



EL SABER DE MIS HIJOS
HARÁ MI GRANDEZA

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

“El Gachi: un depósito de reemplazamiento
de Pb, Zn (Ag), en el distrito de Arizpe,
Sonora, México”

TESIS

Que para obtener el Título de:

MAESTRÍA EN
CIENCIAS GEOLOGÍA



Presenta:

Hugo Alonso Zúñiga Hernández

Hermosillo, Sonora, México, Septiembre del 2010.

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

Índice

	Pág.
I.- Resumen.....	1
II.- Introducción.....	3
II.1.-Localización del área de estudio.....	4
II.2.-Trabajos previos.....	4
II.3.-Propósito del trabajo.....	5
III. – Geología regional del área de estudio.....	7
III.1.- Precámbrico.....	7
III.2.- Paleozoico.....	8
III.2.1.- Cámbrico.....	8
III.3.- Mesozoico.....	9
III.3.1.- Jurásico.....	9
III.3.2.- Cretácico.....	12
III.3.2.1.- Grupo Bisbee.....	13
III.3.2.2.- Rocas volcánicas e intrusivas.....	14
III.4.- Cenozoico.....	17
III.5.- Cuaternario.....	19
IV.- Geología estructural y tectónica regional.....	20
V.- Geología.....	22
V.1.- Geología del depósito El Gachi.....	22
V.1.1.- Cretácico.....	23
V.1.1.1.- Formación Morita.....	23
V.1.1.2.- Formación Mural.....	24
V.1.1.2.1.- Miembro Cerro La ceja.....	24
V.1.1.2.3.- Miembro Lutita Tuape.....	27

V.1.1.3.- Conglomerado El Gachi.....	27
V.1.2.- Cretácico Tardío.....	28
V.1.2.1.- Volcánicas Formación Tarahumara.....	28
V.1.3.- Terciario.....	35
V.1.3.1.- Diques.....	36
V.1.3.2.- Formación Báucarit.....	36
V.2.- Geología estructural en el área de la mina El Gachi.....	38
V.3.- Mineralización.....	39
V.3.1.- Generalidades.....	39
V.3.2.- Depósito El Gachi.....	44
V.3.2.1.- Mineralización de reemplazamiento.....	44
V.3.2.2.- Mineralización epitermal.....	47
V.3.3.- Métodos analíticos, mineragrafía.....	51
V.3.3.1.- Paragénesis.....	51
VI.- Métodos analíticos.....	60
VII.- Inclusiones fluidas.....	62
VII.1.- Selección de muestras.....	62
VII.2.- Petrografía de las inclusiones fluidas.....	63
VII.3.- Resultados analíticos.....	64
VII.3.1.- Sistema de reemplazamiento.....	64
VII.3.2.- Sistema epitermal.....	68
VII.4.- Interpretación y discusión de los resultados.....	68
VIII.- Isótopos estables.....	73
VIII.1.- Isótopos estables de S.....	73
VIII.1.1.- Geotermometría S.....	78
VIII.2.- Isótopos estables de Carbono y Oxígeno.....	79

VIII.3.- Comparación de los valores de isótopos estables con otros distritos en México y el mundo.....	90
IX.- Discusión.....	94
X.- Conclusiones.....	101
XI.- Bibliografía.....	104

Relación de figuras

Figura II.1.- Localización del área de estudio.....	6
Figura III.1.- Geología general del área de estudio.....	11
Figura III.2.- Distribución de rocas del Cretácico Temprano en Sonora.....	16
Figura V.1.- Mapa geológico del área del depósito 1:20 000.....	25
Figura V.2.- Columna estratigráfica del área Mina el Gachi.....	26
Figura V.3.- Sección geológica A-A'.....	31
Figura V.4.- Mapa geológico detalle zona mineralizada El Gachi 1:5000.....	40
Figura V.5.- Sección mostrando la deformación propuesta para el área de estudio.....	41
Figura V.6.- Diagrama ternario de las proporciones aproximadas de Pb-Zn-Cu de distritos selectos.....	45
Figura V.7.- Obra Sotomayor, escala 1:500.....	48
Figura V.8.- Levantamiento de la obra Amavisca, escala 1:500.....	49
Figura V.9.- Levantamiento de la obra Ana Dolores, escala 1:500.....	50
Figura VII.1.- Temperaturas de homogenización para las muestras pertenecientes al sistema de reemplazamiento.....	67
Figura VII.2.- Temperaturas de fusión para las inclusiones fluidas del sistema de reemplazamiento.....	67
Figura VII.3.- Correlación entre la salinidad (NaCl equivalente) y las temperaturas de homogenización (Th) en inclusiones fluidas en diferentes sistemas minerales presentes en el área de estudio.....	70
Figura VII.4.- Correlación entre temperaturas de homogenización (Th) y temperaturas de fusión del hielo (Tm) en inclusiones fluidas, dentro los diferentes sistemas minerales presentes en el área de estudio.....	70
Figura VIII.1.- Histograma de frecuencia de valores de $\delta^{34}\text{S}$ obtenidos en la mineralización de sulfuros en la mina El Gachi.....	75
Figura VIII.2.- Histograma de frecuencia de valores de $\delta^{34}\text{S}$, para las diferentes obras con mineralización de reemplazamiento.....	76
Figura VIII.3.- Rango de valores de $\delta^{34}\text{S}$ en ambientes geológicos.....	77

Figura VIII.4.- Fraccionación en equilibrio de minerales de azufre relacionados a H ₂ S.....	80
Figura VIII.5.- Distribución de δ ¹⁸ O en ambientes geológicos (Field <i>et al.</i> 1985).....	85
Figura VIII.6.- Distribución de δ ¹³ C en ambientes geológicos (Field <i>et al.</i> 1985).....	85
Figura VIII.7.- Diagrama de variación isotópica de δ ¹⁸ O y δ ¹³ C.....	88
Figura VIII.8.- Mapa de δ ¹⁸ O en carbonatos del depósito El Gachi.....	89
Figura VIII.9.- Comparación de valores de isótopos de S en diferentes depósitos de reemplazamiento vs pórfidos de Cu.....	93
Figura IX.1.- Comparación de fuerzas de tensión de diferentes sulfuros, como una función de la temperatura y presión constante de 1000 bares. (Kelly, 1975).....	100

Lista de fotografías

Fotografía V.1.- Fotografías mostrando las características distintivas que presentan las Formaciones Morita y Mural dentro del área de estudio.....	29
Fotografía V.2.- (a) Fotografía mostrando afloramientos típicos del Miembro Lutita Tuape en el área de estudio con deformación e intemperismo; (b) Afloramientos del Miembro Lutita Tuape.....	30
Fotografía V.3.- Fotografía mostrando Conglomerado El Gachi, que pueden ser correlacionable con el Conglomerado Picacho descrito por González-León et al., (2000).....	32
Fotografía V.4.- Sedimentos brechados sobreyaciendo la Formación Mural.....	33
Fotografía V.5.- Afloramientos y secciones delgadas pertenecientes a la Formación Tarahumara.....	34
Fotografía V.6.- Rocas volcánicas terciarias.....	35
Fotografía V.7.- Diques del Oligocenos cortando al Grupo Bisbee, así como la mineralización dentro de la obra Amavisca.....	37
Fotografía V.8.- Afloramientos de las deformaciones presentes dentro del Miembro Lutita Tuape.....	42
Fotografía V.9.- Estratos de caliza perteneciente al Miembro Cerro La Ceja silicificado, alterado y mineralizado por evento epitermal.....	53
Fotografía V.10.- Minerales de mena presentes dentro de las obras mineras.....	55
Fotografía V.11.- Minerografía del evento de reemplazamiento	56
Fotografía V.9.- Briqueta minerográfica mostrando fósil reemplazado por sulfuros dentro de la obra Amavisca.....	57
Fotografía V.13.- Estibinita en muestra de mano y briqueta minerográfica	58
Fotografía VII.1.- Inclusiones fluidas pertenecientes a la obra Sotomayor.....	65
Fotografía VII.2.- Inclusiones fluidas pertenecientes a la obra Amavisca.	66
Fotografía VII.3.- Inclusiones pertenecientes al evento epitermal.....	69
Fotografía IX.1.- Fotografía del afloramiento de cuarzomonzonita La Vaquería.....	99

Tablas

Tabla V.1.- Secuencia paragenética del depósito El Gachi.....	59
Tabla VIII.1.- Valores de $\delta^{34}\text{S}$ en sulfuros en las obras Ana Dolores, Amavisca y Sotomayor, en orden estratigráfico ascendente y dividido por obra minera.....	74
Tabla VIII.2.- Pares minerales en sulfuros de las diferentes obras mineras que conforman la mina El Gachi, dispuestos en orden estratigráfico.....	81
Tabla VIII.3.-Valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$ de la zona mineralizada y calizas recolectadas dentro de la mina El Gachi. Los valores de los isótopos de oxígeno y carbono son relativos a los estándares SMOW y VPDB, respectivamente.....	83
Tabla VIII.4.- Valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$ correspondiente a caliche dentro de fracturas, calcitas, dentro del área del depósito El Gachi. Los valores de los isótopos de oxígeno y carbono se expresan respecto a SMOW y VPDB, respectivamente.....	84
Tabla VIII.5.- Tabla con rango de valores de isótopos estables y temperaturas mínimas de formación de los fluidos mineralizantes en depósitos de reemplazamiento en el mundo.....	92
Tabla IX.1.- Edades de mineralización en el noroeste de Sonora.....	98
..	

Agradecimientos

Agradezco en primer término al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por haberme apoyado con una beca para la realización de mis estudios. Agradezco especialmente a mi asesor Dr Lucas H. Ochoa Landin, quien me entusiasmó en la realización de este trabajo, con el que aprendí mucho en el aspecto geológico, dentro del salón de clases y en el campo, así como de las diferentes platicas que tuvimos para la interpretación de los datos. También agradezco al Dr Carlos González León, por aceptarme en su proyecto No. 24893 el cual se intitula **“Caracterización de los eventos magmáticos, tectónicos y mineralizantes durante el Cretácico y Terciario en Sonora. Análisis de un sector”**, por las revisiones a detalle que realizo de mi trabajo. Al Dr Martin Valencia Moreno el cual me apoyo parcialmente por medio de su **Proyecto 49528-F: “Magmatismo, deformación y metalogenia Laramide: análisis de la subducción y el papel de la litósfera en el norte de México”**. A los profesores Dr Efrén Pérez Segura y Dr Inocente Guadalupe Espinoza Maldonado. A todos ellos por sus acertados consejos y revisiones hechas para la optimización del escrito.

Gracias también a Rafael Del Rio Salas, el cual ayudo en gran medida al enriquecimiento de la calidad de esta escrito, por medio de exhaustivas revisiones e interpretaciones, a través de los meses que le dedique al escrito y por la valiosa facilitación de análisis isotópicos. A mi hermano Luis Gustavo el cual me acompaño en mis días de campo dentro del área de estudio, los cuales fueron satisfactorias y de muy buen resultado, por las revisiones y consejos para la finalización del escrito. Un agradecimiento especial al Departamento de Geología, por la formación académica que me ha brindado, y a todo el personal que labora en esta institución

A mi novia Karina la cual me apoyo y me comprendió en estos meses de redacción de la tesis.

A todas aquellas personas que de alguna manera u otra tuvieron participación en este trabajo.

I.- Resumen

El depósito El Gachi se encuentra localizado en la parte centro oriente del estado de Sonora, dentro de la Provincia Fisiográfica de la Sierra Madre Occidental. Se tienen 195,000 toneladas probadas, con leyes promedio de 505 g/t de Ag; 10.4 % de Pb, 5.3% de Zn y 0.017% de Cu, y con un total de 395,000 toneladas posibles con leyes similares (SGM, 2002). El Gachi pertenece a los pocos depósitos típicos de reemplazamiento hospedados en calizas, en Sonora. El presente trabajo describe varios aspectos de la génesis del depósito El Gachi, el cual se encuentra acompañado de una sobreimposición parcial de un sistema epitermal de baja sulfuración. La geología del área en su mayoría corresponde a sedimentos calcáreos con intercalaciones de sedimentos clásticos del Cretácico, pertenecientes a la parte media inferior del Grupo Bisbee. Discordantemente aflora una secuencia conglomerática polimíctica, nombrado informalmente Conglomerado El Gachi, estos cubren una zona muy pequeña en el área de interés, y se compone de fragmentos principalmente del Grupo Bisbee, y en menor proporción de rocas volcánicas y sedimentos finos. Hacia el norte y este, las rocas cretácicas se encuentran cubiertas en parte por rocas volcánicas cretácicas de la Formación Tarahumara, en contacto discordante, las cuales a su vez son cubiertas por unidades volcánicas más jóvenes del Terciario. Hacia el SW del área afloran rocas más recientes caracterizadas por unidades de relleno de cuenca intercalados con basaltos de la Formación Báucarit.

Las rocas del Grupo Bisbee no solo son las más antiguas expuestas en la zona del Gachi, sino que además, estas unidades se encuentran fuertemente plegadas y autocabalgadas con vergencias de los pliegues hacia el noreste. Así mismo, son la roca huésped de la mineralización. La mineralización en El Gachi consiste principalmente de galena, esfalerita, pirita y pirrotita, con cuarzo y calcita como minerales de ganga. Esta mineralización se presenta en diferentes formas, incluyendo estructuras mineralizadas casi verticales, las cuales parecen haber servido como conductos alimentadores, cambiando en zonas estratigráficamente superiores, a mantos reemplazando las rocas calizas de la Formación Mural, siguiendo burdamente la estratificación. En superficie, las rocas hospedantes de la mineralización se arreglan en una dirección NW-SE por efecto estructural y son seccionadas por una serie de fallas con dirección preferencial NE-SW. En la parte superior de la zona mineralizada, ocurren zonas brechadas, fracturadas y

El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.

fuertemente silicificadas, las cuales presentan ciertos grados de recristalización, que parecen corresponder a un evento hidrotermal de tipo epitermal de baja sulfuración, contemporáneo o ligeramente posterior al evento de reemplazamiento, caracterizada por una mineralización de estibinita y valores anómalos de Au, con cuarzo y calcita como minerales de ganga.

Se obtuvieron 55 valores isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en minerales de calcita dentro y fuera de la zona mineralizada, junto con rocas carbonatadas presentes en el área de estudio, muchas de las cuales conforman la roca encajonante del depósito. Los isótopos de oxígeno presentan una variación entre +1.51 a +19.37‰, abarcando ambientes como lo son el rango de rocas ígneas, así como de rocas sedimentarias. Los isótopos de carbono varían de -5.02 a +0.98‰, el cual cae dentro del rango de calizas marinas. Los estudios isotópicos realizados a los minerales de mena, consistieron de 39 análisis de $\delta^{34}\text{S}$ en sulfuros dentro de diferentes obras mineras siguiendo un orden de la más profunda a más somera. Los análisis varían dentro del rango de -1.7 a 7.6‰, lo cual sugiere probablemente dos fuentes de S, uno con un fuerte componente magmático y otro probablemente con un aporte orgánico a partir de secuencias evaporíticas intercaladas dentro del Grupo Bisbee. Además se obtuvieron temperaturas para la mineralización utilizando dos diferentes métodos: el primer método es utilizando pares minerales esfalerita-galena, pirita-galena, pirita-esfalerita y pirita-pirrotita, generando valores que van desde 200 a 408°C. El segundo utilizando la técnica de inclusiones fluidas dentro de cuarzo y calcita, las cuales aportan temperaturas mínimas de atrapamiento que varían de 142.6 a 380.2°C, junto con rangos de salinidad, obtenidos a partir de la fusión de hielo que van de 0.15 a 15.17 % NaCl equivalente, con una profundidad de emplazamiento aproximado entre los 610 y 856 metros de profundidad. Esta información aunado a las firmas isotópicas y relaciones de campo, sugieren que el Gachi corresponde a un depósito distal de Reemplazamiento Pb-Zn (Ag) hospedado en rocas carbonatadas, formado a principios del Terciario, relacionado posiblemente a sistemas tipo pórfido de cobre comunes en esta región del noroeste de México.

II.- Introducción

El estado de Sonora es conocido a nivel nacional como uno de los mayores productores de Cu-Mo, relacionado a depósitos tipo pórfido de cobre que se incluyen dentro de una franja metalogenética que se extiende por casi todo el oeste de Norte América. En Sonora existen dos depósitos considerados de clase mundial, que son los depósitos de Cananea y la Caridad, localizados en el noreste del estado. Yacimientos de menor tamaño incluyen a Milpillas, Lucy, María, El Alacrán, Cumobabi, Cuatro Hermanos, Suaqui Verde y Piedras Verdes.

La mayoría de estos depósitos minerales han sido reconocidos en el NW de México, algunos de los cuales han sido relativamente bien estudiados y clasificados; sin embargo, algunos de estos han sido poco entendidos y no han sido debidamente caracterizados, posiblemente debido a su bajo tonelaje y poca importancia económica. Entre estos se tiene a El Gachi, El Cuervo, Cabullona y Pilares de Teras, entre otros. Y aunque se infiere una cierta relación genética-espacial con sistemas pórfido de cobre, a la fecha no se tiene un conocimiento pleno de esta posible asociación.

El objetivo de este estudio es realizar una caracterización geológica, mineralógica y geoquímica del depósito El Gachi, como representante de un tipo de yacimientos de reemplazamiento en Sonora, asociado a sistemas tipo pórfido de cobre. Se trata de entender su génesis, así como determinar la posible fuente de los fluidos mineralizantes, la interacción que hay con la roca encajonante y agentes externos en su formación. Es el objetivo también correlacionarlo geoquímicamente con varios depósitos de este tipo, dentro y fuera del estado, como aquellos del tipo Naica y Santa Eulalia, localizados en el estado de Chihuahua.

Con el fin de cumplir con los objetivos propuestos, se utilizaron diferentes métodos analíticos los cuales son ampliamente requeridos para este tipo de estudios. Se hicieron estudios de mineragrafía con el fin de conocer la paragénesis y asociaciones minerales presentes en el depósito, con lo cual se definió qué fases de minerales metálicos se deberá analizar por $\delta^{34}\text{S}$. Los $\delta^{34}\text{S}$ son característicos de cada sistema, indicándonos fuentes de S, ambientes de formación y temperaturas de formación del depósito. También se analizaron isótopos estables de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ para determinar fuentes y tipos de fluidos involucrados a partir de muestras de calcita y caliza. Estos se complementaron con el estudio de

El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.

inclusiones fluidas realizado en minerales traslucido de alteración y asociados a la mineralización, los cuales aportan datos sobre la composición física y química de los fluidos mineralizantes, así como su temperatura mínima de atrapamiento.

II.1.- Localización del área de estudio

El área de estudio del depósito El Gachi, ubicado en el municipio de Arizpe, a 15 km al SE del poblado del mismo nombre. El área cartografiada se localiza entre las coordenadas E: 583128, N:3353503 y E:583128, N:3348834, dentro de la hoja Arizpe H12B73 (Figura II.1). Tiene una altura promedio de 1140 mts sobre el nivel del mar y se ubica dentro de la Provincia Fisiográfica de la Sierra Madre Occidental y más específicamente en la Subprovincia de Barrancas o Altiplanicie Lávica, de acuerdo a Raisz E., (1964), la cual se caracteriza por largas sierras y mesetas orientadas noroeste – sureste, donde forma parte de una zona propicia para la formación de depósitos de reemplazamiento para el NW de México.

II.2.- Trabajos previos

En el área de de estudio se han realizado varios trabajos geológicos por diferentes autores, donde se incluyen organismos gubernamentales, universidades, institutos de investigación y empresas privadas. Los primeros trabajos publicados fueron realizados por González León (1978), en un área de aproximadamente 290 km² en la porción noroeste del área, en donde describe la geología y da un panorama muy general sobre la alteración y mineralización del área estudiada. Rodríguez Castañeda (1991), hace el estudio geológico del área El Téguachi, localizada a ~ 25 km al sureste del poblado de Arizpe, en el cual describe la estratigrafía y hace un análisis tectónico-estructural. Martínez G. H. y Soots L. N. (1994), presentaron la cartografía de la Hoja Banámichi localizada a un lado de la de Arizpe. Posteriormente, González-León (1994), propone la evolución tectono-sedimentaria del margen suroeste de la cuenca Bisbee, en donde incluye un análisis estructural y ambiente de depósito. Los resultados obtenidos por el citado autor apoyan la idea de que la Cuenca Bisbee se formó por un proceso distensivo tipo rift y que su límite sur-oriental se extiende hasta el centro de Sonora. En 1998 se publicó la cartografía geológico- minera y geoquímica escala 1: 50,000 de las cartas vecinas Saracachi H12 B72, Nacozari de García

El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.

H12 B74 y Bacoachi H12 B64, colindantes al oeste, este y noreste respectivamente con la Carta Arizpe (Consejo de Recursos Minerales 1998). Posteriormente el Consejo de Recursos Minerales (1998) publicó la Cartografía Geológica-Minera y Geoquímica de la Carta Cananea H12-5 escala 1:250,000. Este trabajo, de carácter regional, incluye la totalidad de la Carta Arizpe y se trata de un estudio geológico con énfasis en yacimientos minerales en el que se describe la estratigrafía indicando de las rocas más antiguas que afloran en la Carta Arizpe corresponden al Conglomerado Glance de edad Jurásico Superior- Cretácico Inferior. Así mismo, señala las minas y prospectos más importantes como Juanita, Las Chispas, El Gachi, La Mancha, Santa Rosalía y El Júcabe. Finalmente González León *et al* (2000), realizan un análisis de la geología comprendida en el cuadrángulo Arizpe y Bacanuchi, la cual a su vez comprende la totalidad de la Carta Arizpe con excepción de la esquina sureste donde se ubica el área del presente trabajo. Los autores describen la estratigrafía de la región mencionando a las rocas de las formaciones Morita, Caliza Mural y Cintura del Grupo Bisbee de edad Cretácico Inferior, como las más antiguas del área.

II.3.- Propósito del trabajo

El trabajo se realizó con el propósito de estudiar los distintos tipos y estilos de mineralización hospedados en rocas volcánicas de la Formación Tarahumara en diferentes niveles estratigráficos; en el norte-centro del estado de Sonora; esto como parte del proyecto CONACYT No. 24893 “**Caracterización de los eventos magmáticos, tectónicos y mineralizantes durante el Cretácico y Terciario en Sonora. Análisis de un sector**” a cargo de los Dr. Carlos M. Gonzales León.

El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.

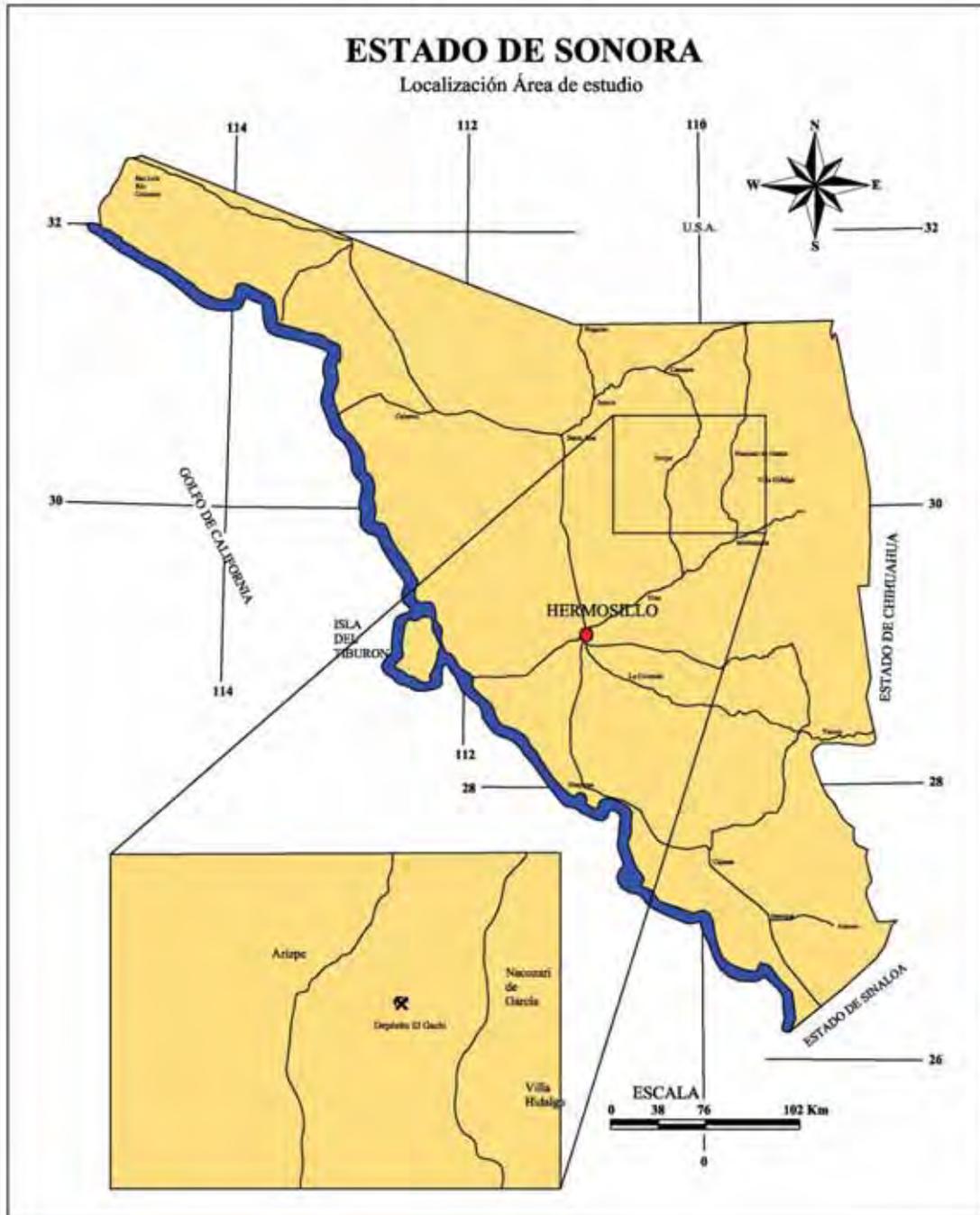


Figura II.1.- Localización del área de estudio.

III. – Geología regional del área de estudio

Este capítulo describe de manera general la geología, estratigrafía y tectónica de la región del noreste-centro de Sonora, la cual engloba la geología de los alrededores del depósito. La descripción de las unidades se hace en de más antiguo al más joven.

III.1.- Precámbrico

El área de estudio se encuentra dentro del llamado Bloque Norteamérica el cual es considerado como basamento de la región, y cuya edad varía de 1600 a 1700 Ma. El Bloque de Norteamérica está compuesto de un conjunto de grauvacas metamorfizadas, filitas y flujos de lavas que conforman el Esquisto Pinal (Anderson y Silver, 1977; Anderson y Schmidt, 1983; Keep, 1996). El Esquisto Pinal se encuentra intrusionado en los alrededores por dos etapas de plutonismo granítico posteriores a 1650 ± 25 y 1450 ± 25 Ma (Anderson et al. 1979). Los plutones más antiguos consisten de cuarzo dioritas y cuarzo monzonitas con texturas equigranulares, mientras que la segunda fase representado por el Granito Cananea la cual es más abundante consiste de un magmatismo que evoluciona de granodioritas a granitos (Valentine, 1936). El Granito Las Mesteñas, también intrusiona al Esquisto Pinal, este último presenta una textura porfídica y al que se le asigna una edad similar al Granito Cananea (Anderson et al. 1979). Hacia el noroeste del poblado de Opodepe (Figura III.1) se tiene una unidad nombrada como Complejo El Alamito (Rodríguez-Castañeda, 1994), compuesta principalmente por esquistos y gneises. Un fechamiento isotópico por U-Pb para el metamorfismo (Anderson y Silver. 1971, 1981) dio una edad de 1650 Ma. Estas rocas son correlacionables con el basamento cristalino de la región de Caborca. El complejo metamórfico El Alamito, es intrusionando hacia la porción este, por el granito El Jacalón (Rodríguez-Castañeda, 1994), el cual está compuesto de granodiorita y diques microdioríticos; localmente la granodiorita presenta fracturamiento, foliación y deformación; con plagioclasa, hornblenda, biotita, escaso cuarzo y feldespato potásico, con óxidos y zircón como minerales accesorios. En cambio, los diques de color gris oscuro, presentan una textura afánítica, con minerales de andesina, hornblenda y muy poco cuarzo. La edad de la granodiorita El Jacalon, fue fechada en 1.7 Ga por U-Pb (Anderson *et al.* 1978); por lo cual es correlacionable con intrusivos precámbricos de composición granodioríticas y cuarzomonzoníticas de esa misma edad de la región de

Caborca (Anderson *et al.*, 1978). Intrusionando al Complejo El Alamito, se tiene un intrusivo micrográfico nombrado como El Granito Santa Margarita (Rodríguez-Castañeda, 1994), fechado por U-Pb en zircones en 1100 Ma (Anderson, 1989) el cual es correlacionable con el llamado Granito Aibó de esa misma edad en Caborca.

Hacia el suroeste del mapa regional (Figura III.1) en el centro-norte de Sonora, aflora una unidad cámbrica denominada “Cuarcita Los Changos” (Rodríguez-Castañeda, 1984). Esta unidad fue asociada con rocas volcanoclasticas y de posible edad Mesozoica, pero esto fue corregido por Stewart *et al.* (2002), como Proterozoicas, y correlacionadas con la Formación Tapiro del Grupo Las Viboras, con la que la cuarcita es correlacionada. En afloramiento se presenta de color café rojizo, gris y café claro en capas medianas a gruesas de grano fino. Aunque la cuarcita comúnmente está muy fracturada, forma masas de roca resistente a la erosión, con relieve abrupto que tiende a formar acantilados; específicamente esta unidad está conformada por ortocuarcitas. El estudio petrográfico realizado por Rodríguez-Castañeda, muestra que se componen casi en su totalidad de cuarzo, más algunos granos de pedernal y minerales opacos cementados por sílice. El cuarzo es policristalino con extinción ondulante, con una matriz compuesta de sílice con esporádica sericita y hematita. Esta unidad se encuentra en contacto tectónico de cabalgamiento con rocas volcánicas jurásicas.

III.2.- Paleozoico

Las rocas paleozoicas en la parte centro norte de Sonora se encuentran pobremente distribuidas, y están constituidas principalmente por cuarcita, areniscas conglomeráticas, conglomerados y escasas lutitas; estas rocas paleozoicas descansan discordantemente sobre granitoides precámbricos que conforman el basamento en esta región de Sonora.

III.2.1.- Cámbrico

Hacia el noroeste del mapa regional y hacia el sur del poblado de Bacoachi afloran cuarcitas correlacionables con la Cuarcita Bolsa pertenecientes al Cámbrico Medio (Ransome, 1904). Esta unidad está cubierta discordantemente por una secuencia calcárea que está representada por calizas y dolomías que es correlacionable con la Caliza Escabrosa (Ransome, 1904) de edad Cámbrico Superior.

III.3.- Mesozoico

Las rocas de Mesozoico en Sonora se encuentran ampliamente distribuidas, principalmente al noroeste-noreste y este de la región. Rocas marinas de la Formación Cucurpe (Araujo y Estavillo, 1987). Conglomerados polimícticos deformados de la Formación Cocóspera (Gilmont, 1978). Rocas sedimentarias clásticas y continentales del Grupo Cabullona (Taliaferro, 1933; González-León *et al.* 1994). Unidades sedimentarias producto de transgresiones y regresiones marinas de la Formación Bisbee (Dumble, 1902; Ransome, 1904), y finalmente rocas volcánicas de composición andesítica y dacítica de la Formación Tarahumara (Wilson y Rocha, 1949) y su equivalente la Formación Mesa (Valentine, 1936). Algunas de estas unidades son descritas con mayor detalle debido a su cercanía con el área de estudio.

III.3.1.- Jurásico

Las rocas jurásicas afloran escasamente en el centro norte de Sonora, y están representadas principalmente por rocas volcánicas, y sedimentarias, particularmente del tipo areniscas, limolitas, calizas y conglomerados (Rodríguez Castañeda, 1988). Hacia el suroeste de la Figura III.1 se tienen unidades volcanosedimentarias junto con las Formación La Colgada y Dos Naciones. La unidad volcanosedimentaria está constituida predominantemente en su base por riolita porfídica y tobas líticas, en menor cantidad por andesitas y areniscas intercaladas, parcialmente cubiertas por capas delgadas de rocas volcánicas terciarias; y a la vez cabalgadas por la ortocuarcita Los Changos hacia el oeste del área, dentro de la hoja Santa Ana, (Rodríguez- Castañeda, 1994).

La Formación Cucurpe (Villaseñor *et al.*, 2005), localizada en el Rancho La Colgada. Consiste de una secuencia de 515 m, compuestos por arcillas laminadas masivas, con areniscas intercaladas, con nódulos calcáreos y amonitas, intervalos de flujos volcánicos basálticos, zonas limolíticas con fosiles de belemnites y posteriormente arenisca tobaceas, areniscas y limolitas pertenecientes al Oxfordiano tardío - Titoniano. La Formación Cucurpe se encuentra sobreyacida por sucesiones de edad incierta, pero posiblemente Cretácico Tardío, nombrado Formación Rancho La Colgada (González León *et al.*, 2001; Rodríguez-Castañeda, 1986). Esta unidad fue propuesta originalmente para describir una secuencia volcanosedimentaria que aflora en los alrededores del rancho La

El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.

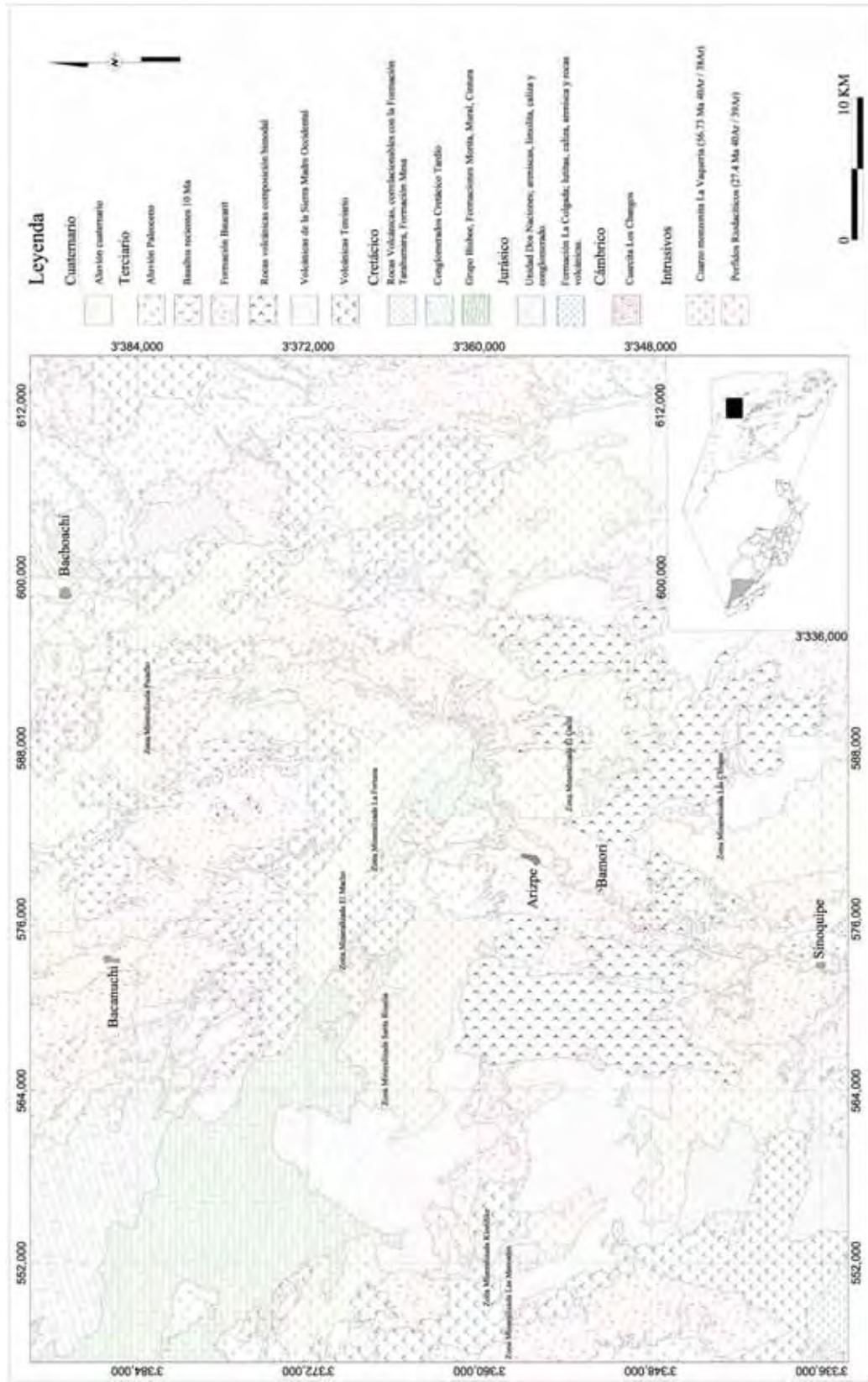
Colgada, que es una importante localidad fosilífera (Rangin, 1977). La Formación Rancho La Colgada se encuentra cubierta, en discordancia angular, por rocas del Cretácico Superior y por sedimentos de la Formación Baucarit, los cuales a su vez infrayacen discordantemente a rocas volcánicas terciarias.

La Formación Dos Naciones, (Rodríguez-Castañeda, 1986), aflora en el oeste del área de estudio y se encuentra discordantemente encima del basamento proterozoico; esta secuencia consiste de arenisca, limolita, caliza y conglomerado para la cual le asigna una edad Jurásica Tardía – Titoniano. Los estratos varían de 10 cm a 1 m y contienen restos de pelecípodos y amonitas, con un espesor difícil de especificar debido a fallas que la seccionan, pero se estima en unos 1000 m.

