

5
2 g

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA

SUCESION ESTRUCTURAL, CONDICIONES DE PALEOESFUERZO
Y SUS RELACIONES CON LA MINERALIZACION EN EL
DISTRITO MINERO DE NAICA, CHIHUAHUA.

TESIS PROFESIONAL que para obtener el
grado de INGENIERO GEOLOGO presenta:

Manuel de Jesús Aragón Arreola.



1990



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

RESUMEN

Se muestra la sucesión y condiciones cualitativas de paleoesfuerzo de los eventos estructurales que afectaron la secuencia sedimentaria de plataforma de la Sierra de Naica, Municipio de Saucillo, en el Estado de Chihuahua. La mineralización de sulfuros en mantos y chimeneas se relaciona con el tercer y cuarto evento estructural provocado posiblemente por un intrusivo, que no se conoce en superficie ni en los niveles inferiores de la mina, pero que se infiere por la presencia de diques micrograníticos, mineralogía de la mena y de la roca encajonante, por estudios geofísicos y por las condiciones de esfuerzo que presenta la mineralización.

Se colectaron más de 2,400 datos estructurales, levantándose relaciones geométricas de familias de fracturas, composición del relleno de fracturas, rumbos de fallas y la relación de los datos con la litología. La información se manejó mediante estereogramas equi-angulares y con técnicas estadísticas de conteo.

Se reconocen seis eventos estructurales que afectan la zona: 1). Esfuerzos compresivos eocénicos con S1 (sigma uno) horizontal que pliegan la secuencia formando algunos corrimientos de bajo ángulo con corto desplazamiento, fallamiento transcurrente y juntas vacías en dos direcciones relacionadas a la carga y descarga de fuerzas. 2). Una familia de fracturas rellenas de calcita, las cuales no se tiene claro qué mecanismo les dió origen. 3 y 4). Una posible intrusión que trae consigo un S1 mucho mayor que S3 y forman fracturas en varias orientaciones, formadas durante la evolución dinámica y temporal del sistema, los diques se emplazan al inicio de la etapa de relleno. 5). Suspensión total de los esfuerzos anteriores y formación de un patrón disperso de fracturas rellenas de calcita. 6). Fallamiento en bloques y formación de juntas en sentido paralelo a las fallas y oblicuo debido a la recuperación elástica del macizo. Este evento se asocia al sistema Sierras y Valles y es muy posterior a la mineralización.

Se resalta la importancia de otras técnicas que aunadas a las clásicas sirven como guías de la mineralización.

INDICE

Resumen.	iv
Indice.	v
Agradecimientos.	vi
Introducción.	1
Geomorfología.	3
Estratigrafía.	3
Rocas sedimentarias.	4
Rocas ígneas.	6
Rocas metamórficas.	6
Yacimientos minerales.	7
Morfología.	7
Mineralogía.	7
Geología Estructural.	9
Geometría de fracturas y tipos de fracturamiento.	10
Primero: FV1.	12
Segundo: FCa2.	14
Tercero y Cuarto: F3 y F4.	14
Quinto: FCa5.	16
Sexto: FV6.	18
Discusión.	25
Conclusiones y recomendaciones.	34
Referencias Citadas.	36

INTRODUCCION

La Unidad Naica, propiedad de Compañía Fresnillo S.A. de C.V., se ubica en el municipio de Saucillo, a 110 km al SE de la Ciudad de Chihuahua, en el Estado de Chihuahua (figura 1). En el diseño se extrae plata, plomo, zinc y tungsteno y su producción alcanza las 60,000 toneladas mensuales de mineral.

Fisiográficamente el distrito minero se localiza en la parte centro-oeste de la Provincia de Sierras y Valles, en los límites occidentales con la Sierra Madre Occidental.

La zona operativa de la Unidad se encuentra en el flanco noreste de la Sierra de Naica o de la Mina, que junto con las serranías de El Monarca y de Enmedio constituyen el distrito.

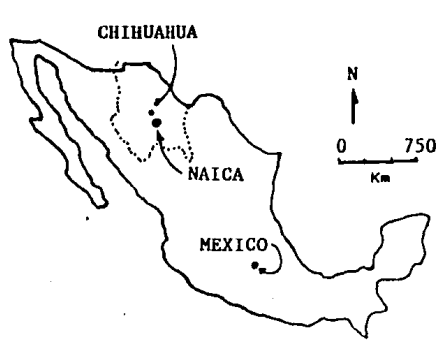
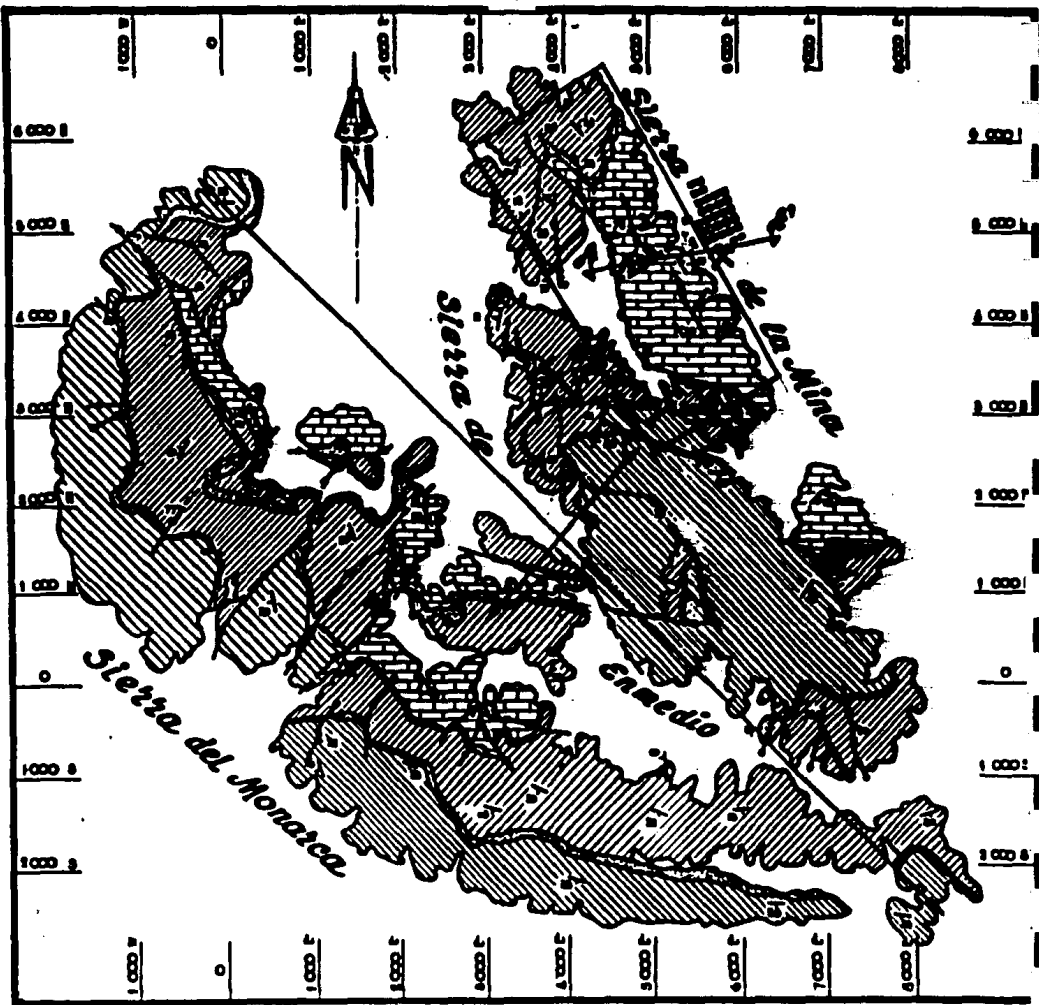
El conjunto de las tres sierras forma un anticlinal inclinado asimétrico, cóncavo, orientado NW-SE, cortado por numerosas fallas que se describirán posteriormente.

