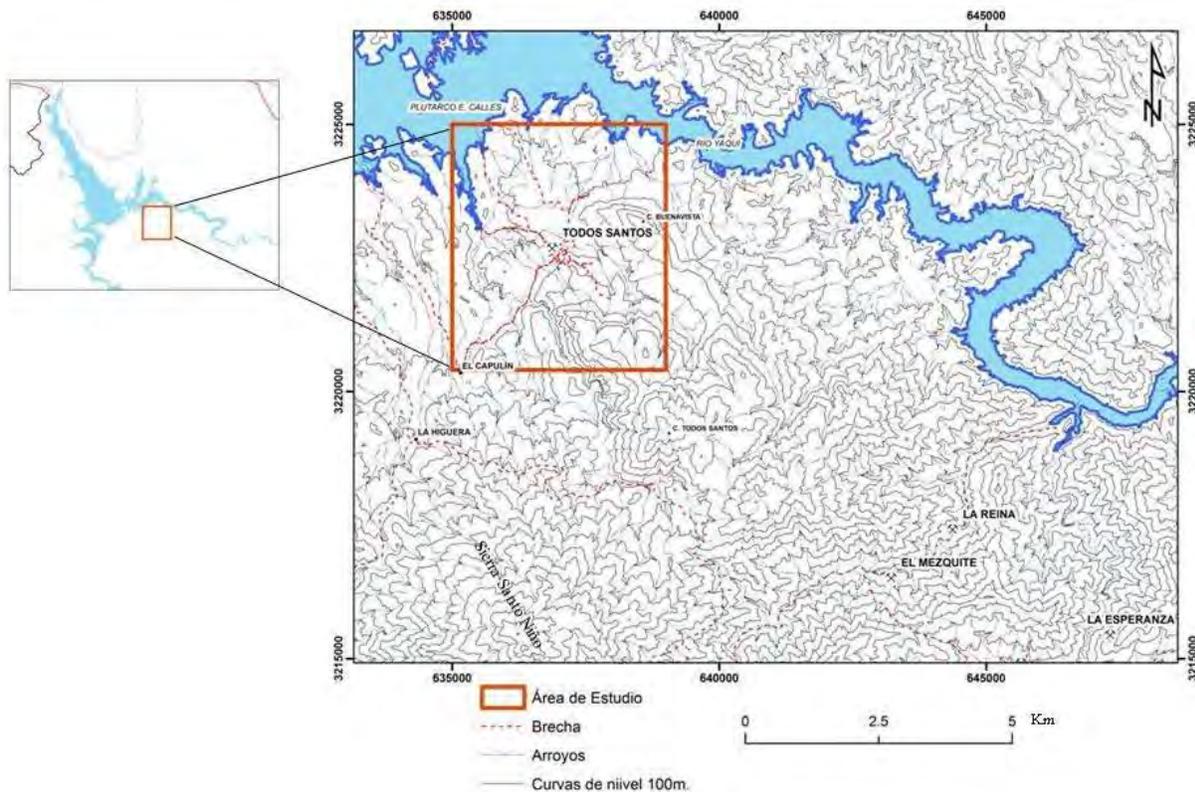


Figura 2. Delimitación del área de estudio Todos Santos y ubicación geográfica.

La fisiografía del área de estudio Todos Santos corresponde a la parte noreste de la sierra Santo Niño, que queda comprendida en la Subprovincia Fisiográfica de Sierras y Valles Paralelos. Esta sierra tiene una dirección NW-SE, y está constituida por rocas sedimentarias (calizas y lutitas) del Paleozoico e intrusiones dioríticas y graníticas del Cretácico-Terciario. La topografía es abrupta y el relieve accidentado, con elevaciones que van desde los 400 msnm a un máximo de 2000 msnm.

Las corrientes más importantes que drenan el área son arroyos intermitentes que únicamente llevan agua en temporada de lluvia, estos arroyos son los llamados: Todos Santos, El Potrero, Capulín y La Higuera que descargan en la Presa Plutarco Elías Calles (El Novillo). El tipo de drenaje es dendrítico y radial.



Figura 3. Vista panorámica viendo hacia el suroeste del área de estudio Todos Santos. Se observa al fondo las calizas del Paleozoico Superior con topografía abrupta, que se encuentran en contacto cabalgante con las andesitas del Cretácico Superior y en la margen de la presa la Formación Báucarit del Terciario inferior-medio.

## 1.2 Objetivos

Dentro de área de estudio se encuentra la mina Todos Santos constituida principalmente por minerales con contenidos de plata, plomo, zinc y barita. Este yacimiento se encuentra hospedado en rocas calcáreas del Paleozoico y se ubica muy cerca del contacto estructural entre esta unidad y rocas volcánicas del Cretácico Superior-Terciario inferior. Los objetivos definidos para este estudio fueron:

- Caracterizar el yacimiento en el área de estudio para proponer una hipótesis genética y una clasificación del tipo de yacimiento mineral.
- Definir la relación estructural entre las unidades encajonantes al yacimiento
- Determinar la paragénesis mineral y la secuencia paragenética en el depósito
- Determinar las características de los fluidos que originaron el yacimiento e hipotetizar sobre la fuente de los metales que propiciaron la depositación del los mismos.

## 1.3 Método de trabajo

El método de trabajo que se realizó en este estudio consta de cuatro fases las cuales son:

1.- Trabajo de gabinete. Durante esta fase se recopiló la siguiente información:

- Bibliografía de reportes técnicos editados por el antiguo Consejo de Recursos Minerales (C.R.M.), hoy Servicio Geológico Mexicano (S.G.M.) del área de estudio.
- Información de fotografías aéreas a escala 1:75,000.
- Información de la carta geológica y magnética (ambas editadas por C.R.M.) y topográfica escala 1:50,000 Santa Teresa (H12D45) así como información vectorial de la misma carta topográfica (INEGI), para la elaboración de mapas de campo y presentación con el software Arc View 9.3.
- Información de las cartas geológicas Bacanora (H12D55) escala 1:50,000 y Madera (H12-9) escala 1:250,000.

2.- Trabajo de campo. El trabajo de campo se realizó en tres visitas, que involucraron casi 15 días de trabajo en campo, donde se reconocieron las unidades aflorantes, contactos, estructuras, zonas mineralizadas. También se tomaron muestras para petrografía en las áreas de interés del yacimiento mineral.

En total se recolectaron 39 muestras, numeradas desde TS-01 hasta TS-39, se seleccionaron las muestras más representativas y con interés para posteriormente hacer su estudio y análisis. En el Anexo I se encuentra una tabla con ubicación, zona, obra minera, descripción de estudios y/o análisis que se hicieron a las muestras seleccionadas.

3.- Trabajo de laboratorio. De las 39 muestras obtenidas en el campo se seleccionaron 17 muestras para láminas delgadas para su estudio petrográfico, nueve secciones pulidas para el

estudio de minerografía, una de estas se utilizó para la identificación del mineral de tetrahedrita con el microscopio electrónico de barrido, ocho muestras de esquirlas de mineral para el análisis de isótopos estables y dos muestras doblemente pulidas (04-20 y 04-25) para el estudio y análisis de inclusiones fluidas.

El estudio petrográfico y minerográfico se realizó en el laboratorio de petrografía en el departamento de Geología de la Universidad de Sonora, con un microscopio Leitz Orthoplan, el cual cuenta con luz reflejada y transmitida, mismo que sirvió para los dos estudios y la toma de fotomicrografías con una cámara digital instalada a dicho microscopio.

De las 17 láminas delgadas se hicieron las descripciones microscópicas y toma de fotomicrografías, así como para las nueve secciones pulidas para el estudio minerográfico. En el Anexo II se encuentran las descripciones completas de estas muestras incluyendo fotomicrografías.

En el laboratorio del Departamento de Polímeros y Materiales de la Universidad de Sonora se utilizó el microscopio electrónico de barrido marca Jeol, modelo 5410 LV equipado con un sistema EDS (*Energy Dispersion Spectroscopy*) marca Oxford. En el Anexo III se presentan los resultados de estos análisis.

Para el análisis de isótopos estables se enviaron ocho muestras de esquirlas de mineral a los laboratorios de isotopía de la Universidad de Arizona en Tucson, Az., E.U.A., las cuales fueron analizadas por el Dr. Christopher Eastoe.

El estudio de inclusiones fluidas se realizó en el laboratorio de microtermometría del Departamento de Geología de la Universidad de Sonora, utilizando una platina microtermométrica marca Linkam montada a un microscopio Leitz modelo Labor Lux.

## 2 MARCO GEOLÓGICO

### 2.1 Geología regional

La Geología regional del área de estudio Todos Santos está representada por rocas que van del Paleozoico al Reciente.

A continuación se hace una breve descripción de las unidades aflorantes en el cuadro marcado en la parte inferior izquierdo de la carta Santa Teresa (H12D45). (Ver figura 4)

#### 2.1.1 Paleozoico

Está representado por una secuencia de rocas carbonatadas de plataforma con orientación general N45°W e inclinación de 40°SW. Esta unidad está compuesta por calizas masivas, con lentes y nódulos de pedernal, horizontes de lutitas y areniscas, y calizas silíceas bandeadas con pirita, con un espesor aproximado de 600 m. La edad que se tiene de esta secuencia carbonatada es del Misisípico al Pérmico Temprano, descrita por Vega-Granillo y Araux-Sánchez (1985) en la parte sur de la sierra La Campanería y es correlacionable con series similares en la Sierra Agua Verde descritas por Stewart et al., (1999).

Parte de esta unidad se puede correlacionar particularmente con la parte superior con la Formación Mina México (Poole, *et al.*, 2008), constituida por un conjunto de estratos siliciclásticos y turbidíticos representados por areniscas (cuarcitas) de granulometría muy fina a fina. La Formación Mina México ha sido identificada en otras localidades de Sonora centro-oriente (Sierra Santa Teresa, Sierra Las Rastras, Sierra Martínez).

A esta secuencia de rocas carbonatadas de plataforma se les refieren en este trabajo simplemente rocas paleozoicas.

#### 2.1.2 Mesozoico

Está representado por la Formación Tarahumara que está constituida principalmente por andesitas, dacitas y en menor proporción por riolitas y tobas riolíticas. Las rocas de esta unidad se encuentran alteradas hidrotermalmente, presentando alteración propilítica, silicificación, en algunos lugares oxidación y abundante pirita. La formación ha sido fechada en el río Yaqui en 90-70 (Mc Dowell *et al.*, 2001) y en la porción centro-oriental de Sonora se han obtenido edades más jóvenes 54 y 66 Ma por Rodríguez-Castañeda en el 2002 (Calmus *et al.*, 2010)

Esta formación en la parte noroeste de la sierra Santo Niño está siendo cabalgada por las rocas paleozoicas. (Figura 4)

Se distingue también un grupo de granitoides que se relacionan con un conjunto intrusivo llamado informalmente Batolito de Bacanora, que intrusionan tanto a la Formación Tarahumara como a las rocas paleozoicas (Figura 4). Este batolito representa un 25% de la sierra Santo Niño pero las cartas geofísicas sugieren que dichos afloramientos representan un cuerpo mayor a profundidad. La litología principal de este batolito es granodiorita, y varía de tonalita a granito

*sensu-stricto*, los minerales máficos comunes son la hornblenda y biotita, pero también se encuentra localmente piroxeno. En el área de La Esperanza, al sureste de Todos Santos este batolito es cortado por el pórfido San Lucas (cuarzo-monzonita) que es un cuerpo hipabisal a subvolcánico de forma alargada, que también corta a las rocas paleozoicas y a las rocas volcánicas de la Formación Tarahumara. La edad del pórfido de San Lucas es de ~90 Ma el cual fue datado por U-Pb (Pérez-Segura *et al.*, 2009).

### 2.1.3 Terciario

Está representado por dos unidades de rocas volcánicas y la Formación Báucarit.

- La primera unidad de rocas volcánicas está compuesta por tobas e ignimbritas, y que por posición estratigráfica están sobre la Formación Tarahumara, con una posible edad del Terciario inferior-medio ubicándose cerca del área La Esperanza (Pérez-Segura, 2006). (Figura 4)
- La segunda unidad de rocas volcánicas está compuesta por riolitas afaníticas y porfídicas, con horizontes de tobas líticas de edad del Oligoceno, y otra unidad compuesta por andesitas, andesitas basálticas, basaltos, aglomerados y tobas líticas, de edad del Mioceno (Pérez-Segura, 2006). Esta última se encuentra en la parte noreste del Río Yaqui. (Figura 4)
- La Formación Báucarit nombrada por King en 1939, se restringe a la región central y oriental del estado de Sonora, incluyendo la parte occidental de la Sierra Madre Occidental, en una franja que inicia aproximadamente a 100 km de la costa a la longitud de Hermosillo (McDowell *et al.*, 1997). Esta formación es una secuencia sedimentaria continental ligeramente endurecida, con intercalaciones de rocas volcánicas, principalmente flujos de andesitas basálticas y algunos derrames riolíticos. Es notorio en afloramiento un 98% aproximado de clastos correspondientes a rocas graníticas, que sugiere exhumación de algunos plutones anteriormente a la extensión Basin and Range (65-60 Ma) y sedimentarias (cuarcitas), que refleja la naturaleza de las rocas aflorando localmente, en este caso la Formación Tarahumara y rocas volcánicas del Oligoceno, correlacionables con la Sierra Madre Occidental (Calmus *et al.*, 2010). La edad que se tiene para esta formación en la base o subyacentes corresponde al Oligoceno tardío (Mc Dowell *et al.*, 1997; Gans, 1997 *in* Calmus *et al.*, 2010) y para las rocas intercaladas dentro de la formación van de entre 27 y 17 Ma (Demant *et al.*, 1989; Mc Dowell *et al.*, 1997; Gans, 1997; Paz Moreno *et al.* 2003; González León *et al.*, 2000 *in* Calmus *et al.*, 2010).

La Formación Báucarit se encuentra aflorando en la parte oeste del rancho Todos Santos. (Figura 4)

### 2.1.4 Reciente

Está representado por gravas, arenas y limos mal consolidados depositados en los lechos de los ríos.

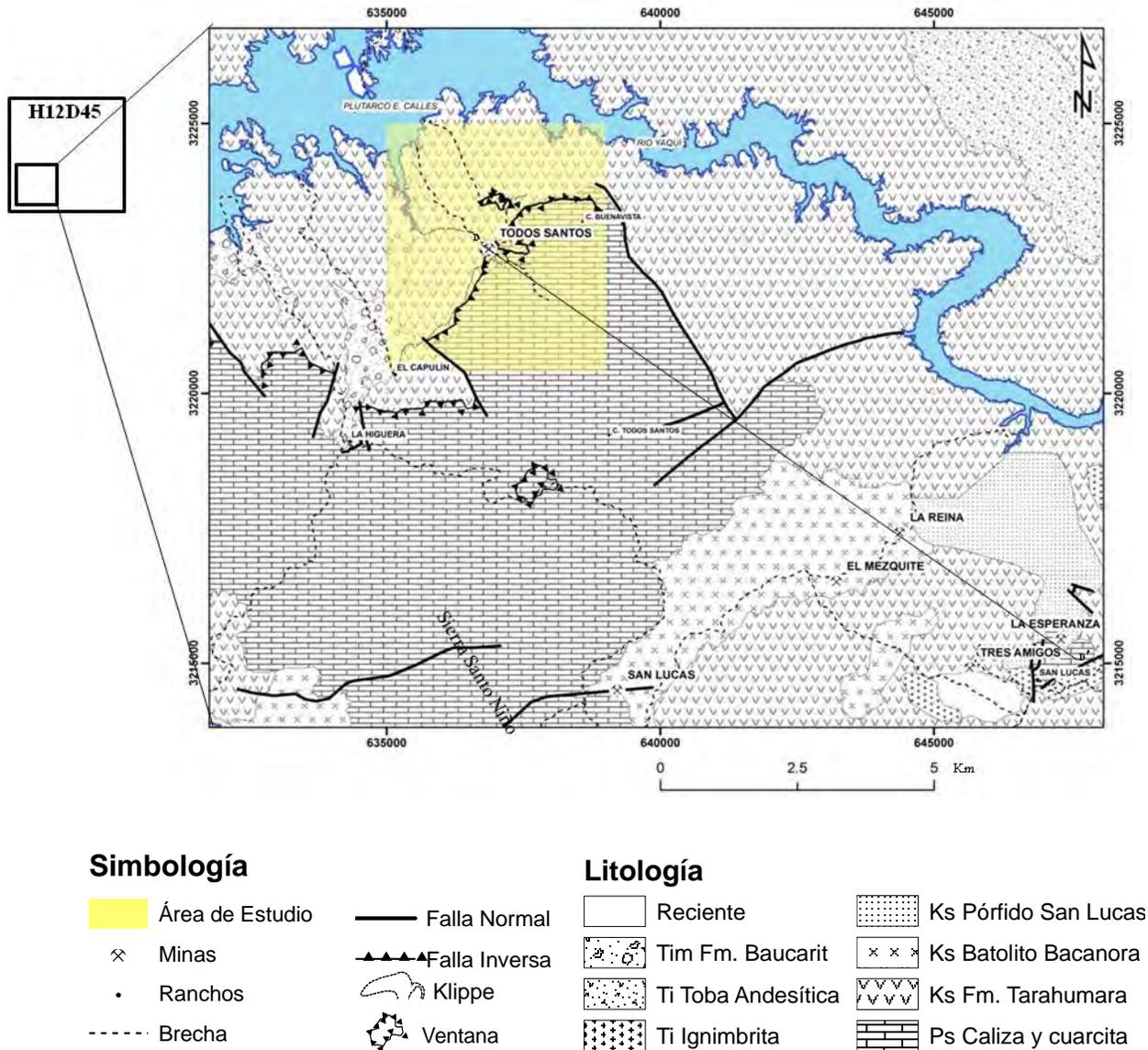


Figura 4. Mapa geológico generalizado del área delimitada en la parte inferior izquierda de la Carta Santa Teresa (H12D45) Servicio Geológico Mexicano (1996) modificada por Pérez-Segura *et al.*, 2009 y modificado para este trabajo por la autora, 2011. En el recuadro amarillo se muestra el área de estudio con la ubicación de la mina Todos Santos y la sección D-D' se muestra en la sección 3.7 Discusión de resultados. Datos estructurales; Klippe: es un remanente roca después que la erosión ha borrado parte de ella. Ventana: es un área autóctona descubierta por la erosión de la roca desplazada encima de ella.

## 2.2 Geología local

En el área de estudio la geología local queda comprendida por rocas carbonatadas del Paleozoico Superior, rocas volcánicas andesíticas que se correlacionan con la Formación Tarahumara, el conglomerado polimíctico de la Formación Báucarit, y en las partes bajas donde desembocan los arroyos se tienen depositados aluviones, del Reciente.

En la Figura 16, se muestra la geología local y en la Tabla 2 se presenta la columna estratigráfica para el área de estudio.

### 2.2.1 Paleozoico

Está representado por una secuencia de rocas carbonatadas de ambiente de plataforma, compuesta de calizas masivas fosilíferas y estratos de lutitas intercalados con horizontes de areniscas, esta unidad se encuentra aflorando en el área de estudio aproximadamente en un 40%. La morfología que presenta esta secuencia de rocas carbonatadas es abrupta, formando varias cañadas y cantiles. (Figura 5)



Figura 5. Fotografía mirando hacia al sureste del paquete de rocas paleozoicas que afloran en el área de estudio en un 40% aproximadamente.

Las calizas se presentan en forma masiva, de color gris y contienen abundantes fósiles que se observan a simple vista; como braquiópodos, pelecípodos, crinoideos, y algunos corales, también se observan bandas y lentes de pedernal, estas calizas tiene un espesor aproximado de 500 m (Figura 6 a y b).

Estas calizas masivas subyacen a un paquete de lutitas limo-arcillosas y areniscas, que van desde unos 30 a 50 cm de espesor, de acuerdo con la información reciente este paquete de lutitas y areniscas pudieran ser correlacionables con la Formación Mina México (Poole *et al.*, 2008). (Figura 6.c)



Figura 6. a) Calizas masivas con bandas y lentes de pedernal de color negro, tomada en la pendiente del cerro Buenavista parte norte. b) Calizas silicificadas, con fracturas y vetillas rellenas de calcita, se observan fragmentos de fósiles, braquiópodos, pelecípodos y materia orgánica, foto tomada cerca del Manto I. c) En esta foto se observan las calizas masivas (parte inferior de la foto) y sobre de ellas el paquete de lutita limo-arcillosa correlacionables con la Formación Mina México, tiene espesores que varían entre 30 a 50 cm. Foto tomada al sur del rancho Todos Santos, en el lugar llamado El Capulincito.

Dentro de las calizas masivas se encontró un fósil de coral solitario (Figura 7), y en comunicación directa con la Dra. Olivia Pérez Ramos, de la Universidad de Sonora, comenta que es un coral rugoso solitario de la Familia Lophophilidium de edad Pensilvánico-Pérmico; y de acuerdo con Pérez-Segura *et al.*, 2009, los fósiles de corales observados en la mina Todos Santos indican una posible edad del Misisípico, lo cual nos da un rango amplio en la edad de estas calizas.