A finales del Jurásico, en la parte N-NW de México y S-SW de Estados Unidos, se tienen sedimentos asociados a un sistema fluvial, depositados en una planicie con influencia marina, que constituye una fase transgresiva del Golfo de México como resultado de un rifting intracontinental que comenzó en el Jurásico Medio. Las unidades sedimentarias correspondientes a estos eventos cubren algunas de las unidades descritas anteriormente. La unidad sedimentaria correspondiente al Jurásico se denomina Conglomerado Glance (Dumble, 1902; Ransome, 1904) y está compuesto por un conglomerado polimíctico pobremente clasificado, junto con brechas con clastos de calizas y cuarcitas paleozoicas, rocas volcánicas mesozoicas, clastos de granitoides jurásicos, y clastos de granitoides y esquistos precámbricos. Esta unidad que varía en espesor de 2 a más de 2000 m (Bilodeau, 1978). Aflora en diferentes áreas del suroeste de Arizona y noreste (Drewes, 1971; Hayes, 1970; Bilodeau y Lindberg, 1983), y norte-centro de Sonora (Taliaferro, 1933; Rangin, 1982; Nourse, 1989), al igual que en la región de Arivechi, donde ha sido nombrado Grupo Zoropuchi (Almazan Vazquez, 1987). Esta unidad se caracteriza por la presencia de abanicos aluviales y sedimentos fluviales de origen tectónico junto con la presencia de rocas volcánicas intercaladas, los cuales en el noroeste de Arizona

Figura III.1.- Geología general del área de estudio. Modificado del Servicio Geológico Mexicano. (Cartas 1:50 000 H12B62 Santa Teresa, H12B63 Bacanuchi, H12B64 Bacoachi, H12B65 Esqueda, H12B66 Oaxaca, H12B72 Saracachi, H12B73 Arizpe, H12B74 Nacoziari de García, H12B82 Santa Ana y H12B83 Banamichi).

El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.



han sido datados como Jurásico Tardío (Bilodeu, *et al.* 1978; Marvin *et al.* 1978; Kluth *et al.* 1982). Esta unidad, aunque es considerada como la formación basal del Grupo Bisbee, no está directamente relacionada a las facies transgresivas y regresivas pertenecientes a la cuenca Bisbee.

III.3.2.- Cretácico

En Sonora el Cretácico está caracterizado por rocas sedimentarias restringidas mayormente hacia el noreste del estado, y rocas volcánicas del Cretácico Tardío. Las primeras están representadas por las rocas del Grupo Bisbee (Ramsone, 1904) (Figura III.2), y se dividen en tres formaciones denominadas como Morita, Mural y Cintura, las cuales fueron originalmente definidas en el SW de Estados Unidos y luego reconocidas en el noroeste de Sonora (Dumble, 1902; Ramsone, 1904; Taliaferro 1933); formadas en ambientes marinos someros a partir de etapas transgresivas y regresivas marinas que ocurrieron en la llamada cuenca Bisbee (Hayes, 1970; Bilodeou y Linderg, 1983). Inmediatamente encima se tiene a los conglomerados polimicticos de la Formación Cocóspera (Gilmont, 1978), que están cubiertos hacia el noreste por rocas del Grupo Cabullona del Cretácico Superior. Al noreste de Moctezuma dentro la sierra La Oposura afloran rocas sedimentarias marinas, consistentes de calizas en su base e interestratificada con lutitas negras en la parte media, y en su parte superior con una secuencia de arenisca claro, intercaladas con limolitas verdosas; las cuales han sido interpretadas, por su disposición espacial como techos colgantes descansando encima de lo que sería el Batolito Oposura (Roldán Quintan, 1994) presentando localmente metamorfismo de contacto. Las rocas anteriormente descritas se encuentran parcialmente cubiertas discordantemente por rocas volcánicas andesíticas y dacíticas con intercalaciones de volcanosedimentos de la Formación Tarahumara (Wilson y Rocha, 1949). Dado que dentro del área de estudio solo afloran rocas pertenecientes al Grupo Bisbee y a la Formación Tarahumara; las primeras de ellas hospedando la mineralización económica de El Gachi y las rocas volcánicas cubriéndolas en discordancia, estas serán descritas en mayor detalle a continuación.

III.3.2.1.-Grupo Bisbee

La Formación Morita (Ramsone 1904) está caracterizada por lutitas y en menor proporción por areniscas con esporádicos lentes de conglomerado intercalados. El color de las lutitas varía de rojizo a púrpura, mientras que las areniscas son de color rojizo a café amarillento. El contacto inferior es transicional con el Conglomerado Glance para localidades en Sonora y SW de E.U. Debido a la similitud de la Formación Morita con la Formación Cintura, la característica distintiva es que la primera de ellas presenta capas de conglomerado las cuales están ausentes en la segunda formación, esto sin considerar que la Formación Mural las separa estratigráficamente (Rodríguez-Castañeda, 1997). Secciones completas de la Formación Morita son conocidas en Cerro de Oro (González-León y Jacques-Ayala, 1988) y Sierra El Chanate (Jacques-Ayala, 1992), secciones incompletas en la región de Santa Ana y Arizpe.

La Formación Mural (Ramsone 1904), consiste de calizas marinas de ambientes someros, lutitas y raramente arenisca que varían en edad desde el Aptiano tardío a Albiano Medio. Las calizas presentan un coloración gris a gris brillante, con un alto contenido fósil, en las que predominan las ostras, equinodermos, pelecípodos, rudistas, turritella, gasterópodos e icnofósiles; además son caracterizados por sus estructuras bien formadas de arrecife (González-León, 1994). La localidad tipo de la Formación Mural es en Mural Hill, localizado a 3 km al este de Bisbee, Arizona, donde afloran y se extienden por el noroeste de Sonora. La Formación Mural consiste de seis miembros los cuales son Cerro La Ceja, Lutita Tuape, Los Coyotes, Cerro La Puerta, Cerro La Espina y Mesa Quemada (Lawton *et al.*, 2004). Estos miembros fueron nombrados conforme a las localidades en donde fueron descritos. La Formación Mural aflora en el área de la mina El Gachi, donde solo los miembros reconocidos son Cerro la Ceja y Lutita Tuape.

La Formación Cintura (Ramsone 1904) está formada por lodolitas y lutitas de color rojo a rojo violáceo, y por areniscas de color gris a gris violáceo verde, con un espesor máximo de 320 m y la sección más completa de la Formación Cintura es conocida en la localidad de Arizpe. La localidad tipo original se encuentra en las Montañas Mule, cerca de Bisbee, Arizona; aunque ha sido descrita en la porción NE de Sonora (sierra El Chanate, Santa Ana, Arizpe y Cerro de Oro) y SW de Arizona como parte del Grupo Bisbee. Esta formación fue depositada en ambientes marino marginales en su parte inferior y ambientes

fluvial dentro de meandros en la parte superior y representando la fase regresiva del Grupo Bisbee (González-León, 1994).

III.3.2.2.- Rocas volcánicas e intrusivas

Discordantemente sobre las rocas sedimentarias cretácicas se depositaron las rocas volcánicas de la Formación Tarahumara, que se encuentran ampliamente distribuidos en el área de estudio (Figura III.1). Estas rocas fueron nombradas como Formación Tarahumara por Wilson y Rocha (1946), en el Arroyo Tarahumara, ~20 km al suroeste de Tónichi (McDowell, 2001) y son correlacionables con las rocas volcánicas de la Formación Mesa descrita por Valentine (1936) en el distrito de Cananea. La Formación Tarahumara está relacionada a la etapa de subducción de la placa Farallón debajo de la placa Norteamericana durante el Cretácico Tardío - Eoceno, como ha sido sugerido por McDowell *et al.* (1979). La Formación Tarahumara se encuentra constituida por flujos de rocas volcánicas con una variada composición litológica. Las rocas más abundantes están constituidas por flujos, aglomerados y brechas de composición intermedia, con intercalaciones de flujos volcánicos félsicas, como han sido reportadas por Dumble (1900), Wilson y Rocha (1946), McDowell *et al.* (1997), y McDowell *et al.* (2001).

Las características geológicas, geoquímicas y tectónicas de la Formación Tarahumara en la porción central de Sonora, sugieren que estas rocas representan la parte extrusiva del evento larámido. Estas rocas no muestran evidencias de deformación compresiva en forma de pliegues; por el contrario, una característica que es evidente y frecuente de observar en muchas localidades, es una íntima asociación espacial y genética con rocas graníticas y un intenso fracturamiento asociado con el desarrollo de amplias zonas de alteración hidrotermal del tipo potásico-propilítico distribuidas en un sentido lateral y vertical.

Estudios geocronológicos utilizando el método U-Pb en zircón (McDowell *et al.* 2001) arrojan edades de 89 y 70 Ma en rocas próximas al miembro inferior y la cima del miembro medio respectivamente, esto en la sección Arroyo Las Uvalmas-Cerro Tarais, y en el Arroyo Obispo, al sur de Suaqui Grande.

Existen además niveles sedimentarios dentro de la Formación Tarahumara que han sido reportados en varias localidades, tales como Cañón El Obispo, Cerro Tarais, Palos

Quemados, Salto del Álamo, Téguachi, y en las porciones sur y suroeste de Cumpas, entre otras. En algunas de ellas se ha identificado la presencia de fósiles algáceos, tallos y raíces de palmeras y madera petrificada. Normalmente estas manifestaciones orgánicas se encuentran dentro de los niveles de pedernal. Recientemente en las calizas del Cañón El Obispo se han identificado dos nuevas especies de plantas de agua dulce como *Tarahumara sophiae* y *Obisopocaulis myriophylloides* (Hernández-Castillo y Cevallos-Ferríz, 1999). Pedernales expuestos en la cercanía de Huépac, reportan abundante contenido de diatomeas, las cuales son correlacionables a una edad Turoniano-Maastrichtiano indicando una edad de ~70 Ma. A su vez muestra que esta parte de la Formación Tarahumara se depositó en una cuenca continental intra-arco (Roldán-Quintana, 2002), con cuerpos de agua no marinos que pudieron funcionar como cuencas hidrológicas en el Cretácico Tardío (Amaya-Martínez y González, 1993).

Hacia el norte del municipio de Arizpe (10 km aproximadamente), se reporta una secuencia volcánica andesítica informalmente llamada Arroyo Alcaparros de 700 m de espesor, conteniendo flujos andesíticos en su parte inferior, con plagioclasas fuertemente alteradas, hornblendas y piroxenos, brechas volcánicas en su parte intermedia, rocas volcanoclásticas grises e intervalos de tobas líticas y riolíticas, en su parte superior. Esta unidad volcánica fue fechada utilizando el método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en biotitas, con edades de ~72 y ~69 Ma (González-León *et al.* 2000).

En las cercanías al poblado de Banámichi, Plasencia Corrales (2008) caracteriza estratigráficamente y petrográficamente una columna de la Formación Tarahumara, con un espesor de 1850 m, y en la cual consiste en una sucesión de seis unidades de rocas volcánicas y volcanosedimentarias. Para esta sección se realizó un fechamiento en una toba riolítica ubicada en la parte inferior de la columna, por el método U-Pb en zircones la cual arroja una edad de ~74 Ma.

Dentro del área regional (Figura III.1) ocurren intrusivos de diferente composición, como es el intrusivo granodiorítico El Manzanal, el cual aflora en la parte centro-oriental y está compuesta de fenocristales de oligoclasa y andesina (60 – 70 vol%) con una matriz microgranular de cuarzo, plagioclasa y feldespato potásico, con hornblenda, biotita, y clinopiroxeno. Esta roca es cortada por diques aplíticos con una orientación noroeste.

El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.

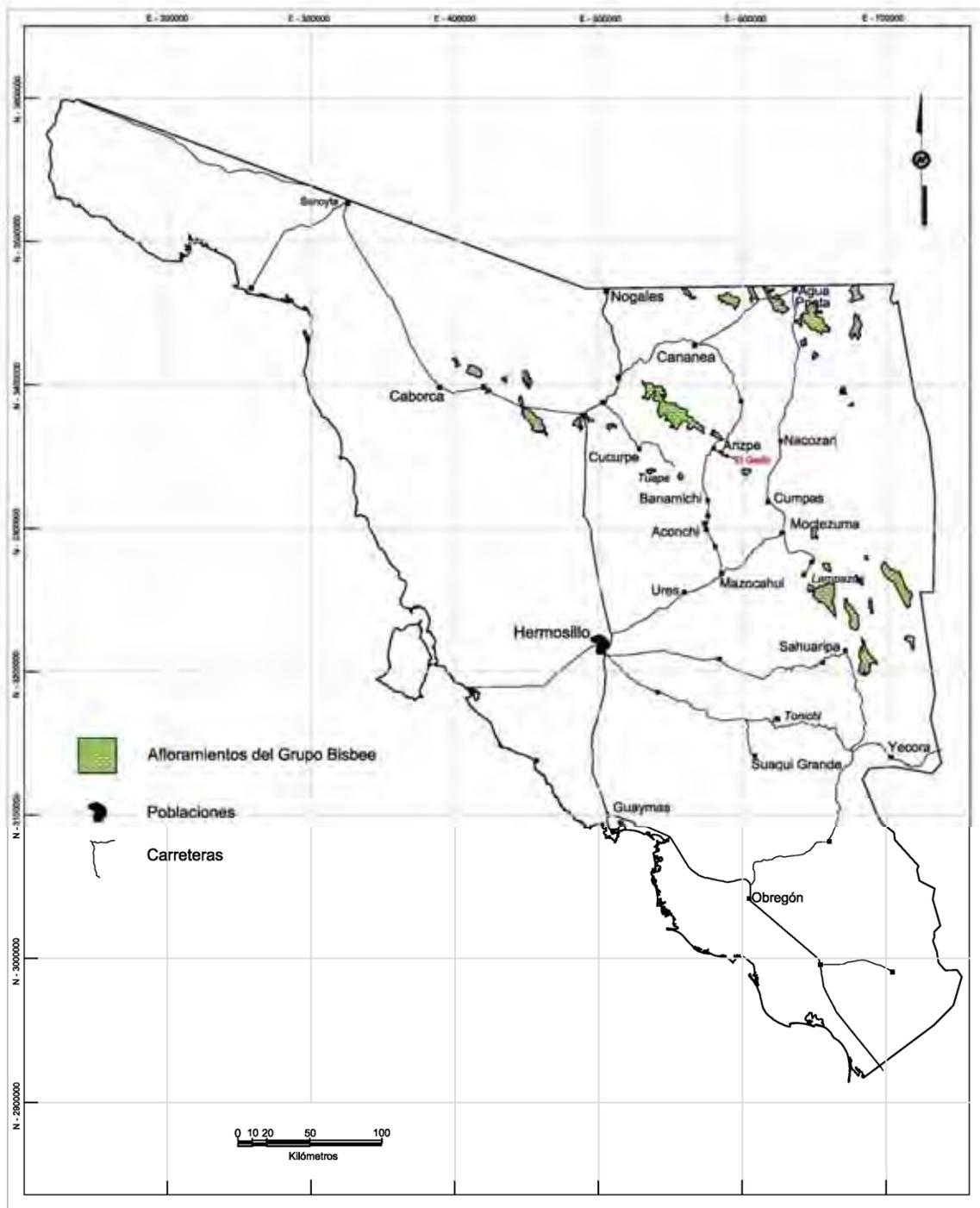


Figura III.2.- Distribución de Rocas del Cretácico temprano en Sonora, Noroeste de México.

El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.

Edades obtenidas en diferentes minerales de la granodiorita utilizando el método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ son del orden de ~ 68 Ma (González-León. *et al.* 2000). En la parte central aflora un intrusivo de composición cuarzo-monzonítico llamado informalmente La Vaquería, que se caracteriza por presentar una textura porfírica con fenocristales de andesina y oligoclasa. Los cristales de plagioclasa están parcialmente alterados a sericita y otros minerales argílicos, con biotita y hornblenda parcialmente cloritizados. Estudios geocronológicos utilizando el método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en biotita, hornblenda, y feldespatos potásicos, dan una edad promedio de 57 Ma (González-León. *et al.* 2000). También ocurren pórfidos riódacíticos hacia el norte del área, fechados en ~ 27 Ma (F. Gray, U.S. Geological survey, 1997, *en* González-León *et al.* 2000).

Hacia el suroeste del área de estudio, y fuera del mapa regional se encuentra el batolito El Jaralito, nombrado de esta manera ya que aflora en la Sierra El Jaralito, (Damon *et al.* 1983) y el cual forma parte de un cinturón de batolitos que se extiende desde el oeste de Norte América, pasa por México y continúa a lo largo de la costa del Pacífico. Este intrusivo aflora por 750 km^2 , y presenta una gran variación composicional, pasando desde granito, cuarzomonzonita, cuarzodiorita a granodiorita (Roldán, 1991). Fechamientos realizados en El Jaralito muestran un rango de edad desde 51.8 a 69.6 ± 2 Ma (Mead, 1982; Anderson 1980). En contacto con el batolito El Jaralito se encuentra El Batolito de Aconchi el cual abarca una extensión de 200 km^2 y está conformado por la Sierra de Aconchi al sur y la Sierra Los Locos al norte. Este batolito está constituido principalmente por granitoide alcalino con abundantes pegmatitas y aplitas, así como diques o pequeñas intrusiones de formas irregulares. Muscovita primaria y granate rojo son característicos de este batolito. Un fechamiento utilizando el método K/Ar fue realizado por Damon en 1979, arrojando una edad de ~ 36 Ma.

III.4.- Cenozoico

Rocas volcánicas terciarias de composición mayormente intermedia a félsica, incluyendo andesitas, dacitas y riolitas, registran el progreso de la extensión en Sonora (McDowell *et al.* 1997), estas se distribuyen ampliamente dentro del área regional de estudio. Hacia la parte centro del área (Figura III.1) aflora una secuencia volcánica compuesta de flujos andesíticos y dacíticos denominado Cerro Las Jarillas, una biotita de

una muestra de roca andesítica colectada en la parte media de esta unidad, fue fechada utilizando el método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en ~ 59 Ma (González-León *et al.* 2000).

Después existe una transición que consiste de rocas mayormente andesíticas (hidrotermalmente alteradas), a rocas predominantemente dacíticas a riolíticas, las cuales se encuentran menos alteradas, lo cual sirve como una separación útil entre grupos de roca antiguas y jóvenes (Wisser, 1966; McDowell *et al.* 1979). La edad de transición está bien definida en algunos lugares, pero para esta área de Sonora, parece ser que existe un pequeño *hiatus* en el magmatismo durante dicha transición (Clark *et al.* 1982).

Periodos de vulcanismo calco-alkalino asociados a la Sierra Madre Occidental (McDowell y Clabaugh, 1979), se desarrollaron en dos etapas entre el Eoceno y el Oligoceno Tardío (45 a 28 Ma). Comparados a las rocas laramidicas estas son rocas más félsicas y menos alteradas (Damon *et al.* 1983). Se encuentran muy bien distribuidas en el área, encontrándose más frecuentemente hacia el oeste y parte central del mapa regional (Figura III.1), junto con escasos afloramientos hacia el este del mismo; unos 10 km hacia el norte de Arizpe, afloran flujos de composición dacítica a riolítica, nombrados informalmente como rocas volcánicas Cerro Cebadéhuachi (González-León *et al.* 2000). Estas rocas fueron fechadas en roca total por el método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en ~ 27 (González-León *et al.* 2000).

Hacia el noroeste y sobreyaciendo las rocas anteriormente descritas se encuentran las rocas volcánicas Mesa Pedregosa, expuestas en la parte más sur del valle Bacanuchi; están compuestas de flujos volcánicos y volcanoclásticos (flujos basálticos, dacitas, tobas riolíticas), con un espesor máximo de 500 m; datos geocronológicos utilizando el método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en sanidina proveniente de una toba riolítica arrojan una edad de ~ 25 Ma (González-León *et al.* 2000). Se considera que estas dos unidades volcánicas por la edad que presentan, que están dentro del vulcanismo asociado al Complejo Volcánico Superior de la Sierra Madre Occidental (McDowell *et al.* 1979).

Posteriormente, el magmatismo evoluciona a uno más heterogéneo y disperso a principios del Mioceno Temprano, el cual consiste de rocas tobáceas más félsicas y en menor proporción lavas basálticas las cuales contienen fuertes firmas geoquímicas continentales (Cocheme *et al.* 1991). Las rocas volcánicas de composición bimodal que sobreyacen a las rocas volcánicas de la Sierra Madre Occidental están más asociadas a un

evento distensivo, de tal manera que estas tienden a formar mesetas. En los valles, estas rocas aparecen intercalados dentro del relleno sedimentario de cuencas formadas (Formación Báucarit) por el fallamiento distensivo “*Basin and Range*”, las cuales indican edades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, entre 24.73 ± 2.5 a 21.7 ± 0.20 Ma (Paz-Moreno *et al.* 1992; González-León *et al.* 2000).

La Formación Báucarit está caracterizada por conglomerados, areniscas y areniscas arcillosas bien estratificadas, las cuales se encuentran expuestas principalmente dentro de las cuencas formadas por el “*Basin and Range*” a lo largo del estado de Sonora, con una orientación preferente NW-SE. El primero en describir este tipo de depósitos sedimentarios rellenando las cuencas de Sonora fue Dumble (1900), sin embargo fue King (1939) el primero en aplicar el nombre Formación Báucarit a esta secuencia, la cual está constituida por conglomerados polimícticos cuyos clastos constituyen virtualmente todas las rocas antiguas localmente expuestas en zonas altas, con arenas y gravas consolidadas, e intercalaciones de uno o más flujos e aglomerados de composición basáltica, interdigitados con aglomerados basálticos, que conforman la Formación Baucarit. La edad de esta formación ha sido determinada por medio de una serie de dataciones K/Ar en las rocas volcánicas intercaladas en los sedimentos las cuales varían desde 23 hasta 10 Ma (Bartolini *et al.* 1994). El proceso de cementación de los conglomerados de la Formación Báucarit es aún incierto, el único estudio disponible es el realizado por Cocheme *et al.* (1988), en el cual proponen que la litificación es similar a los conglomerados en la Cuenca El Huracán en Chihuahua, donde la cementación es causada por cristalización de zeolita, proveniente del material volcánico alterado.

Debido a que es una molasa continental depositada después del fallamiento de sierras y valles paralelos “*Basin and Range*” que ha afectado a Sonora desde el Mioceno (Roldan, 1984), el carácter de su composición litológica está determinado por el de sus áreas-fuentes adyacentes.

III.5.-Cuaternario

El Cuaternario en el área de estudio está caracterizado por una disminución en la actividad volcánica, dominado principalmente por conglomerados, la formación de cuencas sedimentaria y su relleno sedimentario por unidades clásticas, representando la finalización del *Basin and Range*.

IV.- Geología estructural y tectónica regional

Dentro del área regional (Figura III.1) se presentan diferentes estilos de deformación, las cuales registran movimientos de la corteza en diferentes épocas. Las características tectónicas en Sonora y sureste de Arizona durante el Jurásico Tardío y Cretácico Temprano parecen haber sido dominados por deformación extensional detrás del arco magmático desarrollado a lo largo de la costa oeste de Norte América (Dickinson, 1981).

Los depósitos continentales del Conglomerado Glance de edad Jurásico Tardío presentes en el área cercana al eje NW-SE de la posible cuenca donde se depositó el Grupo Bisbee, muestran ausencia de características indicativas de deformación compresiva en el tiempo de la formación del Conglomerado Glance, y sugiere que esta región registra una extensión continental y fallamiento como el interpretado en el SE de Arizona (Bilodeau *et al.* 1982) y norte de Sonora (Nourse, 1989). Las rocas del Cretácico Inferior (Grupo Bisbee) que afloran en lugares aislados del estado de Sonora fueron depositadas en la cuenca de mar somero, la cual existió en el norte de Sonora, y registran una evolución estructural en la región y se encuentran ampliamente expuesto en Sonora (Figura III.2) (Rodríguez-Castañeda. 1997). González-León (1978) describe estas rocas del Cretácico Temprano y sugiere que el estilo de deformación esta relaciona a tres tipos de eventos: (1) compresional, (2) domo y (3) extensión. Rangin (1977) sugiere que en el noroeste de Sonora, y específicamente para las rocas de edad Cretácico Temprano (Albiano - Cenomaniano) presentan una deformación de plegamiento, la cual se explica por medio de deslizamientos. Este estilo de deformación está ampliamente explicada y registrada en Sonora (Taliafierro, 1933; Rangin 1977; González-León, 1978; Pubellier, 1987) los cuales soportan la idea de que esta deformación representa una evento de deformación regional compresivo nombrado orogenia Mesocretácica (Rangin, 1977).

La segunda fase de deformación registrada en el área de estudio, corresponde a la fase Laramide que ocurrió durante el Cretácico Tardío-Eoceno, acompañada por magmatismo calciocalino que migró del poniente hacia el oriente del estado (Anderson y Silver, 1974). La deformación Laramide produjo plegamientos y cabalgamientos locales con dirección de estructuras NW-SE, con asimetría y transporte tectónico, respectivamente,

El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.

tanto hacia el nororiente como al surponiente, que son bien conocidos en el noroeste de Sonora (Rangin, 1977) y suroeste de Arizona (Davies, 1979).

Durante el Terciario, las rocas mesozoicas y las estructuras mesocretácicas y laramídicas de Sonora fueron cubiertas por varios eventos de vulcanismo, los cuales han sido ampliamente estudiados por Roldán y Solano (1978) y Roldán (1984). Un cambio de dirección de la subducción debido a la convergencia de la placa Farallón y Norte América, entre los 50 a 42 Ma (Engebretson, 1982; Stock *et al.* 1988), generó la intrusión de diferentes tipos cuerpos batolíticos con asociaciones mineralógicas características de biotita + muscovita + granate, como lo es el batolito de Aconchi.

El Neógeno está caracterizado por una deformación penetrativa de rocas graníticas y metamórficas foliadas y cizalladas indistintamente con fallamiento normal de bajo ángulo y fallas “*detachment*” a lo largo de un lineamiento noreste, que constituyen las placas inferiores asociadas al “*metamorphic core complex*”, el cual se extiende desde la parte oeste de Canadá, pasando a través de la costa oeste de EU y finaliza la NW de México. Comienza con el desarrollo de la deformación a los 40 Ma; y es responsable de la exhumación de algunos batolitos en la parte centro-este del estado; se ha estudiado que el enfriamiento del descapote tectónico producido en este evento ocurrió entre los 25 a 18 Ma (Nourse *et al.* 1994).

Durante el Mioceno Temprano, se inicio un episodio de fallamiento extensivo, el cual continua hasta la fecha, originando la disposición fisiográfica actual del estado de Sonora, caracterizado por una serie de sierras y valles paralelos (Basin and Range). Dentro de esos valles, se depositaron sedimentos clásticos continentales de origen fluvial y lacustre, con intercalaciones de vulcanismo basáltico en niveles inferiores, que forman espesores de varios cientos de metros y que son conocidos con el nombre de Formación Baucarit. Un último evento de vulcanismo dentro de los valles de Sonora ocurrió desde el Plioceno hasta el reciente, formando extensas mesetas de basalto.

V.- Geología

V.1.- Geología del depósito El Gachi

El depósito de Pb, Zn (Ag) El Gachi está localizado en la parte centro norte de Sonora, aproximadamente a 15 km al sureste del poblado de Arizpe y a 222 km al noroeste en línea recta de la ciudad de Hermosillo en el estado de Sonora (Figura II.1). El depósito El Gachi se encuentra hospedado en rocas sedimentarias, correlacionables con el Grupo Bisbee, ampliamente reconocido en esta región del estado y el cual ha sido descrito por Ramsone (1904); González-León, (1978) y Lawton *et al.*,(2004).

El Gachi es un depósito que fue explotado primeramente por los padres franciscanos hace más de 300 años. Posteriormente continuó su explotación en forma intermitente desde principios del siglo XX hasta los años 50's y 60's. Subsiguientemente se realizaron trabajos de exploración y evaluación por varias compañías, incluida Anaconda Minerals y en 1977 fue denunciada por la compañía Servicios Industriales Peñoles. Actualmente es propiedad del Grupo Serrana, S. A. de C.V., la cual la tiene opcionada a Minera Hochschild Mining plc, que realizan trabajos de exploración en la actualidad.

El depósito El Gachi es del tipo reemplazamiento con cuerpos estratiformes de Zn-Pb (Cu), que se presentan en sulfuros como galena, esfalerita, calcopirita, así como en óxidos, con mineral de ganga principalmente de cuarzo, calcita y pirita. También se tienen vetas epitermales de baja sulfuración con mineralización de plata, plomo, zinc y antimonio, con valores bajos de oro y cobre. Los cuerpos mineralizados han sido explotados a partir de obras subterráneas con más de 1000 m de desarrollo, actualmente en malas condiciones y la mayoría de ellos inaccesibles debido a derrumbes y puentes en malas condiciones.

De acuerdo con información proporcionada por la empresa Grupo Serrana, S. A. de C. V., concesionaria de los lotes que amparan el yacimiento, la evaluación realizada en últimas fechas y basada en los resultados de previas campañas de barrenación, consistieron en 17 barrenos de diamante y aproximadamente 300 barrenos de percusión, las cuales arrojaron la existencia de reservas indicadas del orden de 195,000 toneladas métricas con leyes promedio de 505 gr/ton de Ag; 10.4 % de Pb y 8.7 % de Zn y reservas posibles del orden de 395,000 toneladas métricas con las mismas leyes (SGM, 2002).

El área de estudio abarca una superficie de aproximadamente 18 km², donde más del 80% de las rocas que afloran en esta zona corresponden a sedimentos calcáreos con

intercalaciones de sedimentos clásticos pertenecientes a la parte media inferior del Grupo Bisbee (Figura V.1). Discordantemente aflora una secuencia de aproximadamente 30 m de espesor compuesto por fragmentos del Grupo Bisbee. Estos forman un conglomerado que cubre una zona muy pequeña en el área del depósito, y el cual puede ser correlacionable con el Conglomerado Picacho descrito por González-León (2000). Hacia el norte y este, las rocas cretácicas están cubiertas por rocas volcánicas cretácicas de la Formación Tarahumara en claro contacto de falla, las cuales a su vez son cubiertas por rocas volcánicas más jóvenes del Terciario. Hacia el SW del área se tienen conglomerados y basaltos de la Formación Báucarit. Las rocas del Grupo Bisbee son las más antiguas expuestas en la zona del Gachi, y se encuentran fuertemente plegadas y autocabalgadas con vergencia de sus pliegues hacia el noreste.

La zona mineralizada en la mina El Gachi se encuentra hospedada justo en el contacto entre las Formaciones Morita y Mural, con silicificación y recristalización que hace distintivos a los cuerpos mineralizados en superficie. En esta sección se describen en detalle las distintas unidades que afloran en el área y se mencionan características geológicas, tectónicas, variaciones texturales y de composición que definen los cuerpos mineralizados, como se puede observar en las Figuras V.1 y V.2.

V.1.1.- Cretácico

V.1.1.- Formación Morita

La unidad litológica más antigua expuesta en el área del Gachi pertenece a la Formación Morita, la cual aflora al noreste y este del área de estudio (Figura V.1). En superficie es fácilmente distinguible por su topografía, aunque encubierta es suave y presenta un color café a verde claro en superficie la cual puede ser fácilmente visible a la distancia. Esta unidad se encuentra formada por una serie de intercalaciones rítmicas de lutitas, con algunos de areniscas finas intercaladas en su parte superior. Alcanza un espesor incompleto, aproximado de 120 m, ya que su base no está expuesta. Hacia el norte-noreste y sur del área, la Formación Morita es cubierta discordantemente por la Formación Tarahumara, aunque normalmente su contacto es por falla (Figura V.1). Generalmente esta formación se encuentra deformada con rumbos variable hacia el NW-SE y NE-SW, con echados variables que van de 30 a 60°, sugiriendo estuvo sujeta a una deformación

compresiva, y a su vez afectada por fallas normales tal como se aprecia en la sección A-A' (Figuras V.1, V.3). En algunas zonas, como sucede en la parte norte-noroeste del área, esta unidad presenta una coloración verdosa con tintes de color ocre, producto de alteración hidrotermal. Es cortada por una serie de vetillas unidireccionales de cuarzo + sulfuros, probablemente relacionado a la etapa mineralizante en el área (Fotografía V.1 a,b). Se observa algo de pirita finamente diseminada en menos del 1%, que ocurrió previo a la mineralización más importante en el distrito.

V.1.1.2.- Formación Mural

La Formación Mural suprayace concordantemente a la Formación Morita; sin embargo, su contacto llega a ser discordante. Aflora principalmente en la parte central del área (Figura V.1), regularmente muestra una topografía abrupta, esto debido a la competencia de la roca, que contrasta con la morfología suave de lutitas de la Formación Morita (Figura V.1). Está compuesta de calizas masivas de color gris, horizontes de limolita intercalados y estratificaciones menores de areniscas finas, que se hacen más abundantes hacia su parte superior. Regionalmente esta formación ha sido dividida en cinco miembros, denominados como Cerro La Ceja, Lutita Tuape, Cerro La Puerta, Cerro La Espina, Mesa Quemada, ha sido propuestas por Lawton *et al* (2004). Dentro del área estudio se identificaron los miembros Cerro La Ceja y Lutita Tuape (Figura V.1), los cuales son descritos a continuación.

V.1.1.2.1.- Miembro Cerro La Ceja

Este miembro es el más característico del área ya que está compuesto de calizas fosilíferas, resistentes a la erosión formando escarpes característicos (Fotografía V.1 c). Su parte inferior consiste de calizas masivas, bioclásticas con espesores entre 20 y 25 m, con un porcentaje conchas de ostras de 15-25%. Hacia su parte superior las calizas tienen hasta un 40% de conchas de ostras por volumen (Fotografía V.1 c, d). El contacto de esta unidad con la Formación Morita es discordante y viene a ser muy importante en el área, ya que esta sirve como una zona hospedante de la mineralización (Figura V.2), observándose en parte como algunos fósiles de este miembro han sido reemplazados totalmente por sulfuros (Fotografía V.1 e). Esta unidad presenta una fuerte silicificación y recristalización en las

El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.

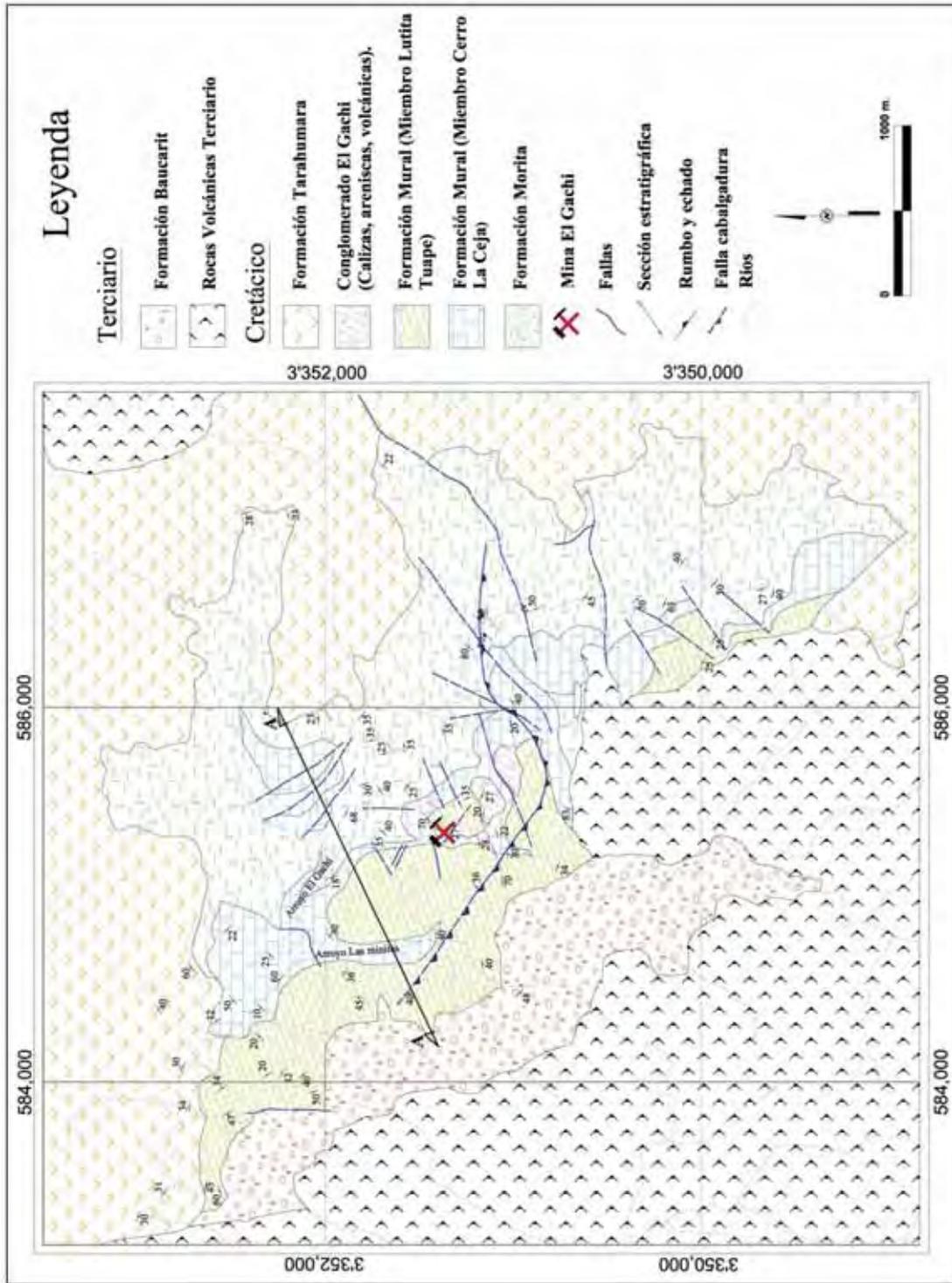


Figura V.1.-Mapa Geológico del área de la mina El Gachi. Escala 1:20 000.

El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.