El objetivo de este trabajo es reconstruir la historia estructural del distrito: la secuencia de eventos de deformación y fracturamiento, la relación entre el fracturamiento y la mineralización de sulfuros y las condiciones de esfuerzo dominantes en cada evento, para entender estructuralmente el yacimiento. El sentido práctico que se desprende de este trabajo es objeto de escritos posteriores.

El área estudiada se restringe a la parte central y norte de la Sierra de Naica (en recuadro en la figura 1) y al interior de la mina. Se levantaron 26 secciones estructurales detalladas en superficie y numerosos datos en las obras durante la cartografía diaria que se lleva en los laborios, obteniéndose rumbos y echados de fracturas y juntas, relaciones de corte entre ellas, relaciones geométricas de los sistemas y tipo de relleno del fracturamiento.

Se aprovechó la cartografía geológica detallada 1:1000 y 1:2500 existente para la sierra (García, 1975; Palacios, 1977; Trejo, 1978), así como la 1:500 que levanta el departamento de geología en las obras mineras.

Los datos fueron tratados estadísticamente mediante estereogramas equiangulares generados en computadora con ayuda del programa MICRONET (Guth, 1987) basado en el algoritmo de Kamb (1959). Los resultados se presentan en diagramas de contornos y fueron interpretados con base en los criterios de relación geométrica de fracturas y tipo de relleno de las mismas.



- | | | | |
|--|----------------------|--|--|
| | FALLAS Y FRACTURAS | | APICE DEL POSIBLE INTRUSIVO, SEGUN COOLBAUGH 1978 Y 1979 |
| | CONTACTO LITOLÓGICO | | EN RECUADRO EL ÁREA ESTUDIADA |
| | ALLUVION-TALLUD | | |
| | CALIZA BUDA | | |
| | LUTITAS DEL RIO | | |
| | CALIZA LOMA DE PLATA | | |
| | LUTITAS BENAVIDES | | |
| | CALIZA AURORA | | |

Figura 1. Mapa geológico regional de la Sierra de Naica.

TOMADO DE PALACIOS, et al. 1988

GEOMORFOLOGIA.

Las sierras presentan fuertes pendientes, entre 15-35 grados por lo general, llegando a formar escarpes verticales cuando la litología cambia a formaciones resistentes. Los arroyos son rectos, normalmente de primer y segundo orden con pendientes fuertes (20 grados o más). La profundidad de disección varía entre 20 y 50 metros y cualitativamente hablando, la densidad de disección es baja. El principal sedimento acarreado por los arroyos son gravas y cantos rodados debido a las fuertes pendientes y a las precipitaciones escasas y torrenciales. Los abanicos aluviales están poco desarrollados y contienen principalmente material muy grueso.

El máximo contraste vertical no excede los 350 metros. El piedemonte es escaso y no supera los 30 metros de elevación con respecto al nivel del valle.

Regionalmente las Sierras de Naica son parte de un conjunto de altos estructurales que forman la Provincia de Sierras y Valles.

Aunque se relacionará con la evolución estructural, no se intenta explicar la génesis de la morfología, por lo cual se deja este inciso en la mera descripción, tampoco se clasifican las formas dentro de sistemas como el de Davis -del cual se le ha asignado la etapa de madurez-, por considerarse que estas clasificaciones han caído en desuso por no aportar mayores elementos (Lugo, 1989).

ESTRATIGRAFIA.

Paleogeográficamente, Naica está situada en la transición del Mar Mexicano con la Cuenca de Chihuahua, en la zona llamada Canal de Camargo, depresión formada por la Paleoisla de Coahuila al oriente y la Paleopenínsula de Aldama al poniente (González, 1976), al parecer prácticamente en la zona de parches arrecifales del Albiano-Cenomaniano (Franco, 1978b) asociados a la Plataforma de Aldama, por lo cual el área no presenta una afinidad clara con las secuencias estratigráficas de Mar Mexicano o de Norte de Chihuahua.

La estratigrafía local ha sido descrita por numerosos autores, pero sólo dos lo hacen con detalle (Franco, 1978a y 1978b; Lofquist, 1986). El primero en describir la secuencia local fue Wilson (1956), quien basado en un trabajo un tanto impreciso de Burrows (1910), asignó nombres formales que hasta la fecha se conservan. La cartografía regional del distrito se presenta en la Figura 1.

En la Tabla 1 se resume la secuencia. Este trabajo no tiene como objetivo una discusión estratigráfica del área. Para los fines que se persiguen es más importante la respuesta mecánica de paquetes de roca al esfuerzo que su clasificación formacional, aunque las interpretaciones de Palacios, et.al. (1986) y Torres (1989) resultan más convenientes por utilizar los nombres propios de la secuencia de Cuenca de Chihuahua y de acuerdo a estos autores se describirá. La secuencia estratigráfica que aflora en la Sierra de Naica es la siguiente:

ROCAS SEDIMENTARIAS.

Caliza Aurora (Wilson, 1956); Unidad III (Franco, 1978b). Caliza fuertemente recristalizada hacia la base, misma que no aflora, en esta parte presenta nódulos de pedernal y bandas carbonosas y arcillosas que se pierden al subir estratigráficamente (Wilson, 1956). Constituida en la cima por calcarenitas oolíticas con bioclastos (miliólidos y fragmentos de rudistas), intraclastos de color gris crema a obscuro y estratificación media a gruesa con escaso pedernal, se intercala con calcilita (micrita con bioclastos) de color gris claro a obscuro (Franco, op.cit.). Se encuentra marmolizada en varios grados, desde ligero hasta muy intenso, presentando incluso zonas de skarn con wollastonita. Wilson (op.cit) dividió la formación en tres miembros, sin embargo estos no pueden considerarse como tales pues son producto de metamorfismo y no de depósito (Torres, 1989). Su edad es Albiano Medio-Inferior y su espesor mayor a 1,000 metros.