Figura 7. a) Foto de coral rugoso solitario de la Familia Lophophilidium de edad Pensilvánico-Pérmico, recolectado en las rocas paleozoicas, cerca del Manto I, mina Todos Santos. b) Fotomicrografía de la muestra TS- 03 sección delgada, se puede observar fantasmas de microfósiles, al centro briozoa y galena relleno espacios abiertos; en la parte superior izquierda peloides, en la parte derecha posible una esponja, la muestra está altamente recristalizada, de acuerdo a la clasificación de Dunham, 1962 (Murillo, 2004), corresponde a un packstone. c) Foto de crinoides que se observan en las rocas paleozoicas, foto tomada cerca del Manto III.

### 2.2.2 Mesozoico

Está representado por las rocas volcánicas andesíticas que se correlacionan con la Formación Tarahumara, descrita anteriormente, esta unidad se encuentra aflorando en el área de estudio cubriendo una superficie de aproximadamente 40%, la morfología de estas andesitas se presenta con suaves ondulaciones en el área de estudio. (Figura 8)



Figura 8. Vista panorámica hacia el noroeste del área Todos Santos, las áreas en rosa es donde se encuentra la unidad de andesitas que cubren un 40% del área de estudio.

Estas andesitas presentan una textura porfídica con alteración propilitica con cristales de plagioclasas alteradas a sericita, con algunas vetillas de calcita, y en algunas otras partes estas son cortadas por vetas de barita. (Figura 9)



Figura 9. a) Foto de andesitas tomada en el borde de la presa El Novillo, cerca de la Peñita donde se desembarca de la panga para el rancho Todos Santos. b) Brecha (Bx) andesítica cortada por una veta de barita, foto tomada en la parte norte del rancho Todos Santos.

De la andesita que aflora cerca del manto I se tomo la muestra TS-17b. En la muestra de mano se observa una textura brechada con fragmentos líticos cloritizados y con una matriz oxidada, con esta muestra se hizo una lámina delgada y en el estudio petrográfico, se observaron fragmentos líticos con relictos de anfíboles cloritizados (hornblenda) en una matriz de plagioclasas alteradas a sericita. Estos fragmentos están soportados por una matriz de óxidos de hierro y calcita, con algunos fragmentos de cuarzo redondeado y algunos minerales isotrópicos. Figura 10.

De manera hipotética se puede inferir que esta área pudiera corresponder a la parte medio-inferior de la Formación Tarahumara, por las observaciones hechas en campo y en la lámina delgada TS-17b, referenciadas con la descripción de Mc Dowell en 1997.

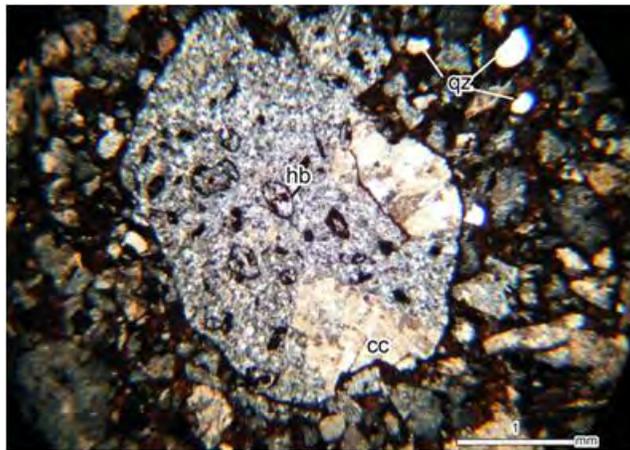


Figura 10. Fotomicrografía de la muestra TS-17b brecha andesítica, fragmentos líticos de andesita en su interior tiene cristales de anfíboles (hb=hornblenda), con matriz microlítica de plagioclasas, también se puede ver en el interior de estos fragmentos con calcita (cc) fuera de los fragmentos líticos, además de fragmentos redondeados de cuarzo (qz), estos están soportados por una matriz arcillosa, con óxidos de hierro y calcita.

Hacia la parte norte del norte del rancho Todos Santos cerca del borde de la presa, las rocas volcánicas andesíticas están siendo cortadas por diques (monzoníticos) como se observa en la Figura 11.



Figura 11. Dique (monzonítico) con una orientación E-W, que se encuentra cortando a las andesitas en la parte norte del rancho Todos Santos.

Otra unidad observada es una riolita al parecer perteneciente a la misma unidad de la Formación Tarahumara, aunque por posición estratigráfica esta unidad pudiera corresponder al Terciario inferior (Oligoceno). Este horizonte de riolita ocupa aproximadamente un 2% en el área de estudio y se ubica al sur de La Peñita. (Figura 12)

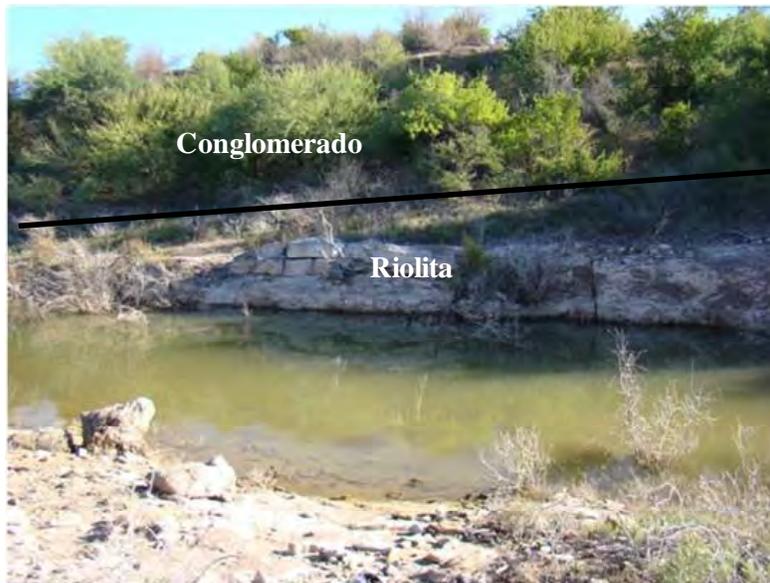


Figura 12. Contacto discordante entre el conglomerado polimíctico de la Formación Báucarit y un posible horizonte de riolita de la Formación Tarahumara.

Fuera del área de estudio, hacia la parte norte del límite del área (Figura 13), se encontró un contacto por falla inversa entre una unidad de rocas volcánicas andesíticas y el conglomerado polimíctico de la Formación Báucarit. Es posible que estas rocas volcánicas correspondan a la Formación Tarahumara, sin embargo dentro de la geología regional se reporta una unidad de andesitas que corresponden al Terciario inferior (Mioceno) que también podría correlacionarse en tiempo con esta unidad.



Figura 13. Contacto por falla (línea roja) entre el conglomerado polimíctico de la Formación. Báucarit y andesitas.  
Foto tomada al norte del área de estudio.

### 2.2.3 Terciario

El conglomerado polimíctico de la Formación Báucarit, se ubica en el límite del área de estudio hacia el oeste y noroeste, ocupando un 8% aproximadamente del área.

En esta área la Formación Báucarit está representada, por una secuencia de horizontes arcillosos, y arenosos, bien estratificados, inter-bandeados y bien compactados, con algunos fragmentos que van de angulosos a sub-angulosos y otros redondeados, los fragmentos corresponden a rocas volcánicas provenientes de las rocas aflorando localmente como la Formación Tarahumara y a rocas sedimentarias. (Figura 14)



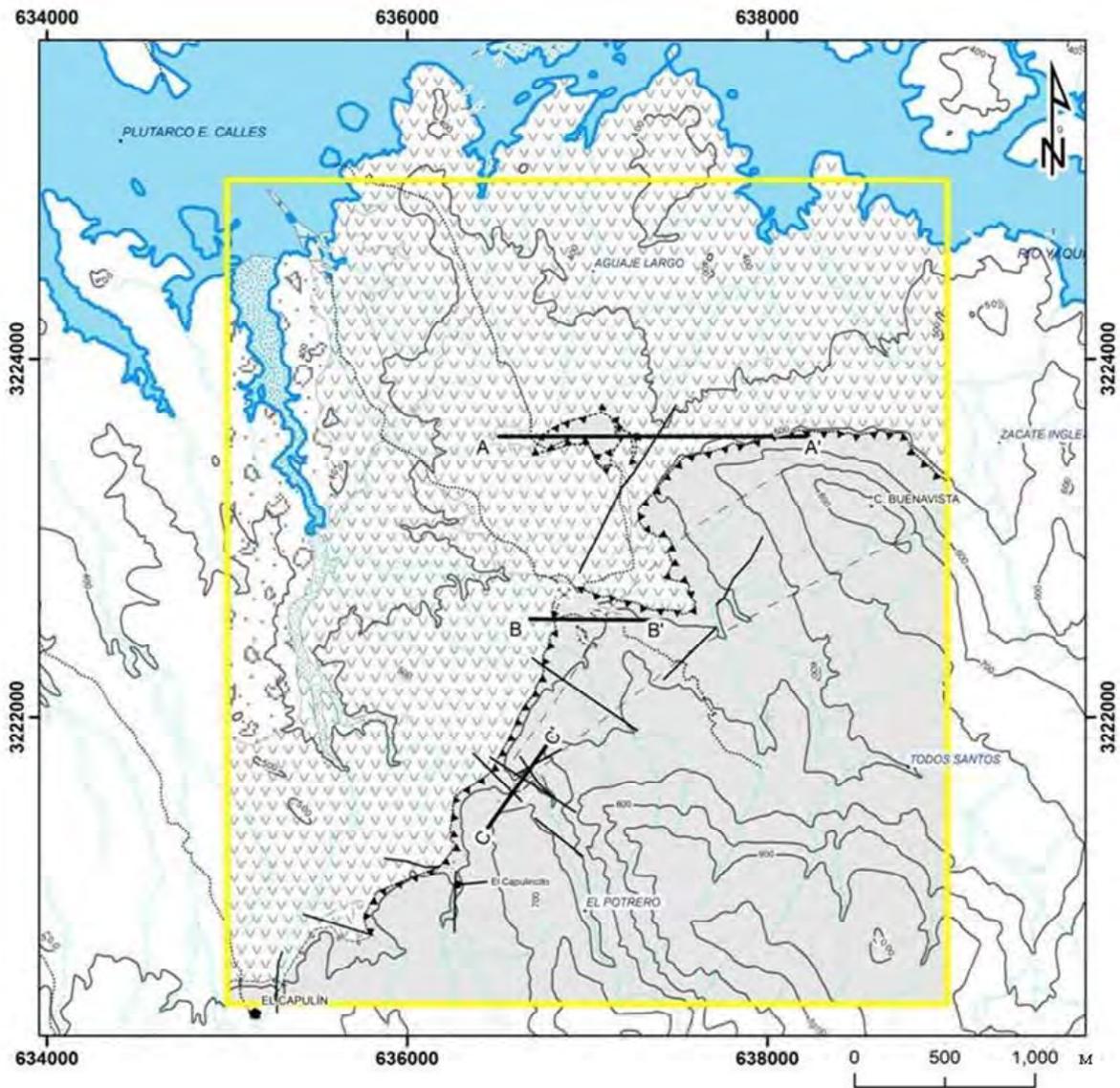
Figura 14. Formación Báucarit las líneas negras marcan los horizontes areno-arcillosos, bien estratificados, inter-bandeados y el círculo negro marca los fragmentos que van de angulosos a sub-angulosos. La inclinación de estos estratos es de aproximadamente 22° al norte. Foto tomada en la parte oeste en el límite del área de estudio.

#### 2.2.4 Reciente

Corresponde a material aluvial relleno de las partes bajas donde se encuentran los arroyos dentro del área de estudio. También existe una área de aproximadamente 1.6 km<sup>2</sup> de caliche/travertino que cubre a las rocas volcánicas andesíticas de la Formación Tarahumara, con un espesor que va de 5 a 20 m, es notoria en las fotografías aéreas y en la imagen de satélite de Google Earth (2009). Esta área se extiende desde el Rancho Todos Santos y hacia la parte noroeste del límite del área de estudio. Esta área puede corresponder a una antigua zona aguas termales que pudo haber disuelto parte de las rocas carbonatadas paleozoicas. (Figura 15)



Figura 15. a) Contacto entre travertino y rocas volcánicas de la Formación Tarahumara, foto tomada en la parte noroeste del área de estudio. b) Travertino ubicado a 130 m del rancho Todos Santos.



**Simbología**

- ✕ Todos Santos
- AreaEstudio
- ⋯ Brecha
- ⋯ Arroyos
- CN 100m
- Secciones
- - - Fallas interpretadas
- Fallas
- ▲▲▲ Falla inversa
- ⋯ Contacto

**Contactos**

- ⤴ Klippe
- ⬢ Ventana

**Litología**

- ▨ Q Aluvión
- ▨ Tim Fm. Baúcarit
- ▨ ? Andesitas
- ▨ ? Riolita
- ▨ Ks Fm. Tarahumara
- ▨ Ps Sec Carbonatada

Figura 16. Geología local del área de estudio Todos Santos, donde se muestra el contacto entre la secuencia de rocas carbonatadas y la Formación Tarahumara. Datos estructurales; Klippe: es un remanente roca después que la erosión ha borrado parte de ella. Ventana: es un área autóctona descubierta por la erosión de la roca desplazada encima de ella.

Edad M.A.	Era	Sub-Era	Periodo	Epoca	Geología local	Formación							
0	Cenozoico	Cuaternario	Neógeno	Holoceno		Aluvi3n							
1.8				Pleistoceno									
2.5				Plioceno	Baúcarit								
5.3		Mioceno											
23.03		Terciario		Pale3geno	Oligoceno								
65.5					Eoceno								
	Paleoceno												
Mesozoico			Cretácico	Superior		Toba Riolítica-Andesítica							
				Inferior		Tarahumara							
			145.5	Jurásico	Superior		Estratigrafía generalizada de la plataforma carbonatada del área Minas de Barita y plataforma carbonatada de la sierra Santa Teresa, Poole, et. al. 2008						
					Medio								
					Inferior								
			199.6	Triásico	Superior								
					Medio								
					Inferior								
			251	Pérmico	Superior		Minas de Barita						
					Medio			Sierra Santa Teresa					
Inferior	<table border="1"> <tr> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>&gt; 1000</td> <td>&gt; 500</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> </tr> </table>	—			—			—	—	> 1000	> 500		
—	—	—	—										
> 1000	> 500												
—	—	—	—										
299	Carbonífero	Pensilviano		Formación Mina México									
		Missisipiano			Carbonatada de plataforma Yacimiento Pb-Zn-Ag barita								
		<table border="1"> <tr> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> </tr> </table>			—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—										
—	—	—	—										
—	—	—	—										
359.2					Calizas sin nombre >120								
					Calizas sin nombre >1500								
					Sin Datos								

• Gradstein, F.M., Ogg, J. G., Smith, A.G., Bleeker, W. & Lourens, L. A Geologic Time Scale 2004

Tabla 2. Geología local del área de estudio y correlación estratigráfica de la plataforma carbonatada en las áreas Minas de Barita y sierra Santa Teresa que incluyen a la Formación Mina México (Poole, *et al.*, 2008). Las unidades aquí presentadas son las que se observaron en el campo. El dique que corta a la Formación Tarahumara, posiblemente pueda estar cortando a la rocas paleozoicas, solo que esta relación no se observó en campo, mostrándose en un tono más claro en comparación donde está cortando a la Formación Tarahumara, además de que se incluyen dos unidades de tobas riolíticas y andesíticas, que posible pueden corresponder a un miembro de esta formación.

### 2.2.5 Relación estructural entre la secuencia paleozoica y las rocas volcánicas de la Formación Tarahumara

De acuerdo con la morfología con la zona de estudio y con la ayuda de las fotografías aéreas se observan siempre las rocas volcánicas andesíticas correlacionables con la Formación Tarahumara en las áreas bajas a elevaciones cercanas al nivel del Río Yaqui, mientras que las calizas paleozoicas aparecen encima de las anteriores hasta la cima de la sierra. El contacto entre ambas unidades está cubierto pero solo se puede interpretar como un contacto con muy poca inclinación hacia el sur y por la fuerte distancia entre las edades de ambas unidades, la única manera de interpretar dicho contacto es tectónica.

Con los pocos datos estructurales de campo que se obtuvieron y con la interpretación de las secciones geológico-estructurales (Figura 16), que se realizaron en el área de estudio nos hace suponer de manera generalizada que la dirección del movimiento de estas rocas paleozoicas es del SW al NE dentro de una superficie de “*thrust fault*” (cabalgamiento) sobre la Formación Tarahumara. Este tipo de relaciones ya había sido sugerido en la cartografía del Servicio Geológico Mexicano y como un evento geológico de gran importancia por Pérez-Segura (2006).

La edad del contacto tectónico entre las rocas paleozoicas sobre las rocas volcánicas de la Formación Tarahumara estaría en un rango de 100 Ma a 91 Ma Pérez-Segura *et al.*, 2009, lo que indicaría que la edad de la Formación Tarahumara sería más antigua de lo que se determinado en Sonora Central de 86 a 68 Ma.

De acuerdo con los fechamientos presentados por dichos autores en el área La Esperanza y de manera hipotética se podría decir que la edad de deformación es contemporánea a este rango de edad.

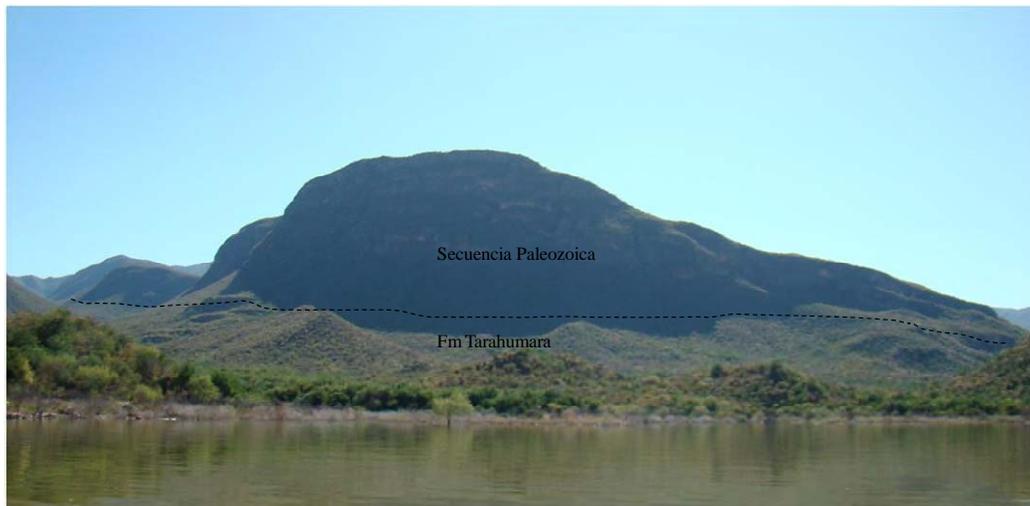


Figura 17. Contacto entre la Formación Tarahumara y las rocas paleozoicas, este contacto está marcado con línea punteada porque es aproximado en la fotografía. Vista hacia el sur del cerro Buenavista.

La sección A-A' (Figura 18), representa de manera esquemática, el contacto que funcionó como superficie de desplazamiento “*thrust fault*” (cabalgamiento) de la secuencia paleozoica sobre la Formación Tarahumara, además de que se tiene una falla normal interpretada que es posterior al cabalgamiento, la orientación de esta sección es W-E.

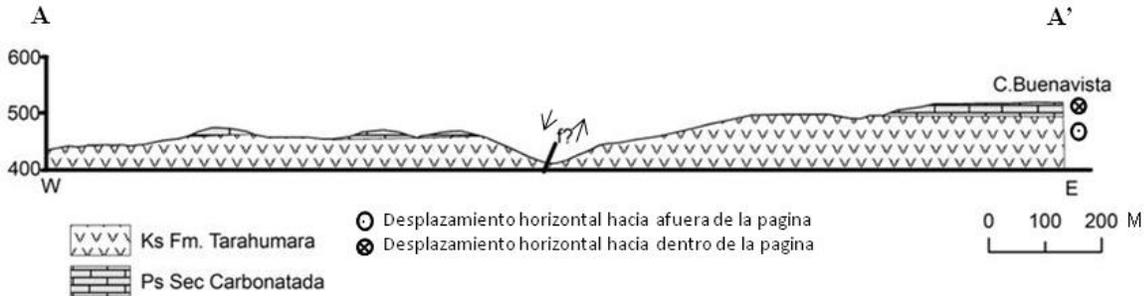


Figura 18. Sección geológico-estructural A-A', donde se muestra el contacto cabalgante entre las dos unidades y muestra el desplazamiento horizontal de la secuencia paleozoica sobre la Formación Tarahumara.

La sección B-B' (Figura 19), también representa en forma esquemática ese mismo contacto que funciona como superficie de desplazamiento entre la secuencia paleozoica y la Formación Tarahumara, dentro de las zonas mineralizadas Manto II y El Puerto.