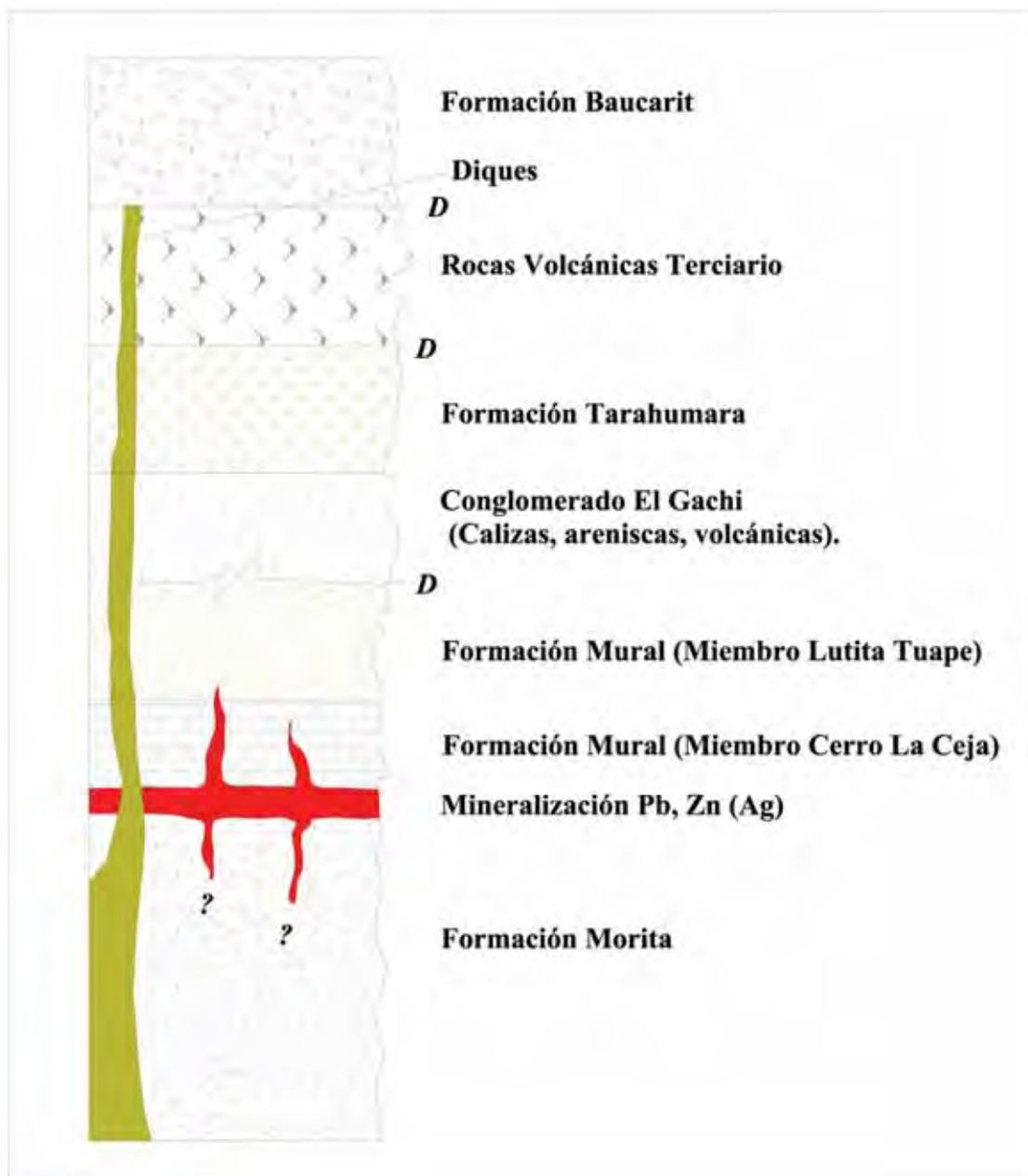


Figura V.2.-Columna estratigráfica del área Mina el Gachi.

partes contiguas a los cuerpos mineralizados, llegando a ser muy penetrativa e intensa en ciertos lugares. Generalmente se presenta deformada teniendo amplios pliegues con sus ejes en una dirección NW-SE y en partes dominado un enrejado de vetillas de calcita-cuarzo con sulfuros, cortando a la unidad y siguiendo la estratificación en el sentido de los mantos mineralizados. El Miembro La Ceja, continua lateralmente de manera ininterrumpida por 5 kilómetros en dirección NW-SE, adelgazándose en su lado sureste, además de ser seccionado por una serie fallas normales con orientaciones NE-SW, hasta desaparecer ser cubierta por las rocas volcánicas de la Formación Tarahumara, como se puede apreciar en la Figura V.1.

V.1.1.2.3.- Miembro Lutita Tuape

Este miembro sobreyace al Miembro Cerro La Ceja y consiste de limolitas y lutitas con estratificación rítmica y algunos lentes de calizas (Fotografías V.2 a y b). Las limolitas ocurren en capas de espesores de 10 a 20 cm y las calizas de 5 a 15 cm en las zonas intermedias y bajas, cambian a espesores de 15 a 30 cm las partes superiores. Toda la unidad presenta un espesor máximo de 150 m. Esta unidad se encuentra cortada por diques de composición dacítica, los cuales no tienen una dirección preferencial aparente. Característico de este miembros es que en la parte S-SW del área cartografiada (Figura V.1), se encuentra deformada en pliegues cerrados, recumbentes con sus ejes orientados en una dirección ENE-WSW preferencial. Se estima que esta deformación es producto de cabalgamiento de esta unidad sobre ella misma, hacia el SW (Figura V.1).

V.1.1.3.- Conglomerado El Gachi

Esta secuencia podría ser correlacionable con la unidad informalmente llamada Conglomerado Picacho por González-León et al. (2000), que aflora a ~7 km al norte del área de estudio, en el Cerro Picacho, está conformada por clastos de caliza (85%), pedernal blanco y negro, areniscas, y rocas volcánicas con una matriz de arenisca de grano grueso, tiene un espesor mayor a 100 m. El conglomerado Picacho, ha sido interpretado como una unidad formada en las cercanías de un ambiente deposicional de tipo abanico aluvial, depositado durante la mayor fase de deformación compresiva que ocurrió en Sonora durante el Cretácico “medio” (Rangin, 1986). Aunque el Conglomerado Picacho y el

El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.

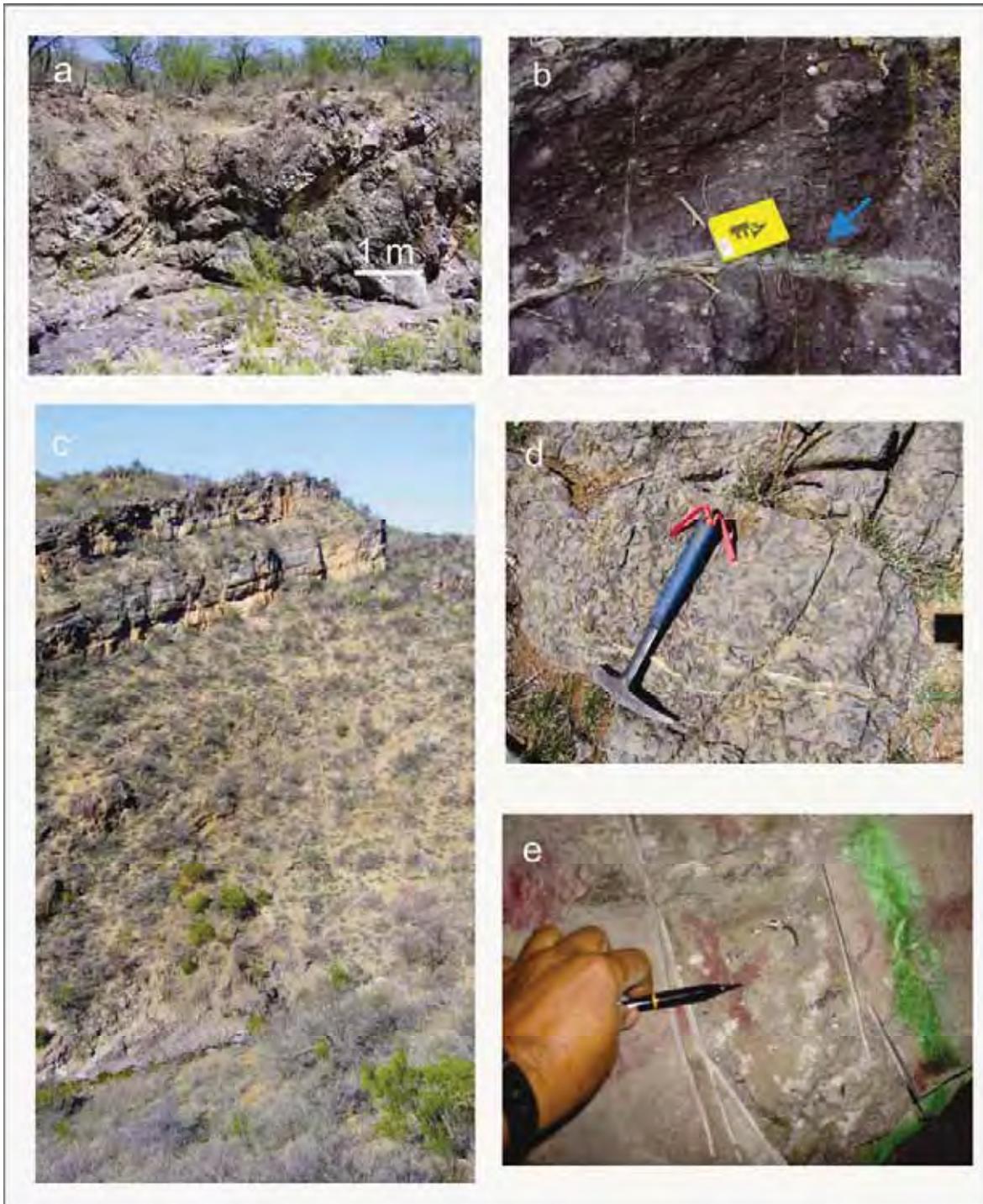
Conglomerado El Gachi, guardan similitudes en la composición, se tiene una marcada diferencia con la unidad originalmente descrita, presenta una deformación contemporánea con la del Grupo Bisbee, que no se observa en el área de estudio.

El Conglomerado El Gachi, se encuentra sobreyaciendo discordantemente a las rocas de los miembros La Ceja y Tuape (Fotografía V.3), observándose bien consolidada, pobremente clasificada, mostrando un leve basculamiento hacia el noroeste y conformada principalmente por un conglomerado polimictico que a su vez presenta intercalaciones de niveles composicionales variables (sedimentarios y volcanoclasticos) así como presencia de pedernal de color negro y blanco (Fotografía V.4a, d). Esta unidad contiene clastos pertenecientes al Grupo Bisbee, caracterizados por fragmentos de caliza pertenecientes a la Formación Mural principalmente, con tamaños que varían desde 3 – 20 cm, y compuestos de limotita presentando formas angulosas a semiredondeados (Foto V.4c). En menor cantidad se encuentran lentes con clastos de roca volcánicas de diferentes tamaños y formas mayormente angulosos, sostenidos en una matriz arenosa de grano grueso (Fotografía V.4b).

V.1.2.- Cretácico Tardío

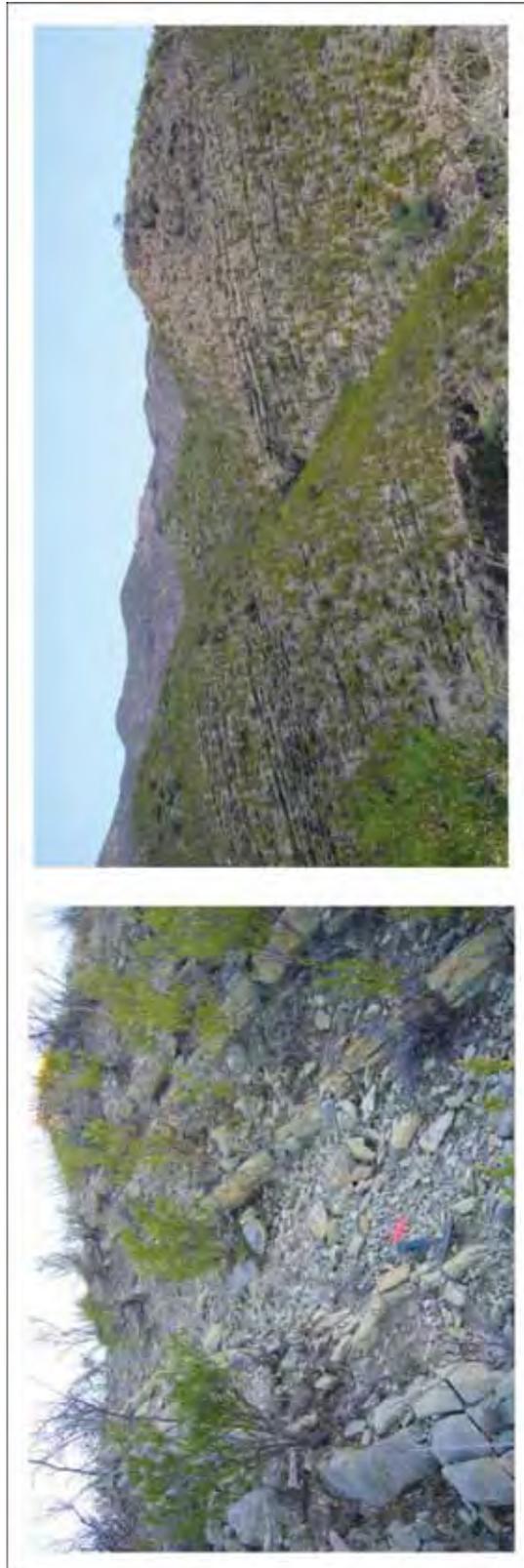
V.1.2.1.- Formación Tarahumara

Las rocas volcánicas pertenecientes a la Formación Tarahumara se encuentran al norte, este y sureste del área de estudio (Figura V.1), presentando un rumbo general de sus capas NW-SE y echados constantes hacia el NE. Cubren las rocas correspondientes al Grupo Bisbee, compuesta principalmente de andesitas y dacitas con intercalaciones de volcanosedimentos los cuales, se encuentran compuestos de fragmentos de rocas volcánicas, líticos de pómez, fragmentos de cuarzo y cristales de feldspatos parcialmente alterados (Figuras V.5a, b, c y d). Esta formación se presenta discordantemente encima de las rocas del Grupo Bisbee (Figura V.5e). Estas rocas pueden ser correlacionables con los flujos andesíticos informalmente nombrado como Arroyo Alcaparros, localizados al norte del área de estudio y fechados por el método Ar^{40}/Ar^{39} con una edad de 72.1 ± 0.4 y 69.1 ± 0.4 Ma (González-León et al. 2000).



Fotografía V.1.- (a).-Areniscas de la Formación Morita afectados por fallamiento normal. (b).-Halo de alteración producido por a la introducción de fluidos mineralizantes con orientación NE-SW dentro de limolitas rojizas de la Formación Morita, cortado por vetillas de calcita con orientación N-S (c).-Caliza Mural, Miembro Cerro la Ceja. Presentando sus escarpes característicos. (d).-Caliza bioclastica con conchas de ostreas del Miembro Cerro La Ceja (e).-Fósiles reemplazados por sulfuros en caliza Cerro La Ceja, dentro de Socavón Amavisca.

El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.



Fotografía V.2.- (a).-Fotografía mostrando afloramientos típicos del Miembro Lutita Tuape en el área de estudio con deformación e intemperismo. (b).-Afloramientos de miembro Lutita Tuape.

El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.

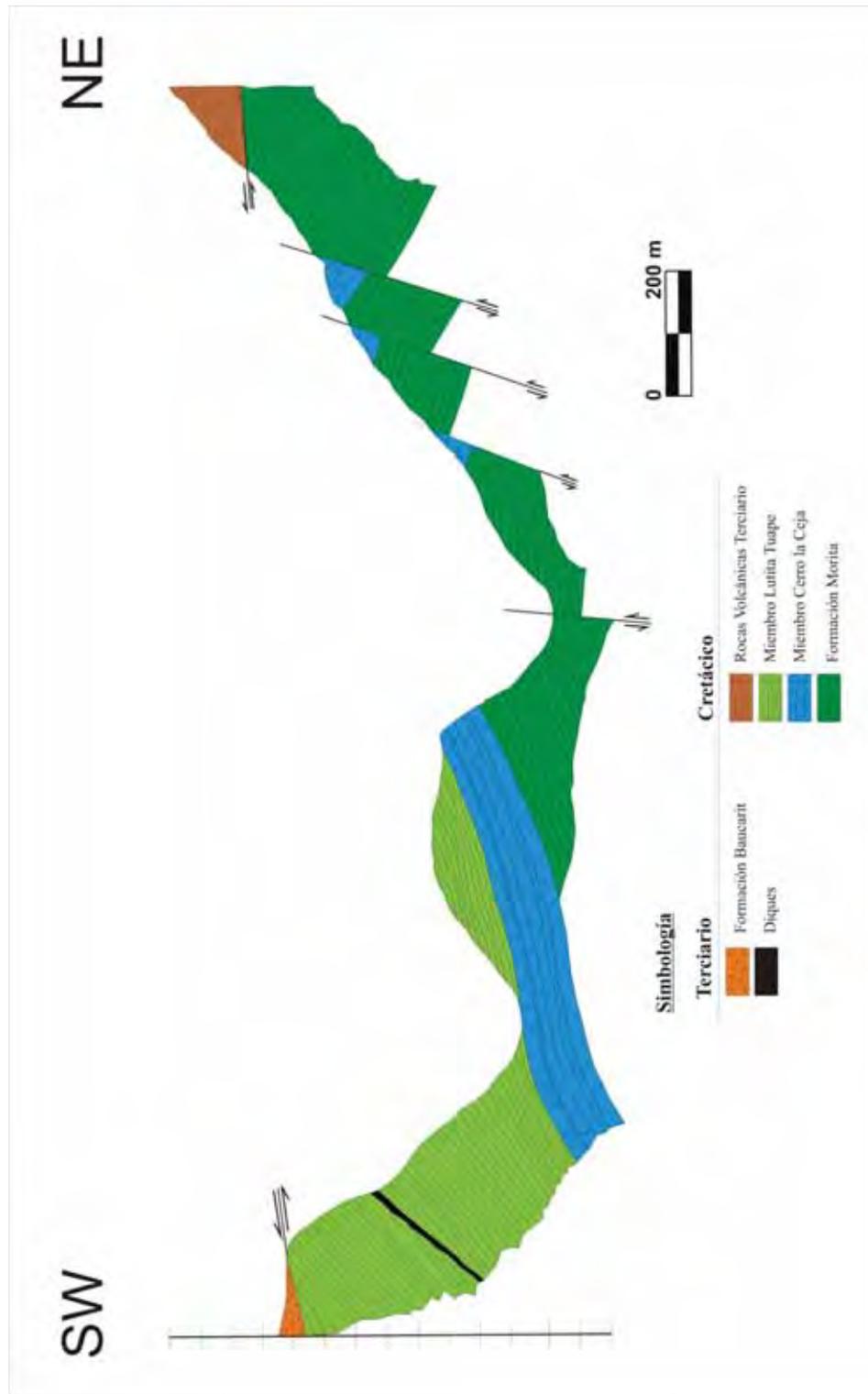
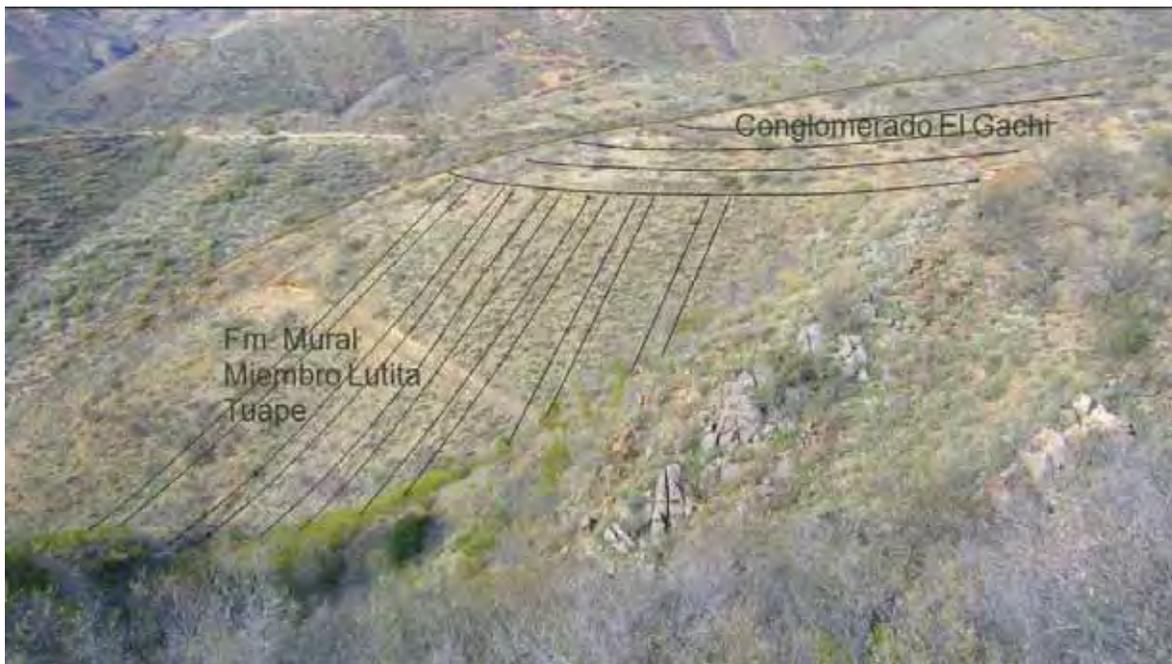


Figura V.3.-Sección geológica del área de estudio A-A', mostrando el juego de fallas normales que seccionan las unidades en el área de estudio.

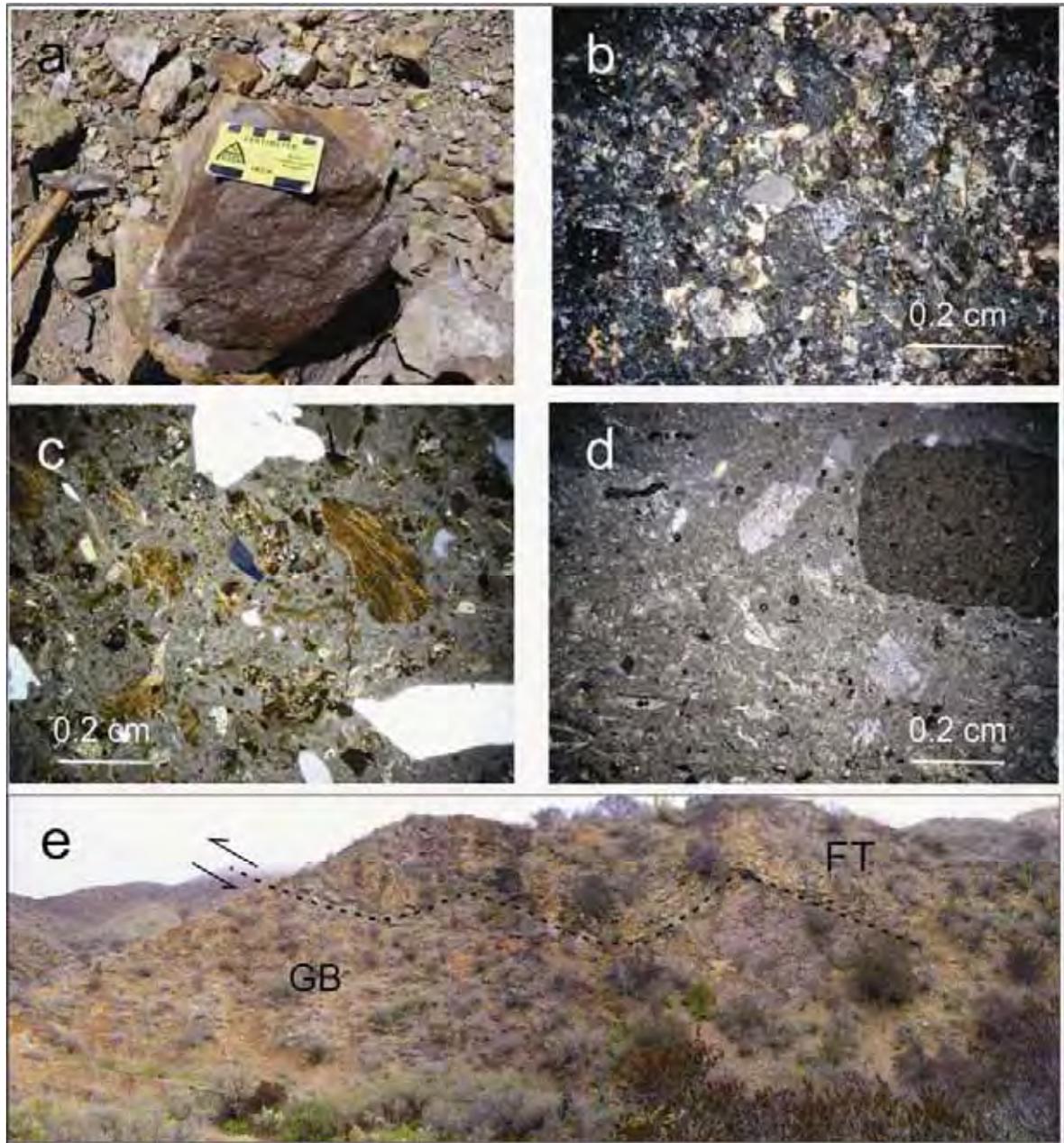
El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.



Fotografía V.3.-Fotografía mostrando al Conglomerado El Gachi, el cual puede ser correlacionable con el Conglomerado Picacho descrito por González-León et al.,(2000). Note como estos sedimentos descansan de manera discordante encima del Miembro Lutita Tuape.



Fotografía V.4.- (a).-Sedimentos pertenecientes al Conglomerado El Gachi, encima del Grupo Bisbee brechados bien consolidados. (b).-Areniscas de cuarzo a la base de los sedimentos. (c).- Conglomerado polimíctico con clastos angulosos pertenecientes al Grupo Bisbee. (d).-Rocas sedimentarias dentro de arenisca mal clasificada.



Fotografía V.5.- (a).-Fragmento de roca tobácea de Formación Tarahumara. (b).- Microfotografía de una toba lítica Se Observan clastos de fragmentos volcánicos, cristales de pómez y fragmentos de cuarzo. (c).- Microfotografía con líticos de pómez, cristales cuarzo y feldespatos parcialmente alterados. (d).-Fotografía con líticos de gran tamaño. (e).-Fotografía mostrando discordantemente las rocas de la Formación Tarahumara (FT) sobre Grupo Bisbee (GB).

V.1.3.- Terciario

Las rocas volcánicas terciarias presentes en el área de estudio están compuestas de flujos de composición andesítica y basáltica los cuales se asocian a vulcanismo del oligoceno (Figuras III.1 y V.1), con espesores dentro del área de estudio del orden de 50-120 m (Fotografía V.6). En varias localidades se puede observar como estas unidades volcánicas se presentan discordantemente sobre las rocas sedimentarias del Grupo Bisbee (Fotografía V.6a) y en claro contacto estructural por falla normal. Estas rocas afloran mayormente en la parte sur del área cartografiada, forman topografías elevadas con formas suaves, su color es característico de tonos grises a oscuros y tienen un basculamiento hacia del noroeste de 25°. En la parte norte del área forman las partes superiores de los cerros y están representados por flujos basálticos, acompañados en menor proporción por flujos de composición andesíticos los cuales sobreyacen discordantemente los paquetes volcánicos de la Formación Tarahumara. En la Fotografía V.6b se aprecia un corte petrográfico de un basalto, presentando olivinos con oxidación parcial a total y un arreglo desordenado de plagioclasas.



Fotografía V.6.- (a).-Rocas volcánicas terciarias en discordancia (D) encima de los sedimentos del Grupo Bisbee. (b).-Roca basáltica presentando plagioclasas y feldespatos potásicos, sin arreglo preferencial y olivinos oxidados.

V.1.3.1.- Diques

Dentro del área de estudio se presentan una serie de diques de composición andesítica con espesores entre de 0.5 y 1.7 m. Estos diques cortan lo estratos mineralizados (Foto V.7a), rocas de la Formación Mural (Miembro Cerro La Ceja y Tuape) como sucede en las obras mineras Amavisca (Figura V.7a) y Ana Dolores. También se encuentran cortando las secuencias volcánicas del Oligoceno hacia el SW del área de estudio (Fotografía V.7b, c), donde estos presentan intemperizadas (Fotografía V.7d). Localmente se caracterizan por una textura traquítica con cristales de oligoclasa – andesina, parcialmente sericitizados, hornblenda epidotizada, así como epidota y micrita relleno las vesículas; todos los diques presentan una orientación preferencial hacia NE, típico de este tipo de diques (Fotografía V.7e, f). Por relación de corte se cree que estos diques fueron emplazados en zonas de debilidad a causa de fallas normales, pertenecientes a eventos de extensión de edad oligocena, y posiblemente están asociados a los basaltos de la Formación Báucarit. Estos diques son correlacionables con lo que se encuentran en el cuadrángulo Bacanuchi – Arizpe (González-León *et al.* 2000), que son de composición andesita-basalto. Teniendo una orientación noroeste, presentando anchos máximos de 5 m y hasta 4 km de longitud, donde se presentan cortando todas las unidades descritas, con excepción de los conglomerados de edades menores a 25 Ma.

V.1.3.1.- Formación Báucarit

Hacia la parte centro-oeste del área, se presenta una secuencia semejante a la Formación Báucarit, formada por conglomerados polimícticos, compuestos de clastos de rocas volcánicas, con tamaños variables que van desde 5 hasta 40 cm, todos ellos sostenidos en una matriz arenosa compuesta de material volcánico, con intercalaciones de flujos de composición basáltica y andesítica. Esta unidad es descrita como Conglomerado Arizpe el cual se compone por una unidad de conglomerados bien compactados, con intercalaciones de areniscas finas a medias, brechas, flujos basálticos, todo estas unidades llegan a exceder los 1000 m de espesor; las brechas y flujos basálticos generalmente están localizados hacia la base de la secuencia (González-León, 2000)



Fotografía V.7.- (a).- Diques (D) de composición andesítica, cortando rocas del Grupo Bisbee y mineralización dentro de obra Amavisca. (b).-Diques cortando Lutita Tuape. (c).- Afloramiento del dique que corta al Miembro Tuape. (d).- Mostrando superficie de intemperismo de dique de composición andesítica. (e).- Microfotografía de lamina petrográfica, nicoles cruzados, mostrando textura traquita, plagioclasas con orientación preferencial y epidotización de hornblendas. (f).-Microfotografía de lámina petrográfica en nicoles paralelos mostrando los diques, con un arreglo de plagioclasas semi-ordenado y epidota relleno de las vesículas.

El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.

Dos muestras de basalto analizadas presentan edades Ar^{40}/Ar^{39} 23.52 ± 0.17 Ma y 21.7 ± 0.20 Ma (González-León *et al.* 2000). Hacia el sur del área de estudio, aflora una secuencia formada principalmente de una secuencia de conglomerados, los cuales difieren en su composición con los anteriormente descritos y aparentemente depositados en cuencas aisladas, pero que podría considerarse como contemporáneos con la Formación Báucarit.

V.2.- Geología estructural en el área de la mina El Gachi

Los eventos tectónicos se iniciaron con la fase compresiva “mesocretácica” (Rangin, 1977), la cual está caracterizada en la región con acortamientos por fallas de cabalgamiento y pliegues con vergencia al noreste (González-León *et al.* 2000), que afectaron a las rocas correspondientes al Grupo Bisbee y a la Formación Tarahumara. Esta deformación se le ubica posterior al Albiano, ya que esta es la edad más joven para el Grupo Bisbee en esta área (González-León *et al.* 2000).

La deformación dentro del área de estudio, se caracteriza por la presencia de un sistema de fallas normales las cuales tienen una orientación preferencialmente hacia el NE-SW y NW-SE (Figuras V.1 y V.4), donde aparentemente las primeras cortan a las segundas. Dentro del área se encuentra un enrejado de vetillas rellenas por calcita, y cerca de las zonas mineralizadas presentan sulfuros y cuarzo, estas estructuras tienen una orientación NE-SW que a su vez son cortadas por vetillas con orientación N-S (Fotografía V.1b) esto nos indicaría que posiblemente exista más de un evento de mineralización en el área.

En la Figura V.4 se presenta un levantamiento geológico a escala 1:5000, realizado en las zonas superficiales del área mineralizada del depósito El Gachi. Se puede observar que una falla de cabalgamiento es la principal estructura que domina el área, tiene una orientación general NW-SE. En la parte central su traza tiene una inflexión aparente, dada por la erosión de la zona, curvándose hacia el NE-SW; pero siempre manteniendo su echado hacia el NW-SE. Hacia el norte de la falla, los miembros Cerro La Ceja y Lutita Tuape se encuentran con actitudes horizontales a semi-horizontales, con una ausencia o débil deformación; mientras que hacia la zona sur de la falla, se encuentran altamente deformados. Hacia el SSE de la falla, se puede observar como los estratos de caliza se encuentran casi verticales, teniendo un rumbo E-NE y un echado de $60-80^\circ$ (Fotografía V.8e). Los estratos de caliza se encuentran deformados siguiendo el patrón o la traza de la

falla de cabalgamiento. A su vez se observa que en corta distancia los estratos de calizas cambian de verticales hacia el SE de la traza de la falla a semi-horizontal al NW de la misma. La Figura V.5 muestra que una dirección de esfuerzos hacia el NE provocó un plegamiento del miembro Cerro La Ceja llegando hasta un límite en que, debido a su competencia paso de un régimen dúctil a uno frágil. Por consiguiente esta unidad se falló poniendo en un espacio reducido capas de la caliza con una actitud casi vertical (SE de la sutura); con el mismo miembro Cerro La Ceja, con actitud casi horizontal hacia el NW de la sutura. También es muy evidente la deformación que sufre el Miembro Lutita Tuape, esto debido a su menor competencia, hacia el SW de la sutura de cabalgamiento, donde se presentan pliegues cerrados (Fotografía V.8a, c, d). Estructuras de “crayón”, los cuales son indicadores cinemáticos, muestran la orientación de los esfuerzos de plegamiento (Fotografía V.8b) que van en un sentido NE. Se presentan auto cabalgamiento del Miembro Lutita Tuape (Fotografía V.8e), junto con un estructuras de deformación formada por la falla de cabalgamiento, que es la más fácil de observar en el área más cercano al depósito (Fotografía V.8f). Como se puede apreciar hacia el centro de la figura, en contacto hacia el norte de la sutura de la falla; las rocas del Miembro Lutita Tuape se encuentran poco plegadas, con rumbos y echados, que siguen el patrón de la inflexión generada por la falla inversa. Esta estructura puede ser seguida hacia el NW del área, hasta perderse debido a la cobertura que tienen con unidades más recientes, mostrándose como inferido el contacto en la Figura V.1.

V.3.- Mineralización

V.3.1.- Generalidades

Los depósitos minerales de reemplazamiento, históricamente han sido llamados “*depósitos de reemplazamiento de carbonatos*” (Prescott, 1926; Fletcher, 1929); debido a su contacto rocas carbonatadas encajonantes, y la abundancia de evidencia textural de reemplazamiento. También nombrados como “*skarn distales de Pb-Zn*” (Einaudi *et al.*, 1981; Einaudi y Burt, 1982) debido a su baja proporción ($\leq 30\%$) de minerales calcosilicatados. Más recientemente se propuso el nombre de “Depósitos de alta temperatura, hospedados en rocas carbonatadas” (Megaw *et al.*, 1988; Titley, 1993; Gilg 1996), ya que

El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.

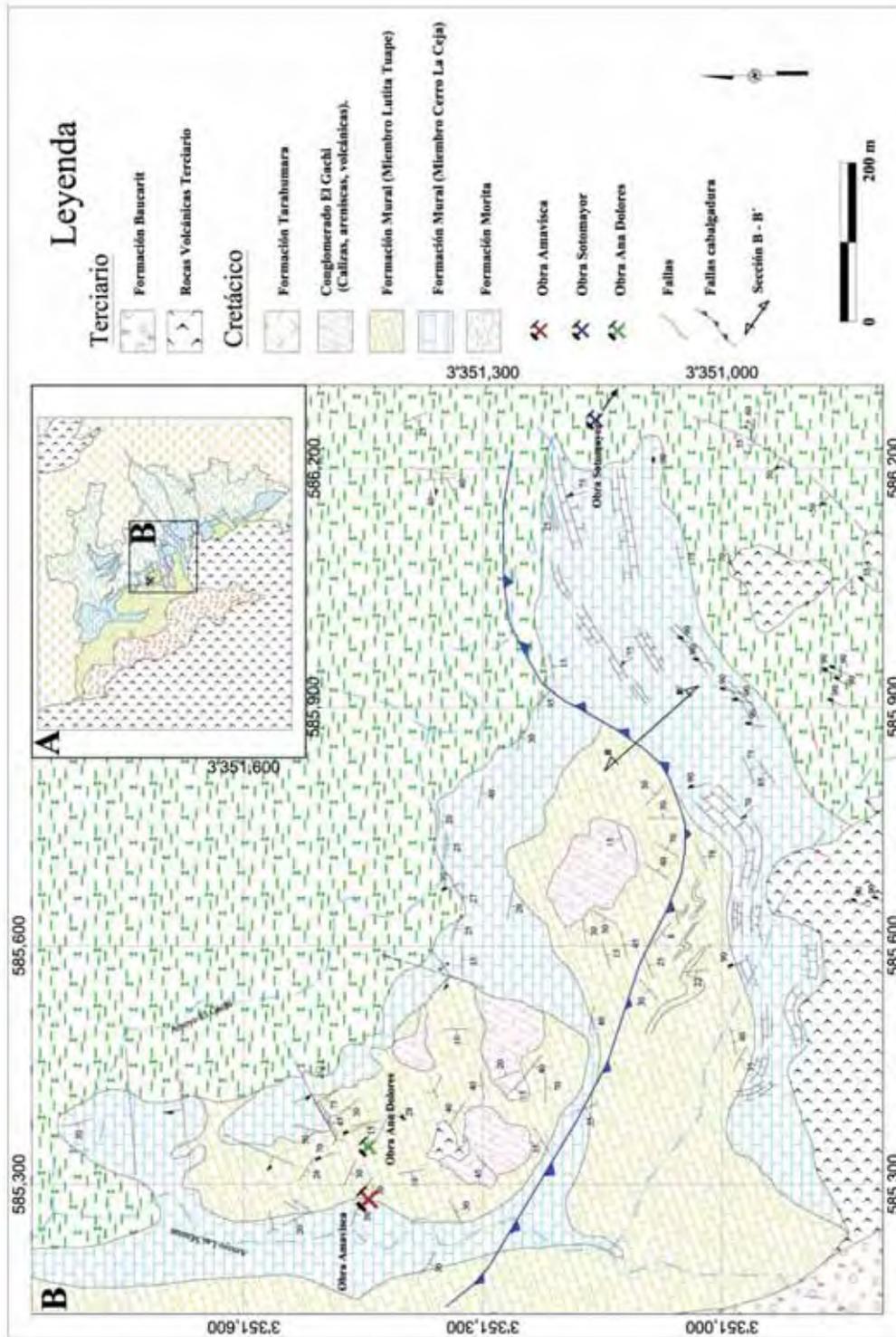


Figura V.4.-Mapa Geológico detalle zona mineralizada El Gachi (1:5000).