Formación Benavides (Palacios, et.al. 1986; Torres, 1989); del Río (García, 1973). Son lutitas calcáreas, margas y limolitas color gris medio a oscuro, ocres al intemperismo (García, op.cit.). Las limolitas se constituyen de clásticos de cuarzo sub y anhedrales, pirita dispersa y en pequeños manchones; la lutita posee clastos de cuarzo, fragmentos de moluscos y algas, su edad es Albiano Medio Superior (Ponce, en Torres, 1989), su espesor no supera los 30 metros y sus contactos son concordantes.

Formación Loma de Plata (Palacios, et.al. 1986; Torres, 1989). Buda (García, 1973). Ha sido subdividida en dos miembros: Miembro inferior: caliza gris crema a gris claro, estratos de 1.5 a 3 metros de espesor. Existen algunos bancos de calizas fosilíferas. Su contacto inferior es concordante con la Formación Benavides (Torres, op.cit.). Miembro Superior: caliza gruesa a masiva de color gris medio a oscuro, ligeramente silicificada (Torres, op.cit.). Se compone de fragmentos de moluscos, radiolarios calcificados y otros foraminíferos escasos y mal preservados. Se encuentran calciesferas, fragmentos de ostrácodos y equinodermos (Ponce, en Torres, op.cit.).

		GARCIA, 1973.	FRANCO, 1978b.	LOFQUIST, 1986.	PALACIOS, et.al. 1986.	TORRES, 1989.
TERCIARIO		DIQUES Y SILLS			DIQUES Y SILLS	DIQUES Y SILLS
CRETACICO	SENONIANO	OJINAGA				
	TURONIANO	EAGLE FORD				
	CENOMANIANO	BUDA	UNIDAD VIII			
			UNIDAD VII		BUDA	BUDA
	ALBIANO	SUPERIOR	UNIDAD VI			
			UNIDAD V		DEL RIO	DEL RIO
	MEDIO	AURORA	UNIDAD IV	LOMA DE PLATA	LOMA DE PLATA	LOMA DE PLATA
			UNIDAD III	BENAVIDES	BENAVIDES	BENAVIDES
			UNIDAD II	AURORA	AURORA	AURORA
			UNIDAD I	LAGRIMA	AURORA	AURORA
	?	?	?	?	?	

TABLA 1. RESUMEN DE COLUMNAS ESTRATIGRAFICAS PROPUESTAS PARA EL DISTRITO DE NAICA, CHIHUAHUA.

ROCAS IGNEAS.

Son principalmente diques y sills que se encuentran tanto en superficie como en el interior de la mina. La roca es afanítica, de color blanco grisáceo al fresco y blanca a la intemperie, pudiéndose observar un intemperismo diferencial que da colores rojos, rosados y blancos asociado a los sistemas de fracturamiento. Han sido fechadas por Rostad (1981) en 26 ± 1 m.a. En muestra de mano se clasifica como aplita, Black (en Palacios, et.al. 1986) la clasifica como albitita y Trigos (en Torres, 1989) le da el nombre de microgranito alcalino.

Se ha inferido la presencia de un intrusivo tipo stock emplazado a profundidad, en este trabajo se da por sentada esta idea con base en el grado de metamorfismo que la secuencia ha sufrido, la presencia de hidrotermalismo, la existencia de diques aplíticos y el sistema de esfuerzos encontrado. Coolbaugh (1978 y 1979) basado en un levantamiento magnetométrico sitúa el ápice del cuerpo a 2,000 metros de profundidad aproximadamente y establece una morfología dómica asimétrica en la que el intrusivo aumenta su pendiente al este en comparación con un suave buzamiento al norte y noroeste; según dicho trabajo, el punto de rompimiento de pendiente se ubica bajo los minados actuales y el ápice bajo las estribaciones más al norte de la Sierra de Enmedio (Figura 1).

ROCAS METAMORFICAS.

Se presentan cuatro tipos, según Torres (1989).

Mármol blanco: ampliamente distribuido en superficie y en el interior de la mina.

Caliza cloritizada: se encuentra solamente en interior mina, está asociada a los respaldos de los mantos mineralizados, es de color gris verdoso, producto de la cloritización de calizas grises de la Formación Aurora.

Skarn de wollastonita: asociado a los intrusivos tabulares, sólo se encontró en interior, la mineralogía es wollastonita principalmente y cantidades menores de vesubianita y hedembergita. Existe un cuerpo tipo chimenea constituido predominantemente por wollastonita (Chim. 4718, -Panchita-).

Skarn de hedembergita, andradita-grosularita (Erwood y Kesler, 1979), en ocasiones con importantes cantidades de vesubianita.

YACIMIENTOS MINERALES

MORFOLOGIA.

Los cuerpos minerales de Naica se presentan en dos tipos: mantos y chimeneas. Siguiendo la clasificación de Torres (1989), pueden tenerse los siguientes tipos de cuerpos:

Mantos de endoskarn: están asociados a diques y sills felsíticos. Su mineralogía es de silicatos cálcicos, la mena se presenta diseminada.

Mantos de exoskarn: se asocian a la caliza cloritizada, no se encuentra relación espacial con intrusivos, su mineralogía es también de silicatos cálcicos y la mena se presenta de la misma forma que en el tipo anterior.

Chimeneas de sulfuros masivos.

Chimeneas de sulfuros-silicatos.

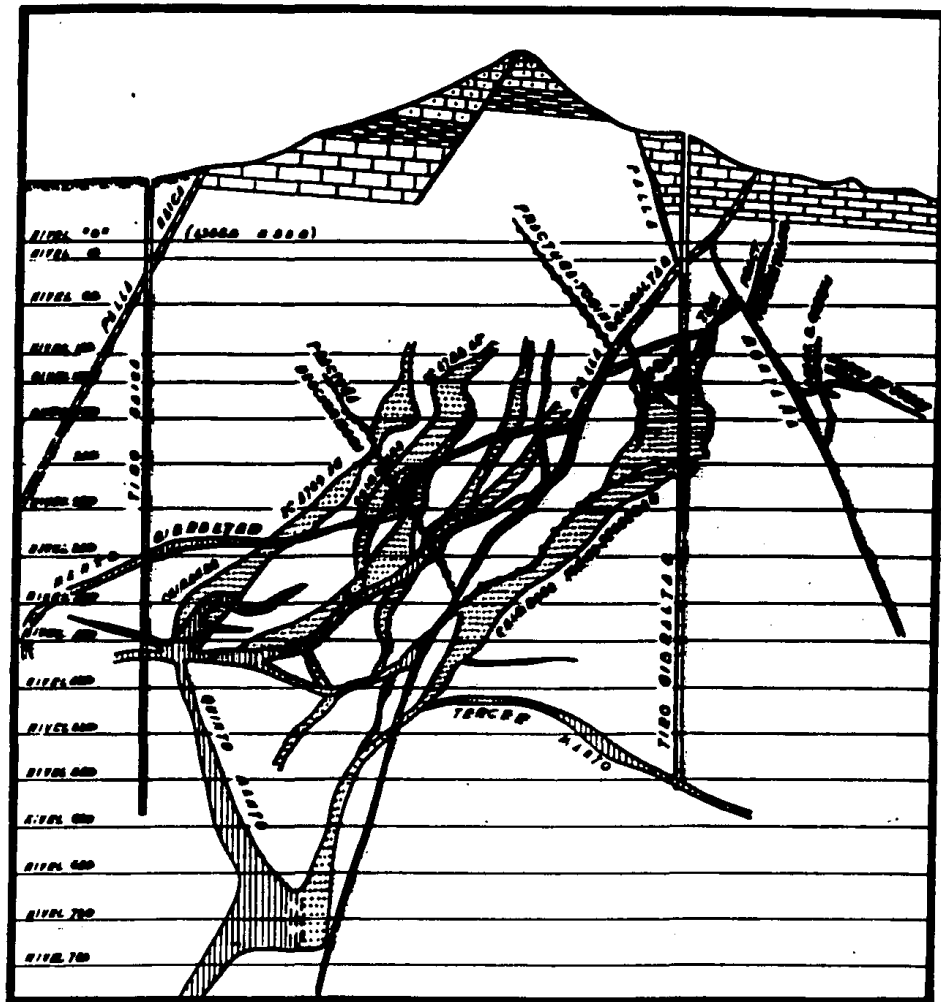
Debido a la gran variedad de formas que adquieren los cuerpos, se ha perdido el sentido estricto de la palabra manto y chimenea, siendo más bien usado con base en su mineralogía y en su asociación a diques, llamándose manto a los cuerpos asociados a intrusivos o cuya mineralogía sea de silicatos con sulfuros diseminados y chimeneas a cuerpos con predominancia de sulfuros.