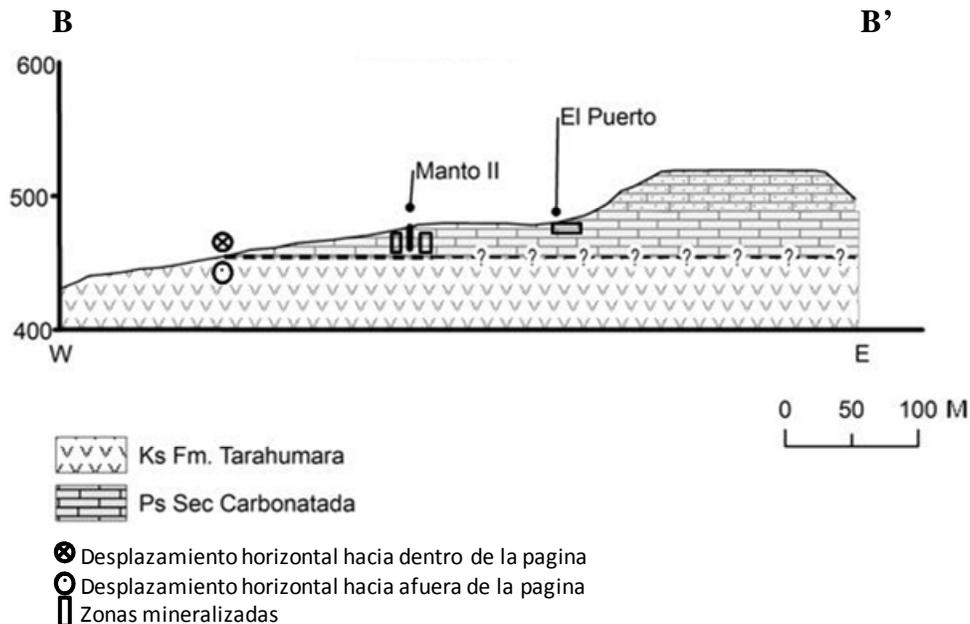


Figura 19. Sección B-B', muestra la zona del Manto II y El Puerto que son áreas mineralizadas (en rectángulo) así como el contacto tectónico entre las dos unidades y su desplazamiento.

La sección C-C' (Figura 20), representa en forma esquemática el tipo de deformación compresiva que afecto a la secuencia paleozoica y de manera hipotética se interpreta que el movimiento fue del SW al NE como se observa en la sección.

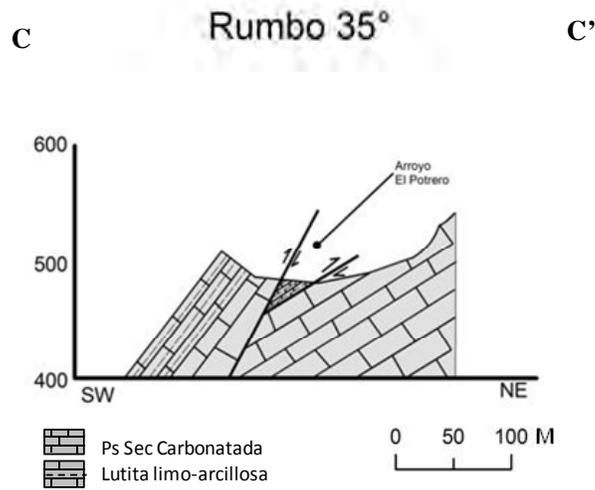


Figura 20. Sección geológico-estructural C-C' área de la cañada del arroyo El Potrero, la secuencia paleozoica está conformada por horizontes de caliza masiva y otra por horizontes de lutita limo-arcillosa, que se pudieran correlacionar con la Formación Mina México.

En el área de la cañada del arroyo El Potrero, se tiene aflorando un horizonte de lutita limo-arcillosa de color rojo, que tienen un espesor de 5cm a 1m de espesor, con un rumbo N 8°W e inclinación 65°SW, que se pudieran correlacionar con la Formación Mina México. Dentro de estos horizontes se observan vesículas de gas tensionales que demuestran el estrés de deformación (Figura 21.a), también se pudieron observar algunos planos de fallas con una textura “shera” que son parecidas a un chorizo. (Figura 21.b)



Figura 21. a) Se observan los horizontes de lutita-limo arcillosa con vesículas de gas tensionales, debido a la deformación a la que fueron sometidas. El rumbo de estos horizontes es de N 8°W con una inclinación 65°SW que a su vez está siendo cortada por una falla con rumbo N15°W e inclinación 37°SW. Foto tomada dentro de la cañada del arroyo El Potrero. b) Deformación dentro de las calizas, la línea en rojo marca una falla y por arriba de la línea se alcanza a observar los horizontes de lutitas limo-arcillosos comprimidos y en la parte inferior estos horizontes perpendiculares a la falla. Foto tomada en la cañada del arroyo El Potrero.

### **3 EL YACIMIENTO DE TODOS SANTOS (Pb-Zn-Ag-barita).**

#### **3.1 Antecedentes**

En el área de estudio se localiza la mina llamada Todos Santos, no se tiene un dato histórico de cuando se empezaron a realizar los trabajos mineros en esta área, pero el vaquero del rancho Todos Santos comenta que antes de que construyeran la presa Plutarco Elías. Calles “El Novillo” en San Pedro de la Cueva los habitantes del poblado de Suaqui ya trabajaban en esa mina.

La asignación minera (del Servicio Geológico Mexicano) Todos Santos, es el nombre con el que se conoce actualmente al yacimiento que se encuentra dentro del área de estudio, pero anteriormente era conocida como La Candelaria de Suaqui, del cual se tienen registrados dos trabajos con este nombre.

Existen varios reportes técnicos elaborados por el personal de oficinas de promoción minera gubernamental.

El primer informe es citado dentro del trabajo de Vázquez-Mendoza, 1997; ese informe se realizó en 1984 por el Ing. Miguel A. Fernández geólogo de la antigua Dirección General de Minería, Geología y Energéticos del Gobierno del Estado de Sonora con el nombre de “Informe de la Visita a la mina Candelaria de Suaqui, en el Municipio de San Pedro de la Cueva, Sonora”. En ese informe se describen algunas de las características geológico-mineras de los cuerpos mineralizados existentes y se colectaron 14 muestras de esquirlas de canal sobre el manto mineralizado, en el interior de las obras mineras del Manto II donde se encuentra el tiro principal.

Además, Vázquez-Mendoza, cita que ya para el año de 1989 el área se denominó Todos Santos según el programa de exploración regional desarrollado por el antiguo Consejo de Recursos Minerales (C.R.M) la misma que fue protegida por la Residencia Sonora en 1989 y en 1993 fue amparada mediante la asignación minera Todos Santos, debido al interés económico de los yacimientos y que para el año de 1996, se empezaron a realizar los trabajos geológico-minero dentro de la asignación minera, con el propósito de explotar y definir el interés de las estructuras existentes, del cual se obtuvo como resultado el “Informe de la exploración geológico-minera realizada en la asignación minera Todos Santos; Municipio de San Pedro de la Cueva, Sonora” elaborado por el mismo Vázquez-Mendoza en 1997. En este informe se describe los tipos de yacimientos minerales existentes en la asignación, valores de análisis de muestras recolectadas, así como algunos trabajos geofísicos que se realizaron.

Otro trabajo es el “Reporte de la vista al fundo minero Candelaria de Suaqui, Municipio de San Pedro de la Cueva, Sonora” realizado en el año de 1985, por Terán-Moreno, donde describe la geología, los tipos de yacimientos y obras existentes, así como algunos datos estructurales. Esta visita de reconocimiento fue hecha a petición del apoderado del concesionario para conocer la posibilidad de explotación económica y reservas de los yacimientos, de esta visita no se obtuvieron más resultados por causas ajenas al antiguo Consejo de Recursos Minerales.

Posteriormente se tiene el Estudio Geofísico con los Métodos de Polarización Inducida y Resistividad en la asignación minera Todos Santos, Municipio de San Pedro de la Cueva elaborado por Reyes-Salazar en 1997, donde se describen los trabajos de geofísica de Polarización Inducida (P.I.) y resistividad, realizados en el área de estudio, presentando mapas y secciones en los mismos.

En la tesis doctoral de Pérez-Segura 2006, se describen algunos datos metalogenéticos complementarios al objetivo principal de la tesis.

### **3.2 Descripción de la mineralización en el depósito Todos Santos.**

La mineralización en Todos Santos se ha clasificado como un yacimiento de reemplazamiento, ya que está hospedado en la secuencia de rocas carbonatadas del Paleozoico Superior. Los principales elementos son plomo-zinc-plata, y los minerales representativos son galena, esfalerita y pirita a simple vista, y como minerales de ganga barita, calcita, cuarzo, hematita, óxidos de manganeso, y trazas de carbonatos de cobre.

La estructura del yacimiento es en forma de lentes masivos o mantos, aproximadamente de 200 m de longitud, que sigue los planos de estratificación de las rocas carbonatadas. Dentro del área de estudio no se observó algún cuerpo intrusivo cortando a estas rocas pero en la parte sur, como se observa en la Figura 4 de la Geología regional, se encuentra el Batolito Bacanora y el Pórfido San Lucas intrusionando a las rocas paleozoicas y a la Formación Tarahumara, siendo las posibles fuentes de calor para generar yacimientos minerales.

Las rocas carbonatadas están recristalizadas y se observa en una franja con un rumbo NE-SW, aunque también se observa una intensa oxidación de sulfuros en las zonas mineralizadas y alteración propilítica (epidota, clorita, pirita, calcita) en las rocas volcánicas andesíticas.

En la figura 28 se muestra la zona de Mantos I, II, III y el cuerpo mineralizado El Puerto.

#### **3.2.1 Manto I**

Como su nombre lo indica están en forma de manto, siguiendo los planos de estratificación de las rocas carbonatadas y se localiza a 240 m al suroeste en línea recta del racho Todos Santos. Es un cuerpo mineralizado de reemplazamiento en las rocas carbonatadas, altamente silicificadas, con un rumbo N65°E/35°SW, su espesor promedio es de 1.50 m y una longitud aproximada de 100 m, en algunos casos el manto tiende a ser horizontal (Vázquez-Mendoza, 1997). La zona mineralizada se ubica muy cerca del contacto tectónico entre las rocas paleozoicas y las andesitas de la Formación Tarahumara. En este cuerpo existen varias obras mineras antiguas denominadas: El Pilar, El Mauto y El Murciélagos.

El Pilar (Figura 22), se encuentra al sur del rancho Todos Santos y es el primer cuerpo que se encuentra de sur a norte por el camino, que conduce del rancho a las obras mineras. Esta obra minera consiste de un cuerpo inclinado con longitud de 15.50 m, labrado con un rumbo S12°W y 26° de inclinación. La mineralización consiste de galena, esfalerita, barita, cuarzo y óxidos de fierro; con una ley media en los afloramientos superficiales 25g/t de Ag, 19% de Pb y 0.9% de Zn y en obras mineras 117g/t de Ag, 9% de Pb y 9.9 de Zn. reportados en Vázquez-Mendoza (1997). En esta área se tienen horizontes de calizas recristalizadas, con horizontes de areniscas y manganeso. (Figura 23)



Figura 22. Foto tomada cerca de la obra El Pilar, caliza masiva de plataforma con horizontes de areniscas, presentan un rumbo NW60°SE con una inclinación casi horizontal.



Figura 23. Calizas estratificadas intercaladas con horizontes de areniscas con espesores que varían de 15 a 20 cm de espesor y horizontes de manganeso de 10 cm de espesor, el rumbo de estas calizas continúa como la figura de arriba solo que aquí se inclinan 48°NE, estas calizas se encuentran entre la obra El Pilar y El Murciélagos.

El Mauto es el segundo cuerpo después de El Pilar y es un pequeño desarrollo de 5.80 m de longitud con rumbo N45°E, de 2 m de ancho por 1.50 m de alto. Las obras que se encuentran aquí están desarrolladas en las calizas recristalizadas, las cuales se encuentran fuertemente brechadas, falladas y basculadas. La mineralización que se sigue presentando es la misma y tiene una ley media de 281g/t de Ag, 8.6% Pb y 13.3% Zn.

El Murciélago (Figura 24), es el tercer cuerpo después de El Mauto. Es la obra de mayores dimensiones y consiste de un tiro inclinado. Dentro de este desarrollo se tiene un pequeño pozo con 3.80 m de profundidad, donde se tiene acceso al nivel inferior con varias obras con frentes y comidos irregulares, se tiene una ley media de 146g/t de Ag, 7.4% Pb y de 9.1% de Zn. En este Manto I se recolectaron ocho muestras que van de la TS-17b a TS-23.



Figura 24. Zona del Manto I, parte de la obra minera El Murciélago, se observa las calizas reemplazadas con mineralización, el rumbo de estas calizas cambia hacia el SW80°NE con una inclinación 37°NW, en la parte superior se tiene oxidación de sulfuros, de aquí se tomaron las muestras TS-21 y TS-22.

### 3.2.2 Manto II

Se localiza a 16 m en línea recta al N25°W del P.P. de la asignación minera, es un manto mineralizado con un espesor de 2 m con un rumbo de NE35°SW/12°SE. De acuerdo a los datos obtenidos en otros estudios, se reportan leyes medias para el tiro principal de 85g/t de Ag, 10.3% de Pb y 10.8% de Zn y en los terreros cerca del tiro principal se tienen leyes promedio de 154g/t de Ag, 4.52% de Pb y 13.4% de Zn.

En este Manto II se encuentra el tiro principal (Figura 25), antiguamente fue explotado con frentes subterráneas, este tiro es vertical con 12 m de profundidad el cual corta al Manto II. En este afloramiento no se ha tenido acceso puesto que este no aflora, pero si se pudieron recolectar seis muestras TS-24 a TS-28 del terrero adyacente al tiro, estas muestras se estudiaron para minerografía y petrografía. La TS-25 se usó para isótopos de azufre con par mineral galena/esfalerita y TS-28 se hizo un análisis con el microscopio electrónico de barrido, para la identificación de un mineral dentro de la galena.



Figura 25. Zona del Manto II Tiro Principal, de los terreros se recolectaron las muestras TS-24 a TS-28.

### 3.2.3 Manto III

Se localiza a 89 m en línea recta al N32°E del P.P. (Figura 26), y consiste de un cuerpo tabular, con un rumbo NE27°SW/34°SE, la longitud aproximada del afloramiento es de 55 m con un espesor de 2.20 m. La caliza está recristalizada, cortada por una serie de vetillas de barita, calcita y cuarzo. En este cuerpo mineralizado se tiene labradas varias obras mineras representadas por frentes, tiros, catas y tajos, denominándolos como El Echadero.

La ley media en este Manto III 56g/t de Ag, 4.3% de Pb y de 2.4% de Zn. para los afloramientos superficiales. Para la obra minera El Echadero 65g/t de Ag, 4.5% de Pb y de 4% de Zn; y para el terrero de 73 g/t de Ag, 9.7% de Pb y 1.7% de Zn (Vázquez-Mendoza, 1997). De este Manto se recolectaron tres muestras que van de la TS-01 a la Ts-03 de las cuales TS-02 y TS-03 se utilizaron para estudios de petrografía, minerografía e isótopos estables.



Figura 26. a) Zona mineralizada Manto III, obra minera El Echadero. b) Se observa un pequeño anticlinal, y los horizontes de las calizas con mineralización cortada por varias vetas de barita.

### 3.2.4 El Puerto

Se localiza a 180 m en línea recta al este del tiro principal del Manto II (Figura 27). Las calizas están siendo reemplazadas, de manera irregular y tiene una intensa oxidación de tipo hematítica, dentro de esta se encuentran varias vetas de barita de diferentes espesores dando una apariencia como de reventones de barita. Tiene un rumbo NW45°SE con una variación en la inclinación de 0° a 37° al SW, la longitud considerada para este cuerpo es de más de 200 m con espesores mínimos de 2 m. Dentro de este mismo cuerpo existen otras obras que consisten de diferentes catas, frentes y tajos; los cuales son conocidos con los nombres de La Perdida, La Chica, La Chica II, Tajo I, La Escondida y El Torote, todas estas de pequeñas dimensiones a excepción de la Perdida que tiene una longitud de 3.10 m y sección de 2 m de ancho y 1.70 m de alto. Las leyes medias para El Puerto son de 72g/t de Ag, 1.40% Pb y 13.33% de Zn en los afloramientos superficiales, en las obras mineras de 132g/t de Ag, 1.61% de Pb y 1.65% de Zn; y en la zona de terreros de 88g/t de Ag, 1.72% de Pb y 0.50% de Zn (Vázquez-Mendoza, 1997).

De este cuerpo mineralizado se tomaron dos muestras TS-04 y TS-05 a esta última se le hizo estudio petrográfico e isótopos.



Figura 27. Parte del cuerpo mineralizado El Puerto, se observan vetas y vetillas de barita en varias direcciones, con espesores variables que van desde 1 a 10 cm de espesor, teniendo una apariencia como de reventones y una intensa oxidación hematítica este cuerpo está hospedado dentro de las mismas rocas paleozoicas solo que se encuentra en los horizontes de lutita limo-arcillosas con intercalaciones de arenisca.

Las descripciones completas de las muestras recolectadas, ubicación, muestras seleccionadas para estudio petrográfico, mineragrafía, inclusiones fluidas, isótopos y microscopio electrónico de barrido se encuentran en el Anexo I.

### 3.3 Geofísica

En el área de estudio Todos Santos, se tienen estudios geofísicos de polarización inducida (P.I.) y Resistividad que se realizaron en 1997 por Reyes-Salazar para el Consejo de Recursos Minerales, con el objetivo de delimitar lateralmente y a profundidad las zonas mineralizadas conocidas como Mantos I, II y III y el cuerpo mineralizado El Puerto.

El estudio consistió de la aplicación de dos métodos; el método de Polarización Inducida (P.I.) y resistividad (arreglo electródico dipolo-dipolo, con lecturas hasta de 150 m de profundidad). Los resultados que se obtuvieron con el método de P.I. fueron dos anomalías eléctricas.

La primera anomalía se encuentra en la zona de Mantos, esta anomalía tiene una longitud de 200 m con un rumbo NE-SW, interpretándose como mineralización de sulfuros contenida dentro de una estructura tipo de manto y forma tabular angosta ; indicando que en los afloramientos de los Mantos I, II y III, corresponden a un mismo cuerpo y para los resultados de resistividad se tiene en esta zona una alta resistividad (500 a 4000 ohms-m) interpretándose como una zona de silicificación dentro de las calizas, ubicando a la zona mineralizada con P.I. dentro de la zona de alta resistividad. (Reyes-Salazar, 1997)

La segunda anomalía se correlaciona espacialmente con el cuerpo mineralizado El Puerto, con un rumbo NW-SE, inclinándose ligeramente al SW, con una longitud de 200 m, de forma tabular, pero esta anomalía presenta en la porción NW una amplitud que se interpreta como dos mantos o un cuerpo irregular. En cuanto a los resultados de resistividad se tiene una alta resistividad (500 a 10,000 ohms-m) correlacionable con el cuerpo mineralizado, interpretándose como una zona de alta silicificación, esta zona se asocia a los reventones y vetas de barita que se encuentran dentro del cuerpo mineralizado El Puerto (Reyes-Salazar, 1997). (Figura 28)

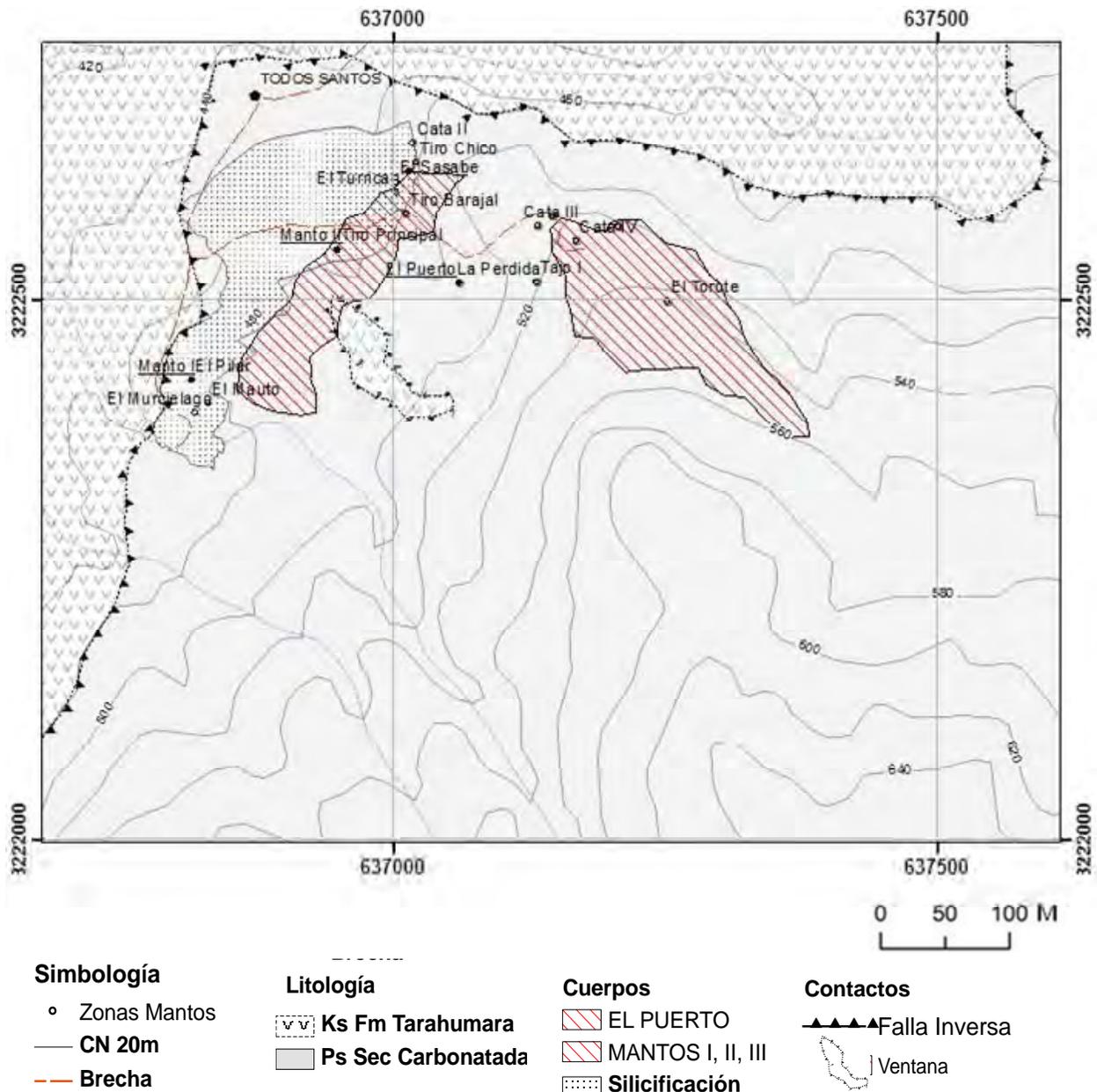


Figura 28. Muestra la zona de Mantos I, II, III y el cuerpo mineralizado El Puerto, se observa que los Mantos I, II y III se orientan hacia el NE-SW y El Puerto se orienta al NW-SE. (Nota: la información presentada en esta figura corresponde a la geofísica de PI y Resistividad, realizada por Reyes-Salazar, 1997, este mapa es reeditado por la autora para este trabajo. Datos estructurales; Ventana: es un área autóctona descubierta por la erosión de la roca desplazada encima de ella.