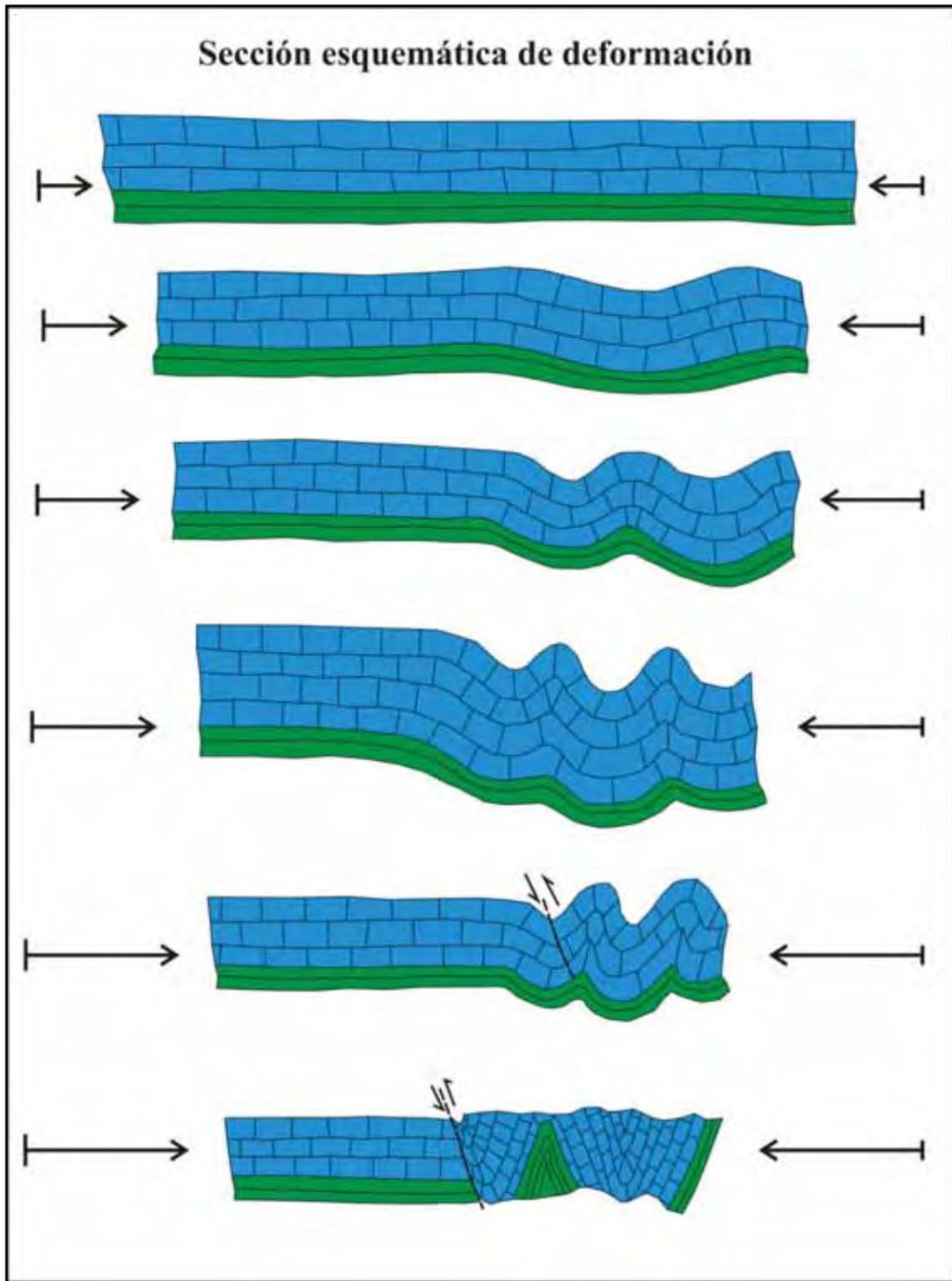
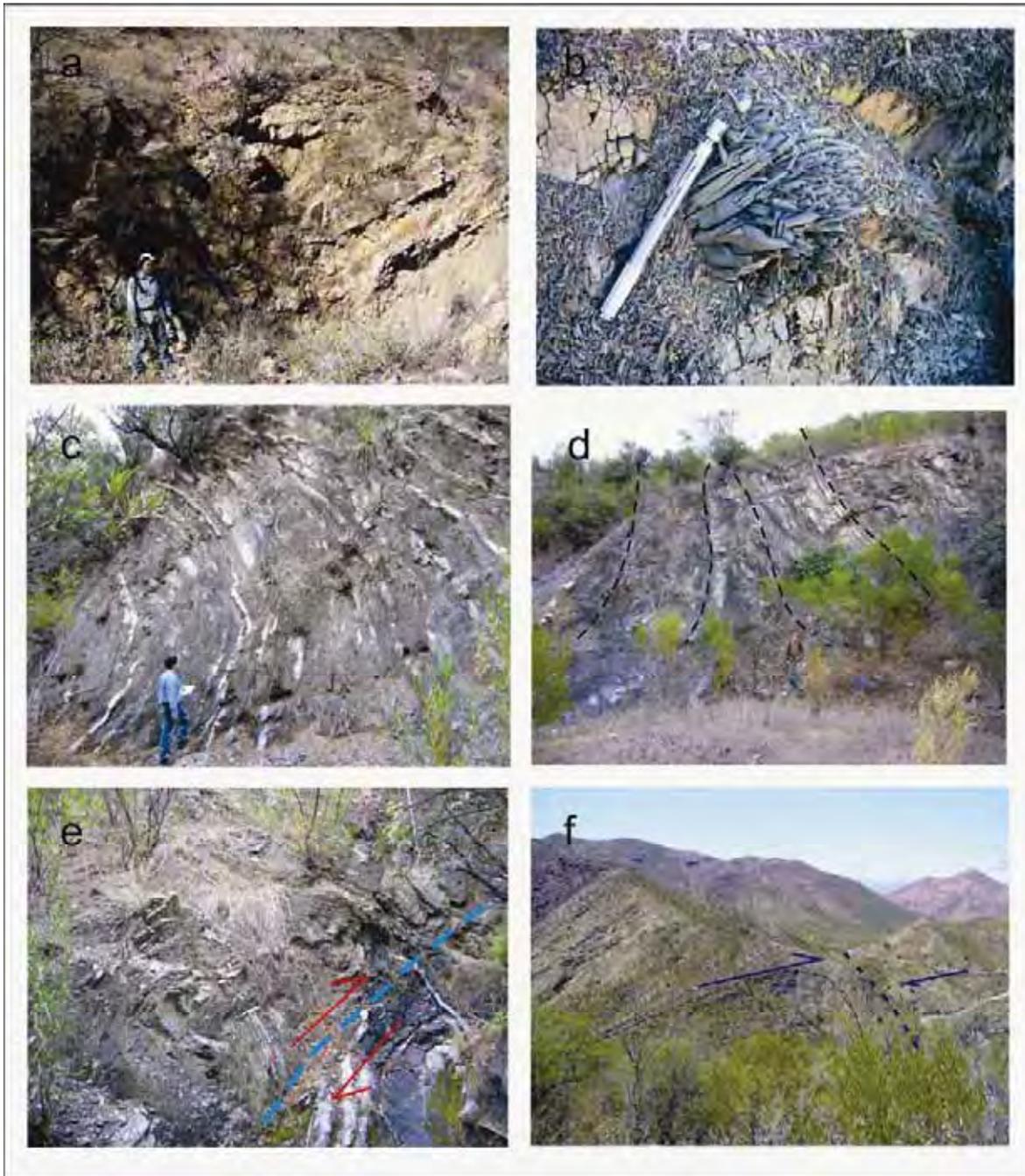


Figura V.5.-Sección B-B' mostrando la deformación propuesta para el área de estudio, con una dirección hacia el NE. (Ilustrado en Figura V.4).



Fotografía V.8.-Deformación en el área, por cabalgadura. (a).-Miembro Tuape plegada hacia el oeste del área. (b).-Indicadores cinemáticos de estructura de crayón mostrando el sentido esquistosidad por pliegue. (c).-Plegamiento del Miembro Tuape. (d).-Pliegue cerrado en Miembro Tuape. (e).-Deformación y cabalgadura de Miembro Tuape sobre sí mismo. (f).-Deformación del Miembro Tuape.

engloban a los depósitos de skarn con las menas de sulfuros masivos y previene la confusión con los depósitos de “Valle de Mississippi”, depósitos sedimentarios exalativos, depósitos sedimentarios estratiformes de Cu-Pb-Zn, depósitos de pórfido de cobre, depósitos volcanogénicos de sulfuros masivos y vetas de Ag, Pb, Zn.

Los depósitos de mena se caracterizan por ser formados a “altas temperaturas”, las cuales varía de ≥ 200 a 480 °C (Megaw, 1988; Titley, 1993; Gilg, 1996); a su vez existe evidencia de que estos tienen un origen epigénético. Su alteración es usualmente baja en minerales calco-silicatados, y la alteración habitualmente está constituida por silicificación de las rocas carbonatadas encajonante. Se forman en zonas distales a rocas intrusivas félsicas relacionadas a subducción continental, en ambientes de trasarco, los cuales en su mayoría pertenecen a edades del Mesozoico al Terciario (Einaudi et al., 1981; Sawkins, 1984; Graybeal et al., 1986). Por lo tanto sobreyacen un basamento cratónico, ninguno de estos ha sido reportado como parte de un terreno marginal acrecionado o relacionado a un arco de islas (Titley, 1993). La fuente de los metales, se cree que es híbrida (Megaw, 1988; Gilg, 1996), y puede variar de fuentes magmáticas a rocas encajonantes, donde la lixiviación tienen un proceso importante. Los cuerpos de mena son fuertemente controlados por el patrón estructuralmente (a lo largo de fallas junto con rocas carbonatadas) y/o litológicamente controladas. Las menas son “masivas”, generalmente contienen una gran cantidad de sulfuros masivos, llegando a alcanzar >50 %, dominados por sulfuros de hierro; las menas de Pb-Zn presentan asociaciones de galena, esfalerita, piritita y siderita, mientras que los cuerpos de Cu presentan calcopiritita, piritita, pequeñas cantidades de pirrotita y un grupo de minerales de plata dominados por hessita y tetraedrita argentífera (Titley, 1993). Virtualmente todas las menas presentan una zonación de los metales, los cuales tienen diferentes escalas como son discutidos por Titley (1993), en estos lugares las menas de reemplazamiento son distales al intrusivo o centro termales y están estructuralmente controlados. Los metales de mena presentan una zonación a kilómetros, como se presenta en Tintic, Utah, con menas Cu-Ag cercano a las intrusiones, menas de Pb-Ag en partes intermedias y menas de Pb-Zn en zonas distales a los propios intrusivos. En Gilman Colorado, los cuerpos de mena presentan una zonación de Cu-Ag cercano a los intrusivos y una asociación mineral de Pb-Zn-Ag, alejado a cientos de metros del mismo. La alteración más importante encontrada en los sistemas de reemplazamiento es la modificación de las

El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.

rocas carbonatadas; esta modificación va desde una recristalización a un cambio isoquímico en la roca, blanqueamiento, hasta la remoción del cementante carbonatado de la roca, esto en algunas partes de las secciones carbonatadas.

Las proporciones de los metales presentes en estos depósitos están ejemplificadas en la Figura V.6. Este diagrama fue propuesto por Titley (1993), para tratar de agrupar rangos de composición aproximadas para cada región. Los depósitos pertenecientes a la Cordillera Mexicana se ubican en los estados de Chihuahua y Coahuila principalmente, los cuales se caracterizan por ser pobres en Cu, pero con valores casi similares de Pb y Zn. Mientras que los depósitos de la “Gran Cuenca” (SW USA), están caracterizados por distritos distintivos y aislados, ricos en Pb como lo son Bingham Canyon y Tintic en Utah, Eureka y Aurum en Nevada, entre otros. Tomando en cuenta los valores que publicados por Minera Serrana, El depósito El Gachi se encuentra entre estas dos regiones anteriormente mencionados, la cual ubica muy bien geográficamente hablando.

V.3.2.- Depósito El Gachi

El depósito El Gachi tiene 195,000 toneladas probadas y leyes promedio de 505 g/t de Ag; 10.4 % de Pb, 5.3% de Zn y 0.017% de Cu, con un total de 395,000 toneladas posibles con leyes similares (SGM, 2002). El Gachi es uno de los pocos depósitos típicos de reemplazamiento de alta temperatura hospedados en calizas que ocurren en la parte centro-norte de Sonora. Su mineralización es simple, con presencia de sulfuros como galena, esfalerita, pirita, pirrotita, con cuarzo y calcita como minerales de ganga.

V.3.2.1.- Mineralización de reemplazamiento

La mineralización de reemplazamiento en la depósito El Gachi se presenta en diferentes formas, como lo son relleno de estructuras de fallamiento inverso las cuales se encuentran mineralizadas, encontrándose casi verticales y parecen haber servido como conductos alimentadores, atravesando la Formación Morita, estas estructuras en zonas superiores cambian a mantos reemplazando las rocas calizas del Miembro Cerro La Ceja, y parte inferior de las rocas limolíticas y arcillosas del Miembro Lutita Tuape, siguiendo burdamente la estratificación. También se presentan mantos mineralizados, dentro del los miembros Cerro La Ceja y Lutita Tuape. La formación de estos mantos se explica a que los

fluidos mineralizados tuvieron una reacción favorable dentro de estas unidades que son mas carbonatadas. En las partes superiores dentro del Miembro Cerro La Ceja, específicamente en la Obra Ana Dolores se observan como las estructuras semiverticales las cuales sirvieron como alimentadores a la mineralización, están aparentemente atravesando a los mantos mineralizados, esto nos indica que las estructuras semi-verticales se formaron en primera instancia, y que los mantos mineralizados fueron posteriores (Figura V.9).

En superficie las rocas hospedantes de la mineralización (Formaciones Morita y Mural) se arreglan en una dirección NW-SE por efecto estructural y son seccionadas por una serie de fallas con dirección preferencial NE-SW como se puede apreciar en la Figura V.1.

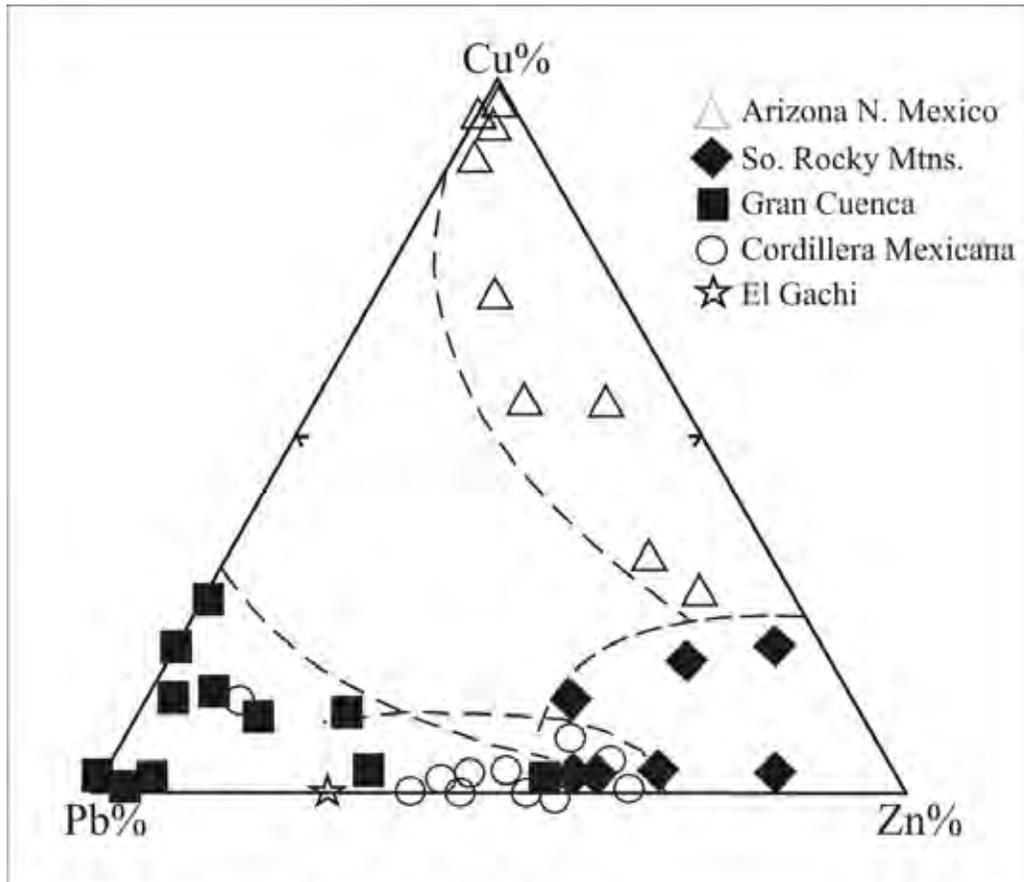


Figura V.6.-Diagrama ternario de las proporciones aproximadas de Pb-Zn-Cu de distritos selectos. Líneas punteadas agrupan rangos de composición aproximadas para cada una de las regiones (Modificado de Titley, 1993).

Prácticamente los cuerpos mineralizados no afloran en superficie y solo se pueden apreciar zonas recristalizadas muy puntuales y erráticas, acompañadas con escasa presencias de vetillas de calcita encima de los cuerpos de reemplazamiento y justo dentro de las rocas calcáreas del Miembro La Ceja forman zonas con débil presencia de óxidos de hierro del tipo limonitas. En las partes más bajas topográfica y estratigráficamente del área, como sucede en la parte NW del arroyo El Gachi en el área cartografiada (Figura V.4), se tienen una serie de vetillas de calcita-cuarzo + sulfuros, las cuales tienen una dirección preferente NE-SW, cortan a la Formación Morita y desarrollan cierto blanqueamiento en sus cercanía como indicativo de alteración (Fotografía V.1b), esto se observa muy bien dentro de la obra Sotomayor (Figura V.7).

Aunque dentro del área de mayor interés económico se observan varias obras mineras, regularmente escarbaderos y trabajos de baja escala, la de mayor desarrollo corresponde al frente La Amavisca. Esta obra se encuentra localizada justo en el centro del área cartografiada (Figura V.1, V.8), puede tener más de 400 m de desarrollo y sigue un nivel más o menos a la altura del contacto entre los miembros La Ceja y Tuape. Las estructuras mineralizadas, tipo veta y mantos, tienen espesores que varían de 2 a 10 m y unos 100 m de ancho y 500 m de largo aproximadamente. Levantamiento geológico a detalle de esta obra, muestra como los cuerpos de Pb-Zn son orientados burdamente en una dirección NE-SW, en el mismo sentido que la serie de vetillas con sulfuros, observadas en superficie, los cuales parecen ser indicadores de posibles conductos alimentadores, con una serie de fallas con dirección preferencial N-S y NE-SW las cuales parecen cortar a los mantos, seccionándolos y en parte cortando toda continuidad lateral (Fotografía V.1b). Observaciones dentro de esta misma obra, indican que la mineralización fue controlada tanto estructuralmente como litológicamente, como se observa dentro o cerca de los cuerpos de reemplazamiento donde se ve como una serie de vetillas con sulfuros corta a la roca hospedante ortogonalmente a su echado lo que permite establecerse la mineralización dentro de horizontes más favorables, generalmente calcáreas. Regularmente las rocas alrededor de los cuerpo mineralizados (vetas y mantos) se observan recristalizadas (Fotografía V.9 b), con zonas silicificadas, con cierta tendencia a incrementarse la intensidad de recristalización hacia los niveles más superiores, y calcáreas, donde parte de los fósiles presentes se encuentran completamente reemplazados por sílice. En el frente

El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.

Amavisca se observa como cercano a los cuerpos mineralizados, se tienen zonas fracturadas variando en intensidad y en parte semejando brechas del tipo “crackle breccia”, que parece ser producto de un evento de disolución de rocas calcáreas asociada a la etapa de mineralización. Por otro lado, se tienen algunos indicadores principalmente texturales y mineragráficos (Fotografía V.10a, b, c, d, e, f), que sugieren que la mineralización fue emplazada en una zona de debilidad, en este caso una falla de compresión relacionada a los eventos del “meso-cretácico”, la cual parece haber sido reactivada, pero como falla normal ya que la mineralización presenta una deformación de arrastre, esto podría haber sucedido en alguna de las etapas de distensión que registra el estado de Sonora.

V.3.1.2.- Mineralización epitermal

En la parte superior del Miembro La Ceja, se observan zonas brechadas, fracturadas y fuertemente silicificadas, las cuales parecen corresponder a un evento hidrotermal del tipo epitermal de baja sulfuración, que es contemporáneo o ligeramente posterior al evento de reemplazamiento. Esto podría explicar los valores anómalos de Au, y Ag que reporta Minera Serrana, debido a que coinciden con el tipo de mineralización presente en estos sistemas. En el área de estudio, este evento se representa por la presencia de una fuerte silicificación de las calizas, formación de drusas de cuarzo, acompañada de una oxidación, el cual está constituido por zonas fracturadas y en parte brechadas con presencia de calcita reemplazada por sílice conocida como calcita hojosa “*bladed calcite*”. La formación de esta textura está asociada a eventos de ebullición donde la disminución de la temperatura en el fluido, causa un aumento de la solubilidad de CaCO_3 y a su vez de CO_2 en el sistema, provocando que el sistema se sature en carbonatos. Causando una precipitación súbita de calcita en el sistema, presentando formas no muy comunes; posteriormente esta calcita es reemplazada por cuarzo. Este tipo de texturas son típicas de los sistemas de baja sulfuración; también se tiene cuarzo calcedónico de baja temperatura y estructuras de brechamiento tipo explosivo. Estas características son complementadas con la presencia de estibinita, pirita, Au en traza y un enrejado de vetillas de cuarzo lechoso con una orientación similar al rumbo de las estructuras presentes que se presumen que son posteriores o son debido a una reactivación del sistema.

El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.

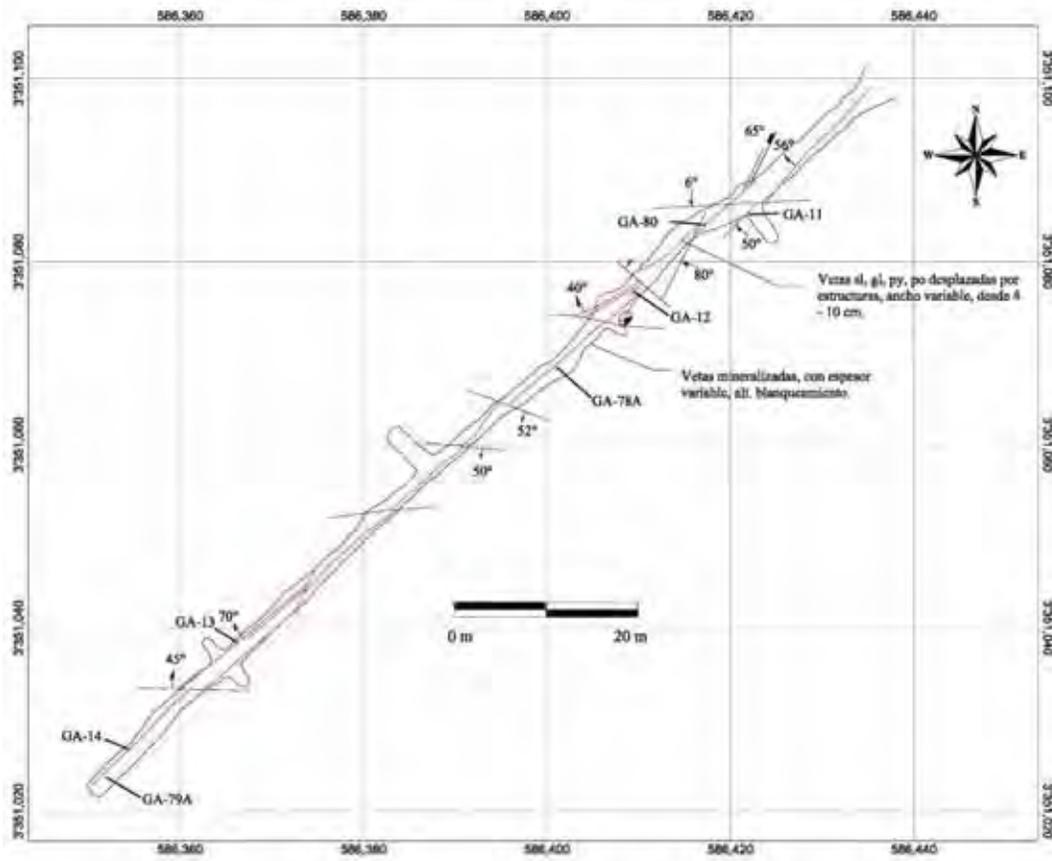


Figura V.7.-Obra Sotomayor, localizada al E-NE del área de estudio, escala 1:500.

El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.

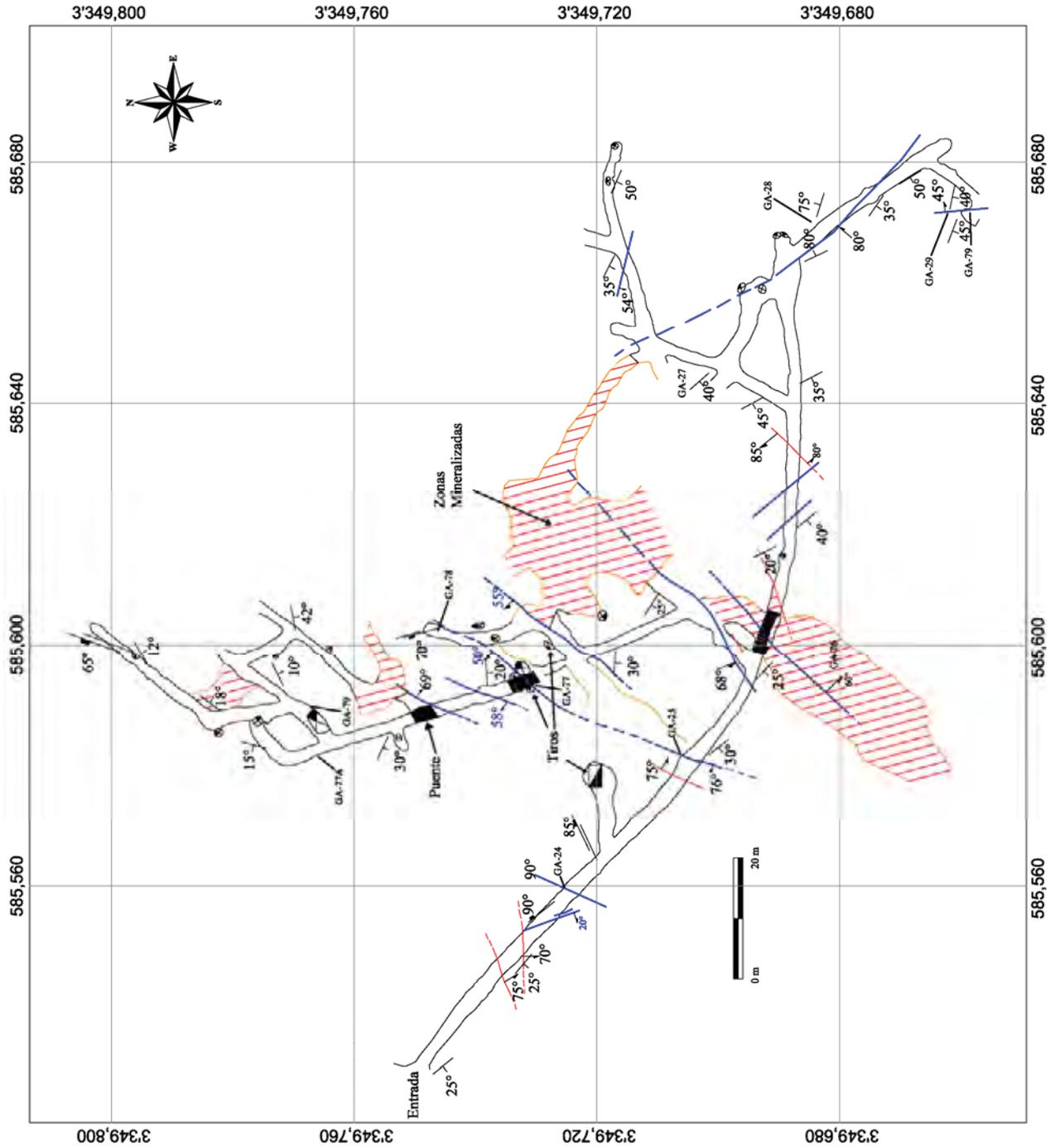


Figura V.8.-Interior mina de la obra Amavisca, escala 1:500. Note como los cuerpos de mena (achurado rojo) están orientados en una dirección NE-SW, y parecen limitados o cortados por estructuras en la misma dirección.

El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.

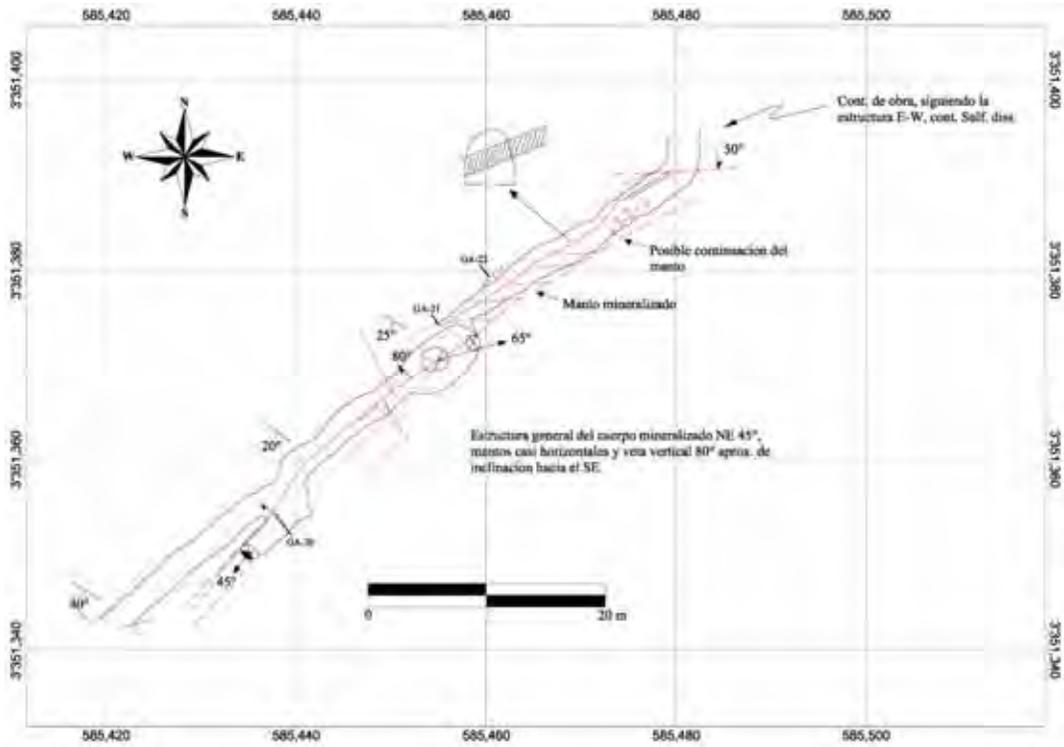


Figura V.9.-Obra Ana Dolores, localizada ~10 m encima de la obra Amavisca Fig. 12. Escala 1:500.

El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.

La estibinita es un mineral típico en estos sistemas ya que por ser de baja temperatura, no podría corresponder al sistema de reemplazamiento. En superficie se puede observar la presencia de estibinita en forma de relictos o “fantasmas”, con formas radiales presentes en la caliza silicificada (Fotografía V.9a, b); sin embargo, a profundidad se manifiesta en vetillas de cuarzo-calcita-estibinita las cuales cortan los mantos de reemplazamiento (Fotografía V.9c). Estas vetillas se encuentran ausentes de deformación. Esta relación indica que esta mineralización es posterior a la de reemplazamiento y posterior o contemporánea a las fallas normales y distensivas en la región. Las calizas que presentan este estilo de silicificación y brechamiento presentan una orientación NE-SW y se encuentran principalmente hacia la zona SE de la flexión que presenta la falla de cabalgadura (Figura V.4).

V.3.3.- Métodos analíticos, minerografía

Para el estudio minerográfico, se seleccionaron 13 muestras de vetas y mantos mineralizados dentro y fuera de los frentes encontrados dentro del área de estudio. A las cuales se prepararon briquetas de secciones pulidas. Se realizaron en el laboratorio de laminación, ubicado en el edificio de Geología, dentro de la Universidad de Sonora. Las muestras provienen de las obras Amavisca (Figura V.12), la obra Sotomayor y Ana Dolores (Figura V.13 y V.14). Se elaboraron además 10 láminas petrográficas, que fueron preparadas en el Laboratorio de Petrografía del Departamento de Geología de la Universidad de Sonora. Las muestras que se analizaron pertenecen a algunas de las secuencias volcánicas presentes en los alrededores de la mina El Gachi y de un intrusivo al norte del área de estudio.

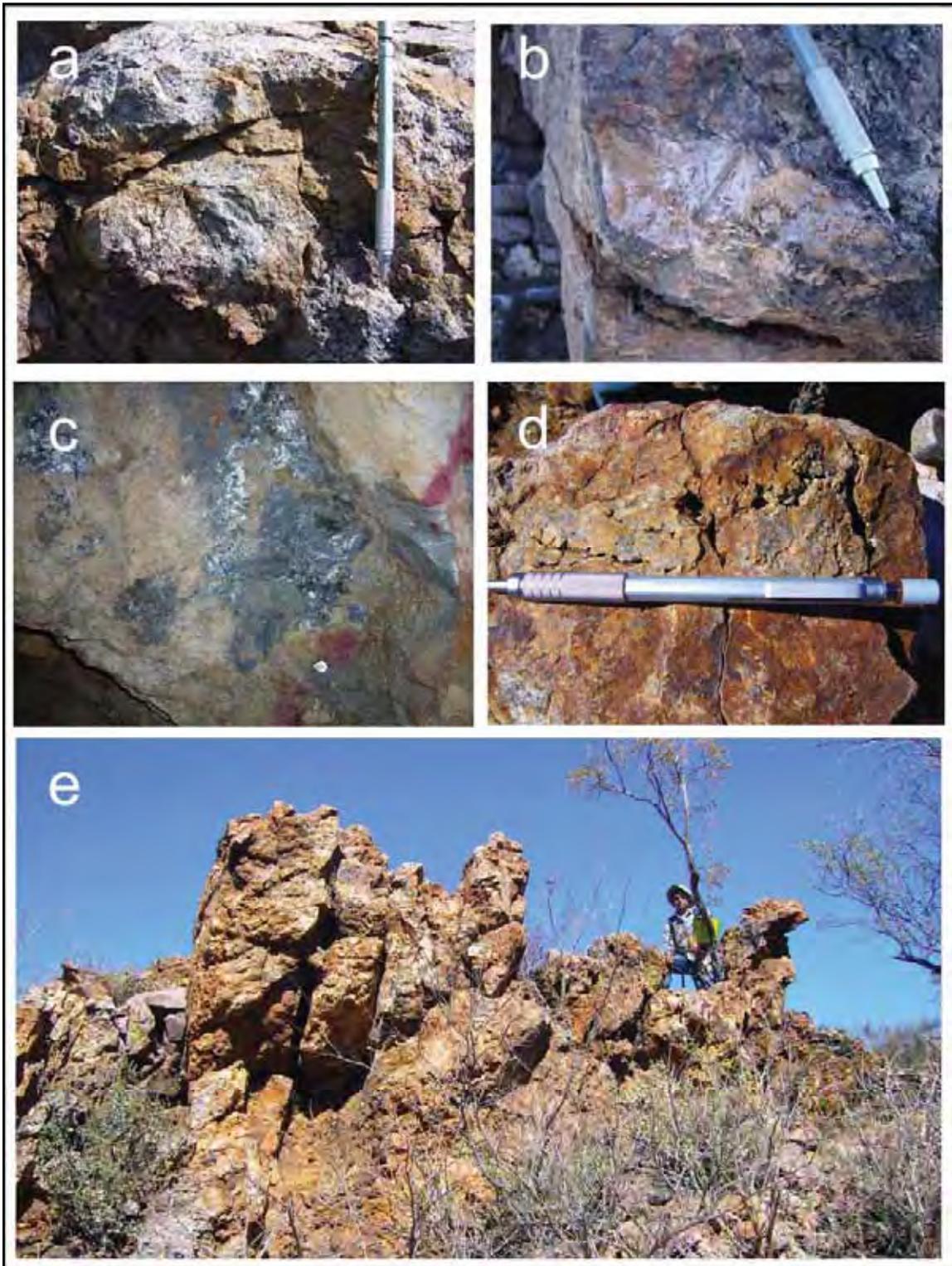
V.3.4.- Minerografía y paragénesis

Se tiene primero una etapa de reemplazamiento acompañada por pirrotita, esfalerita, galena, arsenopirita y pirita, con cuarzo y calcita como minerales de ganga (Fotografía V.10 y V.11) Se estudiaron 11 secciones pulidas para el estudio de la minerografía correspondiente al sistema de reemplazamiento. La pirrotita ($Fe_{1-x}S$) parece ser una de las primeras en la secuencia paragenética de la primera etapa de mineralización, y solo se encuentra dentro de la obra Sotomayor (Figura V.7) la cual representa a los minerales de

niveles más profundos en el sistema; normalmente la pirrotita se cataloga como de ganga en este tipo de sistemas; se presenta en menor abundancia, con formas anhedrales a subhedrales, tiene poca deformación (Fotografía V.11a, d y e). En menos del 10% de las muestras (Fotografía V.11d, e) se presenta cuarzo con formas anhedrales, considerando esto se puede asumir que este un mineral primario debido a la introducción de los fluidos mineralizantes. A su vez se observa que la esfalerita (Zn, FeS) es la de mayor abundancia en la mayoría de las laminas, variando de 30 – 60 %, con geometrías amorfas y tamaños que varían de ≥ 0.2 cm; este sulfuro presenta dentro del mismo cristales de pirita tamaños del orden de ≤ 0.01 . Este mineral de mena se encuentra en contacto con arsenopirita + galena + pirrotita + cuarzo (Fotografía V.11a, b, c, y e), donde se aprecia una leve deformación solo en el contacto con otros minerales, esta asociación es de suma importancia ya que nos indica equilibrio entre estos minerales, al momento de la formación de los sulfuros. La galena (PbS) presenta un clivaje característico de este mineral, con una deformación dúctil con formas triangulares que registran la mayor evidencia de deformación sufrida en el depósito (Fotografía V.11b, d, e, f); en algunas de las fotos se puede ver que la deformación tiene una orientación preferencial. La galena se presenta asociado principalmente a la esfalerita y en menor proporción pirita, arsenopirita y cuarzo primario (Fotografía V.11a, b, d, e y f).