Se ha observado que las chimeneas siempre parten de cuerpos de exoskarn, la figura 2, ideada por Bravo (1968) y modificada según avanza la mina, muestra los principales cuerpos del yacimiento.

MINERALOGIA.

Los metales por los cuales se explota el yacimiento son plata, plomo y zinc, siendo un importante subproducto el tungsteno. El cobre y el oro ocurren en cantidades muy pequeñas.

Trigos (1987) con base en un estudio petrográfico propone una paragénesis muy completa del yacimiento, misma que se muestra en la figura 3, en él encuentra que la plata viene incluida la mayoría de las veces probablemente en la kobellita y, en el Manto Torino-Tehuacán, está en solución sólida con galena o en tetraedrita-tenantita. Trigos (1988) reporta que el oro se encuentra incluido en esfalerita y galena y por lo general en forma libre.



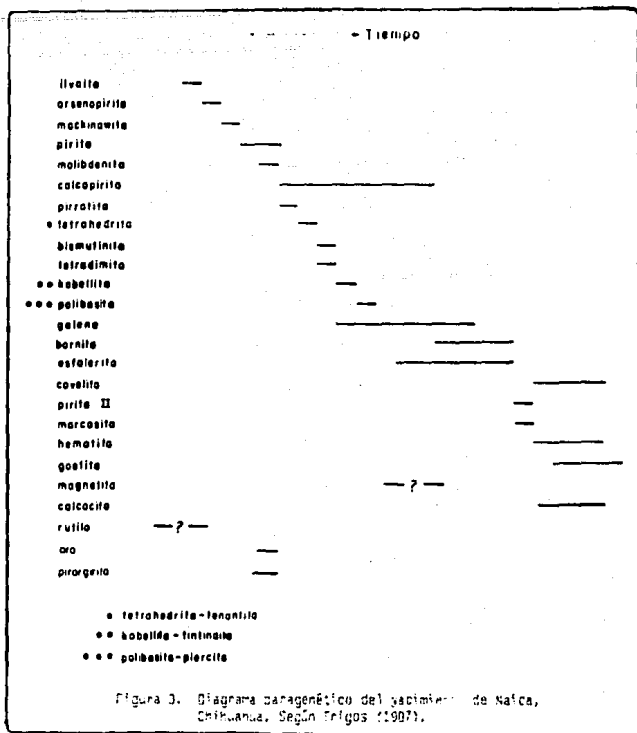
-  ALLUVION-TALUD
-  CALIZA LOMA DE PLATA
-  LUTITAS BENAVIDES
-  CALIZA AURORA
-  CHIMENEAS
-  MANTOS
-  FRACTURA MINERALIZADA
-  FRACTURA POSTMINERAL

**SECCION N30E,
VIENDO AL NW**

LOS PRINCIPALES
CUERPOS HAN SIDO
PROYECTADOS A LA
SECCION.

TRAZO DE
PLAZA, S.S. 1911

Figura 2. Sección geológica esquematizada de los principales cuerpos del yacimiento de Naica.



GEOLOGIA ESTRUCTURAL

Este trabajo, como su nombre lo indica, pretende postular un modelo de evolución estructural que conjugue tanto los conceptos dinámicos que se han manejado hasta ahora como los nuevos que se propongan a partir de este estudio.

Para ello se realizaron en superficie 26 secciones estructurales en las que se detallaron 1,812 datos, además de trabajarse 250 rumbos de estratificación a partir de la cartografía 1:2,500 existente; en la mina el muestreo fue selectivo y fueron hechas 250 mediciones; los rasgos levantados fueron:

- Rumbo y echado de fracturas y su tipo de relleno.
- Rumbo y echado de juntas vacías.
- Rumbo y echado de fallas.
- Rumbo y echado de fracturamiento en diques.
- Relaciones geométricas entre familias de rasgos.
- Algunos datos de estratificación (pues se tiene una base cartográfica muy completa).
- Rumbo y buzamiento de estriamiento.

Además de las secciones estructurales, cuya ubicación se presenta en la división de áreas de la figura 4 y de la cartografía de interiores, se realizó un reconocimiento completo de la Sierra de la Mina, pues las secciones se levantaron en las regiones centro-sur y norte de la serranía. Las áreas son nombradas según la cercanía a algunos sitios o por nombre evocativos y son:

- SCRU. Sitio de la Cruz. 3 secciones en Fm. Aurora y una cuarta sobre dique.
- TRCysA Tiro Ramón Corona y Tiro San Antonio. 4 secciones en Fm Aurora.
- TCH Tiro Chubasco. 3 secciones en Fm Aurora.
- TN1237 Tiro Naica. 4 secciones en Fm Aurora.
- TZ12 Tiro Zolá. 2 secciones en Fm Aurora.
- TN45 Tiro Naica. 2 secciones en Fm Aurora.
- TN6 Tiro Naica. 1 sección en Fm Aurora.
- GLUT Tiro Gibraltar en lutitas 2 secciones en Fm Benavides.
- GCAL Tiro Gibraltar en calizas. 1 sección en Fm Loma de Plata.
- TZ3 Tiro Zolá. 1 sección en Fm Loma de Plata.
- TZ4 Tiro Zolá. 1 sección en Fm Aurora.

Los datos se trabajaron mediante redes estereográficas equiangulares, por considerarse que este tipo era el que más convenía al objetivo, pues se da más importancia a las orientaciones que a la distribución estadística (Ramsay, 1967), aunque los resultados se presentan en diagramas de contornos, pues es la manera más rápida de visualizarlos.

GEOMETRIA DE FRACTURAS Y TIPOS DE FRACTURAMIENTO.