### 3.4 Mineralogía y secuencia paragenética

De las tres zonas de manto que existen dentro del área de estudio se seleccionaron nueve muestras que corresponden a las calizas silicificadas y mineralizadas, de estas muestras se realizaron secciones pulidas, para posteriormente hacer el estudio minerográfico y definir la secuencia paragenética del yacimiento mineral dentro del área de estudio

A continuación se hace una descripción de las muestras estudiadas.

Del manto I se obtuvo la muestra TS-22 (Figura 29), en la muestra de mano se observa que la caliza está altamente silicificada y oxidada, con fracturas rellenas de óxidos (hematita) y galena, en lámina delgada se observa la misma silicificación y las fracturas con galena, con algunos fantasmas de fósiles recristalizados.

En la sección pulida de esta muestra la ganga está representada por cuarzo, que coincide con la silicificación de la caliza, se observa también como la galena se introduce dentro de esta ganga, coexistiendo con esfalerita. Dentro de la esfalerita, de manera diseminada existen inclusiones de calcopirita; se observó también pirita diseminada y muy fina aproximadamente como en un 2%, dentro de esta superficie pulida.

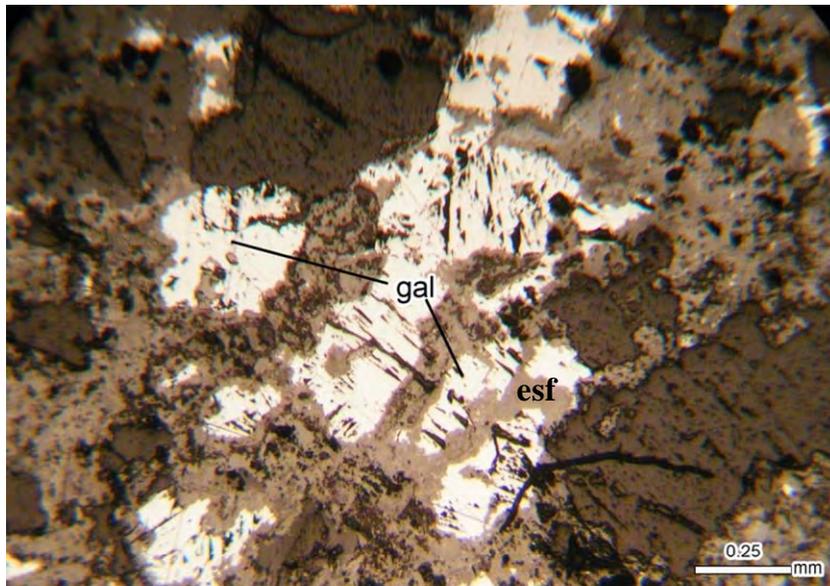


Figura 29. Fotomicrografía de la sección pulida TS-22, se observa galena al centro y esfalerita, dentro de la ganga representada por fragmentos de caliza silicificada, la calcopirita en esta fotomicrografía no se observa ya que es muy fina, así como la pirita (gal=galena, esf=esfalerita).

En la zona de Manto II, en la superficie se observa caliza altamente silicificada, con zonas de oxidación de los sulfuros y en otras partes oxidación de hierro, a pesar de la inaccesibilidad de la obra minera, cerca del tiro se tiene una zona de terreros donde se pudieron recolectar muestras para este estudio.

De la muestra TS-24 (Figura 30), se obtuvieron tres secciones pulidas. En ellas se observa que la galena se introduce dentro de la ganga (barita-cuarzo), y dentro de esta galena se tiene esfalerita muy fina, de color café claro. Esta sección pulida también presenta, como en las otras dos anteriores, inclusiones de calcopirita, además de observar también trazas de covelita de origen supergénico. Otro mineral que se observó en esta sección pulida dentro de la galena es un mineral identificado por sus propiedades ópticas como tetrahedrita, se observa con un color gris claro, mucho más tenue que la esfalerita y se encuentra en esta sección como en un 2% aproximadamente.

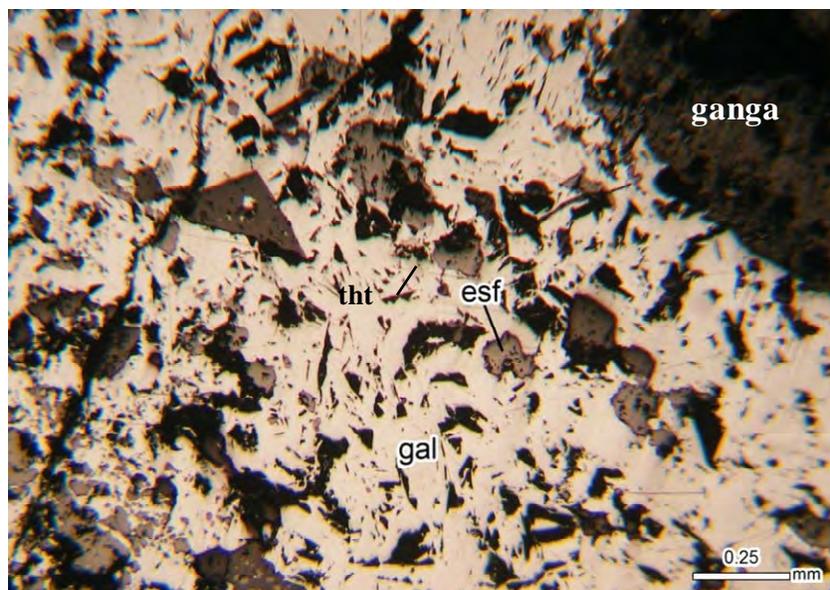


Figura 30. Fotomicrografía de la sección pulida TS-24, se observa el contacto entre la galena y la ganga, esfalerita al centro de color gris claro y la tetrahedrita con un tono más claro que el de la esfalerita (esf= esfalerita, gal= galena, tht= tetrahedrita).

Para poder hacer la correcta identificación de este mineral se hizo un análisis utilizando un microscopio electrónico de barrido con capacidad para microanálisis. La mejor identificación de este mineral se hizo en la sección pulida TS-28, donde se pudo observar mejor. Los resultados confirman la presencia de tetrahedrita, a la cual se atribuyen también las concentraciones de plata del yacimiento, como se muestra en otra parte de este trabajo.

En las secciones pulidas TS-24A y TS-24B (Figuras 31.a y 31.b) respectivamente se observa que la galena junto con la esfalerita se introduce dentro de la ganga transparente, aproximadamente se tiene un 2% de pirita disseminada y se alcanza a distinguir en la muestra TS-24A un 1% de goethita supergénica que tiene un color rojizo en luz transmitida (no se observa en la fotomicrografía).

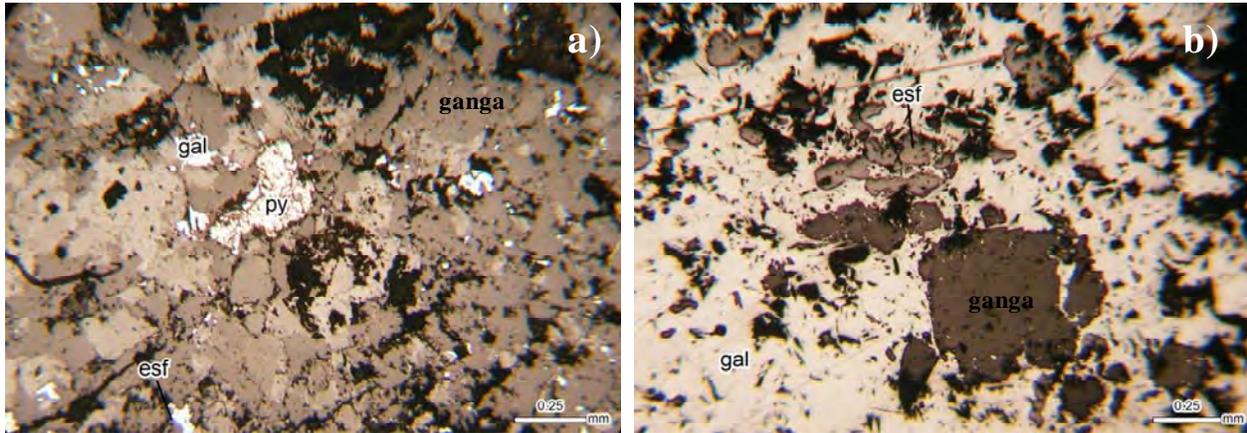


Figura 31. a) Fotomicrografía de la sección pulida TS-24A, se observa galena, esfalerita y pirita, dentro de la ganga. b) Fotomicrografía de la sección pulida TS-24B, se observa galena, esfalerita y ganga en el centro (gal= galena, esf= esfalerita).

En la muestra TS-25 (Figura 32), en muestra de mano se observa una textura brechada, con fragmentos de caliza silicificada, galena y pequeños cristales de esfalerita, En la sección pulida se sigue observando algo similar que en las anteriores secciones: la galena se introducen dentro de la ganga, al igual que la esfalerita, la cual contiene inclusiones de calcopirita en un 3% aproximadamente, la pirita se encuentra de manera disseminada, con una textura de “ojos de pájaro” como en un 2% aproximadamente.

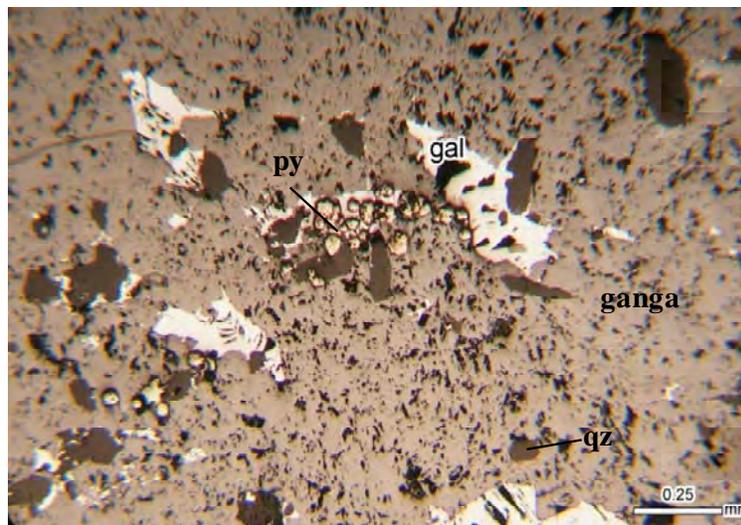


Figura 32. Fotomicrografía sección pulida TS-25, se observa galena anhedral y subhedral en la parte inferior derecha dentro de la ganga, pirita (textura “ojos de pájaro”) y cuarzo euhedral (gal= galena, py= pirita, qz= cuarzo).

En la muestra TS-26 (Figura 33), en muestra de mano se observa una textura de tipo cebra, en la lámina delgada se observan cristales de barita de euhedrales a subhedrales, en contacto con calcita y galena, y oxidación secundaria en las fracturas. En la sección pulida se observa galena deformada, esfalerita con inclusiones de calcopirita, pirita diseminada y tetrahedrita en un 10% aproximadamente.



Figura 33. Fotomicrografía sección pulida TS-26, se observa galena que se introduce dentro de la ganga (barita), así como deformación de esta, esfalerita en contacto con la galena y la ganga (gal= galena, esf= esfalerita).

En la muestra TS-28 (Figura 34), se observa en muestra de mano galena y barita, así como oxidación en la parte superficial de la muestra, microscópicamente en lamina delgada se observa que la caliza esta silicificada con cristales euhedrales a subhedrales de barita, en contacto con galena. En la sección pulida se observa una matriz irregular que constituye la ganga (barita, calcita y cuarzo), la galena se introduce dentro de esta ganga y tiene con ella inclusiones de tetrahedrita que presenta un color gris claro, de esta sección pulida se hizo el análisis con el microscopio electrónico de barrido para identificar el mineral que contiene plata en el yacimiento de Todos Santos.

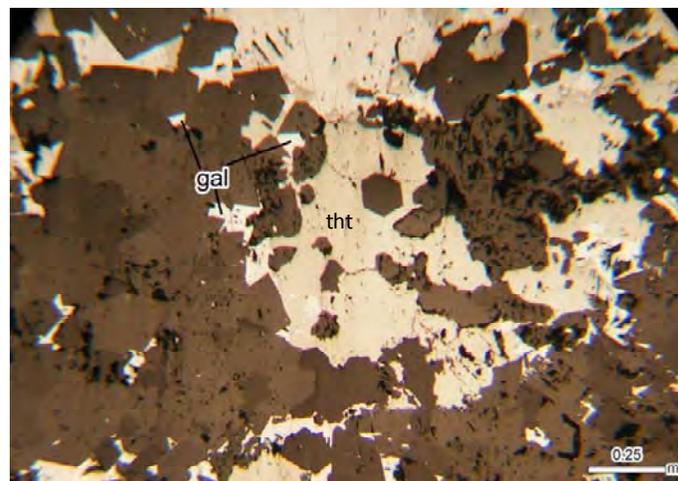


Figura 34. Fotomicrografía de la sección pulida TS-28, se observa al centro tetrahedrita dentro de galena y en contacto con la ganga (gal= galena, tht= tetrahedrita).

Por último la muestra TS-02 representa parte de la zona del Manto III, en la muestra de mano se observa una textura brechada, dentro de la caliza altamente silicificada, presentando mineralización con galena, esfalerita muy fina, pequeñas vetillas y fracturas rellenas con calcita y oxidación en la parte exterior; en la sección pulida de esta muestra, se observa claramente como la galena junto con esfalerita, se introducen rompiendo a la caliza, produciendo la mineralización, y por último se observa covelita producto de alteración de la calcopirita, (Figura 35.a) a diferencia de la muestra TS-03, no se observa una textura brechada en la muestra de mano, pero sí silicificada y cortada por varias vetas de barita junto con galena que se introduce dentro de la barita o relleno de espacios en la caliza silicificada, en la sección pulida de esta muestra se observa galena dentro de la ganga, así como covelita. (Figura 35.b)

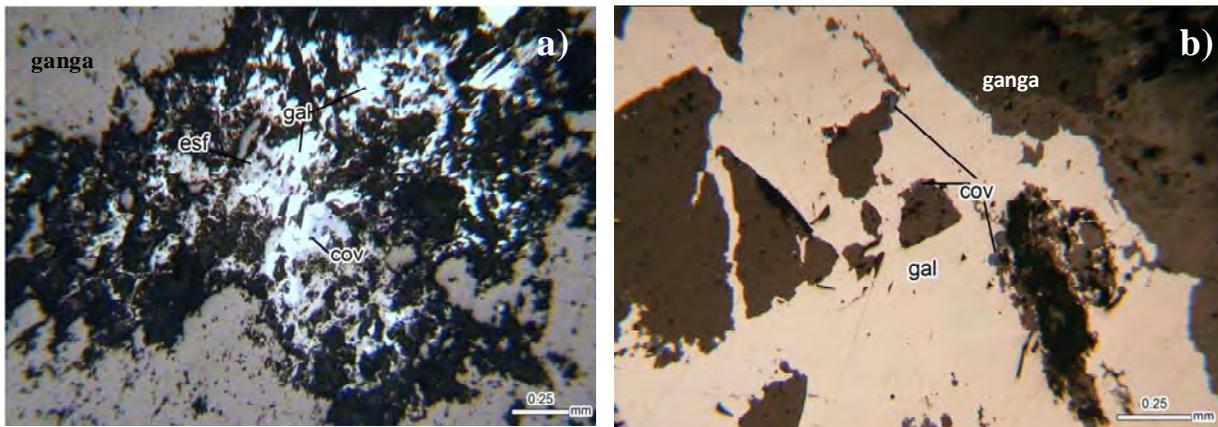


Figura 35. a) Fotomicrografía de la sección pulida TS-02, se observa como la galena se introduce en la ganga, acompañada con esfalerita y trazas de covelita producto de la alteración de la calcopirita. b) Fotomicrografía sección pulida TS-03, se observa como la galena esta dentro de la ganga, y también trazas de covelita, el color gris oscuro representa a la ganga (gal =galena, esf= esfalerita, cov=covelita).

### 3.4.1 Análisis al microscopio electrónico de barrido

De la sección pulida TS-28 se hicieron varios análisis con el microscopio electrónico de barrido, incluyendo un análisis semicuantitativo, cuantitativo, espectro e imagen. En esta sección se presenta el espectro del análisis A (Figura 36), donde se observan los elementos en picos de identificación S, Cu, Sb, Pb, Ag, Zn y Fe.

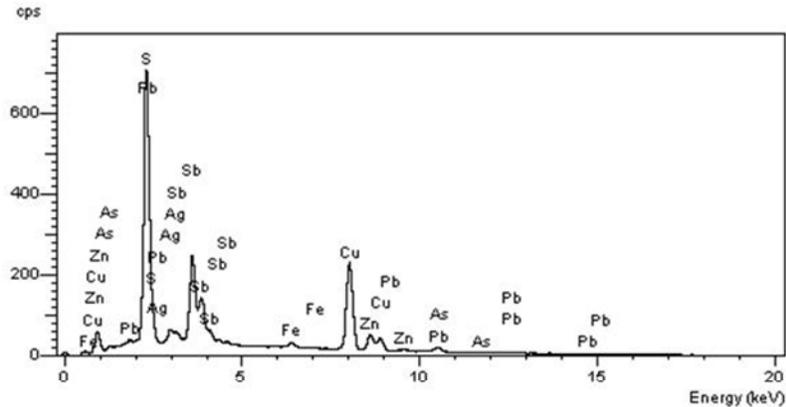


Figura 36. Espectro del análisis analizado con el microscopio electrónico de los elementos indicados.

Con este análisis se pudo determinar los elementos dentro del mineral y así poder calcular la fórmula empírica del mismo.

La tabla 3 muestra en la primera y segunda columna los valores obtenidos con el microscopio electrónico, las columnas siguientes los cálculos que se hicieron para obtener la fórmula simplificada del mineral.

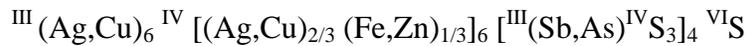
Elemento	% Elemento	Peso Atómico	Recalculo		Proporción atómica
Cu	29.22	63.54	32.9388	0.5184	8.7520
Ag	3.09	107.86	3.4833	0.0323	0.5452
Fe	0.94	55.84	1.0596	0.0190	0.3204
Zn	6.00	65.37	6.7636	0.1035	1.7468
Sb	25.22	121.75	28.4297	0.2335	3.9423
As	2.05	74.92	2.3109	0.0308	0.5208
S	22.19	32.06	25.0141	0.7802	13.1725
	88.71		100.0000	1.7177	

Tabla 3. Datos obtenidos del microscopio electrónico (primera y segunda columna) y valores calculados para obtener la fórmula simplificada del mineral estudiado.

La fórmula obtenida con estos resultados es la siguiente:



Esta fórmula es muy cercana a la de la tetrahedrita. En la literatura este mineral se le conoce también con el término “fahlore” ya que es usado con las modificaciones de “tetrahedrita”, “tenantita y “freibergita” para describir minerales con estructura  $I43m$ , y con una fórmula estructural aproximada como:



Esta fórmula está citada por Dimitrova et al., 2007 ya que ha sido aceptada por varios autores.

La muestra estudiada reporta Pb donde puede ser probable que se sustituya por Zn o Fe, o pueda ser contaminación de otro mineral, es por eso que no se consideró en el cálculo.

La Figura 37, muestra la imagen que se obtuvo con el microscopio electrónico de barrido, de la sección pulida TS-28, se puede observar la tetrahedrita en el centro de la imagen, este mineral es el portador de la plata dentro del yacimiento.