En menor proporción se tienen cristales de arsenopirita (FeAsS) con hábitos prismáticos característicos, presentando formas subhedrales y a su vez observándose colores muy característicos de este mineral de mena (Fotografía V.11 a, f), algunos de estos presentan fracturamiento intenso, se encuentra muy asociado a galena y esfalerita. La pirita (FeS₂) con hábitos subhedrales a euhedrales, se presenta en bajas cantidades con excepción de la muestra 2 (Fotografía V.11f) la cual se encuentra en la parte de la entrada de obra Amavisca (Figura V.8), se presenta de forma radiada no muy común; con un fracturamiento muy intenso en la mayoría de los minerales. Todos los minerales anteriormente descritos presentan un fracturamiento el cual está siendo rellenado por calcita y cuarzo hidrotermal principalmente.

En la Fotografías V.10a y V.11c, se observa una asociación mineral, llamada textura Rod, esta textura ha sido anteriormente documentada por Emmons *et al* (1927) y



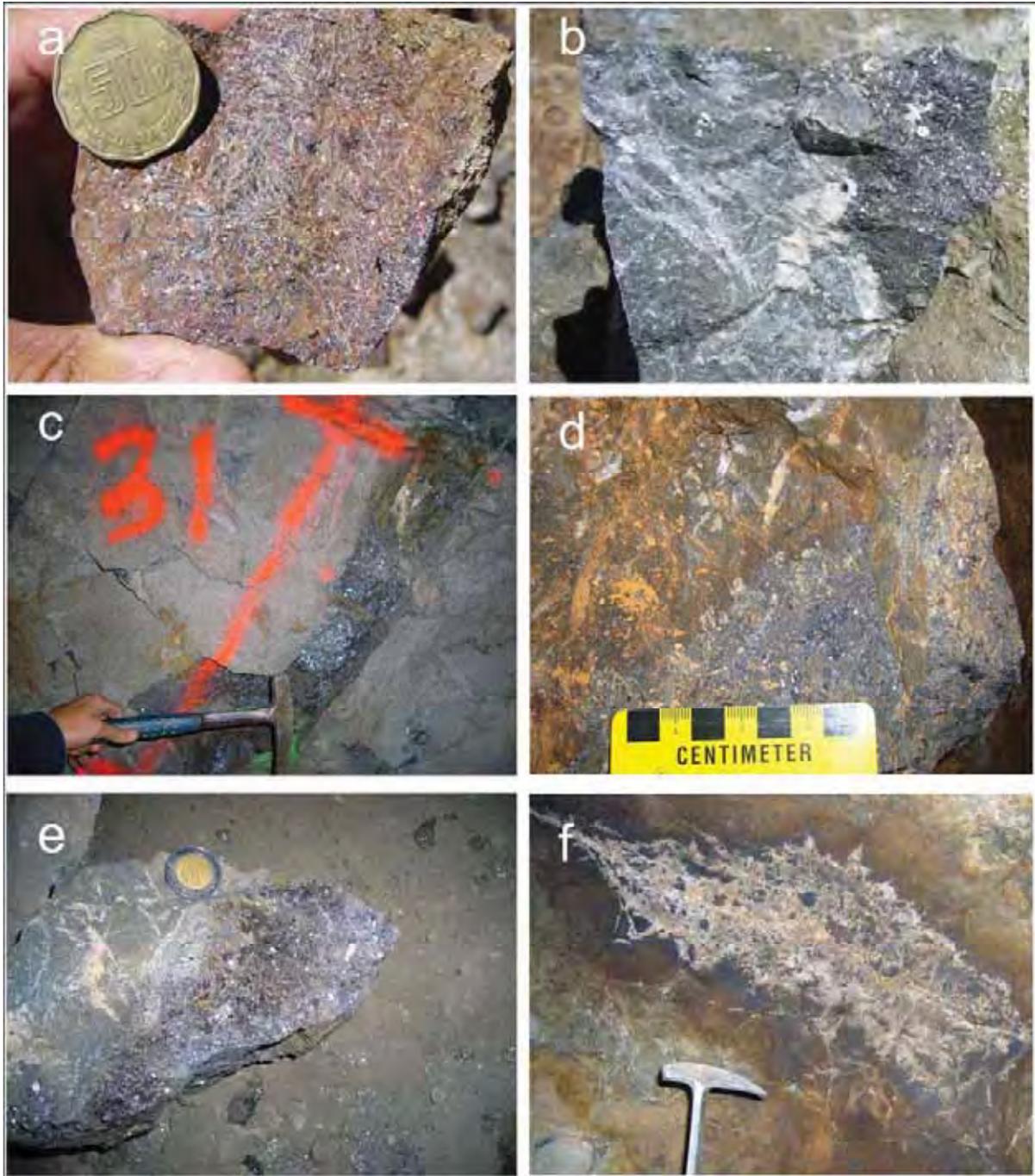
Fotografía V.9.- (a) (b).-Relictos de estibinita radiada en superficie, en caliza silicificada y oxidada. (c).- Mineralización de estibinita en veta-falla?, cortando la mineralización de reemplazamiento dentro de la obra Amavisca. (d).-Caliza silicificada y brechada, con oxidación. (e).-Caliza con sentido casi vertical, presentando brechamiento y oxidación. Asociado a la mineralización epitermal fotografía tomada viendo hacia el NE.

Thompson *et al.* (1990), referida como “textura eutéctica”; está compuesta de sulfuros de hierro (pirrotita, marcasita y pirita), con una matriz de otros sulfuros, cuarzo y carbonatos. Esta textura es originada por cristales tabulares de pirrotita que han sido reemplazados por pirita y marcasita, seguidos subsecuentemente por la recristalización de pirita y marcasita, lo cual hace que sus tamaños aumenten, todo esto dentro de una matriz de esfalerita. La textura Rod dentro del distrito de Gilman Colorado, es interpretada como un reemplazamiento de marcasita bandeada (Loverin *et al.* 1970; en Thompson *et al.* (1990).

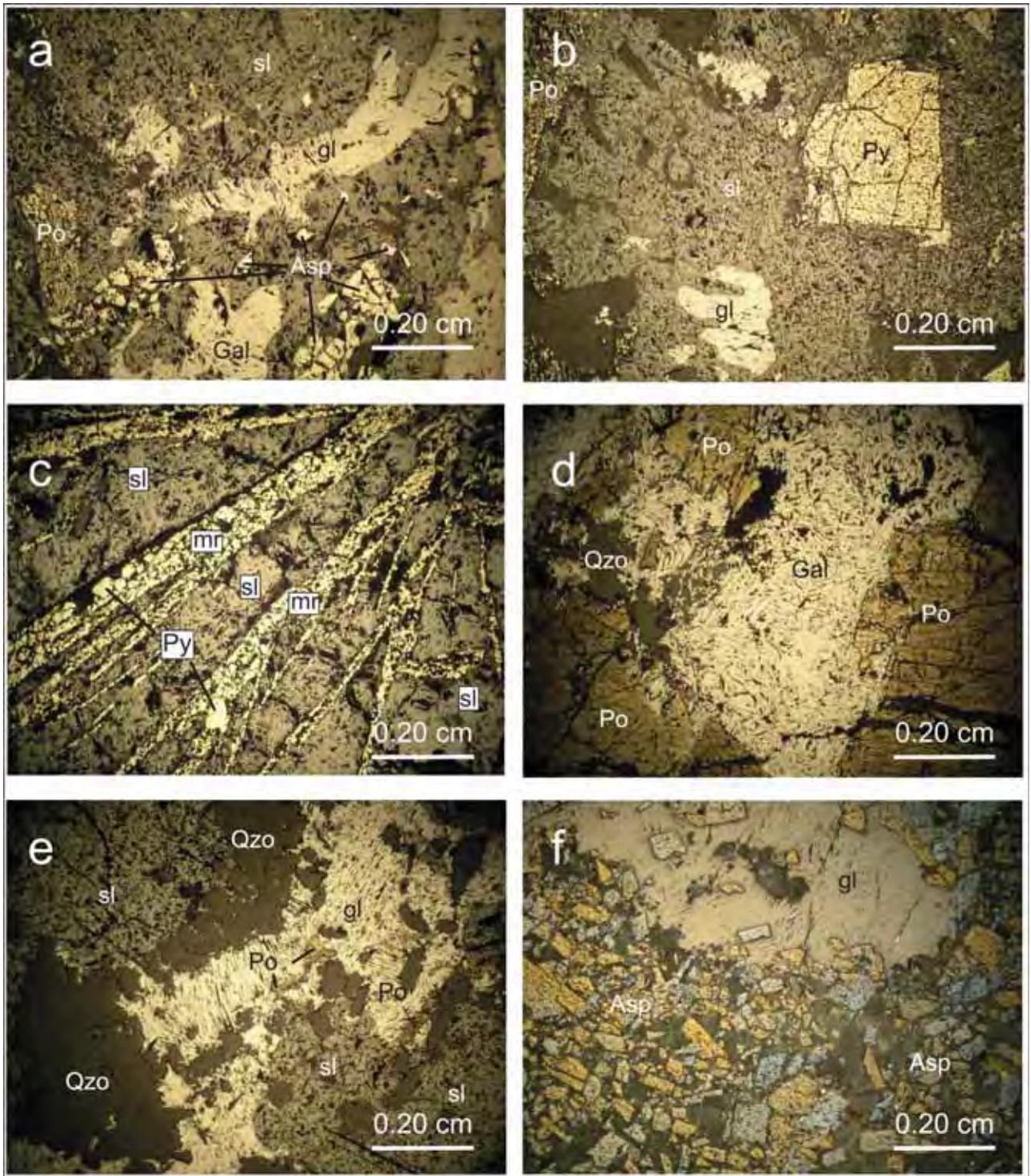
En la Fotografía V.12, se observa el estudio minerográfico realizado a un corte de caliza silicificada y mineralizada, esta muestra proviene del interior de la obra Amavisca, que es la más importante del área de estudio; dentro de este corte se puede observar como los fósiles han sido silicificados y mineralizados (Fotografía V.12a) parte inferior derecha de la misma, con una mineralización controlada mayormente por sulfuros de galena, mostrando su clivaje característico con formas triangulares y observándose una ligera deformación; la galena se encuentra muy asociada con la arsenopirita que se presenta en menor proporción, teniendo formas subhedrales y tamaños muy pequeños ≤ 0.20 cm (Fotografías V.12b, c y d).

La fotografía V.13 (b, c, d, e) es un sección pulida que se realizó para un estudio minerográfico del sistema epitermal; donde se observan vetillas de estibinita que cortan la mineralización de reemplazamiento (esfalerita, galena, arsenopirita y pirrotita). Esta muestra se encuentra ubicada dentro del frente Amavisca, en interior mina y que en superficie se presenta como fantasmas dentro caliza silicificada (Fotografía V.9a, b, c, d). Aquí el mineral de estibinita presenta un hábito fibroso en superficie pulida que es característico, y se observa como este guarda una asociación muy estrecha con la pirita, y con la calcita, que es un mineral de ganga característico (Fotografía V.13c, d, e).

Por evidencias de campo, estudio de la mineralización y un detallado estudio minerográfico de secciones pulidas recolectadas de los cuerpos de reemplazamiento y solo una muestra del sistema epitermal de baja sulfuración se concluye que la secuencia paragenética del depósito El Gachi, es como se muestra en la Tabla V.1.

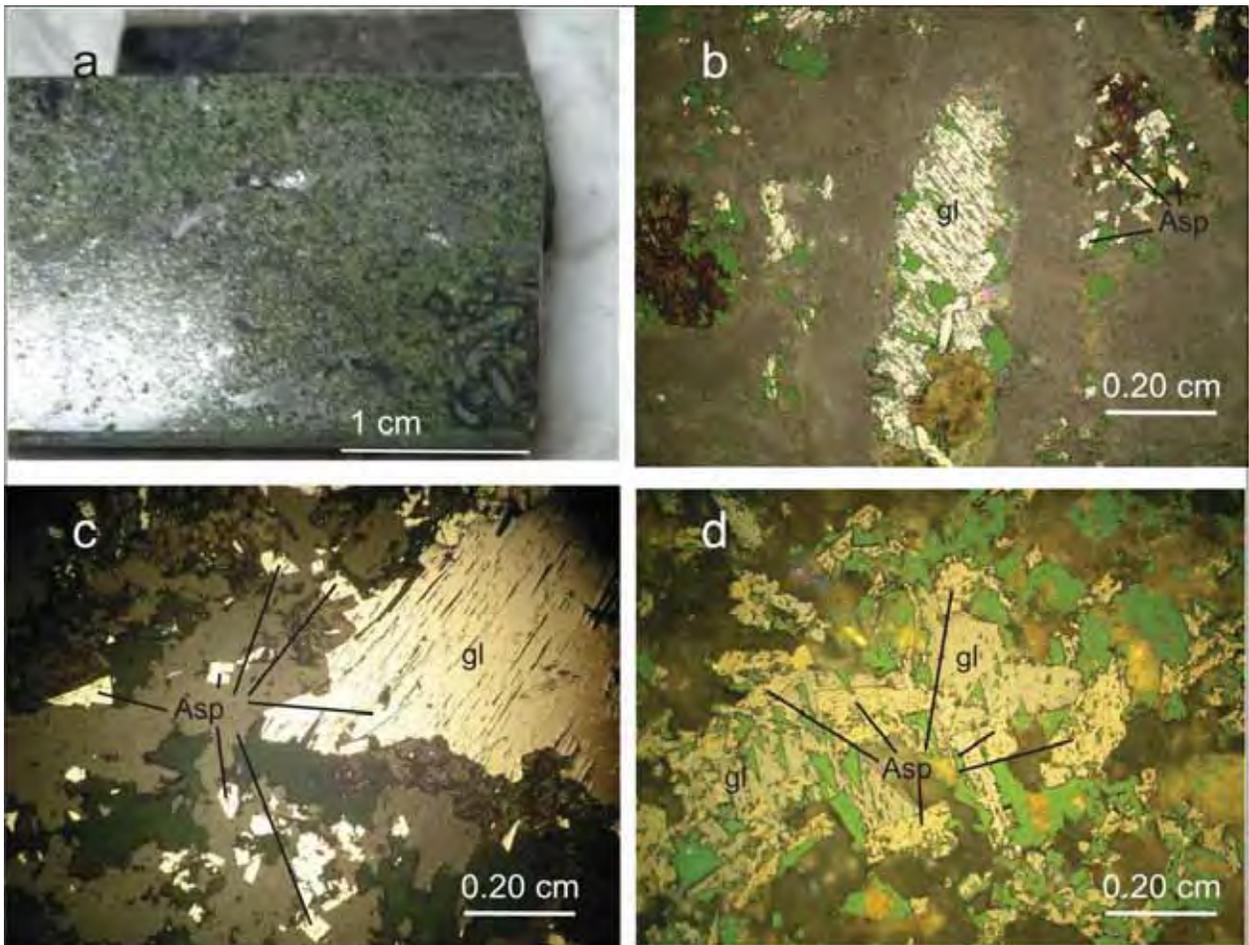


Fotografía V.10.- (a).-Mineralización de vetillas de marcasita, con pirita en matriz de esfalerita, el cual conforma la textura Rod o textura Eutíctica (b).-Sulfuro masivo formado en caliza recristalizada perteneciente a la parte inferior de la Formación Mural; dentro de la Obra Amavisca. (c).-Estructura mineralizada compuesta de galena-esfalerita principalmente, dentro de obra Amavisca. (d).-Sulfuros masivos. (e).-Veta de sulfuros masivos reemplazando a caliza, dentro de obra Amavisca. (f).-Zona de blanqueamiento de la caliza, posible conducto de mineralización.

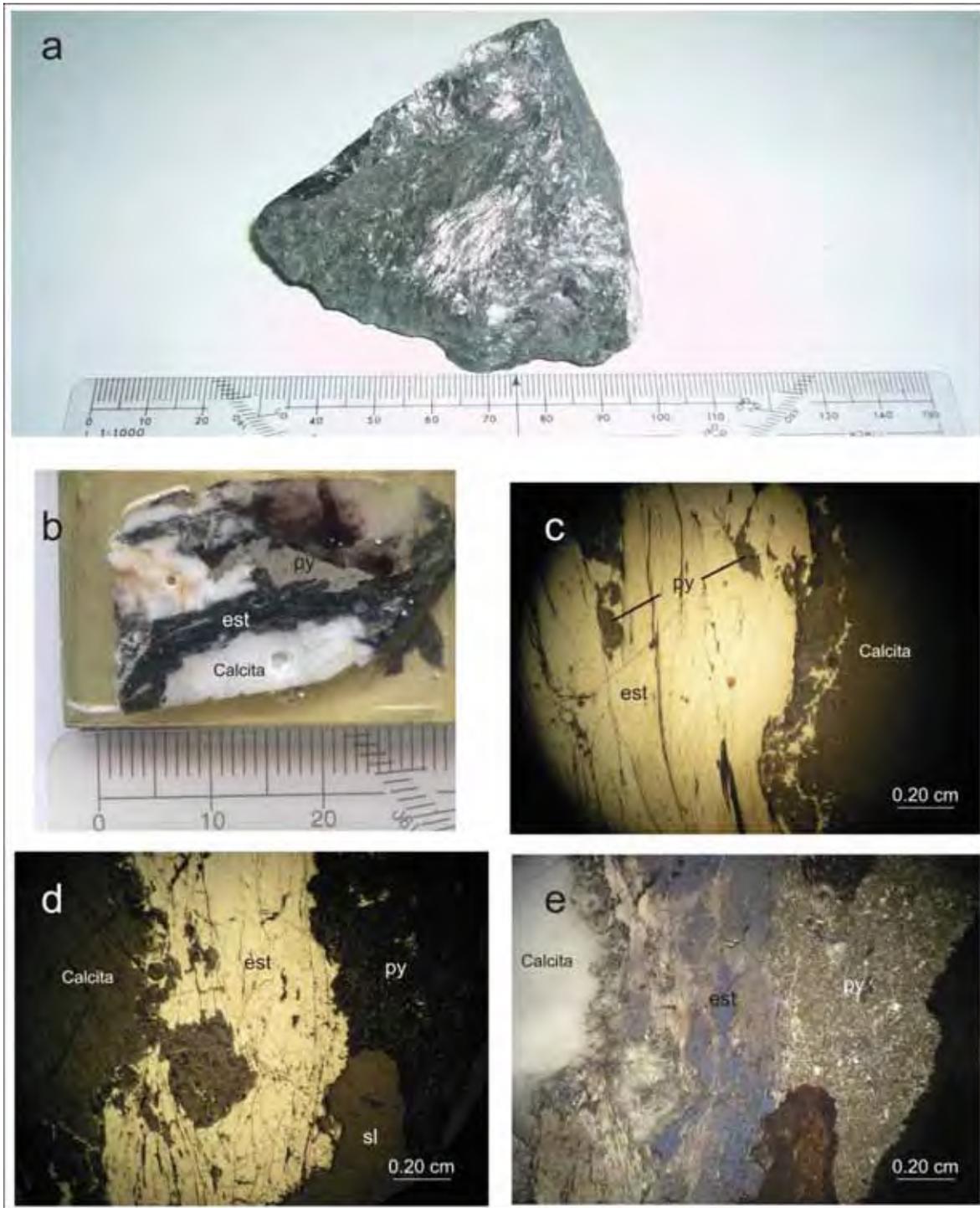


Fotografía V.11.- (a).- Fotografía petrográfica muestra 1 (b).- Muestra 1 (c).- Muestra 2, mostrando la textura Rod (d).-Muestra GA-12 (e).-Muestra GA-28 (f).-Muestra GA-81. (gal: Galena; sl: Esfalerita; Asp: Arsenopirita; Py:Pirita; Qzo: Cuarzo; mr: Marcasita).

El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.



Fotografía V.12.- (a).-Briqueta pulida para minerografía, muestra GA-21. (b) (c) (d).-Fotografías mostrando mineralización de sulfuros de galena y arsenopirita correspondientes a la mineralización de reemplazamiento. (gl: Galena; Asp: Arsenopirita).



Fotografía V.13.- (a).-Muestra de estibinita mostrando su carácter fibroso. (b).-Fotografía mostrando superficie pulida, estibinita asociada con calcita y pirita. (c).- Fotografía de sección pulida, mostrando estibinita, se observa su carácter fibroso del mismo. (d).-Fotografías de sección pulida mostrando estibinita asociada a Pirita y calcita con luz polarizada. (e).-Estibinita mostrando su color característico en luz natural. (est: estibinita; py: pirita).

PARAGENESIS		
MINERALES	Reemplazamiento	Epitermal
Pirrotita	—————
Esfalerita	—————
Galena	—————
Arsenopirita	—————
Marcasita	
Pirita	—————	—————
Estibinita		—————
Cuarzo	—————
Calcita	

Tabla V.1.- Secuencia paragenetica de la Mina El Gachi. (1er etapa: Reemplazamiento; 2da Etapa: Epítermal baja sulfuración.).

VI.- Métodos analíticos

Aparte de los estudios, mineragraficos, petrográficos y de inclusiones fluidas en minerales seleccionados de las diferentes obras y cuerpos minerales en el área de estudio, también se hicieron análisis de isótopos estables de S, C y O en sulfuros de mena y minerales de ganga.

Los análisis de inclusiones fluidas se realizaron en la Universidad de Sonora, utilizando una platina termométrica Linkam THMS 600, el cual tiene un rango de temperatura de -196 a 600 °C y un error de 0.1 °C. Este aparato está montado en un microscopio Olympus BX 51. Para todos los análisis se utilizó un objetivo de 50 x. La platina fue calibrada utilizando inclusiones fluidas sintéticas “*SYN FLYNC*”, las cuales se tratan de 5 inclusiones fluidas con sistemas líquido + vapor, manejando diferentes rangos de temperatura. Finalmente una inclusión de alta temperatura la cual está cercana a la máxima temperatura que alcanza la platina termométrica. Para estar seguro de la calidad de los datos obtenidos, se le realizó de 5 a 10 repeticiones de cada una de las mediciones para asegurarse del valor obtenido, considerando calidad, tamaño y forma de la inclusión fluida. Se prepararon un total de 10 laminas para este estudio, teniendo en consideración de que estas deben de tener un grosor menor a 30 µm, pulidas en ambas caras, y llevando un trato especial de la muestra al ser adherida al porta objetos para su pulido ya que se debe utilizar una cera o resina con bajo punto de fusión (entre 55 y 75 °C), o que se disuelva fácilmente en acetona, esto para asegurar la integridad de las inclusiones y no llegar a un grado de decrepitación de las mismas. Las muestras se tomaron principalmente en zonas superficiales e interiores de la zona mineralizada donde se tomaron un total de 10 ejemplares de los carbonatos asociados a sulfuros de la etapa de reemplazamiento; una muestra se analizó directamente en sulfuros, específicamente tratando de medir las inclusiones dentro de esfalerita. Cuatro muestras relacionadas a caliza silicificada y cuarzo hidrotermal relacionado al sistema epitermal de baja sulfuración.

Las mediciones de los isótopos de azufre en las muestras de sulfuros fueron realizadas en el Laboratorio Ambiental de Isótopos en la Universidad de Arizona. Las mediciones isotópicas se obtuvieron utilizando un espectrómetro de masas de flujo continuo (continuous-flow gas-ratio mass spectrometer) Finnigan Delta PlusXL. El peso de las muestras pulverizadas osciló entre 0.3 a 0.7 mg, las cuales posteriormente se vertieron

El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.

en capsulas de estaño junto con pentóxido de vanadio para inducir ionización. La combustión de las muestras se realizó a 1,030°C utilizando un analizador elemental (Costech) acoplado al espectrómetro de masas. Se utilizó el estándar internacional NBS123 además de estándares internos. Los datos isotópicos de azufre son expresados utilizando la notación $\delta^{34}\text{S}$. La precisión analítica es de ± 0.15 per mil o mejor (1σ). Los datos isotópicos para las muestras de S se muestran en la Tabla VIII.1.

Las mediciones de los isótopos de carbono y oxígeno en los carbonatos relacionados a la mineralización y en la roca encajonante, fueron realizadas en un espectrómetro de masas (Finnigan MAT 252) acoplado a un dispositivo automatizado (automated carbonate preparation device KIEL-III) realizadas en el Laboratorio Ambiental de Isótopos dentro de la Universidad de Arizona. Las muestras para los análisis de isótopos de C y O fueron tomadas utilizando un mini-taladro con ayuda de un microscopio binocular. El peso de las muestras pulverizadas osciló entre 20 a 150 μg , y reaccionaron al vacio con acido fosfórico deshidratado a 70°C. Se utilizaron los estándares internacionales NBS-19 y NBS-18, con precisiones de $\pm 0.1\text{‰}$ y $\pm 0.06\text{‰}$ (1σ) para $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ respectivamente. Los datos isotópicos de C y O se muestran en las Tablas VIII.3 y VIII.4.

VII.- Inclusiones fluidas

Se realizó un estudio de inclusiones fluidas para poder identificar las temperaturas de homogenización (T_h), temperatura de fusión (T_m), a partir de esto estimar la salinidad y profundidad mínima de atrapamiento del líquido mineralizante. Estudios de inclusiones fluidas en estos sistemas son muy escasos debido a las complejidades de los diferentes minerales, ya que en su mayoría los minerales de mena y ganga son en su mayoría opacos, existiendo una baja proporción de minerales translucidos los cuales son esenciales, para asegurar que se tendrá una buena cantidad de luz al observarlas en el microscopio. Generalmente la composición de los fluidos dentro de las inclusiones fluidas en los sistemas de reemplazamiento varían ampliamente, llegándose a encontrar inclusiones ricas en fluidos o vapor sin minerales hijos, o inclusiones fluidas en algunos depósitos llegando a encontrar más de 10 minerales hijos dentro de las inclusiones fluidas, como es el caso del depósito de Jamestown, Colorado (Nash y Cunningham 1979, en Roedder 1984). Las temperaturas de formación de los fluidos mineralizantes en diversos distritos de reemplazamiento varían de 200 a 500 °C (Megaw et al. 1988; Beatty 1990). Aunque, hay depósitos individuales los cuales las temperaturas oscilan de 120 a 680 °C (Gilg, 1996). Mientras que las profundidades obtenidas generalmente varían de ≤ 500 m. a 3.5 km (Lovering et al., 1978 en Megaw 1988). Las salinidades obtenidas en análisis de inclusiones fluidas son de las más variadas presentes en los sistemas mineralizados en el mundo, teniendo entre ≤ 1 a 60 % NaCl equivalente (Megaw et al. 1988; Gilg 1996; Roedder 1984; Titley 1993).

VII.1.- Selección de muestras

Con el fin de estudiar las inclusiones fluidas en minerales del área se recolectaron de vetillas de cuarzo translucido – semitranslucido, calcita, calcita silicificada y muestras asociado a diferentes sulfuros, junto con cristales de esfalerita baja en hierro (“blenda”). Para este estudio se elaboraron 11 láminas doblemente pulidas, provenientes de las obras mineras más representativas en el área de estudio, estas son obra Sotomayor (Figura V.7) y Amavisca (Figura V.8). La segunda es la más importante ya que alberga las zonas más ricas en mineral de mena y se encuentra desarrollada exclusivamente dentro de la Formación Mural. En cambio los trabajos en la obra Sotomayor se encuentran dentro de la Formación Morita, ubicada a 800 metros aproximadamente hacia el este de la obra Amavisca.

VII.2.- Petrografía de las inclusiones fluidas

Se llevo a cabo un estudio petrográfico de las laminas pulidas, para poder elegir las inclusiones fluidas más apropiadas para su análisis, estas laminas fueron colectadas dentro de los cuerpos de reemplazamiento, como en las zonas de cuarzo aparentemente relacionado a eventos epitermales.

La mineralización de reemplazamiento presenta vetillas de cuarzo, calcita, esfalerita presentes en las estructuras de vetas y mantos que conforman la mineralización económica de esta zona. En las vetillas de cuarzo analizadas, no se encontraron inclusiones de buena calidad y tamaño para un análisis, ya que la gran mayoría son de color muy oscuro o “lechoso”, y su tamaño es pequeño ($< 3\mu\text{m}$). Los cristales de calcita presentaron condiciones más apropiadas para ser estudiadas, aun con la limitante de que estos son muy pequeños y sucios, y algunos con reemplazamiento total o parcial por cuarzo. Por otro lado, la mayoría de la esfalerita presente es rica en hierro del tipo “*marmatita*”, y solamente algunas muestras correspondieron a esfalerita baja en hierro de la variedad “*blenda*”, sin embargo se detectó una baja proporción de inclusiones fluidas y de tamaño pequeño, que fueron difíciles de analizar. Aun así, se lograron obtener algunos datos apropiados para su interpretación.

El mineral más propicio para el análisis del sistema de mineralización epitermal, fue un cuarzo semicristalino a cristalino que se encontró asociado a las capas de caliza silicificada, en la parte superior del área principal (Figura V.4), ya que más del 95% del cuarzo presente fue cuarzo lechoso.

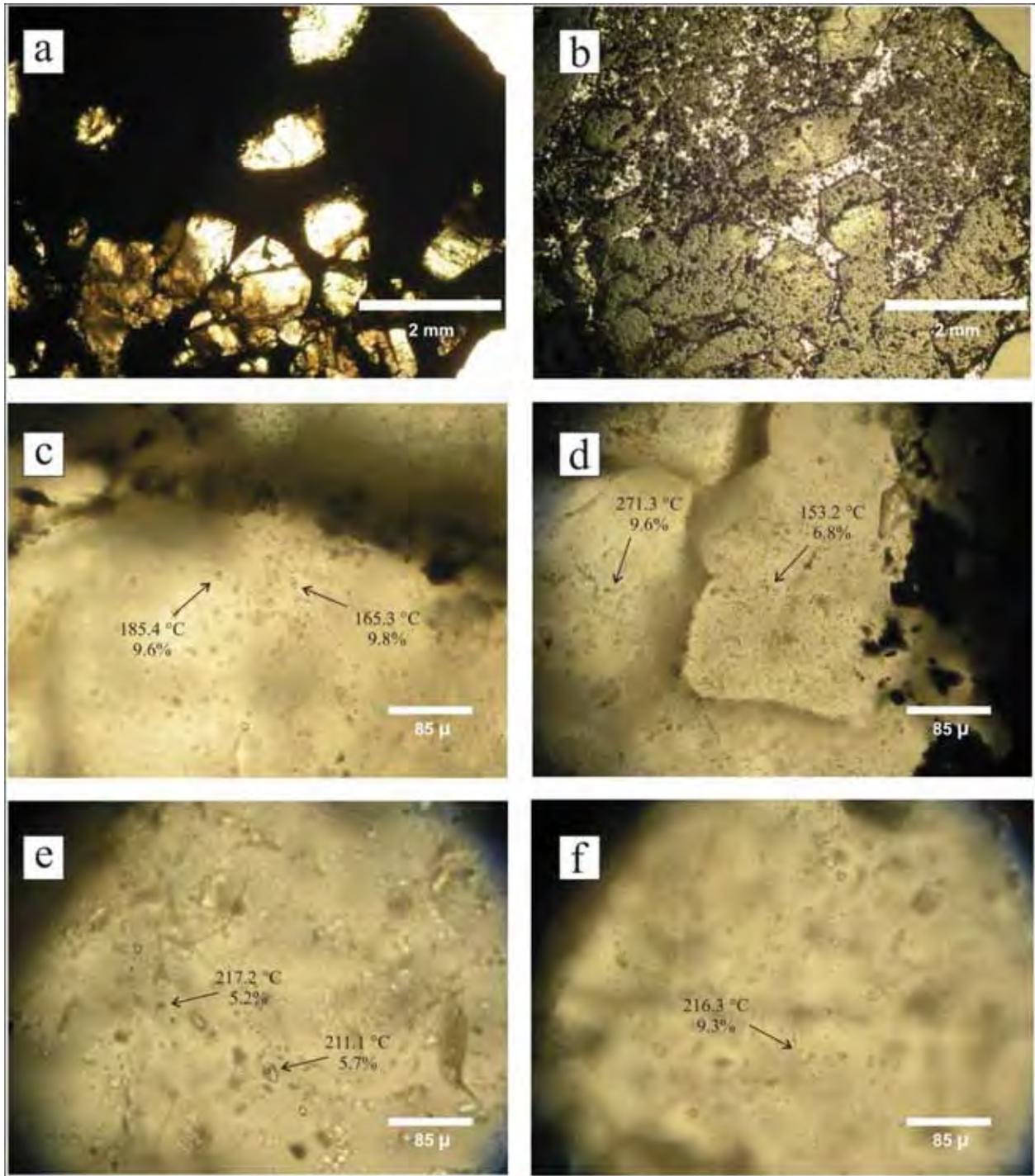
Se identificaron mayormente inclusiones fluidas primarias, junto con una menor proporción de inclusiones fluidas secundarias. Solamente inclusiones fluidas de dos fases fueron encontradas a temperatura ambiente, estas fases principalmente liquido + vapor y en menor proporción vapor + liquido, ningún mineral hija se encontró en las muestras analizadas. Las inclusiones fluidas estudiadas presentan formas variadas, que van de irregulares a ovoides y algunas formadas por los caras de cruceros de cristales de calcita. Todas estas en su mayoría presentan un tamaño de 40 a 5 μm , pero algunas llegan alcanzar tamaños de hasta 65 μm (Fotografía VII.2b)

VII.3.- Resultados analíticos

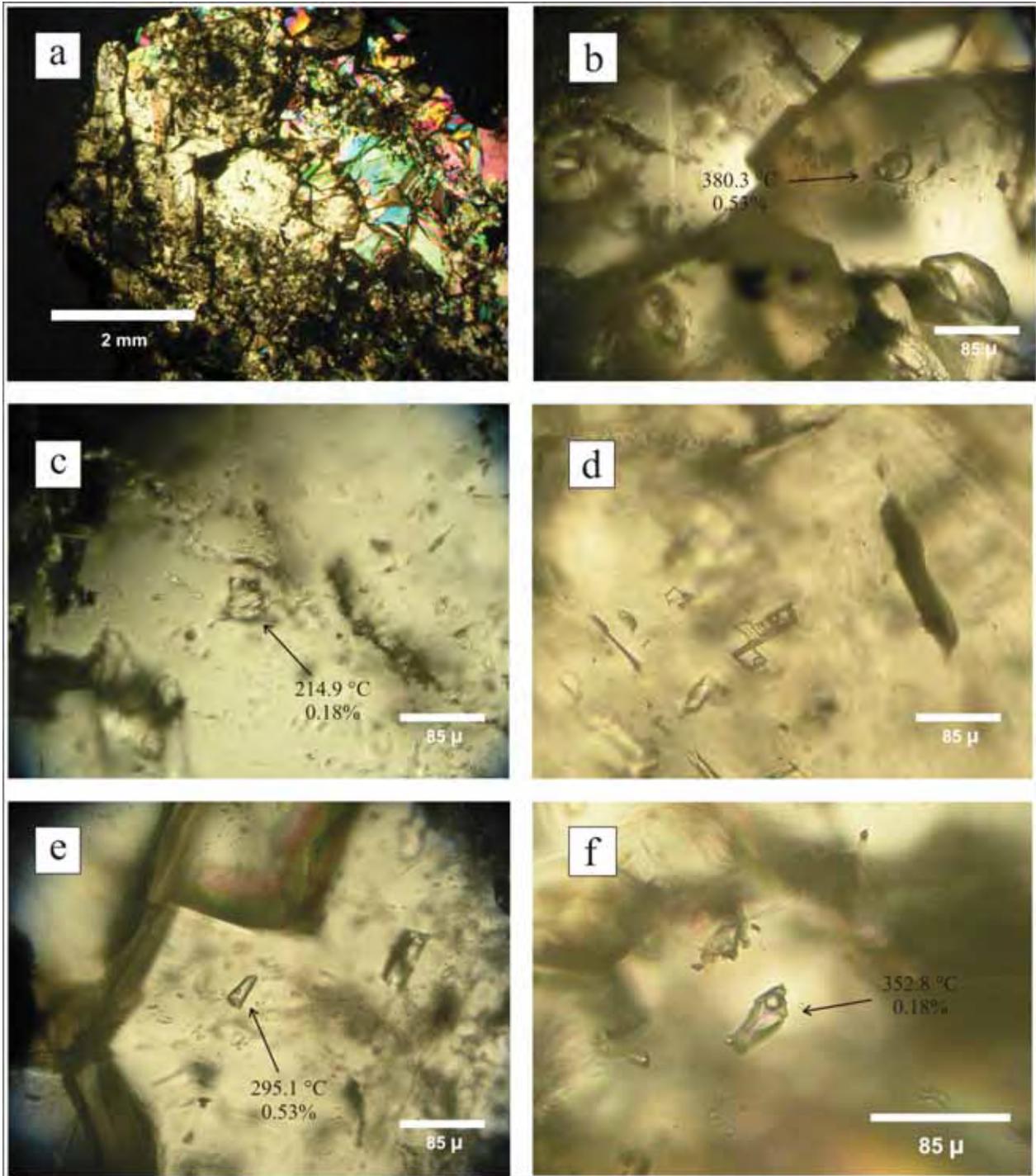
Los resultados obtenidos en este estudio se dividen en dos, primeramente se describen los datos pertenecientes al sistema de reemplazamiento el cual como ya se menciono anteriormente, corresponde a la mineralización más importante del depósito El Gachi, y posteriormente se analizaran los resultados obtenidos del sistema epitermal.

VII.3.1.- Sistema de reemplazamiento

Los resultados obtenidos de las inclusiones pertenecientes a la mineralización de reemplazamiento exhiben información contrastante dentro de las dos obras muestreadas. Las inclusiones fluidas estudiadas pertenecientes a la obra Sotomayor (Muestra GA-12, Fotografía VII.1) pertenecen a cuarzo de forma anhedral inmerso dentro de una matriz de esfalerita asociado a una estructura semivertical principal rellena de sulfuros (pirrotita + esfalerita + arsenopirita + pirita). Las temperaturas de homogenización en la fase liquida ocurren entre 142.6 a 270.3°C (Figura VII.1), mientras que las salinidades interpretadas debido a la fusión de hielo varían de 5.71 a 15.7% NaCl equivalente (Figura VII.2). Las inclusiones estudiadas pertenecientes a la obra Amavisca (Muestra GA-29, Figura V.8), constituida en parte por calcita silicificada y zonas de cuarzo subhedral (Fotografía VII.2 a), en donde las temperaturas de homogenización en la fase liquida varían de 267.1 a 380.2 °C (Figura VII.1) y las salinidades obtenidas por la fusión de hielo se encuentra de 0.18 a 0.53% NaCl equivalente (Figura VII.2). Aplicando los diagramas de presión presentados por Haas Jr. (1971), para temperaturas por encima de 350°C, las condiciones de presión de atrapamiento bajo condiciones litostáticas aproximadas fueron estimadas en el orden de los 165 a 234 bares, considerando una densidad de la corteza continental de 2.76 – 3.0 g/cm³ y 3.7 km por cada kilobar (Best G. 2003). En base a estos parámetros se obtendría una profundidad de formación entre los 610 y 865 m de profundidad para el sistema de reemplazamiento en el área del depósito El Gachi.