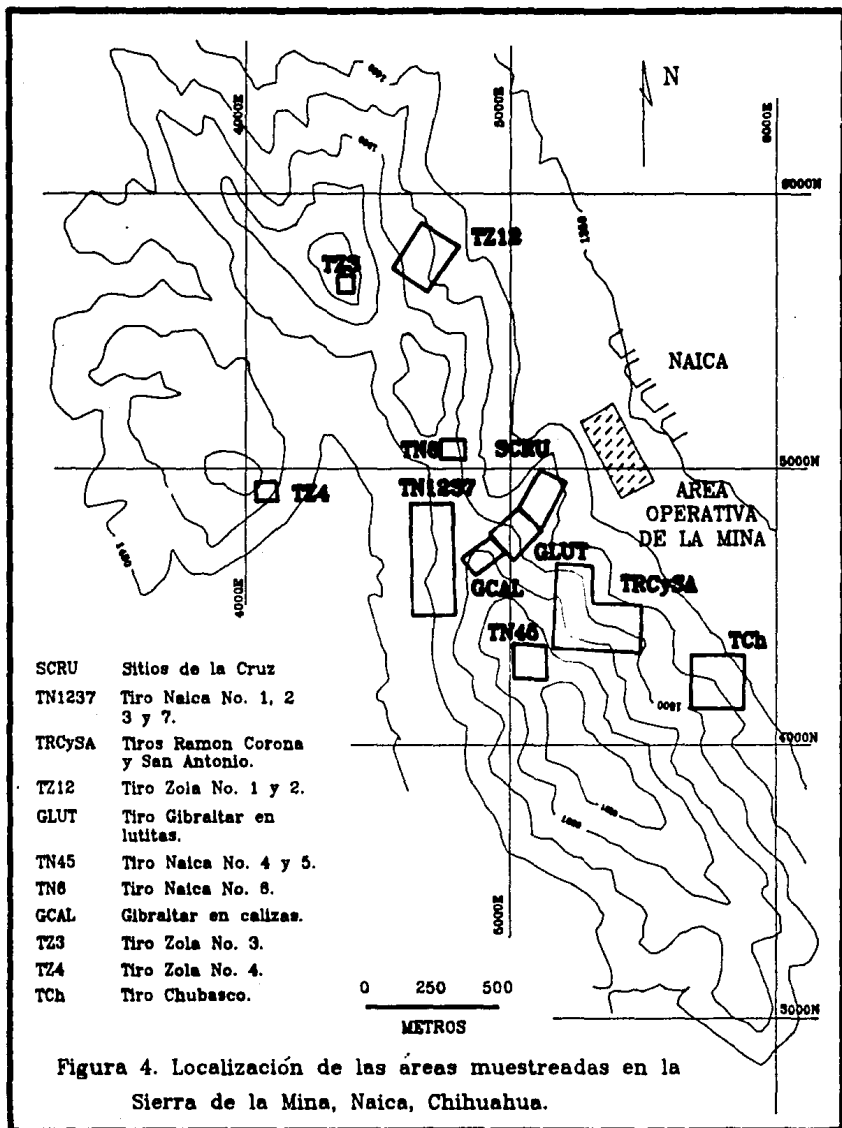
Las rocas de Naica presentan varios tipos de fracturamiento, por su relleno fueron observados los siguientes:

Superficie:

- Vacías.
- Rellenas de calcita.
- Con calcita y en menor cantidad de óxidos de fierro y manganeso.
- Rellenas de óxidos de fierro, manganeso, algunas con piritita oxidada y mayor o menor cantidad de calcita.

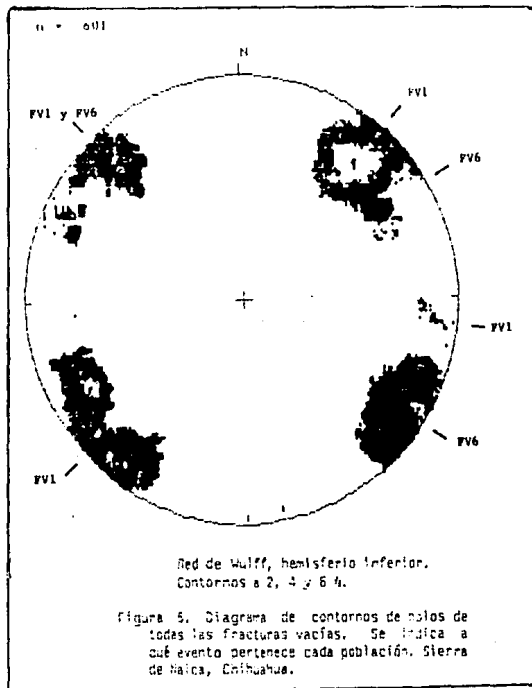
Interior:

- Vacías.
- Rellenas de calcita.
- Rellenas de calcita-sulfuros.
- Con sulfuros.
- Con silicatos-sulfuros.
- Vacías únicamente cortando a cuerpos de silicato o sulfuros.
- Rellenas de cuarzo.
- Con yeso y calcita.
- Rellenas de yeso.



Se reconocen 6 etapas de fracturamiento en el macizo rocoso, dos de ellos se traslapan temporalmente, algunas pueden asociarse a otros rasgos mayores como el plegamiento, el fallamiento y el emplazamiento de los diques. La información se ofrece tanto para superficie como para interior, citándose localidades ya sea por formaciones estratigráficas o por sitios de la mina en que se observó el rasgo de que se trata. A continuación se describe cada etapa de fracturamiento para posteriormente entrar en discusión, correlación e interpretación:

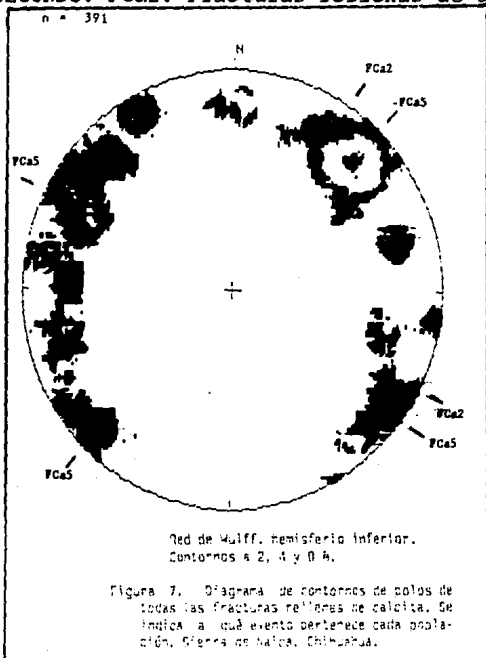
PRIMERO: FV1. Fracturamiento vacío. Fue reconocido en superficie y sólo en escasos sitios en la mina. Está constituido por una familia de fracturas, más bien aisladas, sólo en ocasiones se presentan en conjuntos, pero nunca de muchos miembros. Aunque su patrón es recto (formando planos bien definidos) su expresión no es fuerte, generalmente están cerradas. Se presentan como dos grupos de orientaciones oblicuas, su tendencia preferencial es N50W/70SW y 85 NE y un patrón acompañante N48E/81SE; se encontró una tercera dirección subordinada, pero sólo en pocas localidades. En la Formación Benavides estos patrones se unifican en uno principal N52W/83NE y 80SW. En la figura 5 se podrá apreciar la relación entre este evento y el sexto (FV6), descrito adelante. También puede verse la variabilidad de orientaciones y echados de cada familia. En la figura 6 se menciona en qué localidad se encontró FV1.