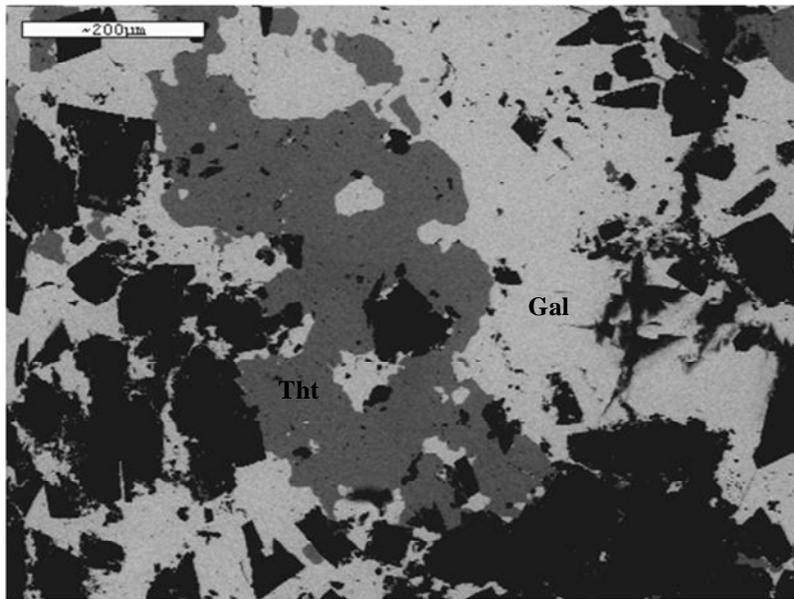


Figura 37. Imagen obtenida con el microscopio electrónico de barrido de la sección pulida TS-28, tetrahedrita (tht) al centro de la imagen, alrededor de ella galena (gal) y los minerales opacos están representados por la ganga (barita, cuarzo).

De acuerdo con Sack, R 1985, la tetrahedrita-tenantita es un “Cadillac” de soluciones recíprocas e indicadores de ambientes mineralizadores hidrotermales, porque tiene una composición variable, dependiendo la temperatura, ya que puede estar como un mineral primario a una temperatura de 375°C (ej: Darwin, California, Czamanske y Hall, 1975 *in* Sack, 1985) o como mineral accesorio a una temperatura de 200°C (ej. Depósito de Pb-Zn-Cu-Ag en Topia, Durango, México, Loucks, 1984 *in* Sack 1985).

### 3.4.2 Secuencia paragenética

A partir del estudio de las observaciones de campo en el afloramiento, de las muestras de mano y de las secciones pulidas, se propone la siguiente secuencia paragenética para el depósito. (Figura 38)

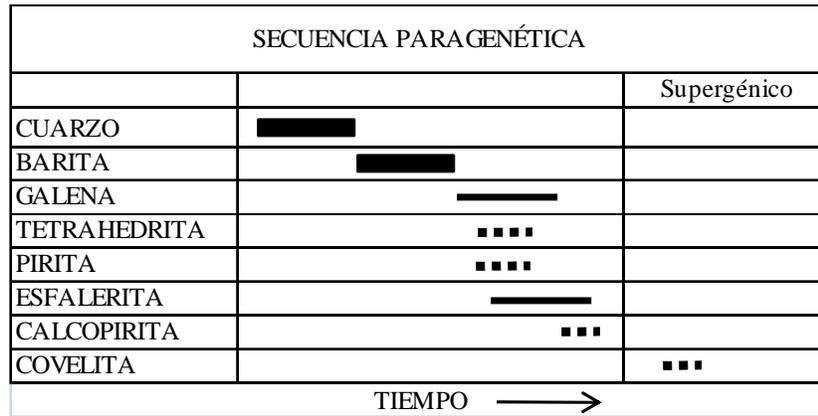


Figura 38. Secuencia paragenética del depósito Todos Santos, Municipio San Pedro de la Cueva, Sonora, México.

### 3.5 Inclusiones Fluidas

#### 3.5.1 Microtermometría

La microtermometría se basa en la medición de diferentes temperaturas en las cuales se producen cambios de fases en las inclusiones fluidas, cuando estas son sometidas a temperaturas de  $-196^{\circ}\text{C}$  de congelamiento a  $+600^{\circ}\text{C}$  de calentamiento.

Las temperaturas que se obtienen en el proceso de congelamiento y calentamiento de las inclusiones fluidas son: temperaturas finales de fusión del hielo ( $T_{fh}$ ), las cuales se relacionan con la composición de los fluidos; así como las temperaturas de homogenización ( $T_h$ ), que permiten conocer las temperaturas mínimas de formación de las inclusiones, siempre y por ende, se interpretan como las temperaturas mínimas de formación de un mineral.

#### 3.5.2 Equipo microtermométrico utilizado

El equipo que se utilizó para la medición de inclusiones fluidas de las muestras del área de Todos Santos fue una platina microtermométrica marca Linkam modelo TMS 94 (Figura 39), montada a un microscopio Leitz Labor lux 12, con objetivos de 20X, 10X y 50X. Este microscopio a su vez está conectado a un adaptador para poder transmitir la imagen del microscopio a un Televisor. La platina Linkam está instalada en el Laboratorio de Petrografía en la Universidad de Sonora.



Figura 39. Platina Linkam modelo TMS 94 instalada al microscopio Leitz, foto tomada en el laboratorio de petrografía del Departamento de Geología, UNISON.

Antes de iniciar con el congelamiento y el calentamiento se verificó la calibración de la platina con tres estándares sintéticos a diferentes temperaturas de  $-56.6$ ,  $-21.2$ ,  $-10.5$   $^{\circ}\text{C}$  y  $365$   $^{\circ}\text{C}$ ; en cada medición de estándar se hizo la depuración de la platina, quitando la humedad o suciedad que se queda dentro de ella.

El congelamiento se realiza por la circulación de nitrógeno gas proveniente de un tanque de acero lleno con nitrógeno líquido, que está conectado a una bomba y a un controlador que

congela a una temperatura aproximada de  $-196^{\circ}\text{C}$ . La muestra se encuentra aislada del ambiente dentro de una platina que está colocada sobre el microscopio. Para el calentamiento, la platina alcanza temperaturas de  $+600^{\circ}\text{C}$ . La parte externa de la platina cuenta además con un sistema de enfriamiento del equipo por circulación de agua.

El calentamiento y el congelamiento se hacen por medio de un controlador, ya sea manual o automático, donde se puede variar la velocidad de calentamiento y congelamiento. Las temperaturas más bajas de enfriamiento en este estudio fueron de  $-100^{\circ}\text{C}$  y de calentamiento de  $+350^{\circ}\text{C}$ .

### 3.5.3 Petrografía de las Inclusiones Fluidas.

Se estudiaron las muestras 04-24 y 04-25, anteriormente estudiadas parcialmente por Pérez-Segura (2006) en el mineral de barita (mineral ganga dentro del yacimiento Todos Santos).

Pérez-Segura 2006, reportó en la muestra 04-20 (Figura 40), inclusiones trifásicas con  $\text{H}_2\text{O}$  líquido y  $\text{CO}_2$  en fase líquida y vapor, en este trabajo se encontraron pocas inclusiones de este tipo; pero debido a su tamaño pequeño fue imposible medirlas.



Figura 40. Muestra 04-20 inclusión fluida trifásica acuo-carbonosa  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ , Pérez-Segura (2006).

Tanto en las muestras 04-24 y 04-25, se observaron inclusiones fluidas del tipo II, bifásicas que presentan una fase líquida y una burbuja de vapor; con un grado de relleno estimado de 0.90 a 0.95%; y en otras inclusiones de 0.5% donde el vapor es mayor que la fase líquida. Estas inclusiones son secundarias, la forma de algunas inclusiones son irregulares, alargadas con forma de ganchos, otras son circulares de un tamaño menor a 60  $\mu\text{m}$  esas inclusiones son de  $\text{H}_2\text{O}$ . (Figura 41)

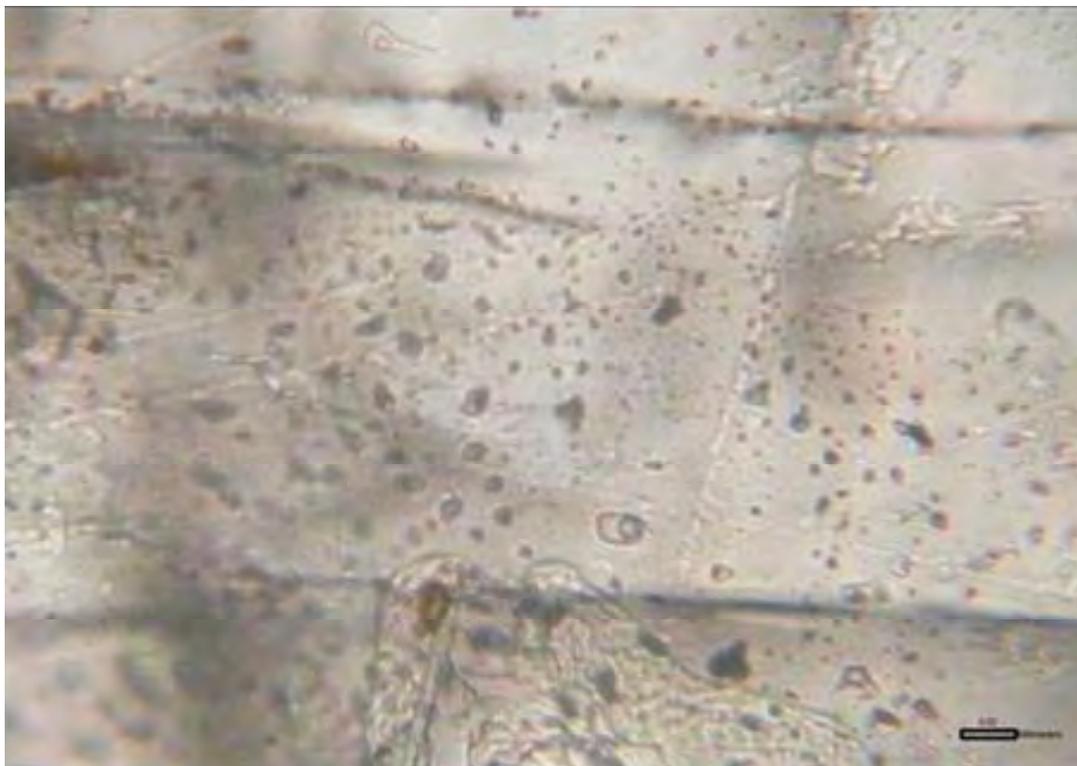


Figura 41. Muestra 04-20, Inclusiones fluidas dentro de barita, el tamaño varía de  $6\mu\text{m}$  a  $25\mu\text{m}$ , la mayoría de estas inclusiones son bifásicas y con  $\text{H}_2\text{O}$ .

### 3.5.4 Resultados microtermométricos

Las mediciones que se obtuvieron fueron temperaturas de homogenización (Th) y temperaturas de fusión del hielo (Tfh), de las mediciones de la 1 a la 19 y la 54 no se pudieron observar las temperaturas de fusión del hielo ya que al congelar las inclusiones el fenómeno no era observable, con la medición de las temperaturas de fusión del hielo, se obtuvieron las salinidades de cada una de las inclusiones y posteriormente se obtuvieron las temperaturas de homogenización que se obtiene cuando al calentar la inclusión de la fase líquida la burbuja desaparece. En la tabla 4 se hace un resumen de los datos obtenidos de las dos muestras estudiadas.

Mediciones	Th (°C)	Tfh (°C)	Sal (wt%)	Mediciones	Th (°C)	Tfh (°C)	Sal (wt%)
1	185	NO	NO	28	265.2	-1.6	2.74
2	185	NO	NO	29	282.8	-1.5	2.57
3	150	NO	NO	30	220.9	-1.5	2.57
4	178	NO	NO	31	259.4	-1.6	2.74
5	178	NO	NO	32	215.8	-1.5	2.57
6	118	NO	NO	33	243.9	-1.6	2.74
7	131	NO	NO	34	223.7	-1.5	2.57
8	146	NO	NO	35	273.4	-1.6	2.74
9	159.2	NO	NO	36	260.3	-1.6	2.74
10	167.9	NO	NO	37	259.9	-1.5	2.57
11	176.8	NO	NO	38	241.8	-2.6	4.34
12	179.7	NO	NO	39	278.8	-2.6	4.34
13	144.8	NO	NO	40	227.9	-2.5	4.18
14	139.5	NO	NO	41	310.5	-2.5	4.18
15	184.4	NO	NO	42	261.7	-2.5	4.18
16	259.8	NO	NO	43	299.0	-2.5	4.18
17	221.7	NO	NO	44	211.6	-2.6	4.34
18	261.3	NO	NO	45	208.7	-2.6	4.34
19	255.5	NO	NO	46	237.2	-2.6	4.34
20	241.9	-1.6	2.74	47	194.6	-4.5	7.17
21	243.2	-1.8	3.06	48	185.6	-4.5	7.17
22	247.8	-1.8	3.06	49	213.3	-4.5	7.17
23	287.7	-5.8	8.95	50	168.9	-2.9	4.80
24	242.6	-1.6	2.74	51	285.6	0.0	0.00
25	234.9	-1.6	2.74	52	256.2	0.0	0.00
26	325.1	-1.0	1.74	53	265.4	-1.2	2.07
27	279.5	-1.5	2.57	54	247.9	NO	NO

Tabla 4. Resumen de los resultados microtermométricos de las mediciones obtenidas de las dos muestras. Th: temperatura de homogenización, Tfh: temperatura de fusión del hielo, Sal: Salinidad wt% NaCl equivalente, NO: no observable.

Las mediciones obtenidas en las inclusiones fluidas acuosas con respecto a las temperaturas de fusión de hielo (T<sub>fh</sub>) se obtuvo que la mayor parte de las inclusiones presentan T<sub>fh</sub> de -1.6 a 4.5°C, lo cual corresponde a una composición del fluido 2.7 a 7.2% de NaCl eq. Los datos son similares a los de Pérez-Segura (2006), aunque éste encuentra valores de T<sub>fh</sub> de -11°C, lo cual equivale a una composición de 15% de NaCl eq.

Con respecto a las temperaturas de homogenización (Th) en las inclusiones fluidas acuosas (Figura 42), las temperaturas obtenidas definen 2 aparentes modas: una de 170-180°C y otra hacia 240°C. Por otra parte, todas las inclusiones bifásicas acuosas medidas por Pérez-Segura (2006), van de 110 a 150°C. Los datos anteriores se pueden interpretar de 2 maneras; una que se puede referir a 2 pulsos de mineralización o bien a un solo pulso en un rango de temperatura muy amplio, en donde pudiera haber insuficiencia de medidas para alcanzar una probable moda hacia 240°C. Pérez-Segura (2006), reporta además inclusiones acuo-carbonosas que homogeneizan entre 300 y 340°C (Figura 43). Estas últimas no fueron observadas en este estudio, pero pudieron corresponder a inclusiones primarias e interpretarse como las temperaturas mínimas de formación de la barita.

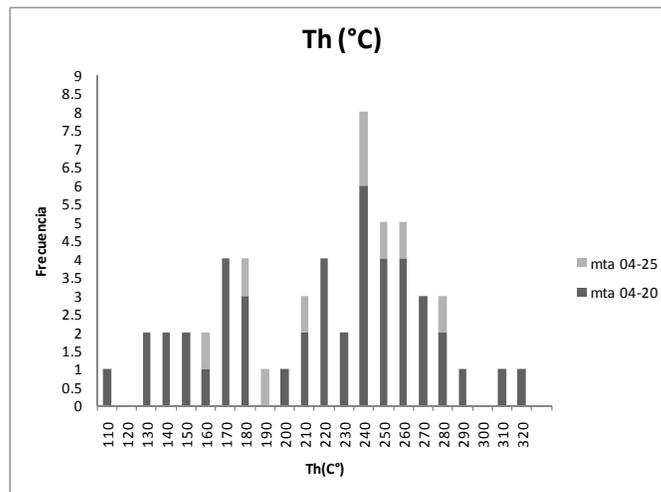


Figura 42. Histograma de temperatura de homogenización (Th) en relación con la frecuencia, para las dos muestras medidas en barita, se observa que el rango para las temperaturas de homogenización va de 130 a 180°C y de 210 a 280°C.

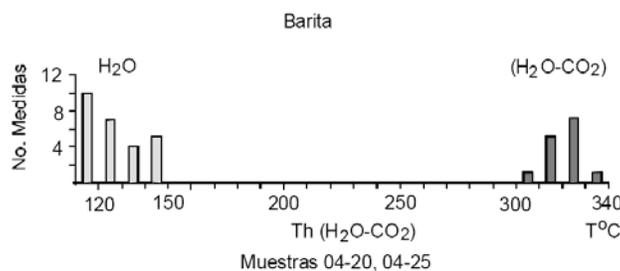


Figura 43. Diagrama que muestra las mediciones efectuadas por Pérez-Segura (2006) en las muestras 04-20 y 04-25, en inclusiones acuosas y acuo-carbonosas.

Por último se obtuvo la grafica entre las temperaturas de homogenización contra las salinidades (Figura 44), donde se observan dos poblaciones, la primer población con un salinidad promedio de 2.5 a 3% de NaCl eq. con un rango de Th comprendido entre 210 a 280°C y otra población con un rango de salinidad entre 4 a 4.5% de NaCl eq. con un campo más amplio de temperatura entre los 205 a 310°C. Cabe mencionar que el rango de las salinidades obtenidas van desde 0 a 9% de NaCl eq.

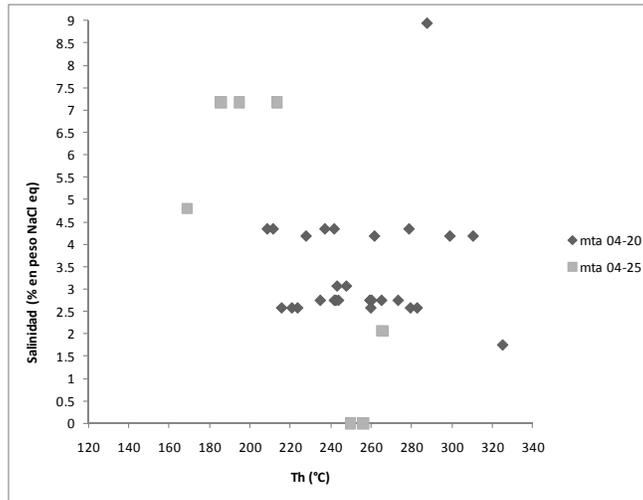


Figura 44. Relación entre la temperatura de homogenización (Th) contra la salinidad (%en peso NaCl eq), se observan dos campos de salinidad, el primero de 2.5 a 3% de NaCl eq., y el segundo de 4 a 4.5% de NaCl eq. indicando salinidades bajas, dentro de las inclusiones medidas.

### 3.6 Isótopos estables

#### 3.6.1 Resultados de análisis isotópicos

Los análisis se realizaron en el laboratorio de geoquímica de la Universidad de Arizona, en Tucson, Az. Las muestras se mandaron a analizar por isótopos de azufre y de oxígeno, pero por problemas con el equipo, solamente se pudieron obtener los análisis de los isótopos de azufre.

La metodología de la toma de muestra para el estudio de isótopos consistió de moler las rocas seleccionadas con martillo, que se pasaron por dos tamices, el primero con número de malla 5 y el segundo con número de malla 25, del material fino se separaron los cristales de galena, esfalerita y barita con ayuda de una lupa 10x.

En este estudio se analizaron, 8 muestras de mineral en total, donde 4 son de galena, 3 de barita y 1 de esfalerita para los isótopos de azufre.

La siguiente tabla resume las muestras utilizadas para el análisis de isótopos estables, agregando también otros datos obtenidos por Pérez-Segura (2006).

Muestras	UTM E	UTM N	Zona	Mineral	<sup>34</sup> S <sub>CDT</sub> ‰	<sup>18</sup> O <sub>SMOW</sub>
TS-02	637008	3222599	Manto III	galena	0.1	
TS-03	637003	3222608		barita	12.9	n/d
				galena	-1.4	
TS-05	637137	3222570	El Puerto	barita	12.7	n/d
TS-22	636818	3222395	Manto I	galena	-4.7	
TS-25	636963	3222549	Manto II	esfalerita	9.2	
				galena	9.3	
TS-33	636574	3224029		barita	12.8	n/d
04-19A	s/c	s/c	Manto II	galena	3.3	
04-20A	637017	3222270		barita	10.0	12.26
04-21A	s/c	s/c		galena	8.5	
04-21B	s/c	s/c		esfalerita	6.6	
04-25A	s/c	s/c	Manto I	galena	-1.9	
04-25B	s/c	s/c		barita	12.0	12.8
s/c= sin coordenada exacta					n/d= no disponible	

Tabla 5. Relación de muestras utilizadas para isótopos estables. Las muestras TS-02 a TS-33 corresponden a este estudio y 04-19A a la 04-25B corresponden al estudio por Pérez-Segura, 2006.

Como se observa en la tabla los rangos comprendidos para <sup>34</sup>S<sub>CDT</sub> ‰ para los sulfuros van desde -4.7 hasta 9.3, siendo predominantes los valores positivos, mientras que los valores en la barita se observan valores de <sup>34</sup>S<sub>CDT</sub> ‰ que varían de 10 a 12.9. Para el <sup>18</sup>O<sub>SMOW</sub> sólo se tienen los mismos datos reportados por Pérez-Segura (2006).