Fotografía VII.1.-Inclusiones fluidas pertenecientes a la obra Sotomayor. a).-Corte de zona mineralizada con luz polarizada, compuesta de esfalerita de la variedad marmatita, la cual engloba a cuarzos con forma anhedral los cuales fueron analizados. b).-Misma área de la fotografía mostrada con luz polarizada. c) – f).- Inclusiones fluidas analizadas, en la cual se muestra la temperatura de homogenización (en la zona superior) y salinidad porcentual de NaCl equivalente (zona inferior).



Fotografía VII.2.-Inclusiones fluidas pertenecientes a la obra Amavisca. a).-Cristal de calcita (zona inferior transparente) cortada por vetilla de cuarzo (zona superior coloreada), la calcita se encuentra parcialmente silicificada. b).-Inclusión fluida de gran tamaño dentro de cuarzo. b) – d).-Inclusiones pseudosecundarias dentro de calcita silicificada, forma delimitada por los cruceros de la calcita. e) – f).-Inclusión fluida dentro de cuarzo.

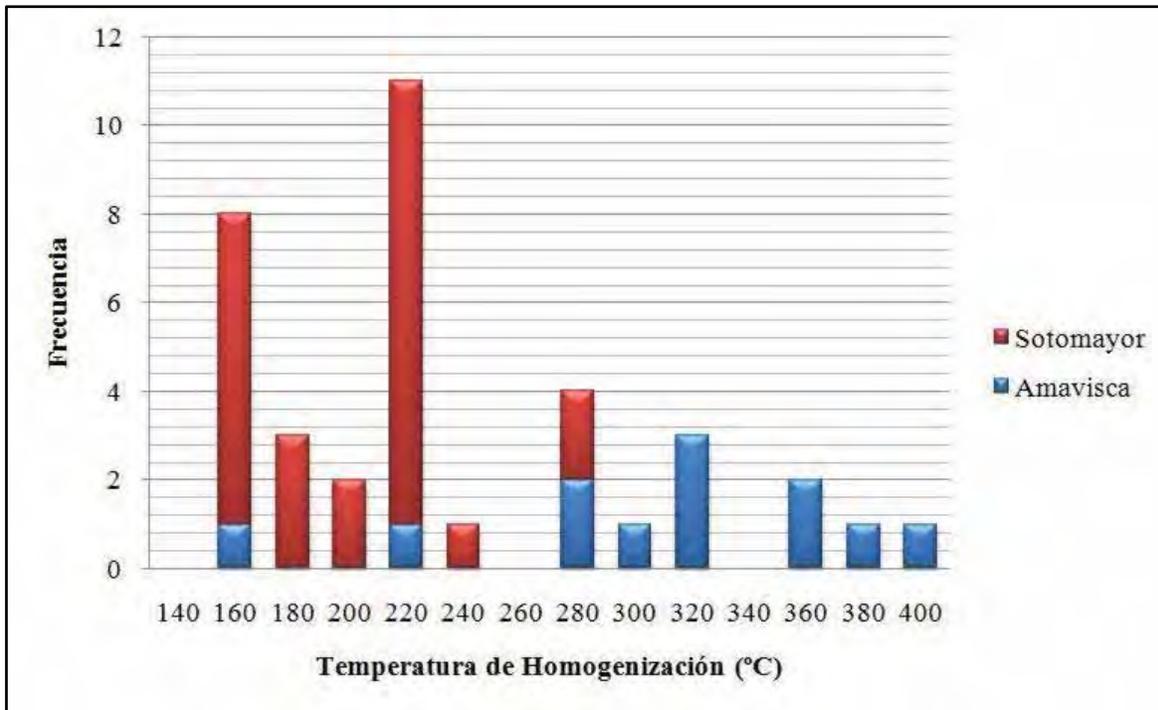


Figura VII.1.-Temperaturas de homogenización para las muestras pertenecientes al sistema de reemplazamiento.

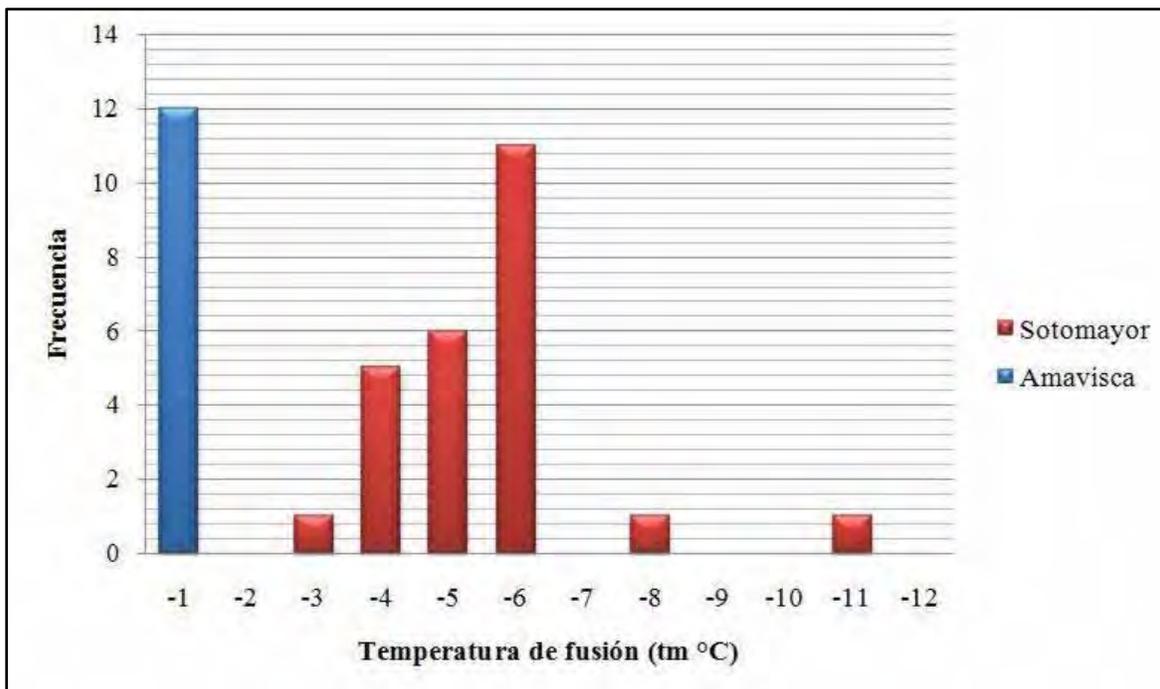


Figura VII.2.-Temperaturas de fusión para las inclusiones fluidas del sistema de reemplazamiento. Las temperaturas de fusión fueron estimadas según las ecuaciones revisadas para el sistema $H_2O-NaCl$, (Bodnar 1993).

VII.3.2.- Sistema epidermal

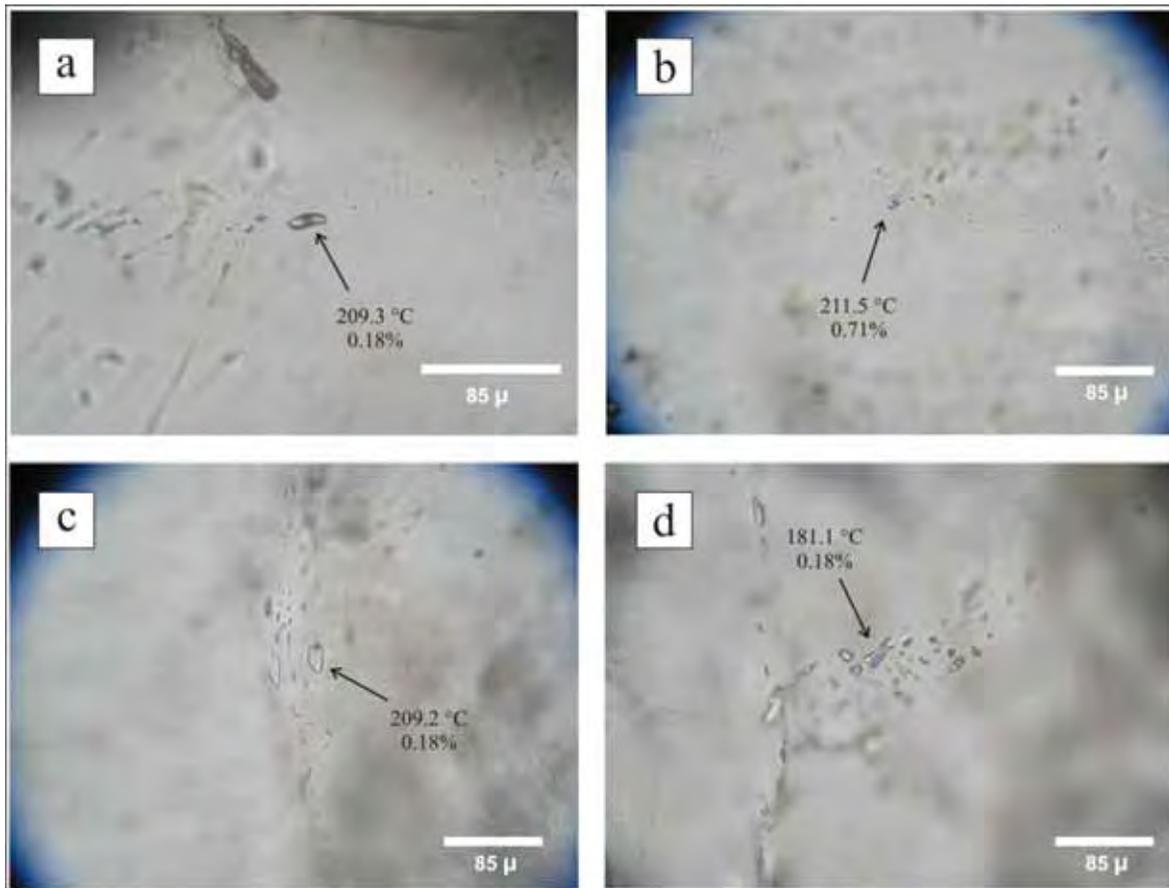
El estudio de las inclusiones fluidas relacionadas al sistema epidermal de baja sulfuración, se llevo a cabo en muestras colectadas de vetillas de cuarzo que cortan la mineralización de reemplazamiento en el interior de la obra Amavisca (Figura V.8). Otras se recolectaron en la parte superior de la zona mineralizada (Figura V.4), cercano a la zona de fallamiento inverso, en donde se encuentran zonas brechoides y pequeñas vetas de cuarzo de 1 a 2 cm de ancho, cortando a capas de caliza pertenecientes al miembro Cerro La Ceja (Fotografía V.9e).

Los análisis realizados en minerales de cuarzo, se enfocaron en inclusiones fluidas alineadas dentro de los bordes de intercrecimiento del cuarzo semicristalino sugiriendo corresponder a inclusiones fluidas primarias, llegando a observar al menos 15 muestras de inclusiones fluidas, las cuales la mayoría de estas no sobrepasaba los 10 μm de largo dificultando su medición. Aun así, se determinaron Th en la fase líquida de 114.6 a 211.5 °C, con salinidades por fusión de hielo de 0.18 a 0.78 %, típicas de este tipo de ambientes. Para este sistema no se pudo aplicar una corrección para la profundidad ya que las temperaturas no sobrepasan los 350 °C, la cual es la temperatura mínima a la cual se puede obtener la presión aproximada utilizando las tablas de John L. Haas Jr. (1971).

VII.4.- Interpretación y discusión de los resultados

Los resultados obtenidos en este estudio fueron algo contrastantes para el sistema de reemplazamiento, en la cual se puede observar una gran variación en las temperaturas de homogenización de 142.6 a 380.2 °C, y salinidades las cuales varían de 0.18 a 15.7%; mientras que para el sistema epidermal de baja sulfuración las temperaturas de homogenización las cuales en su fase líquida fueron de 114.6 a 211.5 °C, junto con salinidades por fusión de hielo de 0.18 a 0.78 %, las cuales son típicas de este tipo de ambientes.

Varias razones podrían ser las causantes por la cual se presenten esta dispersión en los datos obtenidos en la mineralización de reemplazamiento, ya que al observar los resultados individualmente por obra analizada, se observa que las temperaturas de homogenización de la obra Sotomayor (Figura V.7, obra más inferior estratigráficamente),



Fotografía VII.3.-Inclusiones pertenecientes a la parte superior de la zona mineralizada. Parte central de la Figura V.8 a) – d).-Inclusiones fluidas primarias analizadas dentro de cuarzo asociado a las capas de caliza silicificada semiverticales. Inclusiones fluidas muestreadas, en la cual se muestra la temperatura de homogenización (en la zona superior) y salinidad porcentual de NaCl equivalente (zona inferior).

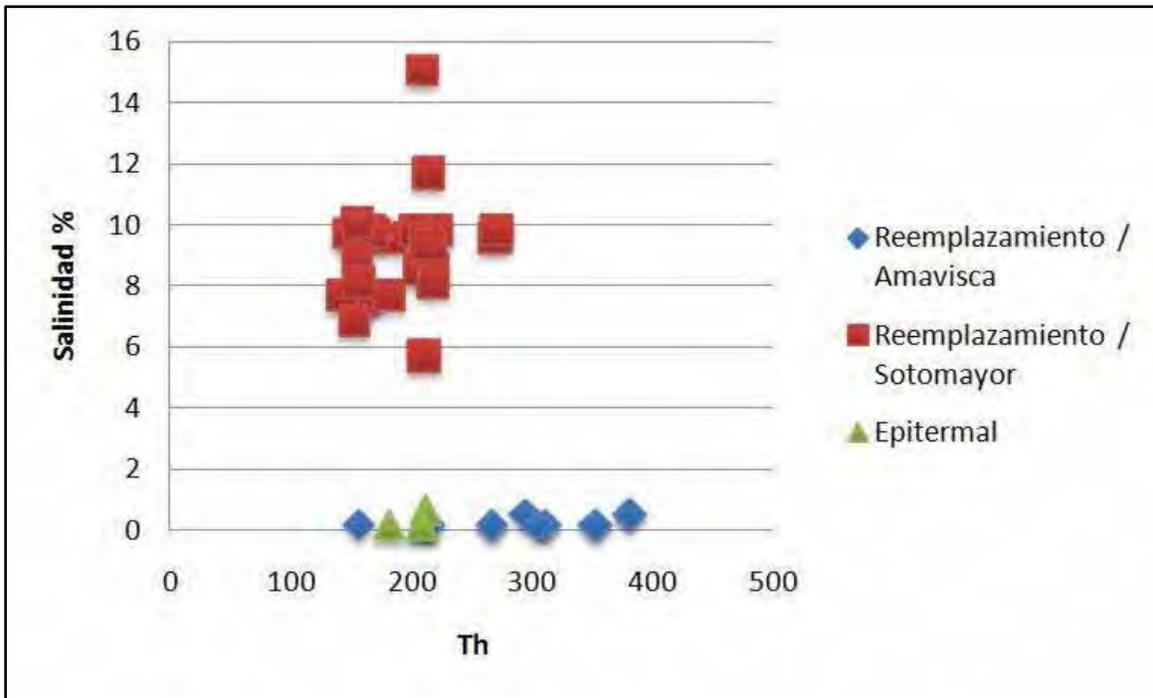


Figura VII.3.-Correlación entre la salinidad NaCl equivalente y las temperaturas de homogenización (Th) en inclusiones fluidas, dentro los diferentes sistemas minerales presentes en el área de estudio.

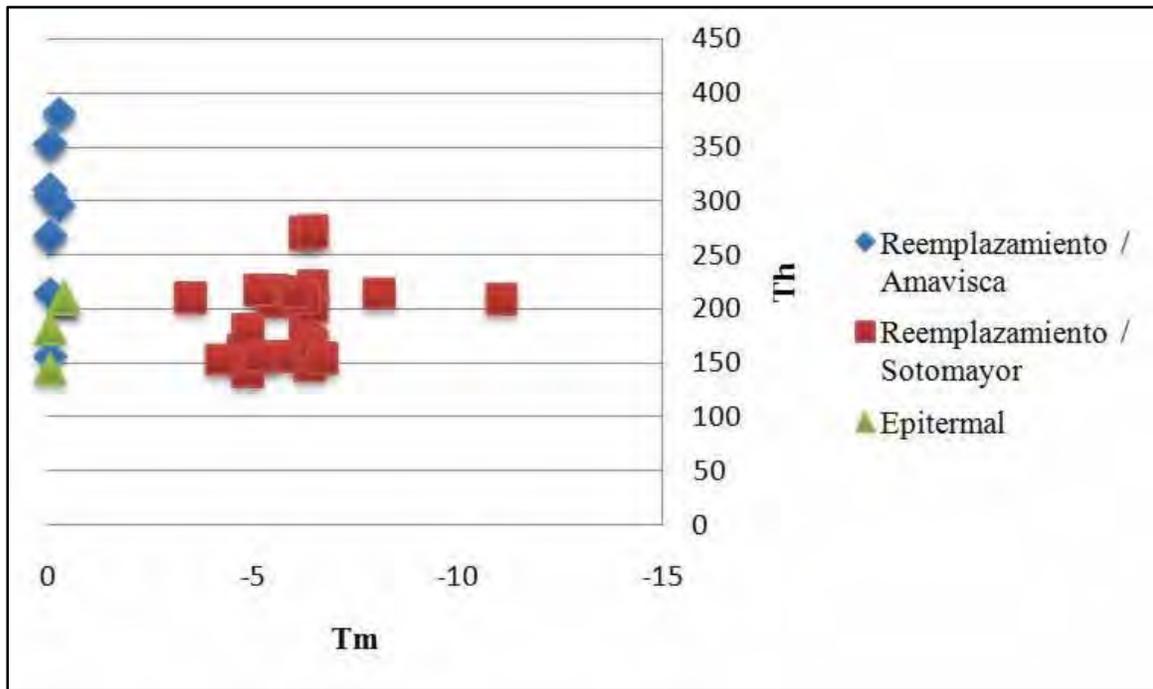


Figura VII.4.-Correlación entre temperaturas de homogenización (Th) y temperaturas de fusión del hielo (Tm) en inclusiones fluidas, dentro los diferentes sistemas minerales presentes en el área de estudio.

las cuales se analizaron en la fase líquida, ocurren entre 142.6 a 270.3°C, junto salinidades de 5.71 a 15.7% NaCl equivalente; mientras que las inclusiones medidas de la obra Amavisca (Figura V.8, obra más superior estratigráficamente), con temperaturas de homogenización en la fase líquida varían de 267.1 a 380.2 °C y las salinidades de 0.18 a 0.53% NaCl equivalente. Esto se resume en conjunto dentro de las figuras VII.3 y VII.4. Por lo que las diferentes formas de explicar estas variaciones se resumen a continuación:

- Suponiendo que toda la mineralización provenga de un solo pulso de mineralización, se asume que la obra Amavisca (Figura V.8) la cual se encuentra en nivel estratigráficamente más elevada, se localice directamente encima de la fuente de mayor calor pero con una salinidad más baja debido a que los fluidos atravesaron un área de mayor espesor y con un contenido de pH y fugacidad diferente, y que la obra Sotomayor (Figura V.7), la cual se localiza en una nivel más inferior estratigráficamente hablando, se encuentre más alejada de la zona de calor principal, por lo que tomando esta suposición como la realidad, se explicaría porque la obra Amavisca tiene la temperatura más alta del sistema, y la obra Sotomayor tiene una temperatura más baja por estar más alejada de la fuente de calor pero una salinidad que posiblemente es la original del sistema pero sin ninguna decremento.
- Otra posible forma de explicar estos resultados, podría ser por medio de la posibilidad de la existencia de dos o más pulsos de mineralización, en las cuales se tiene aportes casi similares de fluidos hidrotermales, o que la obra Sotomayor fue afectada por un segundo pulso de fluidos mineralizantes que solo alcanzo a penetrar en un nivel inferior.
- Que la estratigrafía este afectada por tectonismo.

Aun las diferencias de pulsos de mineralización que se pudieran presentar en el área de estudio, se ha observado una ligera diferencia en el control de la mineralización de las diferentes obras, siendo un control estructural por vetas semi-verticales en la obra de Sotomayor; mientras que dentro de la obra Amavisca, se presenta un control estructural

El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.

más definido por el límite de cabalgamiento el cual tiende a forma mantos mineralizados; esto también se puede observar en el depósito de Gilman, en donde Beaty et al (1990) presentan temperaturas de homogenización en los mantos mineralizados de 391-413 °C y salinidades promedio de 2.8 % NaCl equivalente, mientras que los resultados para un sistema de vetas más profundo en el mismo depósito se presentan temperaturas de homogenización de 174-306 °C y salinidades promedio de 5.2 % NaCl equivalente. Pero aun las diferencias presentes las dos obras dentro de la mina El Gachi presentan una mineralización típica de reemplazamiento.

Esta interpretación se podría enriquecer si pudiera tener acceso a las obras inferiores las cuales están aterradas o son de difícil acceso y así tener una mayor posibilidad de poder obtener muestras de buena calidad para realizar un zoneamiento más a detalle. Así como la falta de un estudio de catodoluminiscencia el cual podría resolver varios problemas referentes a las diferentes etapas de cuarzo presente en el área de estudio.

VIII.- Isótopos estables

La sistemática de isótopos estables es ampliamente utilizada en geología económica con el fin de caracterizar un depósito de mena, conocer el tipo de fluidos involucrados, su firma y fuentes, así como el tipo de ambiente al que pertenece. Para el estudio del depósito de Zn-Pb (Cu) El Gachi, se implementó esta técnica, realizándose 39 análisis de δS en sulfuros, todas ellas relacionadas a la etapa de mineralización económica en el depósito. Además, se seleccionaron un total de 56 muestras para analizar por δC y δO en carbonatos dentro y fuera de los cuerpos mineralizados y rocas calcáreas. Finalmente, los datos de isótopos estables son comparados con resultados en otros depósitos similares, con el objetivo de reconocer características propias y ubicarlos dentro de un sistema mineral específico.

VIII.1.- Isotopos estables de S

Se obtuvieron 39 valores de $\delta^{34}S$ dentro de diferentes obras mineras siguiendo un orden estratigráfico de la más profunda a más somera. Estos resultados están distribuidos de la siguiente forma: 18 análisis en muestras, provenientes de la obra Sotomayor, localizada al noroeste de la obra Amavisca y desarrollada por más de 100 mts, a lo largo de una veta con orientación NE-SW (Figura V.7). En la zona media se tiene la obra Amavisca (Figura V.8), en donde se obtuvieron 14 análisis de isótopos de S, y finalmente se tiene la obra Ana Dolores (Figura V.9), la cual se encuentra estratigráficamente arriba de las anteriores, y en donde se obtuvieron 7 valores de isótopos de S.

Para este estudio se consideraron los minerales de sulfuros más abundantes como pirita, esfalerita, galena, arsenopirita y pirrotita, todos ellos pertenecientes a minerales de mena económica del depósito El Gachi tal como se observa en la Figura V.1., el depósito carece de minerales de sulfatos en las zonas muestreadas. Los resultados de $\delta^{34}S$ de las distintas muestras de sulfuros se muestran en la Tabla VIII.1, donde se observa que los valores presentan un rango de $\delta^{34}S$ -1.7 a +7.6‰, con mayor dominio de valores positivos para la pirita y esfalerita. Se aprecia también, como los valores de $\delta^{34}S$ para Sotomayor, se disparan entre 5.5 a 6.9 ‰.

El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.

Tabla VIII.1.- Valores de $\delta^{34}\text{S}$ en sulfuros en las Obras Ana Dolores, Amavisca y Sotomayor. Ordenados según su nivel estratigráfico en orden ascendente y dividido por obra minera. (py = pirita; gal = galena; sp = esfalerita; po = pirrotita; mr = marcasita; asp= arsenopirita).

Muestras	Mineral	$\delta^{34}\text{S}\text{‰}$	Latitud	Longitud
<i>Ana Dolores</i>				
GA-21	py	2.7	585454	3351373
GA-21	gal	0.9	585454	3351373
GA-20	sp	3.0	585436	3351353
GA-21	sp	2.9	585454	3351373
GA-21	gal	0.9	585454	3351373
GA-21	py	2.7	585454	3351373
GA-21	sp	2.9	585454	3351373
<i>Amavisca</i>				
GA-28	py	1.9	585669	3349683
GA-28	gal	1.6	585669	3349683
GA-28	sp	0.8	585669	3349683
GA-27	gal	-1.7	585646	3349688
GA-27	sp	-0.7	585646	3349688
GA-77a	py	2.8	585593	3349729
GA-77b	sp	1.1	585593	3349729
Ga-77a1	stbn	0.7	585582	3349764
GA-77a2	stbn+sp	2.4	585582	3349764
GA-77a3	py	3.4	585582	3349764
GA-77a4	stbn	0.7	585582	3349764
No 2a	sp	2.6	585282	3351443
No 2b	mr	2.4	585282	3351443
No 2c	mr	3.0	585282	3351443
<i>Sotomayor</i>				
GA-13	py	6.6	586367	3351039
GA-13	py	6.5	586367	3351039
GA-13	gal	6.8	586367	3351039
GA-13	sp	5.9	586367	3351039
GA-13	sp	6.8	586367	3351039
GA-13a	asp	6.1	586367	3351039
GA-13b	po	6.4	586367	3351039
GA-13c	sp	5.7	586367	3351039
GA-11	py	5.8	586421	3351085
GA-11	sp	5.5	586421	3351085
GA-14	gal	5.5	586351	3351023
GA-14	sp	6.2	586351	3351023
GA-14	py	6.4	586351	3351023
GA-12	py	7.6	586409	3351076
GA-12a	po	6.9	586409	3351076
GA-12b	gal	3.4	586409	3351076
GA-12c	sp	6.3	586409	3351076
GA-75	py	6.8	586359	3351377

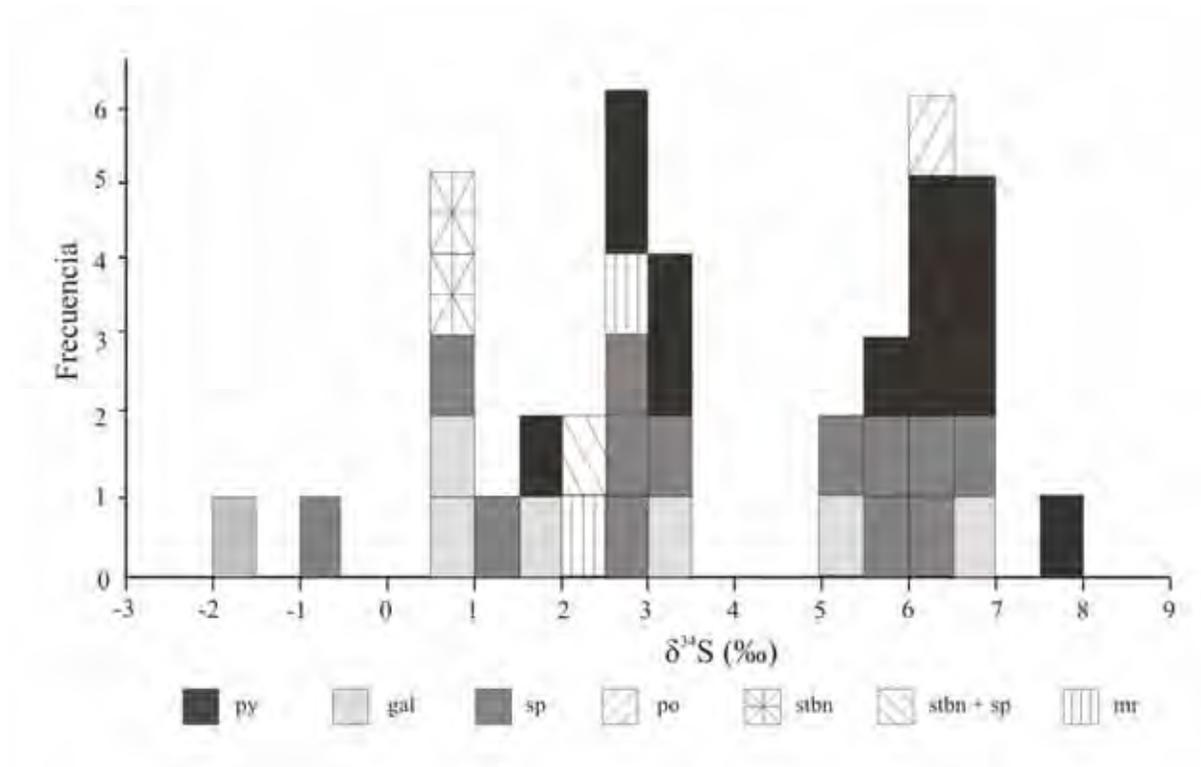


Figura VIII.1.- Histograma de frecuencia de valores de $\delta^{34}\text{S}$ obtenidos en la mineralización de sulfuros en la mina El Gachi. (py = pirita; gal = galena; sp = esfalerita; po= pirrotita; stbn = estibinita; mr = marcasita).

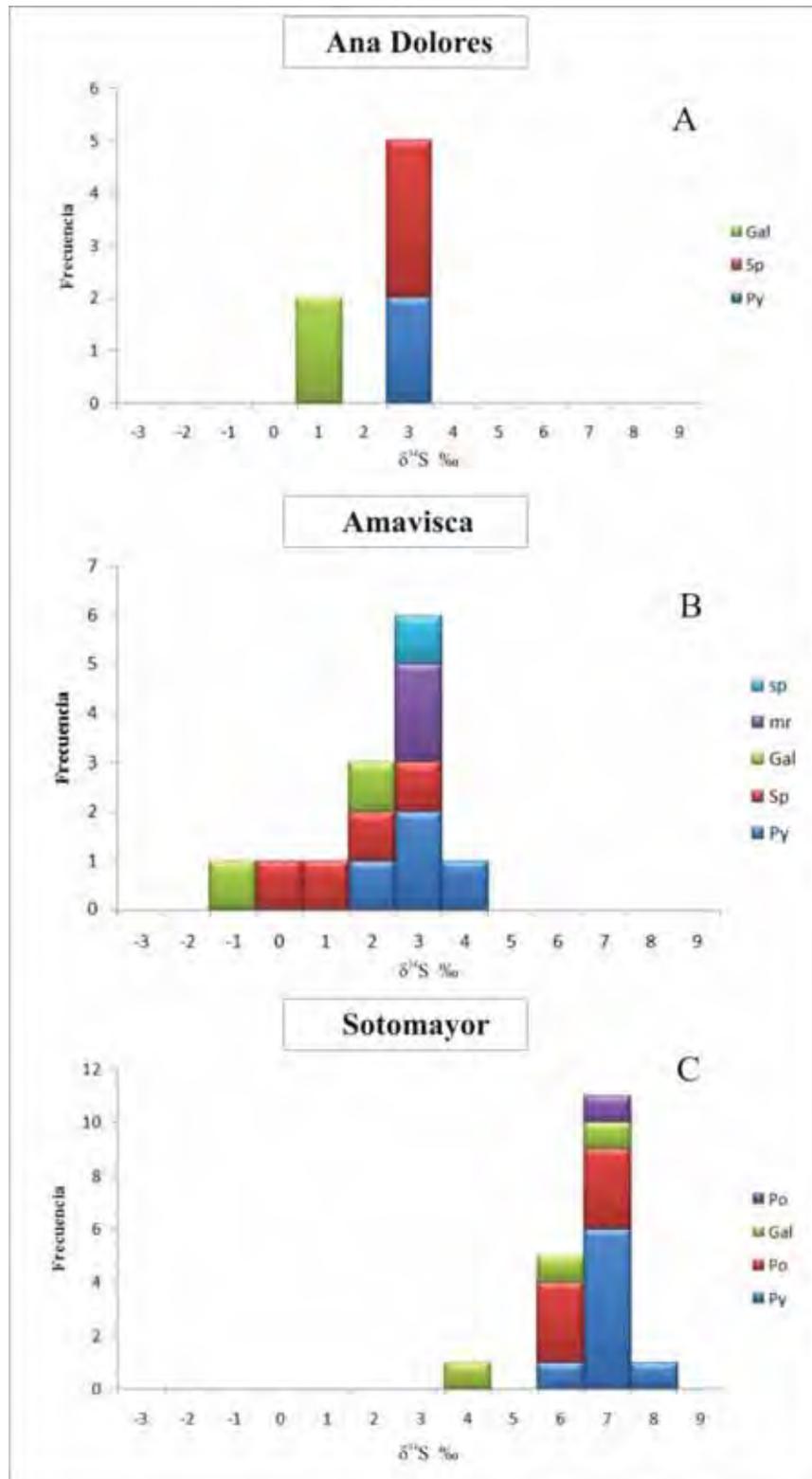


Figura VIII.2.- Histograma de frecuencia de valores de $\delta^{34}\text{S}$, para las diferentes obras con mineralización de reemplazamiento, presentándose en orden descendente. A) Obra Ana Dolores, B) Obra Amavisca, C) Obra Sotomayor. (py = pirita; gal = galena; sp = esfalerita; po= pirrotita; mr = marcasita).

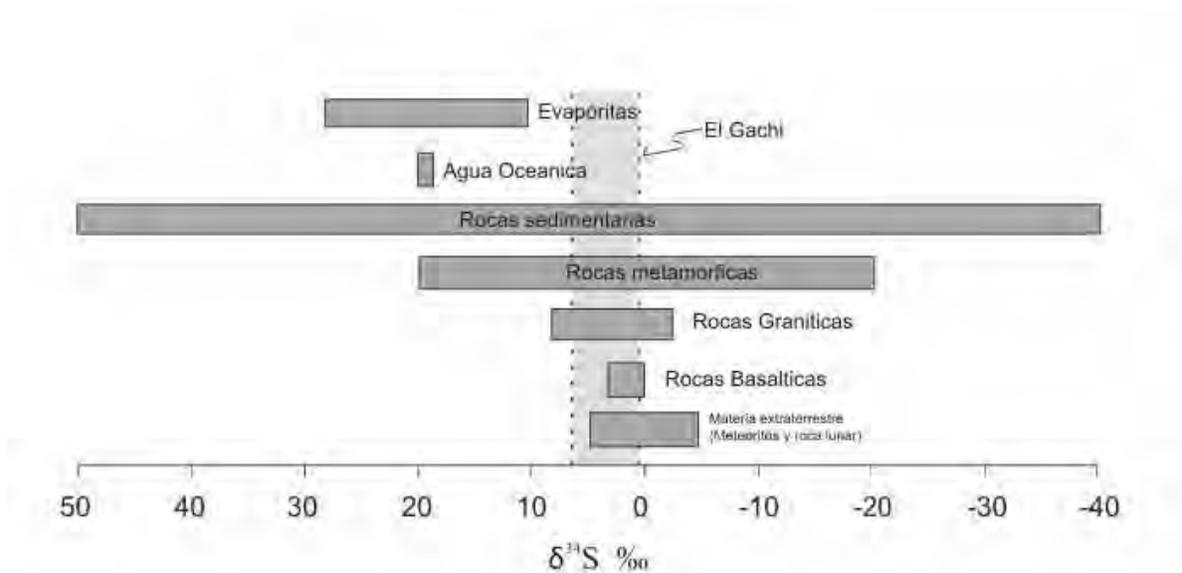


Figura VIII.3.- Rango de valores de $\delta^{34}\text{S}$ en sistemas geológicos (Modificado de Hoefs, 1980). La zona sombreada vertical representa el rango de los valores de $\delta^{34}\text{S}$ obtenidos en el depósito El Gachi.

Observando los valores obtenidos según el nivel estratigráfico donde se desarrollaron las obras, yendo desde el nivel más superior al inferior (Figura VIII.2, A, B y C), se aprecia que hay una gradación muy fuerte entre las unidades mineralizadas. En la obra Sotomayor (Figura V.7), la mineralización se presenta hospedada mayoritariamente en lutitas pertenecientes a la Formación Morita, y se presenta en forma de vetas irregulares con una asociación mineralógica compuesta de galena + esfalerita + pirrotita + arsenopirita + pirita, cuya variación isotópica de $\delta^{34}\text{S}$ oscila entre 3.4 a 7.6‰ (Tabla VIII.1, Figura VIII.2 C). En un nivel intermedio, la obra Amavisca (Figura V.8), alberga los mantos mineralizados más importantes de la mina El Gachi, la mineralización se encuentra hospedada en calizas con pequeños lentes de limolitas pertenecientes al Miembro Cerro La Ceja, dentro de la formación Mural; la asociación mineralógica consistente de galena + esfalerita + pirita + marcasita; las cuales presentan una variación isotópica de $\delta^{34}\text{S}$ muy cercana a cero, oscilando de -1.7 a +3‰ (Tabla VIII.1, Figura VIII.2 B). Por último en el nivel más superior, se encuentra la obra Ana Dolores (Figura V.9), este trabajo se ubica en

El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.

el contacto inferior del Miembro Lutita Tuape dominado por estratos limolíticos intercalados con capas de lutitas y pequeños lentes de calizas. Esta obra está desarrollada mayormente en estructuras verticales y en menor proporción por mantos mineralizados; la asociación mineralógica consiste de galena, esfalerita, pirita. Esta asociación mineralógica presenta una variación isotópica de +0.9 a +3‰ (Tabla VIII.1, Figura VIII.2 A).

Como se puede apreciar en el histograma de la Figura VIII.1, la mayor concentración de los valores de $\delta^{34}\text{S}$ se ubica en los picos de 0.5 a 3.5‰ y 5 a 7‰; de valores los cuales tienen en su mayoría rangos que van de 5.5 a 7% y corresponden a muestras tomadas dentro de la obra Sotomayor. Los picos más pequeños observados en el diagrama pertenecen a la obra Amavisca y Ana Dolores.

La Figura VIII.3 muestra los valores de $\delta^{34}\text{S}$ de diferentes sistemas geológicos. Esta figura también muestra el rango en valores de $\delta^{34}\text{S}$ en el depósito de El Gachi y se observa que el rango de valores coincide perfectamente con los rangos de rocas graníticas y basálticas y se encima a los valores de rocas sedimentarias.

VIII.1.1.- Geotermometría S

Se utilizó la sistemática de isótopos de azufre en pares minerales con el propósito de calcular la temperatura en que se depositaron las fases de los sulfuros, asumiendo que los pares minerales se depositaron en equilibrio isotópico.