FORMACION MUESTREADA	AURORA	AURORA	AURORA	AURORA	BENAVIDES	AURORA	AURORA	LOMA DE PLATA	LOMA DE PLATA	LOMA DE PLATA	AURORA
ZONA	SCRU	TN1237	TRCySA	TZ 1y2	GLUT	TN 4y5	TN6	GCAL	TZ3	TZ4	TCh
EVENTO	SITIOS DE LA CRUZ	TIRO NAICA No: 1,2,3,7.	TIROS R. CORONA Y S. ANTONIO	TIRO ZOLA No 1 y 2	GIBRALTAR EN LUTITAS	TIRO NAICA 4 y 5	TIRO NAICA No: 6.	GIBRALTAR EN CALIZAS	TIRO ZOLA No. 3	TIRO ZOLA No. 4	TIRO CHUBASCO
1	FV	FV		FV	FV		FV	FV	FV?	FV	FV
2		FCa	FCa				FCa			FCa	
3	FCaOx	FCaOx	FCaOx	FOxCa		FOxCa	FCaOx FOxCa			FCaOx	FCaOx
4	FOxCa		FOxCa	FCaOx	FOxCa	FCaOx	FOxCa FCaOx				FOxCa
5	FCa	FCa	FCa	FCa	FCa	FCa	FCa	FCa		FCa	FCa
6	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV

FIGURA 6. RELACION DE EVENTOS ENCONTRADOS POR AREAS Y FORMACIONES MUESTREADAS EN SUPERFICIE. SIERRA DE NAICA, CHIHUAHUA.

SEGUNDO: FCa2. Fracturas rellenas de calcita. Es una familia de



fracturas aisladas, pocas veces se presentan en conjuntos, su forma siempre es recta y su relleno es de calcita de grano fino, nunca son más anchas que 1 cm; el número de representantes de la familia es relativamente pequeño en comparación con la población del evento FCa5. Su orientación preferencial es N57W/75SW y un patrón subordinado a N35E/83NW. No se encontraron representantes de este grupo en las formaciones Benavides y Loma de Plata y muy pocos en interior. La figura 7 muestra las orientaciones de esta familia y sus relaciones con la FCa5. La figura 6 ubica las localidades en que FCa2 fue reconocida.

TERCERO Y CUARTO: F3 y F4. La relación de este evento con los dos anteriores es claramente observable en afloramientos, no así en los laborios de interior donde los representantes de FV1 y FCa2 son muy aislados como para el muestreo sistemático. Los rellenos de óxidos en superficie se consideran equivalentes a los de sulfuros del interior.

Se distinguen tres arreglos principales:

- a.- Recto equidistal. Muchas fracturas rectas ordenadas en forma paralela, aproximadamente equidistales una de otra, la distancia entre ellas no cambia bruscamente, se mantiene más o menos constante para cada localidad.
- b.- Recto. Fracturas rectas bien formadas que se presentan aisladas o en conjuntos pequeños.
- c.- Anastomosado. Grupos de fracturas que siguen un rumbo definido, pero que forman lazos cimoides y ramaleos, da la apariencia de vetilleo anastomosado.

El relleno es variado, en la sierra se distinguieron dos tipos: calcita de grano fino en cuya matriz se encuentran óxidos de manganeso y fierro que en ocasiones dan colores negruzcos o rojizos (se les llamará FCaOx3). El otro tipo lo constituyen óxidos de fierro y manganeso con algunos remanentes de piritita oxidada y cantidades menores de calcita blanca o parda de grano fino (FOxCa4). Temporalmente estas dos familias pueden distinguirse, en varias localidades se

encuentran primero las FCaOx3 y cortándolas el evento FOxCa4 (figura 6), aunque el orden inverso también se reconoce.

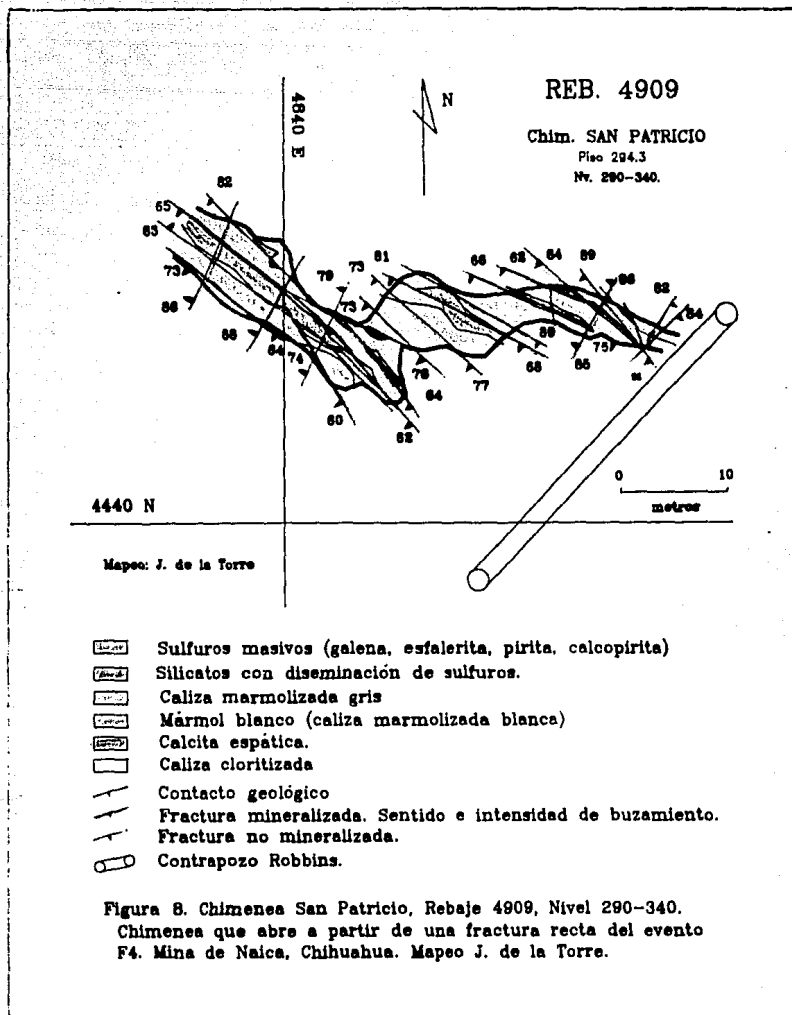
En la mina el relleno que se encontró para este evento es de calcita-sulfuros, sulfuros y silicatos-sulfuros, siendo los más distribuidos los segundos, principalmente constituidos por galena y menor cantidad de esfalerita.