Se utilizó la ecuación  $T(^{\circ}K) = \sqrt[2]{\left(\frac{0.73 \times 10^6}{\Delta_{esf} - \Delta_{gal}}\right)}$  Ohmoto y Rye (1979), para hacer el cálculo de la temperatura.

Con la muestra TS-25 se obtuvo un par mineral de esfalerita-galena, pero al evaluar los datos con la ecuación de Ohmoto y Rye (1979), el valor resultó *E*.

Al seguir evaluando esta fórmula en los diferentes pares de esfalerita-galena, se obtuvieron rangos de temperatura con valores; -16,-18, - 43 °C y otros valores de 10, 20, 29, 78 y 748 °C: El único valor que se acercó a los calculados con las inclusiones fluidas es de 197 °C con las muestras 04-19 A y 04-21 B.

Y con respecto a los datos calculados por Pérez-Segura (2006) se tiene una temperatura máxima de 211°C y una temperatura mínima de 118°C con el par isotópico esfalerita-galena de la muestra 04-21.

Los isótopos de Oxígeno se iban a utilizar para calcular la temperatura a la cual circuló el agua durante el tiempo de depositación mineral, pero al no tener los datos disponibles, se ocupó el valor calculado por Pérez-Segura (2006); donde obtuvo como resultado una agua en equilibrio que se aproxima a una fuente magmática con un valor de  $\delta^{18}O_{H_2O} = 6.95$ .

La figura 45, representa el valor del dato isotópico del O, calculado por Pérez-Segura (2006) y utilizado para este estudio.

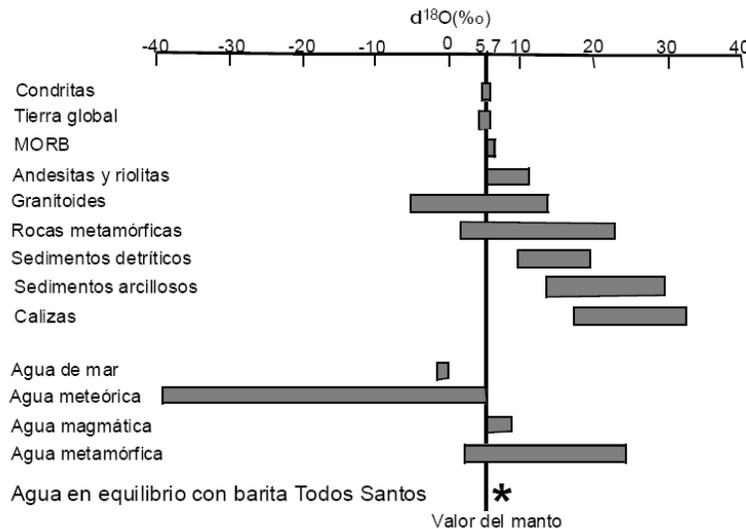


Figura 45. Datos isotópicos del O para los diferentes tipos de aguas y reservorios naturales. El asterisco (\*) muestra la ubicación del dato isotópico de O calculado por Pérez-Segura (2006), para la asignación minera Todos Santos.

### 3.7 Discusión de resultados

Con los resultados obtenidos se discute lo siguiente:

Desde el punto de vista estructural se reconoce un contacto tectónico por cabalgamiento entre la plataforma paleozoica y las andesitas del Cretácico Superior. Esta sería una de las pocas zonas en Sonora donde existen evidencias de una orogenia durante el Cretácico Superior. En este caso el accidente tectónico es de singular importancia porque la mineralización que nos ocupa se encuentra dentro de las rocas carbonatadas paleozoicas pero inmediatamente arriba del contacto.

En lo referente a la estructura de la mineralización, esta se ubica como mantos de reemplazamiento en horizontes, bandas y parches, que incluyen sulfuros de Pb y Zn en una ganga con barita predominante. Los horizontes mineralizados son acompañados por una alteración hidrotermal consistente en silicificación.

En cuanto a los fluidos que originaron los depósitos cabe mencionar que la composición de los mismos en una primera etapa se refiere a proporciones importantes de CO<sub>2</sub>, mientras que en una etapa tardía los fluidos son diluidos y solo predomina el agua. Las temperaturas van en los rangos hidrotermales, a menos de 360°C en una primera etapa, hasta temperaturas tan bajas como 110°C para una etapa tardía. Es decir, no obstante las evidencias hidrotermales, la temperatura no alcanza a formar minerales de metamorfismo como granates y piroxenos, por lo que se supone la existencia de una fuente de calor magmático distal, como lo demuestran las características isotópicas del agua en equilibrio con barita. La existencia de CO<sub>2</sub> solo es convencional en yacimientos de oro orogénico y yacimientos tipo Valle de Mississippi (Wilson, 2001).

En nuestras investigaciones se ha encontrado en la literatura dos yacimientos de reemplazamiento de tipo Manto, que reportan inclusiones acuo-carbonosas, el primero es el yacimiento de Midway en British Columbia, Canadá, donde tienen temperaturas de homogenización de 267°C a 340°C, y evidencian la coexistencia de H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub>, donde sugiere Bradford, 1988 (Nelson 1991) esto representa las temperaturas durante la mineralización, reportando también inclusiones acuosas con temperaturas de homogenización de 120 a 176°C.

Otro yacimiento es el de Deer Trail, en la parte centro-oeste de Utah, en el que se tienen inclusiones fluidas con CO<sub>2</sub> encontradas en esfalerita, lo que indica que este CO<sub>2</sub> varía en abundancia y probablemente se formó por la disolución de la caliza local durante el depósito de mineral (Beatty, *et al.*, 1986). El rango de temperatura de homogenización es de 250 a 300°C, con salinidades de 17 a 22% de NaCl eq.

Entonces se puede decir que la presencia del CO<sub>2</sub> puede corresponder a la disolución de las calizas, durante el pasaje de los fluidos calientes por las rocas carbonatadas, canalizadas a través del contacto entre calizas y andesitas.

La Figura 46, representa de manera hipotética el lugar donde se ubicaría el yacimiento Todos Santos dentro de un diagrama de temperaturas de homogenización de inclusiones fluidas contra valores de plata. La mayoría de estos yacimientos son de tipo Manto como Deer Trail, Gilman, Providencia, Ledville.

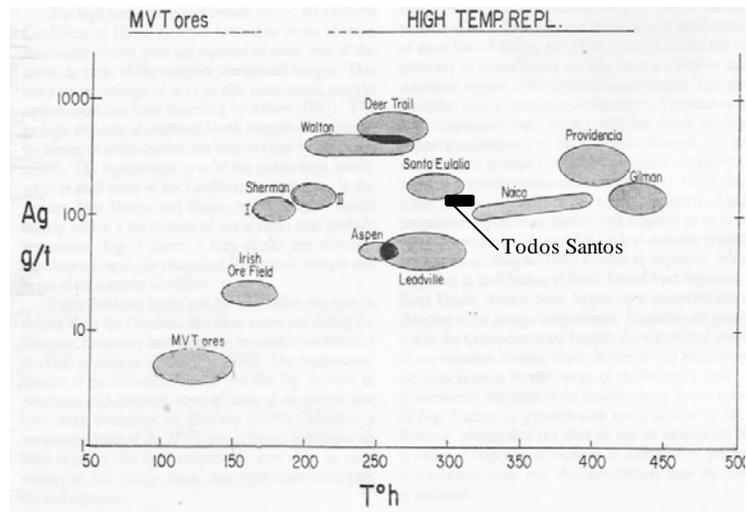


Figura 46. Diagrama donde se representan los rangos de temperaturas de homogenización ( $T^{\circ}h$ ) contra los valores de plata [Ag (g/t)] para varios yacimientos. (Tittley, 1996). El rectángulo en negro es donde se ubica de manera hipotética el yacimiento Todos Santos con un rango de temperatura entre los 310 a 330°C (Pérez-Segura, 2006), con un valor alrededor de los 100 a 200 g/t de plata.

El yacimiento Todos Santos se ha clasificado como un yacimiento de remplazamiento por Fernández en 1984, pero de manera más técnica y como se encuentra actualmente en la literatura inglesa; como “*high-temperature carbonate-replacement deposit*” (CRD) (Megaw, *et al.*, 1988, Megaw, 1999), aunque también se puede encontrar como “*polymetallic carbonates-replacement deposit*” (Hammarstrom, 2002), este nombre se debe a su alto contenido metálico de sulfuros.

Este tipo de yacimientos se caracterizan; porque se encuentran hospedados o remplazando a rocas sedimentarias (calizas, dolomías, mármol, areniscas y/o esquistos) siempre y cuando sean ricas en carbonato de calcio, la forma en la que pueden existir estos yacimientos son: lentes masivos, (mantos), chimeneas o vetas de hierro, plomo, zinc y cobre, que constan con más del 50% de minerales de sulfuros Pb-Zn-Ag-Cu-Au, (Hammarstrom, 2002).

Estos yacimientos sugieren una conexión con intrusiones ígneas como batolitos, diques, sills o con una fuente de fluidos (Nelson, 1991), aunque también implica una asociación genética con yacimientos tipo skarn (Figura 47). Pero cabe resaltar que el yacimiento Todos Santos no puede considerarse como un yacimiento skarn debido a que no presenta minerales calco-silicatados (calcio-hierro-magnesio-manganeso-aluminio) a excepción de minerales silíceos (cuarzo, calcedonia y jaseroide) (Kwak, 1994). Aunque ambos están relacionados genéticamente por magmas que se introducen dentro de rocas sedimentarias, y que se forman por la reacción de fluidos hidrotermales mayores de 250°C, donde estos fluidos pueden llevar de bajas a altas salinidades y muchas contienen  $CO_2$  así como otros componentes gaseosos.

En este tipo de yacimientos la forma es importante ya que implica la conexión genética con un cuerpo intrusivo.

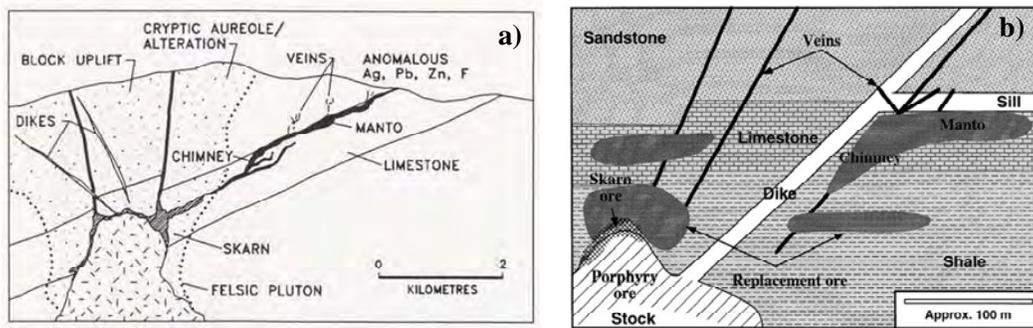


Figura 47. a) Modelo generalizado Tipo Manto (Nelson, 1991) b) Modelo generalizado para yacimientos de alta temperatura relacionados con intrusiones ígneas (Hammarstrom, 2002).

El valor resultante del cálculo isotópico del agua en equilibrio en barita, se aproxima a un agua en equilibrio con una fuente magmática, este valor se puede asociar con el Batolito de Bacanora que se encuentra aproximadamente a unos 5 km del yacimiento Todos Santos. (Figura 48)

En el yacimiento Todos Santos, el control litológico, está muy bien representado, porque la mineralización sigue los planos de estratificación de las calizas paleozoicas, y en cuanto al control tectónico el factor que influye en esta zona está representado por la discordancia entre el contacto por cabalgamiento entre las rocas paleozoicas y de la Formación Tarahumara, que ha servido como medio para que se canalicen los fluidos mineralizantes.

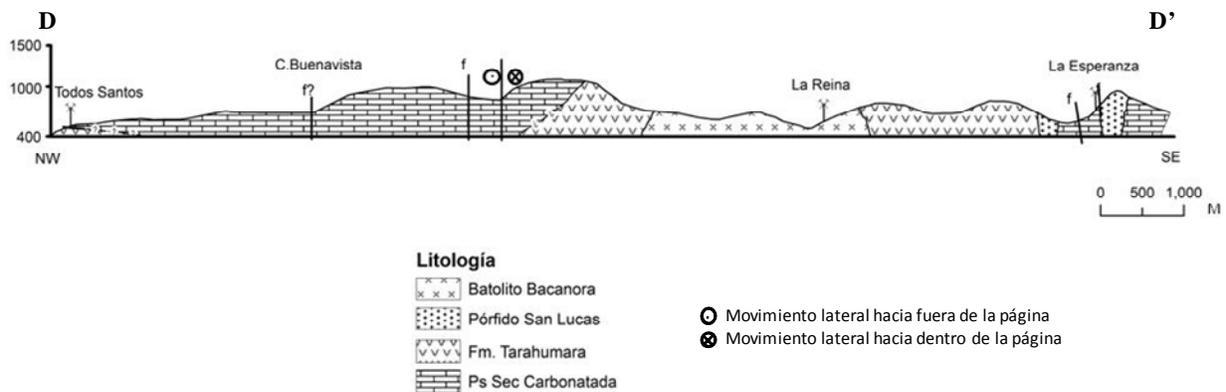


Figura 48. La Sección D-D' (ver Figura 4, Mapa geológico generalizado) sugiere que los fluidos mineralizantes que circularon por el contacto tectónico entre las calizas y andesitas, originaron el yacimiento minero Todos Santos.

## 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El yacimiento Todos Santos, es un yacimiento de moderada temperatura que se hospeda y reemplaza a las rocas carbonatadas del Paleozoico Superior, de tipo Manto y distal de la fuente.
- La mineralización está controlada, desde el punto de vista estructural, por un contacto tectónico cabalgante entre calizas del Paleozoico Superior y andesitas del Cretácico Superior-Terciario inferior.
- En cuanto a los yacimientos existentes se puede decir que, existen dos cuerpos, el primero en la zona de mantos I, II y III corresponde a un mismo cuerpo en forma de Manto tabular y angosto, que tiene una orientación NE-SW y el otro cuerpo irregular nombrado El Puerto, que también presenta una forma tabular, con una orientación NW-SE.
- La mineralización es de Pb-Zn-Ag barita, en forma de horizontes de reemplazamiento y relleno de cavidades. Los minerales presentes son galena, esfalerita, menor calcopirita y tetrahedrita rica en plata; la ganga es de barita y sílice. La alteración hidrotermal presente consiste en silicificación. La secuencia paragenética indica que los sulfuros son levemente posteriores a la barita.
- Los resultados de inclusiones fluidas indican dos etapas: una representada por inclusiones acuo-carbonosas H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> que indican un fluido con composiciones importantes de CO<sub>2</sub> que circulo a temperaturas entre 310-330°C y otro tardío representado por inclusiones predominantemente acuosas y una composición probablemente salina, el cual circulo a temperaturas entre 110-290°C, estos últimos se pudieran considerar como fluidos tardíos que interactuaron con aguas meteóricas.
- Algunos resultados de isótopos estables permiten calcular temperaturas congruentes con las medidas en las inclusiones fluidas, aunque algunos datos evidencian desequilibrio puesto que hay temperaturas incongruentes. Los resultados isotópicos de oxígeno indican un origen magmático para los fluidos en equilibrio con barita.
- El origen de este yacimiento se debe a fluidos magmáticos relacionados con el Batolito Bacanora, pero seguramente distales, puesto que no afloran cuerpos intrusivos en las inmediaciones del yacimiento, ni tampoco minerales de tipo skarn.
- En cuanto a la edad del yacimiento considerando que se debe de correlacionar con las edades de las intrusiones de rocas intrusivas en el área, hacia 89-90 Ma. Dichas rocas intrusionan las rocas carbonatadas del Paleozoico tardío, así como con las andesitas cretácicas (Pérez-Segura, 2010)

Como recomendaciones se pueden proponer, entre otras:

- Realizar un trabajo estructural a detalle y en área más extensa, para determinar el estilo de movimientos que estuvieron involucrados en el desplazamiento de las rocas paleozoicas sobre las rocas andesitas y tratar de determinar la edad del mismo.
- Efectuar exploración utilizando el concepto del contacto tectónico entre las calizas paleozoicas y las andesitas mesozoicas.
- Con respecto a los resultados de inclusiones fluidas, tomar mejores muestras de cristales de esfalerita (de color ámbar y tratar de encontrar con CO<sub>2</sub>) para tomar medias de temperaturas de homogenización y relacionarlas con las temperaturas de homogenización de la barita, ya que si estas temperaturas coinciden, se tendría mejor controlado la temperatura de formación del yacimiento.

## 5 BIBLIOGRAFÍA

- Beaty, D.W., Cunningham, C.G., Rye, R.O., Steven, T.A., Gonzalez-Urien, E., 1986, Geology and Geochemistry of the Deer Trail Pb-Zn-Ag-Au-Cu Manto Deposits, Marysvale District, West-Central Utah. *Economic Geology*, vol.81, p. 1932-1952.
- Calmus, T., Amaya-Martínez, R., Roldán-Quintana, J., 2010, La Orogenia Laramide del SW de Norte América: Análisis de la deformación, magmatismo y metalogénesis. Libro-Guía de la excursión 4-5 Marzo 2010. Universidad Nacional Autónoma de México, Estación Regional del Noroeste, Instituto de Geología-Departamento de Geología Universidad de Sonora. P 1-4, 15-17.
- Consejo de Recursos Minerales, 1996, Carta Geológica Minera Santa Teresa H12D45, escala 1:50,000: Pachuca, Hidalgo, Consejo de Recursos Minerales, 1 hoja con resumen.
- Consejo de Recursos Minerales, 1996, Carta Aero-magética Santa Teresa H12D45, escala 1:50,000: Pachuca, Hidalgo, Consejo de Recursos Minerales, 1 hoja con resumen.
- Dimitrova, D., Kerestedjian, T., Petrova, M., Ilieev, T., 2007, Compositional variations in the tetrahedrite-tennantite fahlores and polybasite-pearceite series from the Chiprovtsi Ag-Pb deposit, northwestern, Bulgaria. *Geological Survey of Finland, Guide53*, p. 39-44.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 1997, Fotografías aéreas escala 1:75,000, zona H12-9, Línea 70.
- Hammarstrom, J.M., 2002, Environmental geochemistry of skarn and polymetallic carbonate-replacement deposit models, *in* Seal, R.R., II, and Foley, N.K., eds., *Geoenvironmental Models of Mineral Deposits: U.S Geological Survey Open-File Report 02-195*, p. 115-142.
- Kwak, T.A.P., 1994, Hydrothermal alteration in Carbonate-Replacement deposits; Ore Skarns and Distal equivalents, *in* Lentz, D.R., ed., *Alteration and Process associated with Ore-Forming Systems: Geological Association of Canada, Short Course Notes*, v. 11, p. 381-402.
- McDowell, F.W., Roldán-Quintana, J., Amaya-Martinez, R., 1997, Interrelationship of sedimentary and volcanic deposits associated with Tertiary extensión in Sonora, México. *Geological Society American Bulletin*, v.109, no.10, p. 1349-1360.
- McDowell, F.W., Roldán-Quintana, J., Connelly, J.N., 2001, Duration of Late Cretaceous-early Tertiary magmatism in east-central Sonora, Mexico. *Geological Society American Bulletin*, v.113; no. 4, p. 521-531.
- Megaw, P.K.M., 1999, The high-temperature, Ag-Pb-Zn-(Cu) carbonate-replacement deposits of Central México. *VMS and Carbonate-hosted polymetallic deposits of Central-México. British Columbia and Yukon Chamber of Mines Cordilleran Roundup. Special Volume*, p. 25-44.

- Megaw, P.K.M., Ruiz, J., Titley, S., 1988, High-Temperature, Carbonate-Hosted Ag-Pb-Zn (Cu) Deposits of Northern Mexico. *Economic Geology*. Vol. 83, p.1856-1885.
- Murillo, M.G. 2004, Apuntes de Petrología y diagénesis de las rocas sedimentarias carbonatadas. 290 p. IPN-ESIA Ticomán.
- Nelson, J.L., 1991, Carbonate-Hosted Lead-Zinc (+/- Silver, Gold) Deposits of British Columbia. Ore deposits, Tectonics and Metallogeny in the Canadian Cordillera. Geological Survey Branch, Paper 1991-4. Mineral Resources Division, p. 71-88.
- Pérez-Segura, E., 2006, Estudio Metalogenético de los yacimientos Ni-Co (Cu-Zn) de la Esperanza, Sonora Central: Caracterización de los depósitos y relaciones con el magmatismo laramídico. Querétaro, México, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis doctoral, 214 p.
- Pérez-Segura, E., González-Partida, E., Valencia, V.A., 2009, Late Cretaceous adakite magmatism in east-central Sonora, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Universidad Nacional Autónoma de México, v.26, núm. 2, p. 411-427.
- Pérez-Segura, E., Gallardo-Romero, R., Valencia-Gómez, V.A., Padberg, M., 2004, La Esperanza: una nueva mineralización con Ni-Co en Sonora, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v.21, núm. 2, p. 260-267.
- Pérez-Segura, E. y González-Partida, E., 2010, Mineralogía de skarn y fluidos asociados a los yacimientos de Cu-Zn-Ni-Co de La Esperanza, Sonora, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Universidad Nacional Autónoma de México, v.27, núm. 1, p.1-17.
- Poole, F.G., Gehrels, G.E., Stewart, J.H., 2008, Significance of detrital zircons in Upper Devonian ocean-basin strata of the Sonora allochthon and Lower Permian synorogenic strata of the Mina México foredeep, central Sonora, México. *Geological Society of America Special Paper* 442, p. 121-131.
- Plumlee, G.S., Montour, M., Taylor, C.D., Wallace, A.R., Klein, D.P., 1995, Polymetallic vein and replacement deposits, *in* du Bray, E.A., ed., 1995, Preliminary compilation of descriptive geoenvironmental mineral deposit models: U.S. Geological Survey Open-File Report p. 95-831, <http://greenwood.cr.usgs.gov/pub/open-file-reports/ofr-95-0831/>
- Reyes-Salazar. A., 1997, Estudio geofísico con los métodos de Polarización Inducida y Resistividad en la Asignación Minera Todos Santos, Mpio. San Pedro de la Cueva, Son. Consejo de Recursos Minerales. Subdirección de Exploración. Gerencia de Exploración Geofísica. Pachuca, Hidalgo. 15 p.
- Sack, R.O., Loucks, R.R., 1985, Thermodynamic properties of tetrahedrite-tennantites: constraints on the interdependence of the Ag $\leftrightarrow$ Cu, Fe $\leftrightarrow$ Zn, Cu $\leftrightarrow$ Fe, and As $\leftrightarrow$ Sb exchange reactions. *American Mineralogist*, Vol. 70, p. 1270-1289.
- Stewart, H.J., Poole, F.G., Harris, A.G., Repetski, J. E., Wardlaw, B.R., Morales-Ramírez, J., 1999, Neoproterozoic (?) to Pennsylvanian inner-shelf, miogeoclinal strata in Sierra Agua

Verde, Sonora, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Universidad Autónoma de México, Vol. 16, no 1. p. 35-62.