La Figura VIII.4 muestra la fraccionación de varios minerales de azufre con respecto a H_2S . Se observa que el par pirita-galena tiene una gran diferencia en su pendiente de todos los minerales comunes usados como pares minerales. Esto significa que el par mineral pirita-galena va a tener la mayor dependencia de temperatura y por lo tanto será el par mineral ideal a utilizar en métodos geotermométricos (Campbell *et al.* 1998). Con esto en mente, los mejores pares minerales utilizados para geotermometría son los que tienen una dependencia de temperatura más amplia en la fraccionación isotópica. La Tabla VIII.2 muestra la selección de los pares minerales de esfalerita-galena, pirita-galena, pirita-esfalerita y pirita-pirrotita. Se obtuvieron 7 pares minerales para la obra Sotomayor, estas es la obra más profunda en el sistema. El valor más alto obtenido corresponde al par pirita-esfalerita con 479.2 °C, mientras que el valor menor es del par pirita-galena con una temperatura de 272.8 °C, obteniéndose una temperatura promedio de 393.8 °C. De los pares

utilizados para calcular la temperatura se descartaron dos pares minerales debido al alto valor de temperaturas que se calcularon, posiblemente estos no se encontraban en equilibrio isotópico, los cuales produjeron temperaturas entre 748.1 y 951.59 °C. Se realizaron 3 pares minerales pirita-esfalerita en sulfuros de zonas de reemplazamiento provenientes de la obra Amavisca, esta obra se encuentra en la parte media del sistema. Obteniéndose dos temperaturas de pares minerales de pirita-esfalerita de 151.43 y 248.85 °C, los cuales dan una temperatura promedio de 200.1 °C, se descartó uno de ellos obtenido debido a su alto valor, además que esta muestra ocurre en textura Rod (Fotografía V.11, V.16 c), la cual se cree que está formada por reemplazamiento de sulfuros, y explica el desequilibrio isotópico en las temperaturas calculadas. Finalmente para la obra Ana Dolores, esta es la obra más somera del área. Se obtuvieron dos pares minerales de esfalerita-galena y pirita-galena, los cuales arrojan temperaturas de 331.2 y 486.3°C, obteniéndose un promedio de 408.7°C. La primera y la última obra se encuentran controladas por estructuras semiverticales a diferencia de la obra Amavisca, que aunque se encuentra cortado por estas estructuras semiverticales, mayormente está controlada por mantos mineralizados de reemplazamiento, estas características podrían controlar las bajas temperaturas de formación en esta obra, pero para esto es necesario una mayor densidad de muestreo en el área, para poder asegurar esta idea.

Un valor de la temperatura mínima más acertada de la mineralización correspondería a los rangos de temperaturas entre los promedios de pares minerales individuales y el promedio general de los mismos, los cuales oscilan entre 334.2 a 354.1°C, para los fluidos responsables de la formación del depósito.

VIII.2.- Isótopos estables de Carbono y Oxígeno

Con el objetivo de determinar la variación isotópica del carbón y oxígeno de los fluidos mineralizantes, se realizó un estudio detallado de las razones isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en 55 valores de calcita recolectadas en partes cercanas y alejadas de la zona mineralizada. En las partes más lejanas, se tomaron en calizas a diferentes niveles estratigráficos, así como caliche dentro de fracturas de las rocas encajonantes; también, se recolectaron muestras que se encuentran relacionadas a los 2 eventos mineralizantes

El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.

presentes en el aérea, esto con la finalidad de determinar el tipo de fuente de fluidos que estuvieron involucradas en la formación de los cuerpos de mena.

Los datos isotópicos de C y O se muestran en las Tablas VIII.3 y VIII.4, se encuentran acomodados de tal manera que se dividen según el nivel estratigráfico al que

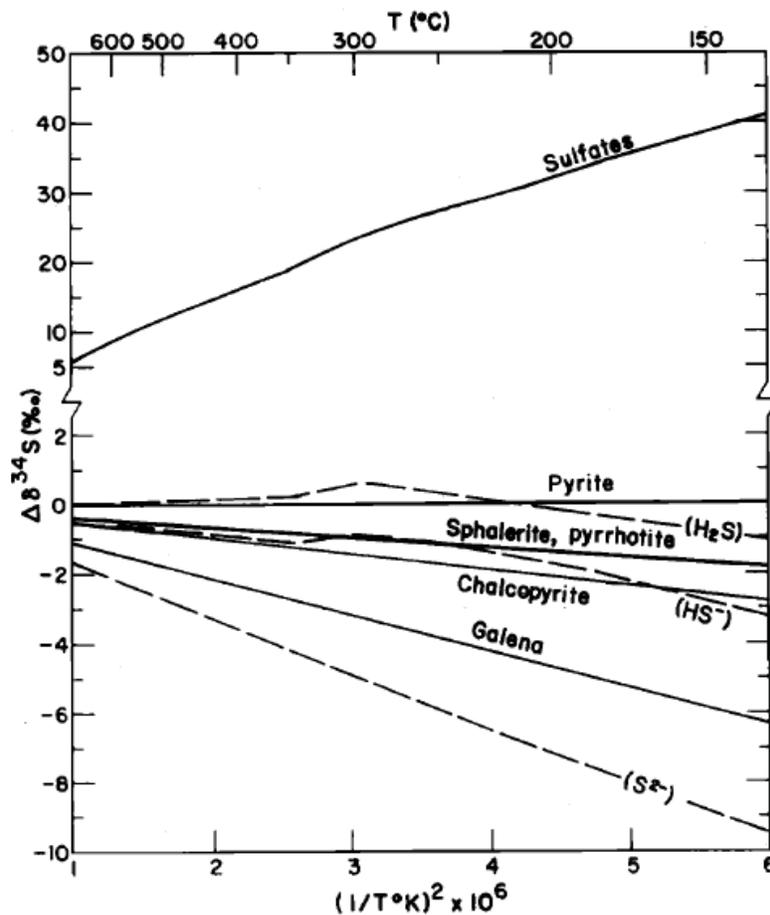


Figura VIII.4.- Fraccionación en equilibrio de varios minerales de azufre relacionados a H_2S . Las líneas punteadas son extrapoladas y calculadas teóricamente. Las líneas solidas son experimentalmente determinadas. Notar el decrecimiento en la fraccionación conforme incrementa la temperatura. (Ohmoto y Rye, 1979).

Tabla VIII.2.- Pares minerales en sulfuros, de las diferentes obras mineras que conforman la mina El Gachi, dispuestos en su respectivo orden estratigráfico.

Muestra	T (°C)	Par-mineral	T (°C)
<i>Ana Dolores</i>			Promedio
GA-21	331.2	Esf-Gal	408.7
GA-21	486.3	Py-Gal	
<i>Amavisca</i>			
No.2	578.4	Py-Esf	
GA-77	151.4	Py-Esf	200.1
GA-28	248.8	Py-Esf	
<i>Sotomayor</i>			
GA-12	272.8	Py-Gal	393.8
GA-12	479.2	Py-Esf	
GA-13	402.4	Py-Po	
GA-14	951.5	Py-Sp	
GA-13	380.8	Py-Sp	
GA-13	433.9	Py-Sp	
GA-14	748.1	Esf-Gal	
Promedio	354.1	Promedio	334.2
Descartados		/individual	

pertenecen. En la Figura VIII.5 se puede observar que el oxígeno presenta una variación entre +1.51 a +26.84 ‰, y abarca una gran extensión de ambientes como lo son el rango de rocas ígneas, rocas sedimentarias y un gran amplio rango de depósitos hidrotermales. Mientras que en la figura VIII.6 el carbonato varía de -5.02 a +0.98 ‰, que aunque se asemeja a los rangos de diferentes ambientes geológicos, sus valores se acercan al promedio de calizas marinas.

La Figura VIII.7 muestra un diagrama de variación isotópica entre $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$, con el propósito de caracterizar isotópicamente los fluidos involucrados en los procesos mineralizantes y la composición isotópica tanto de los diferentes tipos de roca encajonante como los posibles procesos geológicos registrados en el área de estudio. En la figura antes mencionada se observan las variaciones que se tienen en los diferentes sistemas propuestos. Como se puede observar la variación isotópica de C, dentro de la caliza no es muy grande, lo cual sugiere que guarda una semi-estabilidad, mientras que en el Miembro Lutita Tuape se observa una variación en $\delta^{13}\text{C}$ de -2.42 a -2.25‰ y en el Miembro Cerro La Ceja desde -0.95 a 0.98‰, y en $\delta^{18}\text{O}$ variando de +16.74 a +19.37 y +12.42 a +16.45‰ respectivamente. Las variaciones revelan un cambio de condiciones para los diferentes miembros, caracterizado por un decrecimiento en los valores de isótopos de oxígeno, y un cambio en los valores más negativos a positivos en los datos del carbono. Esto nos indica que los valores de carbono no sufrieron ninguna alteración aparente en sus firmas isotópicas y que estos se mantienen en la media de los valores de las rocas sedimentarias oceánicas. Por el contrario, las firmas isotópicas que presenta el oxígeno son más dispersas indicándonos que estas podrían haber sufrido un cambio en su proporción de $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ al momento de su depositación, y/o haber sido afectadas por la influencia de los fluidos mineralizantes.

El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.

Tabla VIII.3.-Valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$, de la zona mineralizada y calizas recolectadas dentro de la mina El Gachi. Los valores de los isótopos de oxígeno y carbono se expresan a SMOW y VPDB respectivamente.

Ubicación	Muestra	Comentario	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)
Zona mineralizada				
<i>Amavisca</i>	GA-1	Calcita pura	1.51	-2.16
	GA-1-1	Calcita pura	1.58	-2.28
	GA-28	Calcita lechosa	7.96	-1.39
	GA-1	Calcita lechosa	13.69	-2.85
	GA-24	Calcita con tono verdoso	15.61	-1.33
	GA-24	Calcita cristalina	13.24	-1.30
	GA-26	Calcita lechosa	16.03	-2.67
	GA-26	Calcita lechosa	15.78	-1.94
<i>Morita</i>	GA-54a	Vetilla de calcita (color blanco)	16.79	-4.49
	GA-10	Calcita lechosa	15.23	-1.89
	GA-10-1	Calcita lechosa	17.39	-0.83
	GA-10	Smoky calcite (lechosa)	17.89	-0.53
	GA-54b	Vetilla de calcita (color blanco)	13.42	-4.87
	GA-54c	Roca encajonante de la muestra GA-54	10.49	-3.94
	GA-54d	Roca encajonante de la muestra GA-54	8.38	-3.88
	GA-7(1)	Calcita lechosa	14.30	-4.43
	GA-7(1)	Calcita lechosa	12.94	-5.02
	GA-7(2)	Calcita lechosa	13.56	-4.98
<i>Vetillas de Sb y calcita</i>	GA-77a		15.66	-6.54
	GA-77b		13.37	-3.31
	GA-71a	Briqueta para sección reflejada	18.90	-3.17
Caliza				
<i>Lutita Tuape</i>	GA-04-09b	Caliza con caliche en una fractura	19.37	-2.42
	GA-04-09a	Caliza con caliche en una fractura	16.74	-2.25
<i>Cerro la Ceja</i>	GA-02-09d	Caliza encajonante alejado de vetilla	16.45	-0.49
	GA-01-09c-1		15.47	-0.16
	GA-02-09c	Caliza encajonante a lado de vetilla	15.72	-0.11
	Caliza Gachi	Caliza	14.46	0.48
	Caliza Gachi	Ceta calcita blanca	14.17	0.98
	GA-01-09c	Caliza con evidencias hidrotermalismo	13.00	0.35
	Caliza Gachi	Caliza	13.84	-0.47
	Caliza Gachi	Veta calcita blanca tr. de sulfuros	12.42	-0.95

El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.

Tabla VIII.4.- Valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$, correspondiente a caliche dentro de fracturas, calcitas y caliza en roca volcánica, dentro del área de la mina El Gachi. Los valores de los isótopos de oxígeno y carbono se expresan respecto a SMOW y VPDB respectivamente.

Ubicación	Muestra	Comentario	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)
Calcitas				
<i>Cerro la Ceja</i>				
	GA-19-09	Calcita blanca	15.49	0.71
	GA-20-09	Calcita blanca	12.61	-3.07
	GA-08-09	Calcita blanca	10.41	-0.98
	GA-08-09a		10.96	-1.32
	GA-02-09b	Vetilla de calcita (color blanco)	12.85	-3.69
	GA-01-09b	Veta de calcita (color blanco)	11.63	-1.05
	GA-01-09b-1		13.60	-2.09
	GA-07-09	Calcita ahumada	13.47	-1.37
	GA-07-09a		13.54	-1.62
	GA-02-09a	Vetilla de calcita (color blanco)	14.52	-1.45
	GA-06-09b	Roca encajonante	15.14	-0.50
	GA-06-09a	Calcita blanca	16.26	0.08
	GA-17-09b	Roca encajonante	14.77	-1.11
	GA-18-09a	Calcita blanca	13.55	-2.29
	GA-18-09b	Roca encajonante	13.74	-2.37
	GA-14-09	Calcita blanca	3.51	-1.03
	GA-14-09a		4.43	-1.00
<i>Lutita Tuape</i>				
	GA-01-09a	Veta de calcita (color blanco)	17.71	0.16
	GA-04-09a-1		18.88	-2.78
	GA-05-09a	Calcita blanca	15.15	-2.57
	GA-05-09a-1		15.30	-2.48
Caliza en Volcánicas				
	GA-22-09	Calcita entre ahumada y blanca	18.71	-1.22
	GA-03-09	calcita blanca	19.25	-2.09
Caliche en fracturas de caliza				
	GA-04-09c	Caliche en fractura	26.84	-1.22

El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.

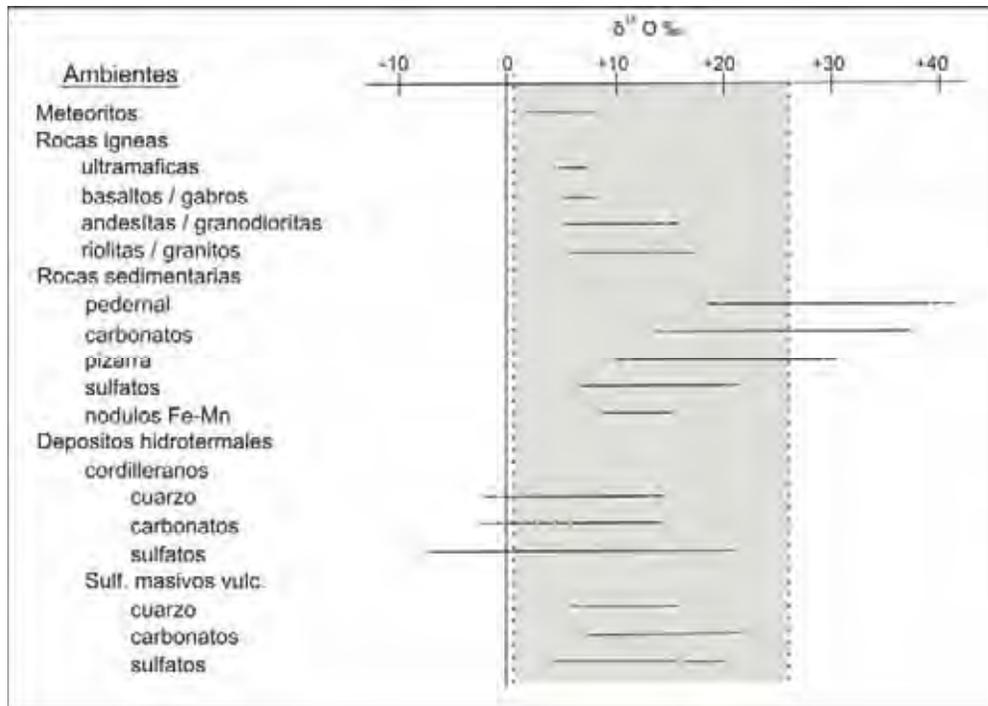


Figura VIII.5.- Distribución de $\delta^{18}\text{O}$ en ambientes geológicos (Field *et al.* 1985). La zona sombreada representa los valores de isótopos de oxígeno de la zona mineralizada en El Gachi. Los valores de los isótopos de oxígeno se expresan respecto a SMOW.

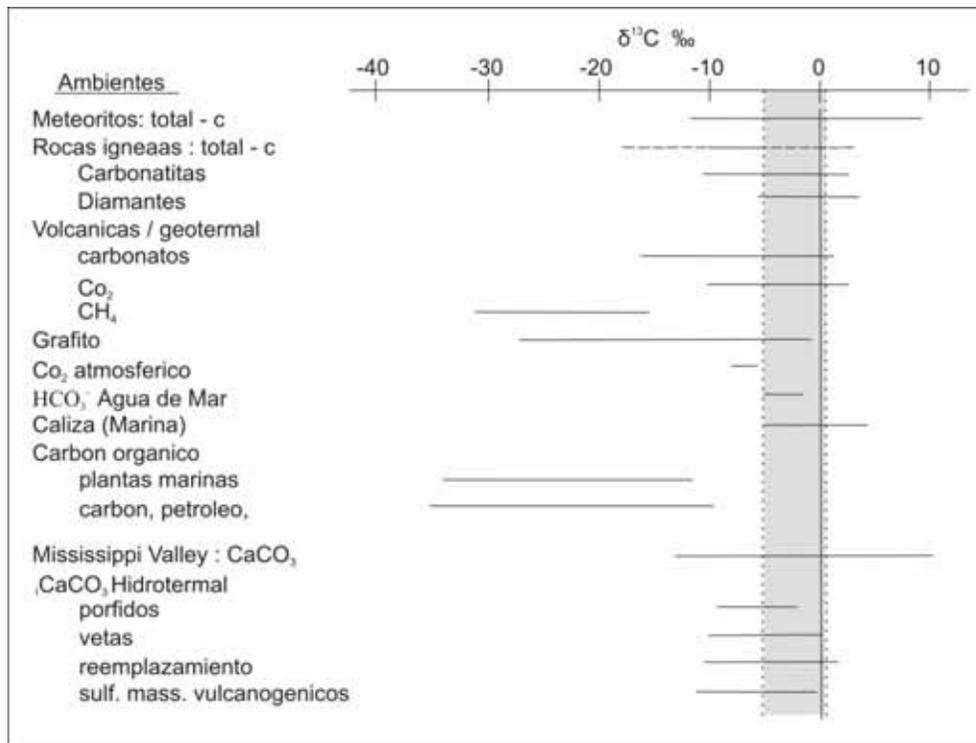


Figura VIII.6- Distribución de $\delta^{13}\text{C}$ en ambientes geológicos (Field *et al.* 1985). La zona sombreada, representa los valores de carbonatos de El Gachi.

Las calcitas que se encontraron asociadas a zonas mineralizadas acompañadas por sulfuros característicos del depósito (esfalerita, galena, pirrotita y piritita), presentan un comportamiento isotópico esperado, ya que estos presentan una fraccionación cerca de las zonas mineralizadas. Estas calcitas tienen un aporte de fluidos hidrotermales representado por su variación en la negatividad en los valores de $\delta^{13}\text{C}$, esto combinado con los valores de $\delta^{18}\text{O}$ que presentan un decrecimiento hacia un valor cercano a 0‰ probablemente ejercido por el calor generado y la interacción de los fluidos con la roca encajonante, mezclando los valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en el depósito. Observándolos individualmente, los carbonatos asociados a la Formación Morita presentan una fraccionación negativa, con un rango de $\delta^{13}\text{C}$ que varía de -0.53 a -5.02‰ y $\delta^{18}\text{O}$ de +8.38 a +17.89‰ (Tablas VIII.3 y VIII.4). Mientras que los análisis asociados a la Formación Mural, específicamente dentro y en las cercanías de la obra Amavisca, presentan una fraccionación no tan evidente en el carbón, donde los valores de $\delta^{13}\text{C}$ oscilan de -1.30 a -2.85‰, mientras que los $\delta^{18}\text{O}$ tienen una gran variación de +1.51 a +16.03‰, esto nos indicaría un aporte de fluidos de origen meteórico. Dentro de estos análisis asociados a la mineralización de tipo epitermal, los carbonatos no presentan una variación tan grande como lo es para la mineralización de reemplazamiento, donde se caracterizan por un empobrecimiento en los valores de isótopos de $\delta^{13}\text{C}$ -3.31 a -6.54‰ y enriquecimiento en $\delta^{18}\text{O}$ con valores entre +13.77 a +18.90 ‰. Esto nos indica que las calcitas presentan una gran correlación genética con la roca encajonante y con sus fluidos mineralizantes.

Los valores de las calcitas que se asocian a los niveles calcáreos de la Formación Mural (miembros Cerro La Ceja y Tuape) tienen un comportamiento isotópico similar a las calizas en el área, el cual luego migra a un fraccionamiento influenciado posiblemente por la interacción de los fluidos mineralizantes junto con una fuerte interacción roca-fluidos. En el Miembro Cerro la Ceja se observa un rango muy cercano al cero, con variación de $\delta^{13}\text{C}$ +0.71 a -3.69‰ y en contraparte se observa un gran empobrecimiento en los valores de $\delta^{18}\text{O}$ que va de +16.26 a +3.51‰, esto debido a la influencia de los fluidos mineralizantes; a su vez un fraccionamiento negativo en las calcitas de miembro Lutita Tuape con variación de los valores en $\delta^{13}\text{C}$ de +0.16 a -2.78‰ evidenciando una mayor presencia de $\delta^{12}\text{C}$ en los fluidos involucrados en la formación del depósito mineral, con una variación en los valores de $\delta^{18}\text{O}$ en +15.15 a +18.88‰, concentrándose principalmente de +12.85 a +15.14‰.

El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.

Se obtuvieron dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$ para vetillas de calcitas que se encontraron cortando a rocas volcánicas pertenecientes a sedimentos volcánoclasticos correlacionables con los de la Formación Baucarit. Los valores nos indican una fuerte relación de esta calcita con las calcitas que se encuentran dentro de las calizas de la Formación Mural; específicamente en el miembro de Lutita Tuape.

Se analizo una muestra correspondiente a Caliche dentro de fracturas en la caliza mural, presenta valores muy enriquecidos de oxígeno en comparación con los anteriormente obtenidos y valores de carbonatos dentro del rango de calizas marinas, teniendo un valor en $\delta^{18}\text{O}$ de +26.84‰ el cual es el valor más positivo en el área y se asocia un ambiente más sedimentario, junto con un valor de $\delta^{13}\text{C}$ -1.22‰.

La variación tan baja en los valores $\delta^{13}\text{C}$ parecen indicar primeramente que el aporte de carbono en los fluidos que intervinieron son isotópicamente constantes, y que posiblemente los fluidos presentes en el evento mineralizante en el área de El Gachi, fueron derivados de una fuente marina carbonatada. Principalmente se asume que la firma isotópica es debida a la fuerte interacción que tienen los fluidos con la roca encajonante de carácter oceánico, como lo son las rocas pertenecientes al Grupo Bisbee. En cambio los valores de $\delta^{18}\text{O}$ presentan una variación mayor, relacionado a fluidos híbridos (fuentes variadas), como lo son ambientes ígneos, agua oceánica y/o meteórica. Debido a que el oxígeno es un constituyente mayor de la corteza terrestre (46.6 %) el valor de $\delta^{18}\text{O}$ en los fluidos es más propenso a ser fraccionado por reacciones fluido-roca. La Figura VIII.8, muestra el mapa de isóvalores de $\delta^{18}\text{O}$, y muestra una fraccionación isotópica hacia las zonas mineralizadas debido a los cambios de temperatura, caracterizados por valores cercanos al cero en las zonas de los cuerpos mineralizados de Pb y Zn y con valores de hasta 20‰ en las zonas distales de la mineralización. Se presume que la variación de las razones isotópicas de oxígeno es debido a la interacción de los fluidos mineralizantes con los sedimentos dentro del Grupo Bisbee.

El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.

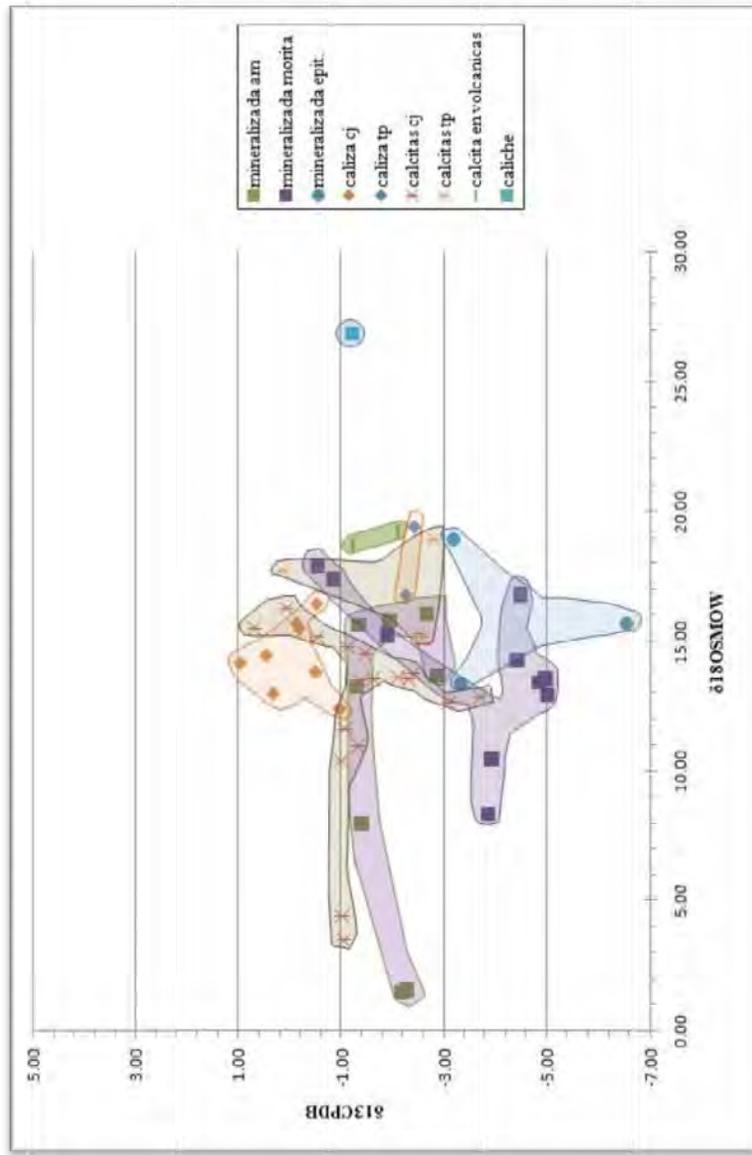


Figura VIII.7.- Diagrama de variación isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$, obtenidos dentro del área de la mina El Gachi. Los valores de los isótopos de oxígeno y carbono se expresan a SMOW y VPDB respectivamente. (Caliza Cj: Caliza Cerro la Ceja; Caliza tp: Caliza Lutita Tuape.)

El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.

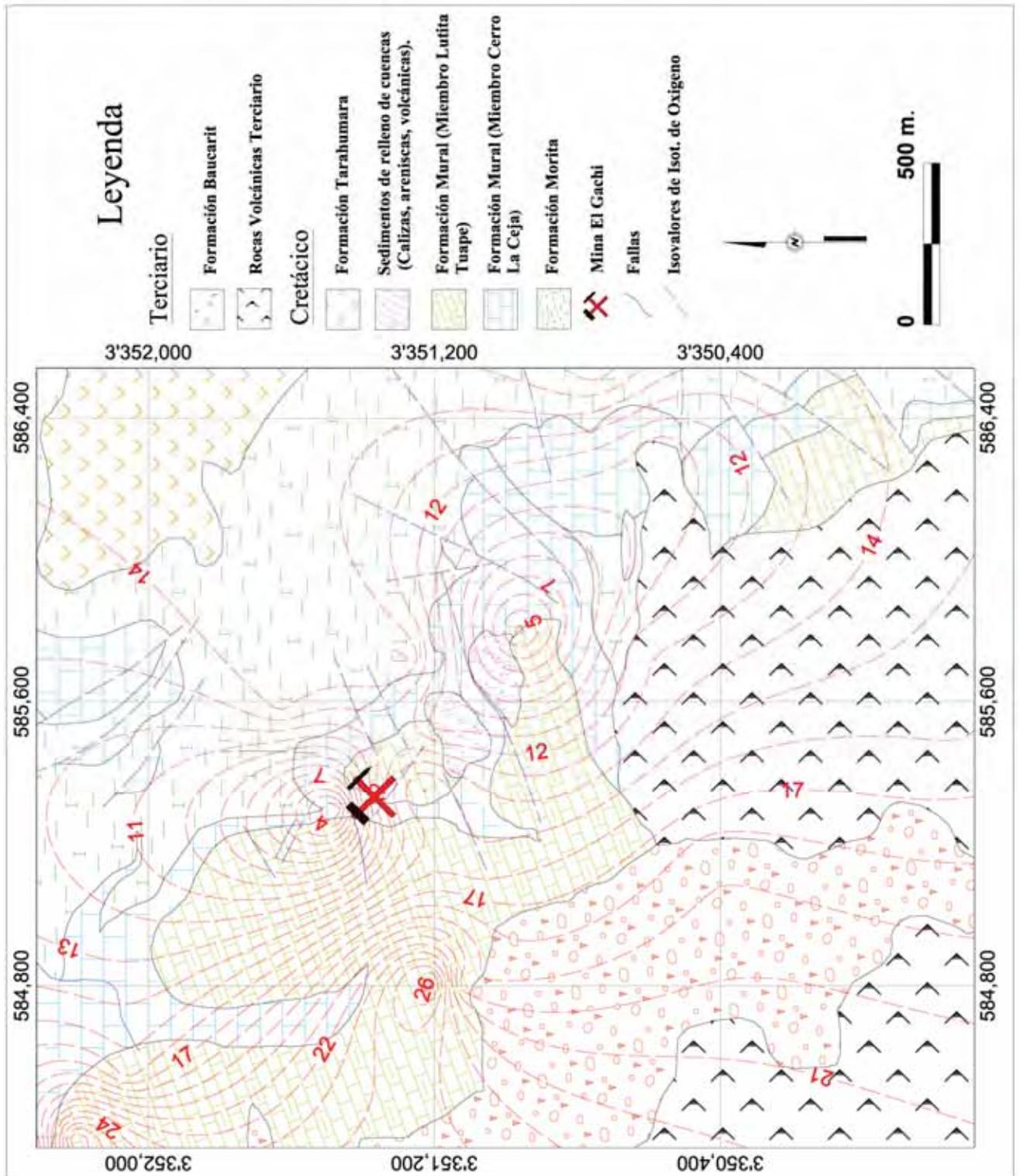


Figura VIII.8.- Mapa isovalores de $\delta^{18}\text{O}$ en carbonatos dentro del área de la mina El Gachi.

VIII.3.-Comparación de valores de Isótopos estables con otros distritos en México y el mundo.

El depósito de reemplazamiento El Gachi, reúne algunas características geológicas y geoquímicas que sirven para compararlos con otros depósitos con características similares en México y a nivel mundial. En el caso de los valores de isótopos estables y los rangos de temperatura para los fluidos mineralizantes del depósito El Gachi, pueden ser comparado con los depósitos de reemplazamiento de Gilman y Leadville en Colorado; así como el gran depósito de Kabwe en Zambia al sur del continente Africano. En México se puede comparar con los yacimientos de Santa Eulalia, Naica, La Encantada, y Providencia entre otros (Tabla VIII.5). Aunque todos estos guardan características especiales, al menos en un contexto general, se caracterizan por estar hospedados en rocas carbonatadas, tener mineralización polimetálica relacionado regularmente a fuentes de origen mayormente magmático, y comúnmente asociados a estructuras que sirvieron de alimentadores del depósito.

Según Field et al. (1985), los sulfuros y sulfatos de depósitos hidrotermales de tipo cordilleranos generalmente están empobrecidos en valores de $\delta^{34}\text{S}$ cuando son comparados con los depósitos de sulfuros masivos. Los depósitos cordilleranos incluyen un gran espectro de valores isotópicos como los son los depósitos de pórfidos cupríferos, vetas y de reemplazamiento que aparentemente se encuentran carentes de una firma isotópica distintiva a pesar de las diferencias en su roca encajonante, metales, minerales. Los valores $\delta^{34}\text{S}$ de sulfatos y sulfuros de la mayoría de estos depósitos son consistentes con un origen magmático mostrando valores alrededor del 0‰. En contraste, los isótopos de los sulfuros volcanogénicos son normalmente enriquecidos en $\delta^{34}\text{S}$ (+12 a + 39 ‰) debido a que la fuente principal del azufre se deriva mayormente del agua mar. Sin embargo, se conoce variaciones que llegan a ser mayores, como es el caso de Santa Eulalia, cuyos valores varían de -20 a +4‰ lo que parece indicar múltiples fuentes para el azufre involucrado en la mineralización (Megaw et al. 1988).

La temperatura de los fluidos mineralizantes en diversos distritos con depósitos de reemplazamiento varía entre 200 y 500 °C (Tabla VIII.5), pero en muchos de estos depósitos se encuentran asociados a depósitos de skarn. Analizando las máximas temperaturas de formación para los skarn, los cuales se dividen en skarn de granate y skarn

de piroxeno, se observa que estos abarcan rangos de temperatura de 680 a 400°C y de 450 a 360°C, respectivamente. Comparando estas temperaturas con el rango de temperatura máximas para depósitos de reemplazamiento libres de skarn que son de 450 a 375°C (Enaudi *et al.* 1981), se observa que los depósitos de reemplazamiento libres de skarn podrían no representar los depósitos más distales, de baja temperatura como lo sugiere la evolución normal de los skarn (Gilg. 1996), sino estar casi a la par, siendo la única diferencia la variación mineralógica que se presenta entre ellos. En columna 4 de la Tabla VIII.5, se muestra una comparación de los rangos de $\delta^{34}\text{S}$ y en la Figura VIII.9 se presenta una comparación de los rangos de depósitos de reemplazamiento contra algunos depósitos de pórfido de cobre en Sonora y Arizona. Se observa que estos guardan una relación genética, y que su fuente es principalmente magmática.

A su vez en la Tabla VIII.5 se puede observar que los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ de los diferentes depósitos presentan una variación muy diferente y revelan una firma particular para cada depósito, lo cual refleja que aunque puedan caracterizarse por una fuente principalmente magmática, los componente de roca encajonante, la fugacidad existente, la variación en el pH, afecta la estabilidad isotópica y pueden afectar la manera en la que sus firmas se comportaran.

Estudio extensos realizados por diferentes autores (Thompson *et al.* 1990; Gilg, 1993; So *et al.* 1993) en la paragénesis de depósitos de reemplazamiento. Se a demostrado que estos depósitos retienen una firma isotópica magmática, lo cual revela una gran asociación con el empobrecimiento del $\delta^{18}\text{O}$, junto con una baja salinidad y mezcla de aguas meteóricas.

Los resultados obtenidos en isotopos estables de C, O y S, para el depósito El Gachi, revelan una fuente magmática la cual tuvo una interacción con aguas meteóricas, esto es muy común en este tipo de sistemas (ejemplos, Kassandra; Gilg, 1996; Leadville district, Colorado; Beaty *et al.* 1990; Santa Eulalia, Plomosas; Megaw *et al.* 1988; Depósitos de la Cordillera Oeste; Titley, 1990), estos valores han sufrido modificaciones de sus firmas a partir de interacción fluido roca, las cuales pertenecen al Grupo Bisbee, esto se puede apreciar muy bien en el histograma de frecuencia de los valores de $\delta^{34}\text{S}$ (Figura VIII.2), y en los valores de $\delta^{18}\text{O}$, dándonos como resultado un sistema mineral muy complejo en el cual la naturaleza de los fluidos guardan su historia de formación, que

El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.

aunque no puede ser resuelta en su totalidad con la información obtenida en este trabajo, nos da una idea general de su evolución.

Depósitos de Reemplazamientos	$\delta^{18}\text{O}$ SMOW ‰	$\delta^{13}\text{C}$ VPDB ‰	$\delta^{34}\text{S}$ TCD ‰	Temperatura (°C)	Ref.
El Gachi (Mexico)	+1.51 a +26.84	-5.02 a +0.98	-1.7 a +6.8	200 - 408	a
Providencia (Mexico)	+12 a +23	-8.5 a +2		200 - 425	b
St. Eulalia (Mexico)	+12 a +21	- 10 a +3	-10 a +3	200 - 375	c
Naica (Mexico)	+7.5 a +16	-1.2 a -6.3	+4	250 - 500	d
La Encantada (Mexico)	+18 a +24	-3 a -8.7		360 - 400	e
Gilman (USA/Colorado)	+6.8 a +25.3	-7.8 a +1.2	-1.3 a +2.4	309 - 413	f
Leadville (Colorado)	+6.9 a +25.72	-4.64 a +1.55	- 2.4 a +3	220 - 470	g
Kabwe (Africa/ Zambia Central)	+27.68	+2.89	-17.75 a -11.7	257 - 385	h

Tabla VIII.5.-Tabla con rango de valores de isótopos estables y temperaturas mínimas de formación de los fluidos mineralizantes en depósitos de reemplazamiento en el mundo. Referencia: a.-Presente trabajo; b.-Rye (1966, 1974); c.-Megaw (1989); d.- Ruiz y Bartón (1985); e.-Díaz (1986, 1987); f.-Thompson (1990); g.-Beaty, 1990; h.-Kamona et al. (2006).

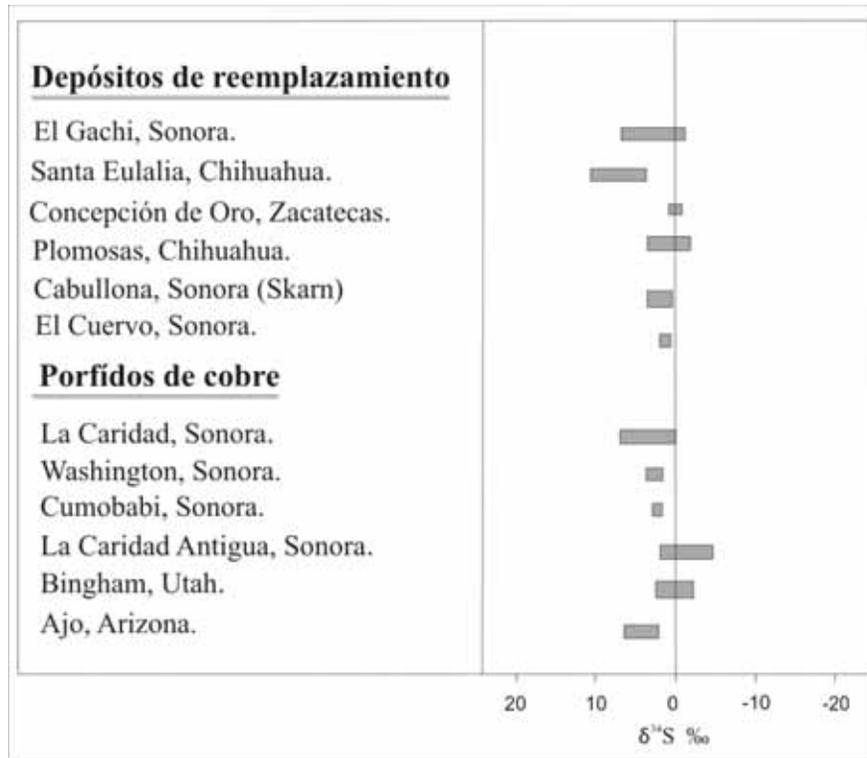


Figura VIII.9.- Comparación de valores de isótopos de S en diferentes depósitos de reemplazamiento vs Pórfidos de Cu. Referencias: *Reemplazamiento*.- Presente trabajo, Megaw (1988), Megaw (1985), Ochoa-Landín (en preparación). *Pórfidos de cobre*: Valencia V. (2005), Zúñiga. L. (en preparación), Cyrus (1971).