En superficie se distinguen los tres tipos de arreglos para el evento FCaOx3, se encuentra que en zonas como Sitio de la Cruz -SCRU-, Tiro Chubasco -TCH-, Tiros Ramón Corona y San Antonio -TRCySA-, Tiro Naica -TN1237- y Tiro Zolá -TZ12- (en la figura 4), los patrones recto equidistal y recto son los que predominan, en tanto que en Tiro Naica -TN45-, -TN6- y Tiro Zolá -TZ4-, domina el arreglo recto equidistal.

En los laboríos, el arreglo que domina ampliamente es el recto, como se ve en las figuras 8 y 9. En muchos casos a partir de una fractura maestra se abren bolsas, que aunque limitadas por estructuras paralelas a la principal, nunca son de importancia equivalente. La Chimenea Torino-Tehuacán formaliza a partir de la unión de dos fracturas, de las cuales toma su nombre. El arreglo recto equidistal se presenta, pero en escalas pequeñas y restringido a pocos sitios, principalmente dentro del mármol blanco (denominado localmente caliza marmolizada blanca). En la Chimenea 4789 (figura 9) se encontró bien marcado este arreglo, pero sólo en la litología mencionada.

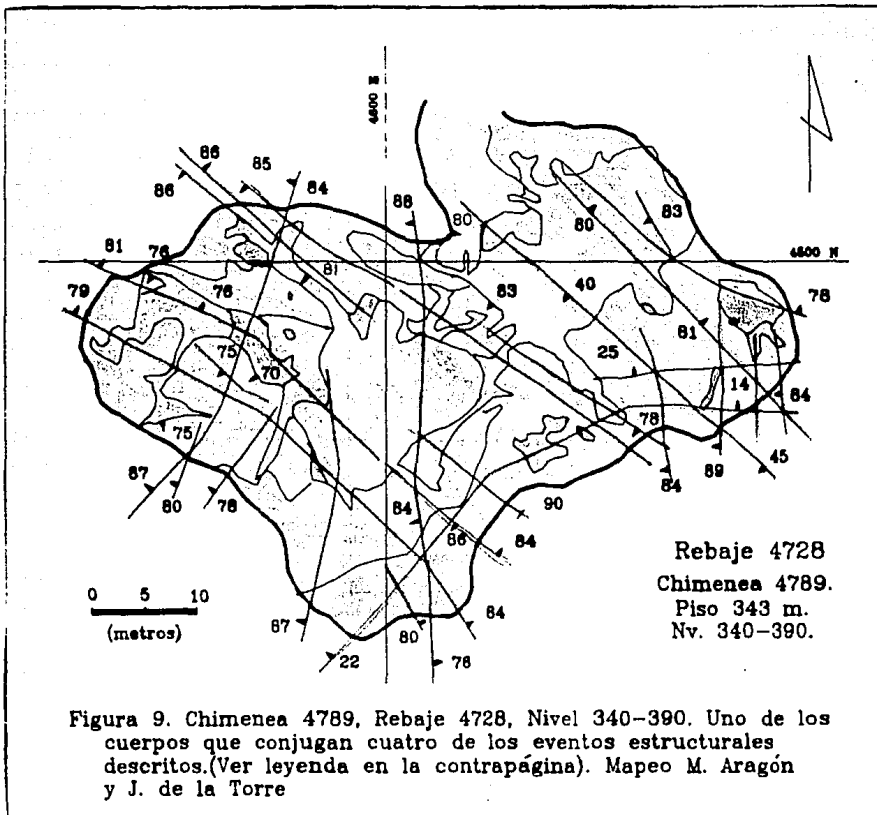
En afloramientos, el fracturamiento FCaOx4 presenta también las tres formas descritas. Al igual que en la mina, dominan las formas rectas aisladas, el arreglo anastomosado está en pequeñas cantidades y el recto equidistal es raro. En la zona Sitio de la Cruz -SCRU- es notorio como las familias FOxCa4 y FCaOx3 solamente presentan su orientación principal. Este sitio corresponde a la proyección de la Fractura Torino que, como se explicó, arma a la Chimenea Torino-Tehuacán. Otra zona en que la orientación de los eventos es casi únicamente la principal es en Tiros Ramón Corona y San Antonio -TRCySA-, bajo este lugar se encuentra la Fractura Ramón Corona, que fue ya minada. Bajo la zona comprendida entre las dos áreas mencionadas SCRÚ y TRCySA se encuentra el Manto Azules-Descubridora, que es continuación del Manto Gibraltar (figura 2).

Las orientaciones dominantes de este sistema son, en superficie: N48W/77SW y de vertical a 85NE, con sistemas subordinados a N67E/75SE Y N42E/81NW. La figura 10 muestra un diagrama donde se presentan tanto FCaOx3 como FOxCa4 en el cual el agrupamiento de fracturas es muy marcado en la dirección preferente. Para la mina se encontró que la orientación principal es N48W/85SW a 87NE (figura 11), el apuntamiento estadístico es menos marcado que en los datos de la sierra y su dispersión es similar. La orientación se conserva, pero los echados aumentan.



Como se mencionó anteriormente, en algunos afloramientos la orientación es marcada, en la figura 12 se muestran tres sitios: dos de ellos ya mencionados, bajo los cuales se encuentran estructuras que ya fueron minadas, bajo el otro, (Tiro Chubasco -TCH-) no se conocen estructuras, pero la exploración de diamante ha sido escasa. Un barreno horizontal en el nivel 120 cortó buen mineral.

QUINTO: FCa5. Fracturas rellenas de calcita. Es un evento ampliamente distribuido, se encuentra prácticamente en todas



las localidades. Su forma es principalmente recta, aunque existen también de geometría alabeada e incluso dando trenes anastomosados. Se presentan solas o en conjuntos pequeños de no más de 5 elementos, su ancho va desde algunos milímetros hasta 10 o 15 cm, su relleno es calcita blanca de grano fino, algunas veces con calcita espática de tintes café en superficie. En ocasiones se presentan brechas. En afloramientos de la Formación Aurora muestra dos orientaciones, ambas con echados conjugados. La primera tiene un rumbo N47W/75SW y 85NE, el patrón subordinado es disperso, su actitud promedio es N27E/80SE y 80NW. Al cambiar a Formación Benavides el patrón subordinado prácticamente se pierde y el principal se manifiesta claramente, los echados siguen siendo conjugados solamente aumentados en promedio 5 grados, el rumbo es así N47W/80SW y vertical. Al entrar a Loma de Plata este cruce de fractura retoma las orientaciones que tenía en Aurora, pero su dispersión disminuye. La