Terán-Moreno. G., 1985, Reporte de la visita al fondo minero “Candelaria de Suaqui”, Mpio. de San Pedro de la Cueva, Sonora. Consejo de Recursos Minerales. Residencia Sonora. 6 p.

Titley, S.R., 1996, Characteristics of high temperature, Carbonated-Hosted replacement ores and some comparisons with Mississippi Valley-Type ores. Society of Economic Geologists, Special Publication, No. 4, p. 244-254.

Vázquez-Mendoza, R., 1997, Informe de la exploración geológico-minera realizada en la Asignación Minera Todos Santos, Mpio. de San Pedro de la Cueva, Sonora. Consejo de Recurso Minerales. Gerencia de evaluación de proyectos, Oficina regional Hermosillo. 50 p.

Vega-Granillo, R., Araux-Sánchez, .E., 1985, Estudio geológico de la Sierra La Campaneria y sus yacimientos minerales. Bol. Depto. Geología. Universidad de Sonora, vol.2, no. 1 y 2, p.74-84.

## **ANEXOS**

**Anexo I**  
**Tabla de muestras, coordinadas y descripciones de mano.**

ANEXO I														
MUESTRA	UTM_E	UTM_N	UTM_Zona	ZONA	OBRA MINERA	MUESTREO	CONDICION	DESCRIPCIÓN MUESTRA DE MANO	LAMINAS PETROGRAFÍA	LAMINAS MINERAGRAFÍA	INCLUSIONES FLUIDAS	ISOTOPOS	Microscopio Electrónico Barrido	Fotos Anexo II
TS_01	637008	3222599	12N					Caliza silicificada, con vetillas rellenas de calcita, mineralización de esferalerita, óxidos de cobre diseminados, óxidos de hierro y manganeso.						
TS_02	637008	3222599	12N	Manto III	El Echadero	Pared mina	Alterada	Caliza silicificada, mineralización con galena, esferalerita, vetillas rellenas de calcita, también se encuentra pirita en fracturas, diseminada y oxidación de la misma, esferalerita, junto con la galena. Presenta una textura brechada.	X	X		X		X
TS_03	637003	3222608	12N					Caliza silicificada, vetas de barita y cuarzo con mineralización galena, esferalerita.	X	X		X		X
TS_04	637137	3222570	12N		La Chica			Cristales de barita dentro de una matriz de óxidos de hierro (hematita, limonita, goethita?) denominados como reventones de barita						
TS_05	637137	3222570	12N	El Ruerto	La Chica		Alterada	Cristales de barita dentro de una matriz de óxidos de hierro (hematita, limonita, goethita?) denominados como reventones de barita	X			X		X
TS_06	637036	3223003	12N	Contacto And-Cz			Alterada	Textura porfídica, con fragmentos lílicos con una matriz roja, a simple vista plagioclasa y anfíboles alterados a clorita	X					X
TS_07	637043	3223006	12N					Disolución de caliza	X					X
TS_08	637217	3223015	12N					Textura porfídica, con fragmentos lílicos visibles con anfíboles alterados en una matriz roja oxidada.						
TS_09	637185	3223126	12N	Carrizo			Alterada	Textura brechada con una matriz roja por oxidación, efervesce con el HCl cementante calcita						
TS_10	636760	3223628	12N				Alterada	Textura brechada con una matriz roja por oxidación, efervesce con el HCl, cementante calcita, se observan feldespatos.						
TS_11	636621	3224069	12N	Parte N del Rancho Todos Santos			Alterada	Se observa una textura porfídica en una matriz microcristalina con anfíboles clorizados	X					X
TS_12	636638	3224051	12N					Se observa una textura afanítica, microcristalina						
TS_13	636692	3224065	12N				Alterada	algunos cristales de epidota, se tiene un fracturamiento con rumbo N64-E47 SE						
TS_14	636692	3224065	12N					Al parecer una Riolita se observan ojos de cuarzo en una matriz afanítica, no se encontró en esta zona otra muestra igual a esta						
TS_15	636692	3224065	12N											
TS_16	636607	3223914	12N	Carrizo			Alterada							
TS_17	636815	3222466	12N		Cerca de El Pilar			Se observa textura brechada, con fragmentos lílicos, clorizados, matriz oxidada, efervesce con HCl, cementante calcita	X					X
TS_18	636815	3222466	12N					Caliza silicificada, vetillas de calcita, mineralización galena, esferalerita, oxidación						
TS_19	636815	3222466	12N					Se observa oxidación y vetillas de calcita						
TS_20	636818	3222395	12N	Manto I		Pared mina	Alterada	Se observa una textura brechada, altamente silicificada con mineralización galena, esferalerita y oxidación (hematita, limonita)						
TS_21	636818	3222395	12N		El Murciélag			Caliza silicificada con fracturas rellenas con óxidos de hierro, (hematita) se observa pirita en estas fractura y en otras galena	X			X		X
TS_22	636818	3222395	12N											
TS_23	636818	3222395	12N											
TS_24	636963	3222549	12N					Caliza silicificada, se observa mineralización rellenado espacios con galena y pirita diseminada		24, 24-A y 24-B				X
TS_25	636963	3222549	12N				Mineralización	Se observa una textura brechada, barita, mineralización con galena, esferalerita y oxidación en la superficie		X		X		X
TS_26	636963	3222549	12N	Manto II	Tiro Principal	Terreros	Alterada	Se observa una textura tipo cobra, mineralización de galena, esferalerita, en la superficie se observa oxidación	X	X				X
TS_27	636963	3222549	12N				Alterada	Caliza silicificada con vetillas de calcita y cuarzo, se observa piritas en las fracturas y oxidación de las mismas	X					X
TS_28	636963	3222549	12N				Mineralización	Se observa mineralización por galena, esferalerita, con cristales de barita, cuarzo, en la parte superficial se tiene oxidación	X	X			X	X

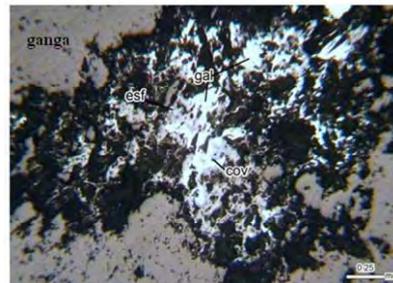
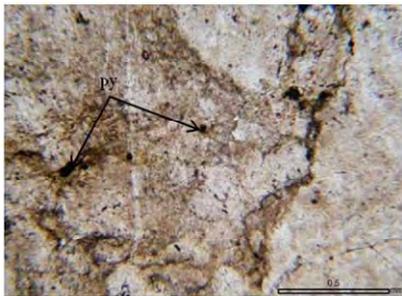
CONTINUACION ANEXO I

MUESTRA	UTM_E	UTM_N	UTM_Zona	ZONA	OBRA MINERA	MUESTREO	CONDICION	DESCRIPCION MUESTRA DE MANO	LAMINAS PETROGRAFIA	LAMINAS MINERAGRAFIA	INCLUSIONES FLUIDAS	ISOTOFOS	Difracción RX	Fotos Anexo II
TS_29	636663	3224089	12N	Parte N del Rancho Todos Santos		Dique?	Aterada	Dique color interperismo crema, color fresco gris claro, textura microcristalina, se observan anfíboles clorizados, feldespatos, argilitada, orientado E90-W	X					X
TS_30	636633	3224087	12N				Aterada	Roca volcánica, color de interperismo verde, color interno gris textura porfídica microcristalina, se observan feldespatos y plagioclasas						
TS_31	636633	3224087	12N	Parte N del Rancho Todos Santos			Aterada	Roca volcánica color intemp crema-blanco, color fresco gris claro. Textura porfídica, se observan plagioclasas y feldespatos, con vetillas de óxidos de hierro, argilitados	X					X
TS_32	636633	3224087	12N				Aterada	Roca intrusiva dique textura porfídica, anfíboles, plagioclasas, alteración color crema argilitados, color interno purpura, con óxidos de hierro	X					X
TS_33	636574	3224029	12N		Barita			Barita, con hematita, gohrita y fluorita? y calcita, actulera? Qtz manganeso				X		
TS_34	637255	3222850	12N	Camino			Aterada	Se observa brechada con feldespatos argilitados y anfíboles clorizados, volcánica	X					X
TS_35	636976	3222743	12N	Cerca del Rancho TS			Aterada	Roca volcánica cristales anfíbol color intemp crema, color interno gris claro	X					X
TS_36	636600	3223046	12N	NE Rancho TS			Aterada	Roca volcánica se observa brechada con alteración argílica y óxidos de Fe como cementante y matriz						
TS_37	635586	3223103	12N	Andesitas				Roca volcánica color interperismo crema-amarillo, color interno purpura con lioclastos, argilitada						
TS_38	635549	3223038	12N	Andesitas			Aterada	Roca volcánica color purpura, microcristalina plagioclasas, alteración argílica y vetillas de óxidos de hierro	X					X
TS_39	635526	3223120	12N	Contacto And-Aragonito				Cristales de Aragonito						
04-20	637017	3222270	12N	Manto II				barita (recolectada por Pérez-Segura 2006)						X
04-25	s/c	s/c	12N	Manto I				barita (recolectada por Pérez-Segura 2006)						X

## Anexo II

### Descripciones petrográficas.

**Muestra: TS-02 Zona: Manto III**



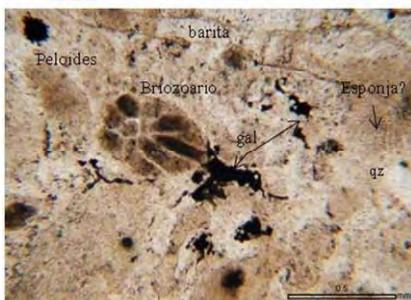
#### DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA

Caliza altamente silicificada y brechada, no se observan fósiles, pirita (py) diseminada, así como en fracturas, con oxidación de la misma pirita.

#### DESCRIPCIÓN MINERAGRÁFICA

Se observa que dentro de la ganga en este caso sílice, se introduce galena (gal), y dentro de la galena se tiene esfalerita (esf) fina, así como trazas de covelita (cov), producto de la alteración de la calcopirita.

**Muestra: TS-03 Zona: Manto III**



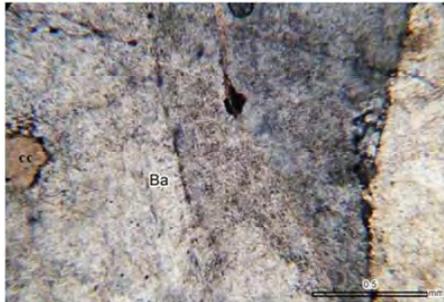
#### DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA

Caliza altamente silicificada con fragmentos de fantasmas de fósiles, briozoarios, esponjas?, peloides, con relleno de vetas de barita, cuarzo (qz) en algunas partes de la matriz. De acuerdo a la clasificación de Dunham (1962) es un Packstone.

#### DESCRIPCIÓN MINERAGRÁFICA

La ganga está representada por barita, calcita y sílice, la galena (gal) se introduce dentro de esta ganga, se tienen trazas de covelita (cov) producto de la alteración de la calcopirita.

**Muestra: TS-05** Zona: El Puerto



**DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA**

Cristales de barita (Ba) tabular, con una matriz de óxidos de hierro y calcita (cc).

**Muestra: TS-06** Zona: Contacto andesitas entre calizas.



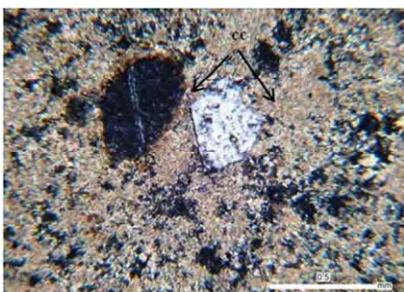
Muestra de mano cv=10cm



**DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA**

Brecha volcánica andesítica con fragmentos líticos, cementados en una matriz roja de óxidos de hierro y calcita (cc), dentro de los fragmentos líticos se tienen anfíboles (hornblenda) que están soportados por una matriz con feldespatos alcalinos (fld) y plagioclasa (plg).

**Muestra: TS-07** Zona: contacto entre andesita y caliza.

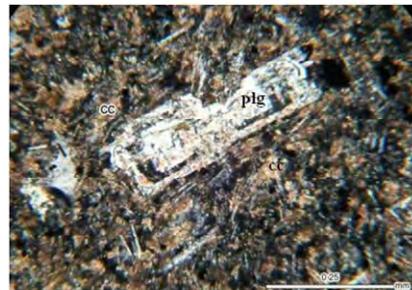


**DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA**

Caliza recristalizada posible travertino con fragmentos de la Brecha volcánica andesítica que se encuentran rodeados de calcita.

Esta roca se encuentra en contacto por encima de la brecha volcánica andesítica.

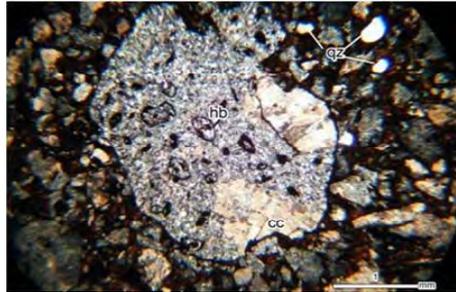
**Muestra: TS-12b** Zona: Andesitas



**DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA**

Textura porfídica, cristales de plagioclasa (plg) dentro de una matriz microlítica compuesta por plagioclasas (andesinas) y feldespatos alcalinos, cementado con calcita (cc) y óxidos de hierro así como minerales opacos diseminados posible piritita. La alteración que se observa en los anfíboles es cloritización.

**Muestra: TS-17b Zona: Manto I**



**DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA**

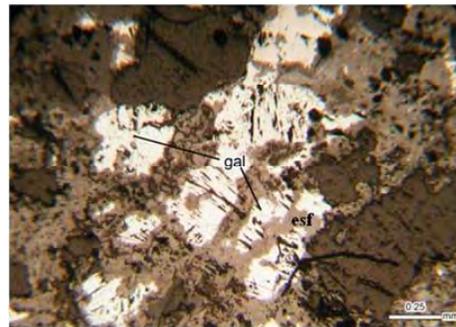
Textura brechada, fragmentos líticos de rocas volcánicas dentro de estos fragmentos se encuentran relictos de anfíboles (hornblenda, hb), en una matriz de plagioclasas y feldespatos alcalinos, y algunos cristales de calcita (cc). Estos fragmentos líticos están soportados en una matriz de óxidos de hierro y calcita, también se observan minerales minerales isotrópicos de óxidos de hierro y fragmentos de cuarzo (qz) redondeados, la alteración común en los anfíboles es cloritización.

**Muestra: TS-22 Zona: Manto I. Obra Minera El Murciélago**



**DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA**

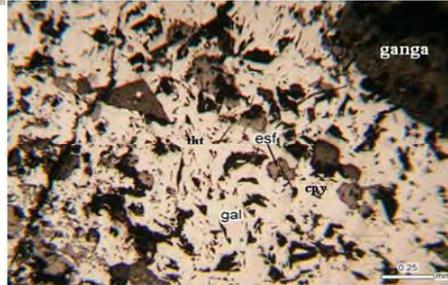
Caliza altamente silicificada con fantasmas de fósiles por ejemplo: espícula de equinodermo, esponjas?, peloides, las fracturas están rellenas de galena, pero algunas de ellas están oxidadas y otras están rellenas con sílice.



**DESCRIPCIÓN MINERAGRÁFICA**

La ganga está conformada por cuarzo, en esta fotomicrografía, se observa como la galena (gal) se mete entre la ganga, coexistiendo con esfalerita, la pirita se encuentra diseminada y muy fina, como en un 2% en toda la muestra, las fracturas están rellenas por óxidos de hierro (hematita).

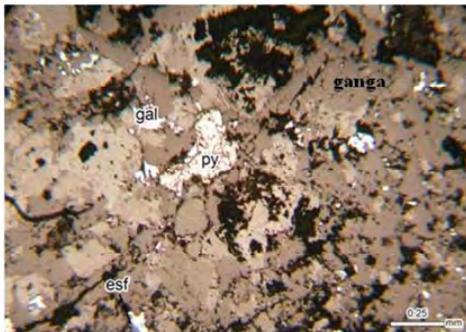
Muestra: TS-24 Zona: Manto II. Obra minera: Tiro Principal/terrosos



**DESCRIPCIÓN MINERAGRÁFICA**

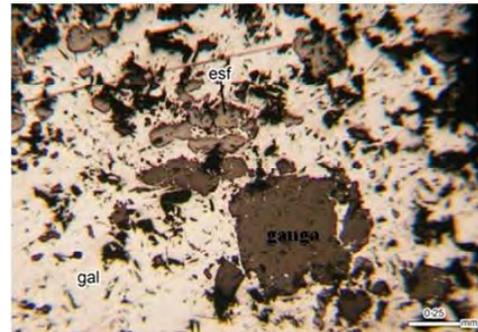
La ganga está representada por sílice, la galena (gal) se introduce dentro de esta ganga, dentro de esta galena hay esfalerita (esf), dentro de la esfalerita calcopirita y trazas de covelita, también se observa dentro de la galena tetrahedrita fina (tht), aproximadamente un 2% en toda la muestra. La covelita y no se observa en esta fotomicrografía, pero en otras áreas de la sección pulida si se observa.

Continuación muestra TS-24



**DESCRIPCIÓN MINERAGRÁFICA**

La ganga está representada por sílice, calcita y barita, la galena (gal) se mete entre la ganga, junto con la galena se tiene esfalerita(esf) y dentro de la esfalerita se observan inclusiones de calcopirita, no se observa en esta fotomicrografía pero esta presente en la muestra. La pirita se encuentra diseminada .



**DESCRIPCIÓN MINERAGRÁFICA**

La galena se mete entre la ganga, la esfalerita (esf) presenta texturas de reemplazo por calcopirita, se alcanza a observar deformación en la galena.

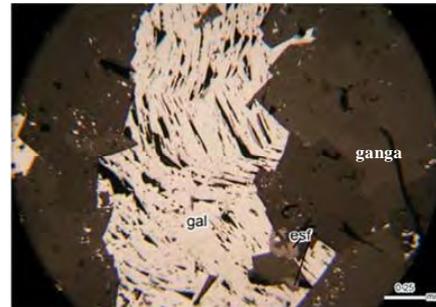
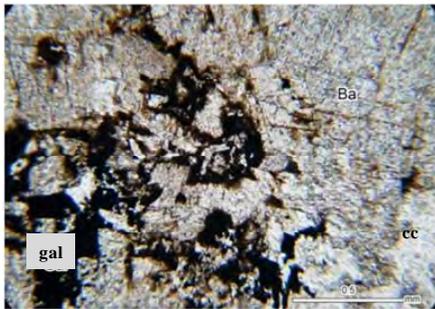
**Muestra: TS-25** Zona: Manto II. Obra minera: Tiro Principal/Terreros.



**DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA**

Como se ha observado en las anteriores muestras con minerografía la ganga está representada por barita, cuarzo, en esta muestra no se observa calcita, la galena (gal) se introduce dentro de esta ganga, en esta muestra si se puede observar pirita (py) diseminada como en un 2%, en esta muestra también se observa textura de reemplazo en la esfalerita por calcopirita.