IX.- Discusión

Para el depósito El Gachi, se presentan diferentes hipótesis, como alternativas para la edad de la mineralización y deformación del depósito mineral, ya que este estudio carece de un fechamiento directo de la mineralización, junto con la problemática de que dentro del área del depósito se tiene la ausencia de un cuerpo intrusivo, el cual nos podría aportar algún indicio de la fuente del mineral; en este estudio se presentan dos posibles escenarios, para resolver estas incógnitas: (1) el primero es que la mineralización se halla formado en forma de mantos dentro de las secuencias sedimentarias del Grupo Bisbee por medio de estructuras de debilidad en la roca y posteriormente por eventos de compresión se hallan deformado (2) la otra es que la deformación de las secuencias encajonantes se dio en una primera etapa, después de esto los fluidos mineralizantes fueron transportados a través de las estructuras de compresión y cabalgamiento, dando lugar a la deformación presente, y posterior a la mineralización. Para poder dar respuesta a las posibles hipótesis primeramente se tendrá que observar los eventos de deformación que presenta el área de estudio, desde un contexto general al particular, esto se discute a continuación.

Se tienen evidencias de que las rocas sedimentarias del Grupo Bisbee que afloran en el estado de Sonora, fueron deformadas por eventos de compresión los cuales han sido documentados anteriormente por González-León (1978), en la cual se registran acortamientos debido a pliegues, presentando vergencias al noroeste que afectan a las rocas del Grupo Bisbee y rocas volcánicas de la Formación Tarahumara; estas estructuras de acortamiento coinciden con estructuras más antiguas del Mesozoico tardío, las cuales presentan la misma dirección e indican un acortamiento de la corteza, estas estructuras son reconocidas a través de más de 1100 km de largo, presentándose en los estados de Sonora, Baja California, Sinaloa y Nayarit (Henry C. D. 1986); dentro del área de estudio estas se presentan en algunas zonas más cercanas al depósito mineral; se cree que esta deformación se dio a finales del Albiano, edad que corresponde a la unidad más joven del Grupo Bisbee (González-León, 1994, Henry, 1986), y anterior al Campaniano Tardío, como lo indican las edades isotópicas de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 72.1 y 69.1 Ma en biotitas pertenecientes a rocas andesíticas nombradas informalmente Arroyo Alcaparros, las cuales no registran esta deformación. Este estilo de deformación se presenta tanto al noreste de Sonora como al sureste de Arizona, los cuales tienen una historia geológica muy similar; con estructuras de

compresión presentado vergencias hacia el NE; todo esto debido a la compresión de la llamada “Orogenia Laramide”, la cual está registrada como la fase Pima en Arizona, y actuó del Campaniano a posiblemente principios del Paleoceno (Drewes, 1981), indicándonos que la deformación no se dio al mismo tiempo en toda la región, sino que tuvo un efecto diacrónico. Un buen ejemplo en el noreste de Sonora es la falla de cabalgamiento de Cabullona, la cual fue inicialmente observada por Taliaferro (1933) y subsecuentemente por Rangin (1977); esta es una estructura tectónica regional de varias decenas de kilómetros de largo. Taliaferro estimó un desplazamiento mínimo de 2.5 Km, basado en la observación de que toda la sección del Cretácico Inferior de la Sierra Anibacachi al sur de Agua Prieta ha sido cortada por esta falla. Esto es importante, ya que una gran parte de los depósitos de reemplazamiento están controlados por estructuras las cuales sirven como conductos alimentadores de los mantos que los forman, esto se puede observar en diferentes depósitos como lo son Naica (Stone, 1959; Ruiz y Barton, 1985), Santa Eulalia (Hewitt, 1943), Providencia (Tripplett, 1952; Megaw, 1988), Gilman (Snively, 1952) y Leadville (Henderson, 1926; Bryant, 1979). Además de la compresión, en los alrededores del área se presentan al menos dos etapas de fallamientos extensionales, están registradas por González-León (2000); dentro del área regional del depósito El Gachi, donde las estructuras más antiguas registran un fallamiento normal con una orientación noroeste y que son cubiertas por las rocas del Baucarit hacia el NW del área de estudio; se tiene registrado que este fallamiento se presentó hacia finales del Oligoceno Tardío. Mientras que el segundo evento de fallamiento en el área está caracterizado por fallas normales con una orientación hacia el norte, las cuales desplazan a al primer fallamiento extensional; a su vez se conoce que este último evento está genéticamente relacionado con la depositación de la Formación Baucarit, esto de acuerdo a las edades isotópicas $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ que se han obtenido de los flujos basálticos interestratificados con esta formación.

Si se analiza la primera hipótesis con respecto a las evidencias de deformación y extensión, comentadas anteriormente, se tendría que ubicar la edad de mineralización entre finales del Albiano, edad que corresponde a la unidad más joven del Grupo Bisbee (Gonzales-León, 1994), pero anterior al Campaniano, lo cual lo ubicaría en el rango de los 70 a >99 Ma aproximadamente y representaría unas de las edades de mineralización más

antiguas para Sonora y el noroeste de México; al revisar las edades de intrusivos cercanos al área y con alguna edad similar, se observa que hay una ausencia de estos en los alrededores, solo pudiendo observar intrusivos menores a 70 Ma; pero al sur del estado, se reportan edades de cristalización de ~91 a ~89 Ma para el batolito de Bacanora y el pórfido San Lucas respectivamente, estos aparentemente fueron la fuente de mineralización para el skarn de Cu-Zn-Ni-Co La Esperanza (Pérez-Segura et al. 2004), estos representan el evento intrusivo más antiguo del Cretácico reportado en Sonora centro-oriental, y son interpretados como edades correspondientes al inicio del evento magmático “*Laramide*” (Pérez-Segura et al. 2009).

Para la segunda hipótesis, la edad de formación del depósito se ubicaría posterior a última fecha de deformación registrada para las rocas sedimentarias del Grupo Bisbee, por lo que se asumiría que la mineralización se formó por un evento menor a 70 Ma aproximadamente; al revisar la literatura por intrusivos presentes dentro de la región, se tiene que el intrusivo más cercano al cual se podría atribuir como fuente de mineralización es la Cuarzo Monzonita del Rancho Vaquería (Fotografías IX.1a y b), esta se localiza a 10 km al norte del área de estudio; esta roca se caracteriza por tener una textura porfírica, con fenocristales de oligoclasa y andesina, las cuales presentan tamaños de hasta 2 mm de largo (Fotografías IX.1c, d y e). Los cristales de plagioclasas están parcialmente alterados a serícita y otros minerales argílicos. Una edad por el método Ar-Ar fue obtenida en biotita arrojando una edad de 56.73 ± 0.7 Ma (González-León. 2000); esta edad es contemporánea con los intrusivos considerados como parte del cinturón de volcánico-plutónico resultado de la subducción de la placa Farallón (Coney, 1977; Damon et al. 1981; Clark et al. 1982), es asociada a la formación de muchos depósitos minerales en el Noroeste de Sonora (Tabla X.1) y Suroeste de Estados Unidos, como lo son el cinturón de Pórfidos de Cobre, en el cual se incluye el depósito Cananea que comparte una edad de aproximadamente 56.5 ± 3.2 Ma K-Ar (Anderson y Silver. 1977) y de 59.3 ± 0.3 Ma Re-Os (Barra et al. 2005); regionalmente se pueden observar diferentes edades de mineralización para el Noroeste de México dentro de la cual se pudo observar que las edades de los depósitos de pórfidos de cobre en la provincia de Norte América varían en Bagdad, Arizona de ~76 Ma, hasta a ~50 Ma en Tameapa, Sinaloa (Barra et al. 2005); por lo que la mineralización que se observa dentro de la Mina El Gachi, se podría ubicar dentro de este lapso. Analizando la

El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.

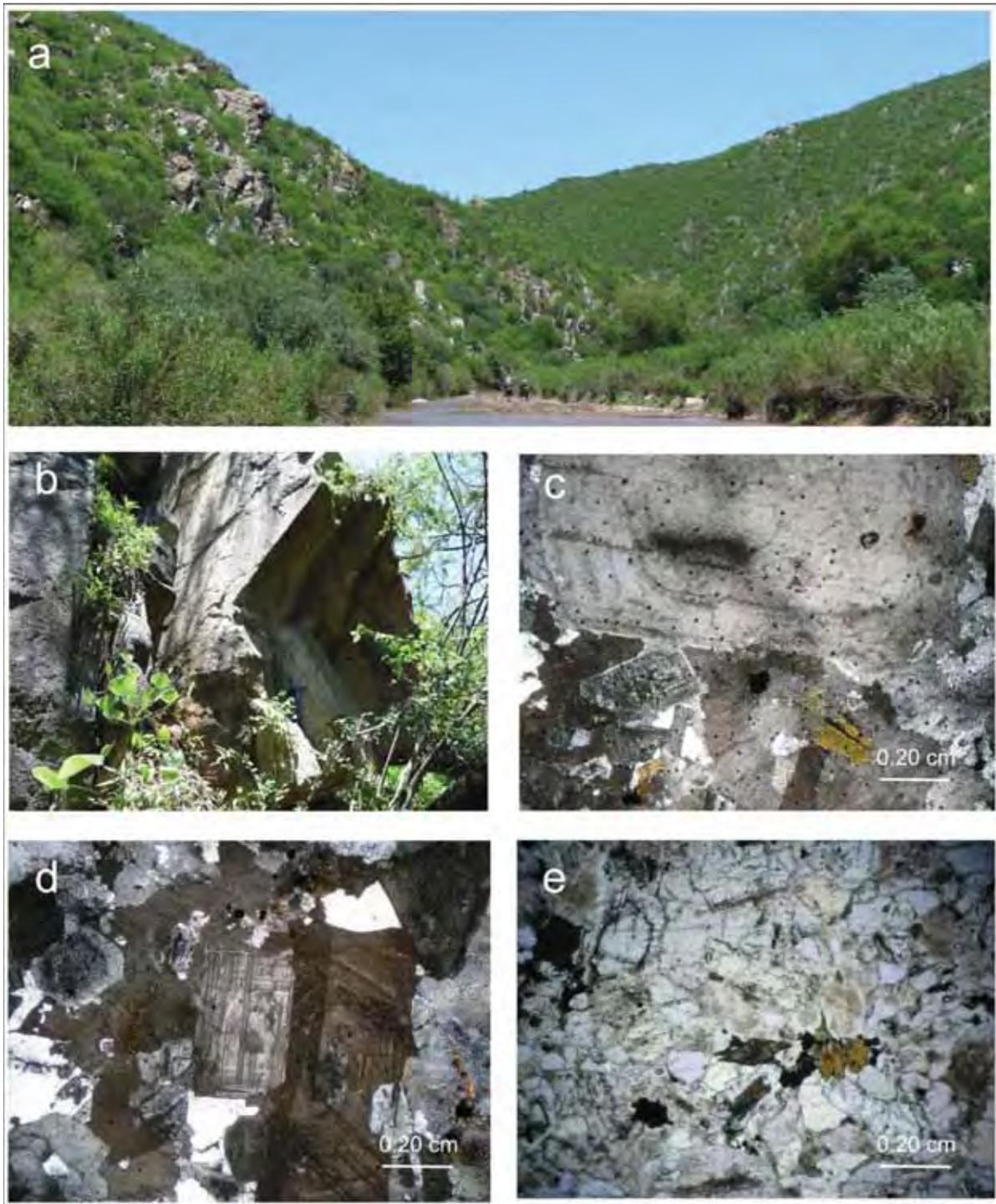
información que se tiene en el depósito, se tiene evidencia de que la mineralización presenta deformación, esto se describe con más detalle en el Capítulo V (Fotografía V.11b, d, e, f), ya que además de la compresión que hay en las rocas encajonantes, también se tienen registradas al menos dos etapas de distensión, a finales del Oligoceno tardío, las cuales podrían ser las responsables para la deformación observada.

Observando las dos hipótesis anteriormente planteadas, parecería que la segunda opción es la más adecuada como interpretación de la edad de formación del depósito mineral presente, lo cual nos acota la aparente deformación de los mantos mineralizados, y en específico de la galena presente, como producto de una reactivación de la estructura de cabalgamiento, por alguna de las etapas de distensión registradas para el noroeste de México a finales del Oligoceno Tardío, formando estructuras de arrastre en los sulfuros y no una deformación por compresión como se podría pensar; este argumento se soporta en el hecho de que, la galena es la que presenta una diferencia de tensión menor de todos los sulfuros presentes (Figura IX.1), por lo que en un ambiente de compresión los esfuerzos generados son más intensos por lo tanto alcanzaría a deformar mas sulfuros aparte de la galena, mientras que en un ambiente de distensión la fuerza generada no es suficiente y solo alcanzo a deformar a la galena. La anterior discusión podría ser soportada en el hecho de que la distribución de la mineralización en los mantos de la mina parece que están más concentrados y con mayor espesor cerca de la falla de cabalgadura, disminuyendo a medida que se alejan de las mismas (Figura V.8).

El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.

Localidad	Tipo de roca	X	Y	Edad (Ma)	Error	Método	Mineral	Fuente
Mina San Judas	Brecha de granodiorita	614345.39	3298878.70	40	0.9	K-Ar	Bi	1
Mina Washington	Granodiorita	588502.58	3307877.90	56.4	1.2	K-Ar	Bi	1
Mina Washington	Brecha hidrotermal	588502.58	3307877.93	45.7	1	K-Ar	Ser	1
El Alacran	Brecha hidrotermal	578088.60	3413080.40	56.7	1.2	K-Ar	Bi	2
Mina El Creston	Granito	532187.51	3305724.95	83.5	1.1	K-Ar	Ser	2
La Caridad	Cuarzomonzonita	646218.45	3354626.20	54.3	1.2	K-Ar	Bi	2
La Caridad	Latita	640991.94	3356452.46	52.5	1.3	K-Ar	Bi	2
La Caridad	Diorita cuarcítica	637787.24	3356411.50	50	1.2	K-Ar	Bi	2
Sierra de Oposura	Granodiorita	667443.18	3303245.79	62.7	1.4	K-Ar	Bi	2
Sierra Mazatan	Granodiorita	576188.96	3224681.65	58	3	U-Pb	Zr	3
Cananea	Brecha hidrotermal	566840.04	3427781.19	59.9	2.1	K-Ar	Phlo	4
Cananea	Granodiorita (Cuifaca)	556243.96	3322442.11	64	3	U-Pb	Zr	5

Tabla IX.1.- Edades de mineralización en el noreste de Sonora. (1).-Damon et al 1983; (2).-Damon *et al* 1983; (3).-Anderson *et al* 1980; (4).-Damon *et al* 1966; (5).-Anderson *et al.* 1977.



Fotografía IX.1.- (a).- Vista panorámica del afloramiento de cuarzomonzonita La Vaqueria (b).- Fotografía mostrando diaclasas e intemperismo típico de intrusivos. (c)(d).- Microfotografías NX mostrando fenocristales de plagioclasa, con cuarzo, biotita, ferromagnesianos. (e).- Microfotografía mostrando la roca cuarzomonzonítica sin cruzar nicoles, con biotita parcialmente cloritizada y esfena como mineral accesorio.

Tratando de entender la deformación en el mineral de galena y la prácticamente ausencia de ella en los otros sulfuros se hace el uso de algunos diagramas de esfuerzos (Kelly y Clark, 1975) en la que se muestran estudios de tensión de minerales, donde se ha probado que la galena es muy susceptible a la deformación más rápido que otros sulfuros, como se puede apreciar en la Figura V.10, se observa una comparación de fuerzas de tensión, con variaciones de temperatura que van desde 24 a 500 °C, a una presión confinante de 1000 bares; es evidente que todos los sulfuros presentan una debilitamiento con el incremento de temperatura, presentando diferentes ritmos de debilitamiento dependiendo el sulfuro, el cambio más evidente es el que sufre la pirrotita, el cual pasa de ser el más fuerte de todos a ser uno de los más débiles arriba de 300°C, también se observa que la galena es el sulfuro que tienen muy poca fuerza y por ende, este mineral registrara una deformación más evidente.

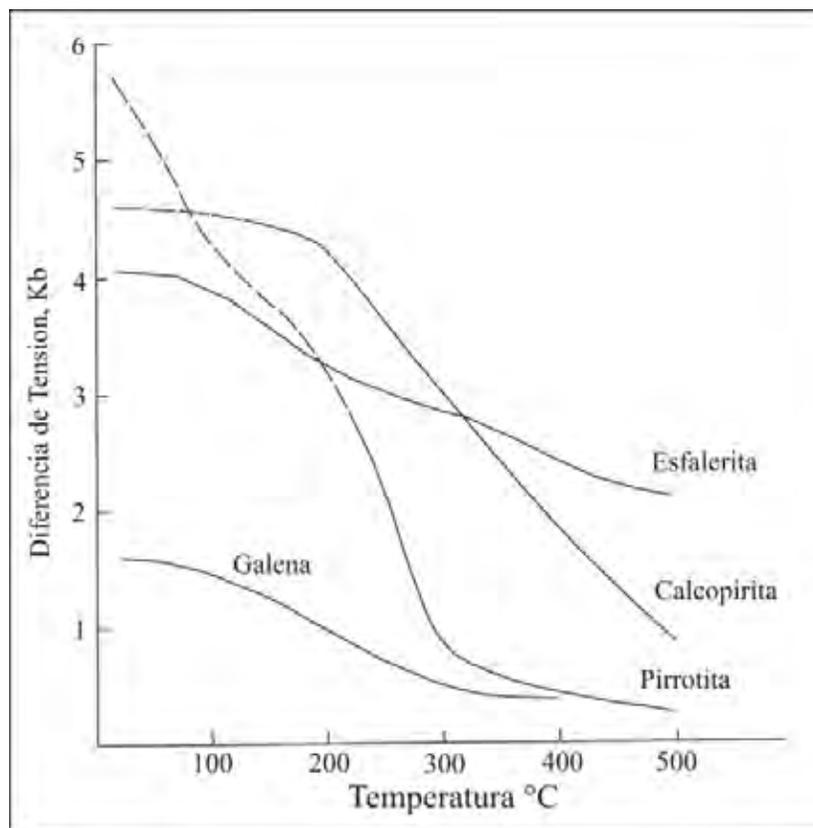


Figura IX.1.-Comparación de fuerzas de tensión, de diferentes sulfuros, como una función de la temperatura y presión constante de 1000 bares. (Kelly, 1975).

X.- Conclusión

Los resultados obtenidos en el estudio realizado en el depósito El Gachi, revelan una historia evolutiva de formación particular, ya que la distribución de la mineralización y alteración que exhibe este depósito, permiten proponer una serie de conclusiones, las cuales se discuten a continuación:

- La mineralización de reemplazamiento Pb-Zn se desarrolla mayormente en el contacto entre la parte superior de la Formación Morita y la base del Miembro Cerro La Ceja, esta última perteneciente a la parte inferior de la Formación Mural. Estas son cubiertas de forma discordante por rocas volcánicas de la Formación Tarahumara y en parte por rocas volcánicas del Mioceno. Esta mineralización de reemplazamiento consiste principalmente de galena, esfalerita, pirita y pirrotita, con cuarzo y calcita como minerales de ganga. Se presenta en forma de mantos, siguiendo burdamente la estratificación y aparentemente relacionada a estructuras verticales con una dirección preferencial N-S y NE-SW que sirvieron de conductos alimentadores. En la parte superior del Miembro La Ceja, ocurren zonas brechadas, fracturadas y fuertemente silicificadas el cual presenta ciertos grados de recristalización en la caliza, las cuales parecen corresponder a un evento hidrotermal del tipo epitermal, contemporáneo o ligeramente posterior al evento de reemplazamiento, caracterizada por una mineralización de estibinita y calcita como mineral de ganga.
- Por medio del estudio de la mineralización y un detallado estudio minerográfico de secciones pulidas recolectadas de los cuerpos mineralización, se llegó a la elaboración de una secuencia paragenética de la mina El Gachi, esta secuencia se muestra en la Tabla V.1. En esta se puede observar que se tiene una primera etapa de reemplazamiento acompañada por pirrotita + esfalerita + galena + arsenopirita + pirita, con cuarzo y calcita como minerales de ganga, seguido de una segunda etapa con un claro carácter epitermal. Se presume que la primera etapa podría estar asociada en tiempo a un régimen compresional, posiblemente en el Cretácico tardío-Terciario Temprano durante la “*orogenia Laramide*”, donde fluidos mineralizantes utilizaron conductos o estructuras resultantes NE-SW, por la cual los

El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.

fluidos mineralizantes aprovecharon la debilidad de las unidades anteriormente deformadas para avanzar y formar los mantos, este sistema asociado a las grandes etapas de mineralización de muchos depósitos minerales en el Noroeste de Sonora y Suroeste de Estados Unidos,

Posteriormente estas estructuras NE-SW pudieron haberse reactivado posterior a la etapa de compresión ya relacionada a una etapa de distensión, registrándose una segunda etapa de mineralización la cual es posterior con respecto a la etapa de reemplazamiento, esta segunda etapa del tipo epitermal de baja sulfuración, la cual corta a la primera etapa de reemplazamiento, compuesta de estibinita acompañada de cuarzo y calcita como minerales de ganga, junto con menor presencia de mineralización de Au (Comm. Personal Geólogos Hoschild).

- El estudio termométricos realizado en minerales de cuarzo y calcita, asociados a la mineralización principal de reemplazamiento, indican una temperatura de homogenización que varían de 142.6 a 380.2 °C, junto con rangos de salinidad, obtenidos a partir de la fusión de hielo que van de 0.15 a 15.17 % NaCl equivalente, con una profundidad de emplazamiento aproximado entre los 610 y 856 metros de profundidad. Las variaciones observadas en los resultados, dentro de las diferentes obras mineras estudiadas, indican posiblemente un cambio en el control de mineralización de dichas obras, siendo en el caso de la obra Sotomayor un control estructural por vetas semi-verticales; mientras que en la obra Amavisca, es definido por un control litológico (presencia de calizas) y estructural (límite de cabalgamiento) formando mantos mineralizados; esto también se puede observar en el depósito de Gilman, (Beaty *et al* 1990). Mientras que los resultados obtenidos para la pequeña manifestación del sistema epitermal de baja sulfurización, son con temperaturas de homogenización en la fase líquida de 114.6 a 211.5 °C, con salinidades por fusión de hielo de 0.18 a 0.78 %, típicas de este tipo de ambientes.
- Los isótopos estables de C, O y S revelan una fuente magmática el cual tuvo una interacción con aguas meteóricas, lo cual es muy común en este tipo de sistemas (Gilg, 1996; Beaty *et al.*, 1990; Megaw *et al.*, 1988; Titley, 1990), estos valores han

El Gachi, un depósito de reemplazamiento de Pb, Zn (Ag), en el distrito minero de Arizpe, Sonora, México.

sufrido modificaciones de sus firmas a partir de interacción fluido roca, las cuales pertenecen al Grupo Bisbee, esto se puede apreciar muy bien en el histograma de frecuencia de los valores de $\delta^{34}\text{S}$ (Figura VIII.2), y en los valores de $\delta^{18}\text{O}$ (Figura VIII.5), dándonos como resultado un sistema mineral muy complejo en el cual la naturaleza de los fluidos guardan su historia de formación, y nos da una idea de la evolución a la cual los fluidos estuvieron sometidos.

XI. - Bibliografía

- Albinson, Tawn., 2001**, Controls on Formation of Low-Sulfidation Epithermal Deposits in Mexico: Constraints from Fluid Inclusions and Stable Isotope Data, *in* New Mines and Discoveries in Mexico and Central America, Special Publication Number 8, 1- 58.
- Albrecht, A., Goldstein, S. L. 2000**, Effects of basement composition and age on silicic magmas across an accreted terrane-Precambrian crust boundary, Sierra Madre, México. *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 13, 255-273.
- Anderson, Thomas H., Silver, Leon T. 1977**, U-Pb Isotope Age of Granitic Plutons Near Cananea, Sonora. *Economic Geology*, vol 71, 827-836.
- Anderson, T.H., Silver, L.T., and Salas, G.A., 1980**, Distribution and U-Pb isotope ages of some lineated plutons, northwestern Mexico: Geological Society of America, Memoir 153, 269–283.
- Anderson, Thomas H., Silver, Leon T. 1981**, An overview of Precambrian rocks in Sonora. *Revista Universidad Nacional Autonoma de México, Inst. Geología*, vol. 5, num 2, 131-139.
- Barra F.; Valencia V., Ruiz J., Ochoa L., Zurcher L., Chesley J. 2005**, Laramide porphyry Cu-Mo mineralización in northern Mexico: Age constraints from Re-Os geochronology in molybdenite, *Economic Geology*, vol. 100. 1605-1616.
- Bartolini, C., Damon, P.E., Shafiqullah, M., and Morales, M.M., 1994**, Geochronologic contributions to the Tertiary sedimentary-volcanic sequences (“Baucarit Formation”) *en* *Geofísica Internacional*, Sonora, México, vol. 33, 67-77.
- Beaty, D. W. 1990**, Origin of the Ore Deposits at Gilman, Colorado. *en* *Economic Geology*, Monograph 7, 193-265.
- Beast G. Myron, 2003**, *Igneous and Metamorphic Petrology* Second Edition, Blackwell Publishing, 758.
- Bilodeau, W. L., 1979**, Tectonic models for Early Cretaceous rifting in the southeastern Arizona, *Geology* 10, 466-470.
- Bodnar, R. J. 1993**, Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl
- Campbell, Andrew R., Larson, Tepper B., 1998**, Introduction to Stable Isotope Applications in Hydrothermal Systems, *en* *Techniques in hydrothermal ore deposits geology*, *Reviews en Economic Geology*, vol. 10, 173-193.
- Clark, Kenneth F**, Gold Deposits of the Northern Sonora, Mexico, Guidebook Series, Society of Economic Geologist, vol. 30.

- Cyrus W. Field; Moore W. 1971**, Sulfur Isotope study of the B limestone and galena fissure ore deposits of the U.S. mine, Bingham Mining District, Utah, *Economic Geology*, vol. 66, 48-62.
- Damon, P. E., Mauger, R. L., 1966**, Epirogeny-orogeny viewed from the Basin and Range province. *Mining Engineers Trans. Soc.*, v. 235, 99-112.
- Damon, P.E., Clark, K.F., and Shafiqullah, M., 1983a**, Geochronology of the porphyry copper deposits and related mineralization of Mexico: *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 20, 1052–1071.
- Damon, P.E., Shafiqullah, M., Roldan-Quintana, J., and Cocheme, J.J., 1983b**, El batolito Laramide (90–40 Ma) de Sonora: Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México (AIMMGM), Memoria técnica XV, Guadalajara, p. 63–95.
- Dickinson, W. R., Lawton T. F., 2001**, Tectonic setting and sandstone petrofacies of the Bisbee basin (USA-Mexico), *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 14, 475-504.
- Fontbote, Lluís. 2006**, Recommended abbreviations for studies in ore deposits. *Sextion des sciences de la terre er de lénviroment. Departement de mineralogie Switzerland.* 5.
- Field, C. W.; Fifarek R. H. 1985**, Light stable-isotope systematic in the epithermal environment. *En Reviews in Economic Geology Vol. 2. Geology and geochemistry of epithermal systems.* 99 – 128.
- Gilg, H. Albert. 1996**, Fluid inclusions and isotope constraints on the génesis of high-temperature carbonate-hosted Pb-Zn-Ag deposits. *En Carbonate-hosted lead-zinc deposits. Special publication number 4, Society of Economic Geologist,* 501-514.
- González-León, Carlos. 1988**, Estratigrafía y geología estructural de las rocas sedimentarias cretácicas del área de Lampazos, Sonora. *Revista de la Universidad Nacional autónoma de México, Instituto de Geología*, vol. 7, num 2, 1988, 148 – 162.
- González-León, Carlos. 1994**, Early Cretaceous tectono-sedimentary evolution of the southwestern margin of the Bisbee basin: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 11, n. 2, 1994, 136-146.
- González-León, Carlos. 1995**, Stratigraphy, depositional environments, and origin of the Cabullona basin, northeastern Sonora. *Studies on the Mesozoic of Sonora and Adjacents Areas: Boulder Colorado. Geological Society of America, Special paper 301,* 121-142.
- González-León, Carlos. 2000**, Cretaceous and Tertiary sedimentary, magmatic, and tectonic evolution of north-central Sonora (Arizpe and Bacanuchi Quadrangles), northwest Mexico. *Geological Society of America*, vol. 112; No. 4, 600-610.

- Gonzales-Partida, Camprubi A., Gonzales-Sanchez, Sanchez-Torres., 2006.** Fluid inclusión study of the Plomositas-Los Arcos polymetallic epithermal vein trac, Plomositas district, Sinaloa, México, *Journal of geochemical Exploration*, vol. 89, 143-148.
- Grijalva-Noriega, 1998,** An Overview of the Cenozoic tectonic and magmatic evolution of Sonora, northwestern Mexico. *Revista de la Universidad Nacional autónoma de México, Instituto de Geología*, vol. 15, num. 2, 145-156.
- Goldstein, Robert. H., Reynolds, T. J., 1994,** Systematics of fluids inclusions in diagenetic minerals, *Society of Sedimentary Geology short course 31*, 199.
- Gustafson, B. Lewis, Field, Cyrus W. 1976,** Sulfur Isotopes in the Porphyry copper Deposit at El Salvador, Chile, *Economic Geology*, Vol. 71, 1533 – 1548.
- Haas, L. J. 1971,** The Effect of Salinity on the Maximun Thermal Gradient of a Hydrothermal System at Hydrostatic Pressure. *Economic Geology*, Vol. 66. 940-946.
- Henry, C. D. 1986,** East-northeast-trending structures in western Mexico: Evidence for oblique convergence in the late Mesozoic. *Geology*, Vol. 14, 314-317.
- Hoefs, Jochen, 1996,** *Stable Isotope Geochemistry*, Springer, 196.
- Jacques-Ayala C., 1992,** The lower cretaceous Glance conglomerate and Morita Formation of the sierra El Chanate, northwestern Sonora, Universidad Autónoma de México, Instituto de Geología, *Revista*, Vol. 10, número 1, 1992, 37-46.
- Jacques-Ayala C., 1992,** Stratigraphy of the lower cretaceous Cintura Formation, Sierra El Chanate, northwestern Sonora, México, Universidad Autónoma de México, Instituto de Geología, *Revista*, Vol. 10, numero 2, 1992, 129-136.
- Lawton, T. F., González-León, C. M., Scott, R. W., 2004,** Stratigraphy and sedimentology of the upper Aptian-upper Albian Mural Limestone (Bisbee Group) in northern Sonora, México, *Cretaceous research*, Vol. 25, 43-60.
- Kamona, A.F., Friedrich, G.H., 2007,** Geology, mineralogy and stable isotope geochemistry of the Kabwe carbonate-hosted Pb-Zn deposit, Central Zambia.. *Ore Geology Reviews*. 217-243.
- Keep Myra. 1996,** The Pinal Schist, southeast Arizona, USA: contraction of a Paleoproterozoic rift basin. *Journal of the Geological Society, London*, Vol. 153. 979-993.
- Kelly, William., Clark, Bruce. 1975,** Sulfide deformation studies: III. Experimental deformation of chalcopyrite to 2000 bars and 500 °C. *Economic Geology*, v. 70, 431-453.
- Kerkhof, Van den., Hein, Ulrich F. 2001,** Fluid inclusión petrography, *Lithos*, vol. 55, 27-47.

- Mcdowell, Fred W.; Roldan Quintana, Jaime., Amaya Martinez, Ricardo; 1997**, Interrelationship of sedimentary and volcanic deposits associated with Tertiary extension in Sonora, Mexico. GSA Bulletin. vol. 109, 1349-1360.
- Mcdowell, Fred W., Roldán Quintana, Jaime., Conelly, James N. 2001**, Duration of Late Cretaceous-early Tertiary magmatism in east-central Sonora, Mexico. GSA Bulletin, vol. 113, no. 4, 521-531.
- Megaw, Peter K. M., Ruiz Joaquin, Titley, R. Spencer., 1988**, High - Temperature, Carbonate – Hosted Ag-Pb-Zn(Cu) Deposits of Northern México, Economic Geology. vol. 83, 1856-1885.
- Megaw., Barton., Falce. 1996**, Carbonate – Hosted Lead-Zinc (Ag, Cu, Au) deposits of northern Chihuahua, Mexico. *En* Society of Economic Geologists, Special Publication No. 4. 277-289.
- Megaw, Peter K. M. 2009**, Evaluation of oxidized Pb-Zn-Ag carbonate replacement deposits of Mexico in light of supergene zinc and residual lead enrichment processes. *En* Society of Economic Geologists, Special Publication 14, 51-58.
- Ohmoto, Hiroshi. 1972**, Systematics and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits. Economic Geology. vol. 67. 551-578.
- Ohmoto, Hiroshi., O. Rye, Robert; 1974**, Sulfur Carbon Isotopes and Ore Genesis: A Review, Economic Geology. vol. 69, 826-842.
- Paz Moreno et al. 2003**, The Quaternary Moctezuma volcanic field: A tholeiitic to alkali basaltic episode in the central Sonoran Basin and Range Province, Mexico. Tectonic evolution of Northwestern Mexico and the southwestern USA: Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper 374, 439-455.
- Plasencia-Corrales, 2008**, Caracterización estratigráfica y petrográfica de la Formación Tarahumara en el área de Banamichi, Sonora. Tesis Ingeniero en Geociencias. Cesues, 1-65. Tesis inédita.
- Pérez-Segura, 2009**, Late Cretaceous adakitic magmatism in east-central Sonora, México, and its relation to Cu-Zn-Ni-Co skarn. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. vol. 26. Num. 2. 411-427.
- Pérez-Segura. 2004**, La Esperanza: una nueva mineralización con Ni-Co en Sonora, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. vol. 21, Num. 2. 260-267.
- Pubellier, Manuel, 1987**, Relation entre domaines cordillerain et Mesogéen au nord du Mexique-etude geologique de la Vellee de sahuaripa, Sonora central: Paris, Universite de Paris VI, doctorate thesis, 219 (sin publicar).

- Raisz, E. 1964**, Landforms of Mexico. Geography Branch of the Office of Naval Reserch, Cambridge. 1 ed.
- Roedder, E., 1990**, Fluid inclusión analysis – Prologue and epilogue. *Cosmochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 54, 495-507.
- Rodríguez Castañeda, José Luis., 1988**, Estratigrafía de la región de Tuape, Sonora. *Revista de la Universidad Nacional autónoma de Mexico*, vol 7, num. 1, 52 – 66.
- Rodríguez Castañeda, José Luis., 1994**, Geología del área de Teguachi, Estado de Sonora, México. *Revista de la Universidad Nacional autónoma de México*. vol. 11, Num 1, 11-28.
- Rodriguez Castañeda, José Luis., 1997**, Gravity-sliding structures in Cretaceous-Early Tertiary rocks in north-central Sonora, Mexico-regional significance. *Revista de la Universidad Nacional autónoma de México*. vol. 14, Num 1, 1-12.
- Roldan-Quintana, Jaime., 1991**, Geology and chemical composition of the Jaralito and Aconchi batholiths in east-central Sonora, Mexico, in Perez-Segura, E., and Jacques-Ayala, C., eds., *Studies of Sonoran Geology: Geological Society of America Special Paper 254*, 69-80.
- Roldan-Quintana, Jaime., 1994**, Geología del sur de la sierra Oposura, Moctezuma, estado de Sonora, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol 11, num. 1, 1-10.
- Rye. R.O., 1966**. The Carbon, Hydrogen, and oxygen isotopic composition of the hidrothermal fluids responsible for the lead-zinc deposits at providencia, Zacatecas, Mexico. *Economic Geology*. vol. 61, 1399-1427.
- Rye, R. O.; O'Neil, J. R., 1966**, The O^{18} content of the water in primary fluid inclusions from Providencia, North-Central Mexico. *Economic Geology*. vol. 68. 232-238.
- Rye. R. O., 1974**, A comparison of sphalerite-galena sulfur isotope temperatures with filling temperatures of fluid inclusions. *Economic Geology*. vol. 69. 26-32.
- Rye, R. O.; Ohmoto, H., 1974**, Sulfur and Carbon Isotopes and Ore Genesis: A Review. *Economic Geology*. Vol. 74. 826-842.
- Seal, R. R. 2006**, Sulfur isotope geochemistry of sulfide minerals. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. vol 61. 633-677.
- Shepherd, T.J., Rankin, A.H., Alderton, D.H.M., 1985**, A practical guide to fluid inclusión studies. Blackie and Son Ltd., Glasgow and London, 240.
- Silberman, Miles L.; 1988**, Characteristics of Gold Deposits in Northern Sonora, Mexico: A Preliminary Report. *Economic Geology*, 1966-1974.

- Sourirajan, S.; Kennedy, G. C. 1962**, The System H₂O-NaCl at elevated temperatures and pressures. *American Journal of Science*. vol 260. 115-141.
- Titley, S. R., 1993**, Characteristics of High-temperature, Carbonate-hosted Massive Sulphide Ores in the United States, Mexico and Peru. En *Mineral Deposits Modeling: Geological Associate of Canada*, special Paper 40, 585-614.
- Thompson T., Arehart G., 1990**, Geology and the Origin of Ore Deposits in the Leadville District, Colorado: Part I. Geological Studies of Orebodies and Wall Rocks. *In Economic Geology*, Monograph 7, 130-155.
- Van den Kerkhof, Alfons., F. Hein, Ulrich, 2001**, Fluid inclusion petrography. *Lithos*, vol. 55, 27-47.
- Villaseñor, A.B., González-León, C., Lawton, T.F., Aberhan Martin. 2005**, Upper Jurassic ammonites and bivalves from the Cucurpe Formation, Sonora (México). *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 22, num. 1, 65-87.
- Wilkinson, J.J., 2001**, Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, Vol 55, 229-272.
- Wisser, E. 1954**, Geology and ore deposits of Baja California, Mexico. *Economic Geology*. V. 49, 44-76.
- Wisser, E. 1927**, Oxidation subsidence at Bisbee, Arizona. *Economic Geology*, Vol. 22, 763-768.