**Muestra: TS-26** Zona: Manto II. Obra minera: Tiro Principal/Terreros.



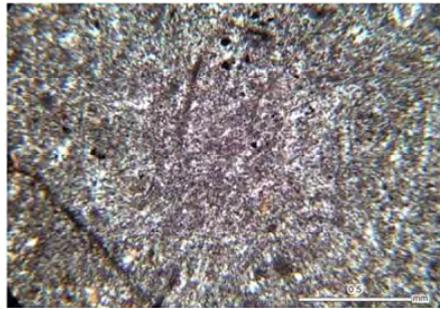
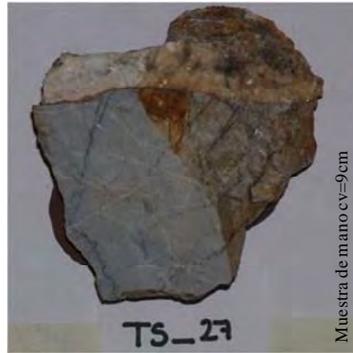
**DESCRIPCIÓN MINERAGRÁFICA**

La galena introduciéndose dentro de la ganga (barita, calcita); en este caso la galena se observa deformada, se tiene pirita diseminada en un 2%, así como reemplazamiento en la esfalerita por calcopirita en un 3% y por último también se observó tetrahedrita en un 10% en la muestra, (no se observa en esta fotomicrografía).

**DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA**

Se observan cristales de barita (Ba) en contacto con calcita (cc), que son la ganga, dentro de esta ganga se observa la galena (Gal) relleno espacios dentro de esta ganga, las fracturas están rellenas de óxidos al parecer de la misma galena.

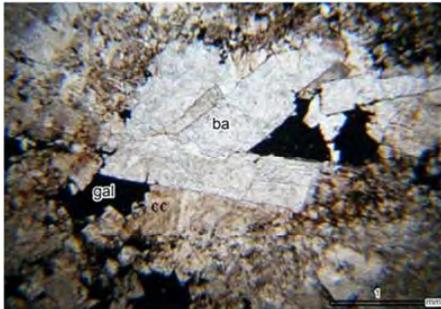
**Muestra: TS-27** Zona: Manto II. Obra minera: Tiro Principal/Terreros



**DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA**

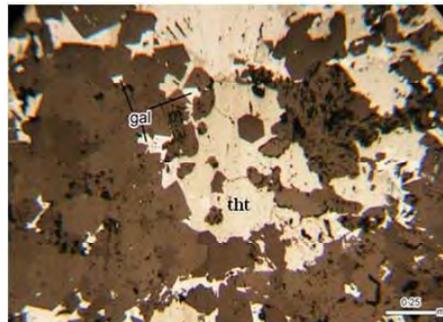
Caliza altamente silicificada con rellenos de vetillas de sílice, pirita diseminada y oxidación de la misma, también se puede encontrar dentro de las fracturas pirita y galena. No se alcanza a observar fósiles que estén presentes en la caliza.

**Muestra: TS-28** Zona: Manto II. Obra minera: Tiro Principal/Terreros



**DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA**

Caliza silicificada con cristales de barita (ba) en contacto con calcita (cc) y vetillas rellenas de cuarzo, se observa también pirita diseminada y como la galena se introduce dentro de la ganga representada por la barita, calcita y sílice.



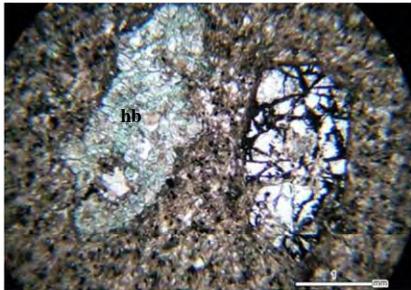
**DESCRIPCIÓN MINERAGRÁFICA**

Galena introduciéndose en la ganga, tetrahedrita (tht) dentro de la galena, dentro de esta muestra se tiene un 10% de este mineral, así también se puede encontrar esfalerita y pirita.

Muestra: TS-29 Zona: Andesitas.



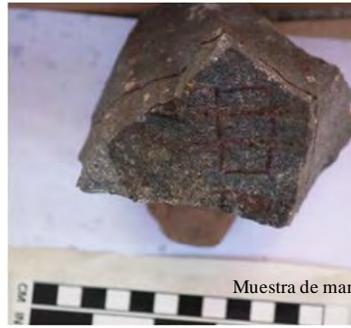
Muestra de mano



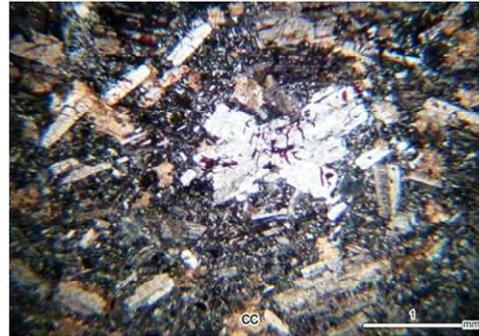
DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA

Textura porfídica, cristales de anfíboles (homblenda, hb), cloritizados, soportados en una matriz microcristalina alterada con plagioclasa y feldespatos, cementados con óxidos de hierro y calcita, también se observa cuarzo relleno cavidades y minerales isotrópicos diseminados posible pirita.

Muestra: TS-31 Zona: Andesitas



Muestra de mano



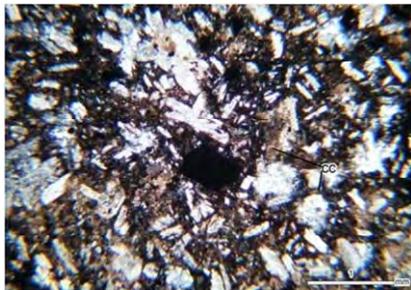
DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA

Textura porfídica, matriz microcristalina de plagioclasas (andesina) y feldespatos alcalinos, observándose orientación de esta matriz, minerales isotrópicos y oxidación de estos, la roca está altamente alterada.

Muestra: TS-32 Zona: Andesitas.



Muestra de mano



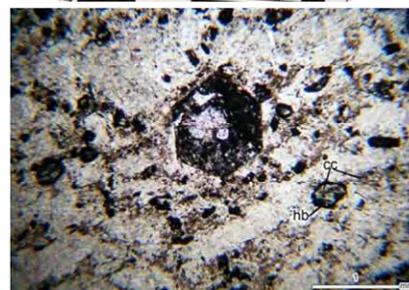
DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA

Textura porfídica, matriz microcristalina, se observan anfíboles como hornblenda alterados a clorita, las plagioclasas que se observan son andesinas, los feldespatos tienen alteración a calcita (cc) y también existen fracturas rellenas de calcita, se observan minerales isotrópicos posible pirita y oxidación de estos, es presente sílice como calcedonia relleno espacios.

Muestra: TS-34 Zona: Andesitas



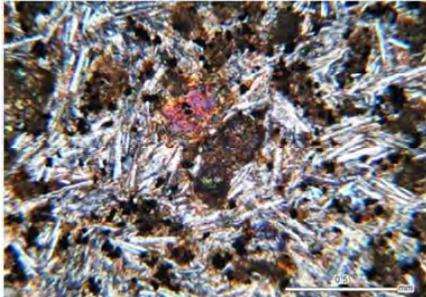
Muestra de mano



DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA

Textura porfídica, con una matriz microcristalina, que consiste de plagioclasas y feldespatos alcalinos altamente alterados, con calcita (cc), también se observan anfíboles (hornblenda, hb) la alteración de estos es clorita, el sílice (cuarzo) se observa relleno cavidades, las fracturas están rellenas de óxidos de hierro y también se encuentran como cementante calcita.

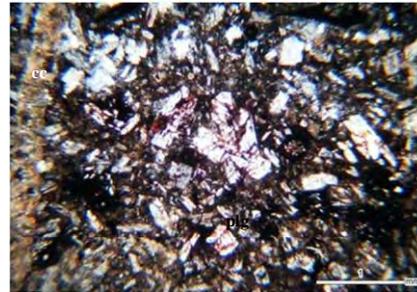
**Muestra: TS-35 Zona: Andesitas**



**DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA**

Textura porfídica, con una matriz microcristalina orientada que consiste de plagioclasas (andesina) y en menor cantidad feldespatos alcalinos se observan anfíboles (hornblenda, hb), y clinopiroxeno, además de calcita (cc) como cementante y rellenando fracturas, sílice (cuarzo), y minerales isotrópicos diseminados y oxidación de éstos.

**Muestra: TS-38 Zona: Andesitas**



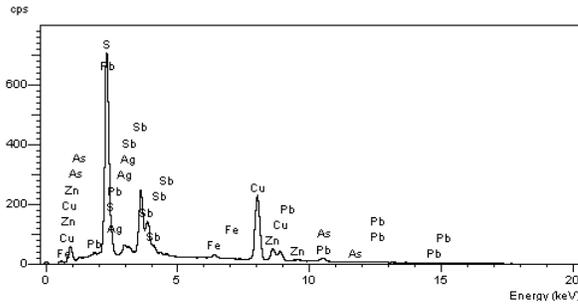
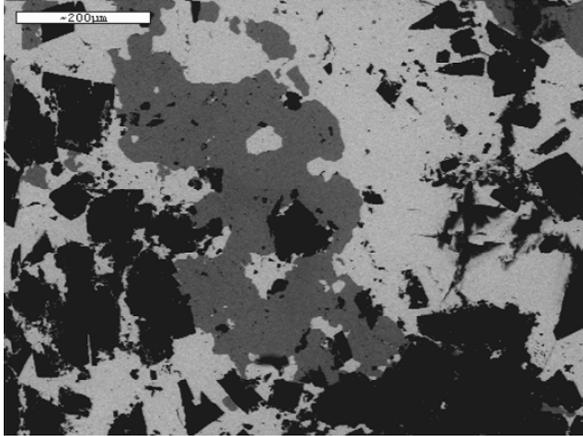
**DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA**

Textura porfídica, con una matriz microcristalina que consiste de plagioclasas (andesina, plg) y feldespatos alcalinos, se observan anfíboles (hornblenda) alterados a clorita, calcita (cc) como cementante y rellenado fracturas y minerales isotrópicos y oxidación de éstos.

## Anexo III

### Análisis al microscopio electrónico de barrido.

#### ANALISIS A



**AANALISIS - Bloc de notas**

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

SEMQuant results. Listed at 10:37:59 on 20/08/09  
 Operator: BROWN  
 Client: DR. EFREN PEREZ (GEOLOGIA)  
 Job: BACANORA  
 Spectrum label:

System resolution = 132 ev

Quantitative method: ZAF ( 4 iterations).  
 Analysed all elements and normalised results.

2 peaks possibly omitted: 0.00, 5.90 keV

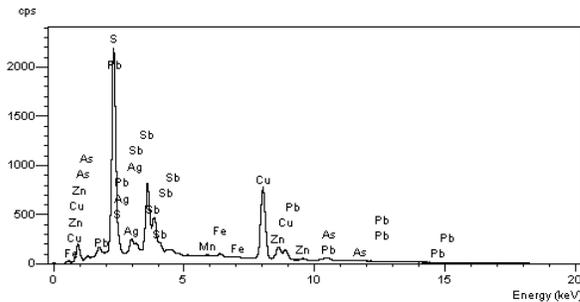
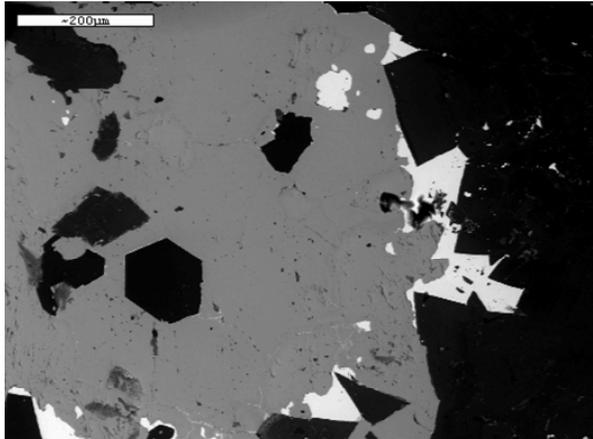
Standards :

S	K	FeS2	01/12/93
Fe	K	Fe	01/12/93
Cu	K	Cu	01/12/93
Zn	K	Zn	01/12/93
As	L	InAs	29/11/93
Ag	L	Ag	01/12/93
Sb	L	Sb	01/12/93
Pb	M	PbF2	01/12/93

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %	
S	K	ED	22.19	43.84
Fe	K	ED	0.94	1.07
Cu	K	ED	29.22	29.14
Zn	K	ED	6.00	5.82
As	L	ED	2.05	1.74
Ag	L	ED	3.09	1.82
Sb	L	ED	25.22	13.13
Pb	M	ED	11.28	3.45
Total			100.00	100.00

\* = <2 Sigma

#### ANALISIS B



**BANALISIS - Bloc de notas**

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

SEMQuant results. Listed at 10:52:56 on 20/08/09  
 Operator: BROWN  
 Client: DR. EFREN PEREZ (GEOLOGIA)  
 Job: BACANORA  
 Spectrum label:

System resolution = 133 ev

Quantitative method: ZAF ( 4 iterations).  
 Analysed all elements and normalised results.

3 peaks possibly omitted: 0.00, 5.18, 5.90 keV

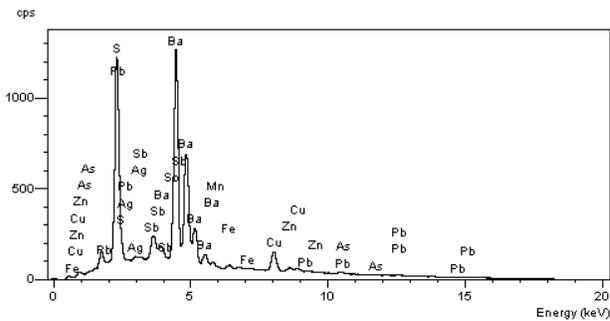
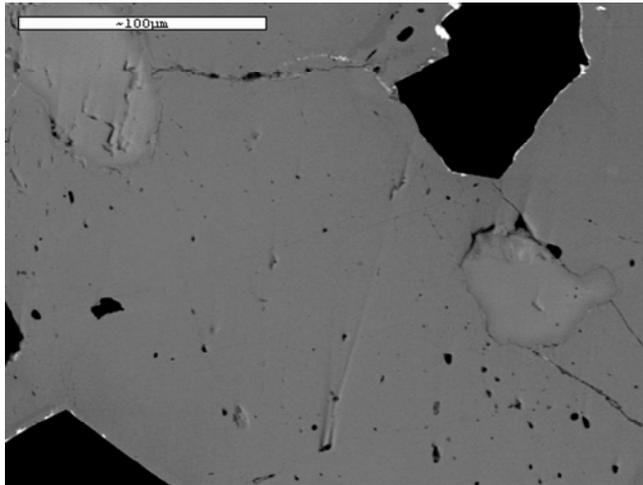
Standards :

S	K	FeS2	01/12/93
Fe	K	Fe	01/12/93
Cu	K	Cu	01/12/93
Zn	K	Zn	01/12/93
As	L	InAs	29/11/93
Ag	L	Ag	01/12/93
Sb	L	Sb	01/12/93
Pb	M	PbF2	01/12/93

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %	
S	K	ED	23.58	44.54
Fe	K	ED	0.77	0.83
Cu	K	ED	31.03	29.57
Zn	K	ED	6.51	6.03
As	L	ED	2.51	2.03
Ag	L	ED	4.57	2.57
Sb	L	ED	26.12	12.99
Pb	M	ED	4.92	1.44
Total			100.00	100.00

\* = <2 Sigma

## ANALISIS B2



B2ANALISIS - Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

SEMQuant results. Listed at 10:56:47 on 20/08/09  
 Operator: BROWN  
 Client: DR. EFREN PEREZ (GEOLOGIA)  
 Job: BACANORA  
 Spectrum label:

System resolution = 133 eV

Quantitative method: ZAF ( 3 iterations).  
 Analysed all elements and normalised results.

1 peak possibly omitted: 0.00 keV

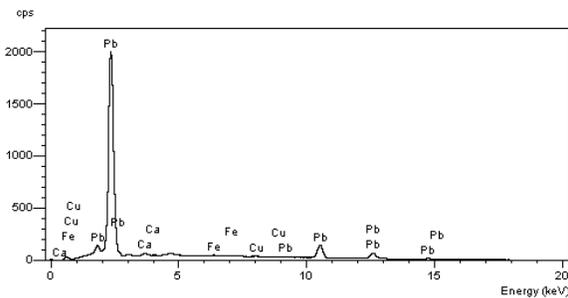
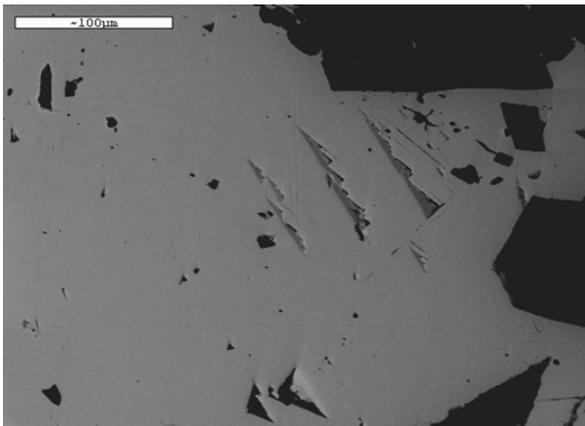
Standards :

S K	FeS2	01/12/93
Fe K	Fe	01/12/93
Cu K	Cu	01/12/93
Zn K	Zn	01/12/93
As L	InAs	29/11/93
Ag L	Ag	01/12/93
Sb L	Sb	01/12/93
Ba L	BaF2	01/12/93
Pb M	PbF2	01/12/93

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
S K	ED	17.51	45.08
Fe K	ED	0.70	1.04
Cu K	ED	6.11	7.93
Zn K	ED	1.18	1.49
As L	ED	0.70	0.78
Ag L	ED	0.67	0.51
Sb L	ED	3.93	2.67
Ba L	ED	63.88	38.39
Pb M	ED	5.31	2.12
Total		100.00	100.00

\* = <2 Sigma

## ANALISIS B3



SEMQuant results. Listed at 11:23:03 on 20/08/09  
 Operator: BROWN  
 Client: DR. EFREN PEREZ (GEOLOGIA)  
 Job: BACANORA  
 Spectrum label:

System resolution = 132 eV

Quantitative method: ZAF ( 2 iterations).  
 Analysed all elements and normalised results.

2 peaks possibly omitted: 0.00, 4.72 keV

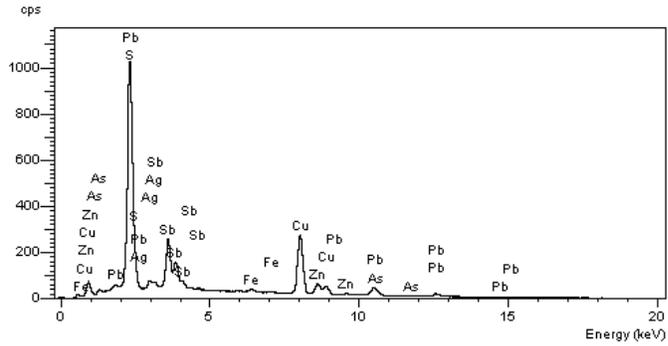
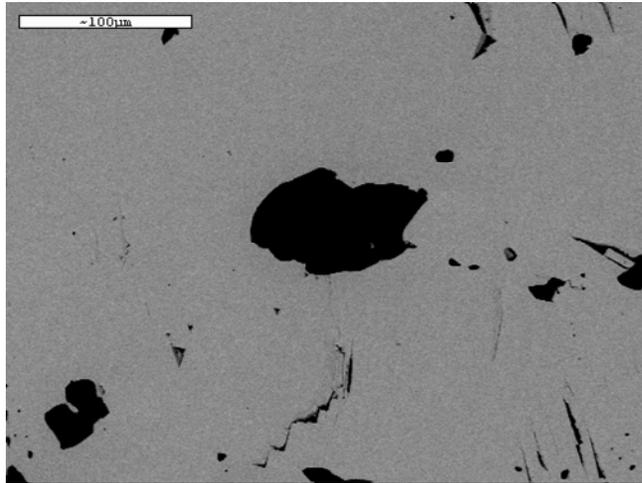
Standards :

Ca K	wollas	23/11/93
Fe K	Fe	01/12/93
Cu K	Cu	01/12/93
Pb M	PbF2	01/12/93

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
Ca K	ED	0.86	4.21
Fe K	ED	0.30	1.06
Cu K	ED	0.36	1.12
Pb M	ED	98.48	93.61
Total		100.00	100.00

\* = <2 Sigma

# ANALISIS C



CANALISIS - Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

SEMQuant results. Listed at 11:37:12 on 20/08/09  
 Operator: BROWN  
 Client: DR. EFREN PEREZ (GEOLOGIA)  
 Job: BACANORA  
 Spectrum label:

System resolution = 132 ev

Quantitative method: ZAF ( 4 iterations).  
 Analysed all elements and normalised results.

1 peak possibly omitted: 0.00 keV

Standards :

S K	Fe52	01/12/93
Ca K	wollas	23/11/93
Fe K	Fe	01/12/93
Cu K	Cu	01/12/93
Zn K	Zn	01/12/93
As L	InAs	29/11/93
Ag L	Ag	01/12/93
Sb L	Sb	01/12/93
Pb M	PbF2	01/12/93

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
S K	ED	20.32	42.94
Ca K	ED	0.41	0.70
Fe K	ED	0.60	0.73
Cu K	ED	25.75	27.46
Zn K	ED	5.19	5.38
As L	ED	2.46	2.23
Ag L	ED	2.66	1.67
Sb L	ED	21.55	11.99
Pb M	ED	21.05	6.89
Total		100.00	100.00

\* = <2 Sigma