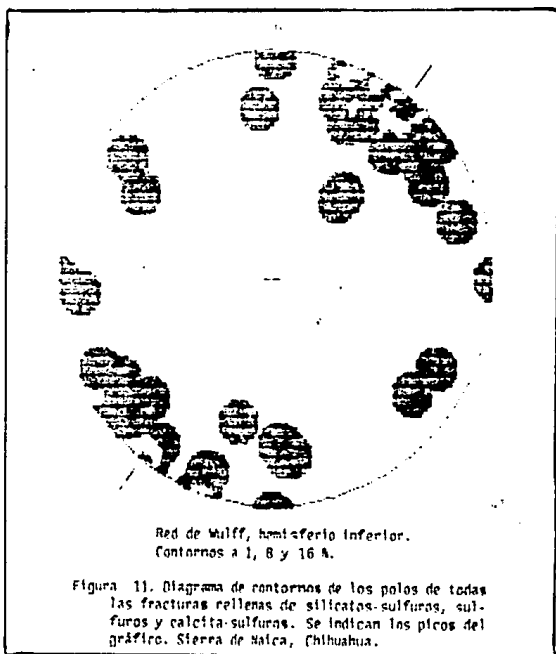
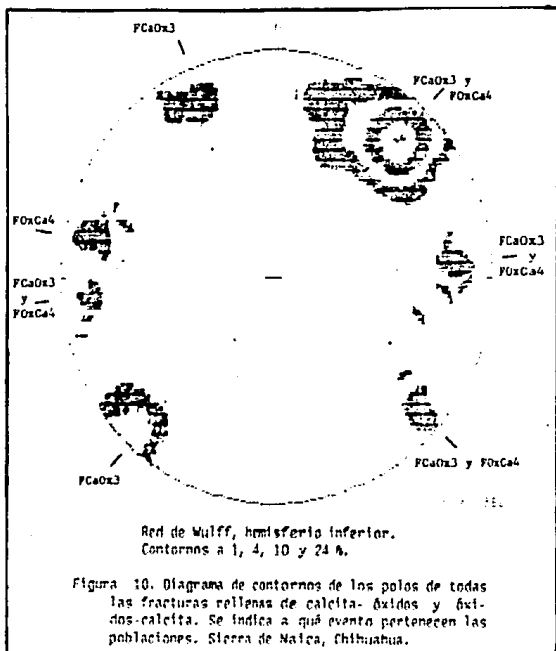


figura 7 muestra las relaciones con el evento FCa2, la figura 13 muestra las fracturas rellenas de calcita en la formación Benavides, comparándolas con la figura 7 se podrá apreciar la deflexión del fracturamiento descrita. La figura 6 ubica los sitios donde FCa5 fue localizada en la sierra.

En el interior de la mina es un evento ampliamente representado, conservan la morfología, es común encontrarlas cortando a los cuerpos de mineral, nunca en estos casos son más anchas de 10 o 15 cm, los espesores mayores los logran fuera de los cuerpos. La orientación preferencial en la mina es N38W/78SW (figura 14), la dispersión aumenta con relación al fracturamiento de calcita aflorante.

SEXTO: FV6. Fracturamiento vacío. Está constituido por una serie de fracturas bastante espaciadas, pero muy bien marcadas en el terreno, rectas en todos los casos, en ocasiones forma escarpes en las unidades calcáreas. Es común encontrarlas abiertas, en la mina se les encuentra en prácticamente todo el macizo rocoso. Es principalmente a través de este sistema que corre el agua que ha dado problemas al minado desde que los trabajos se iniciaron en Naica. Esta misma agua ha depositado sulfatos en este tipo de fisuras, siendo el más vistoso de

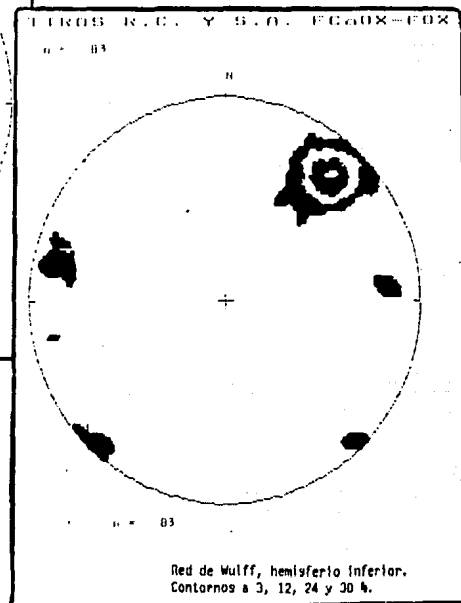
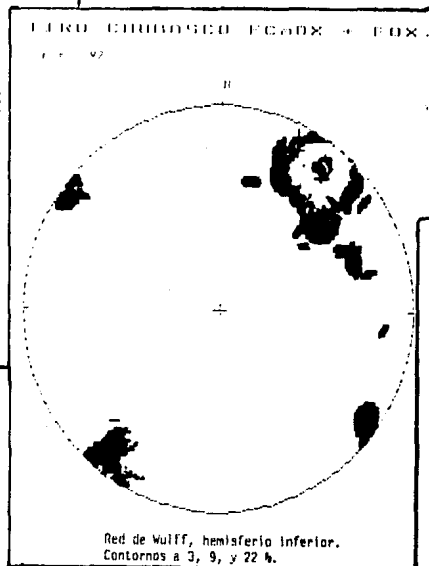
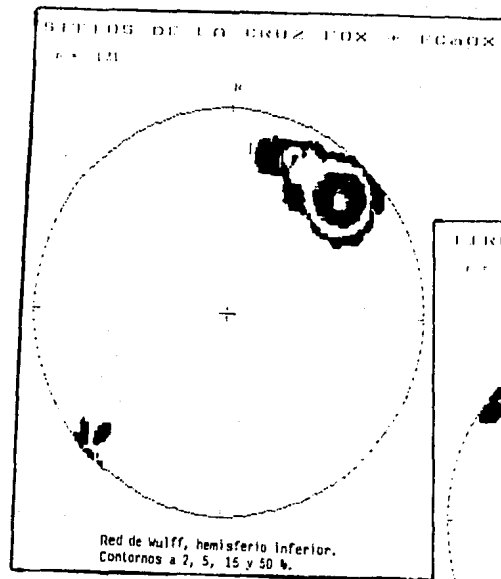
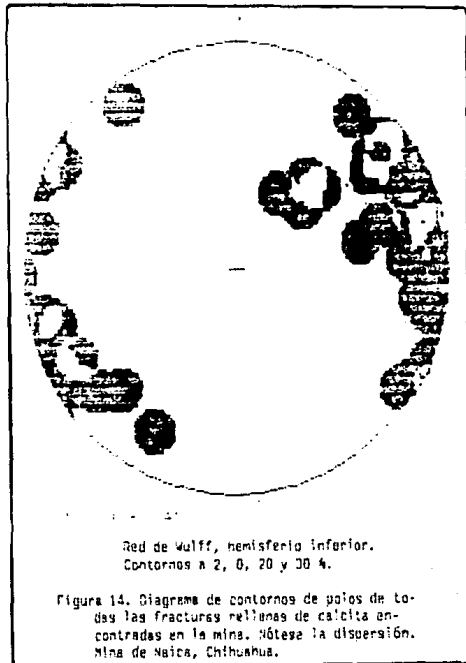
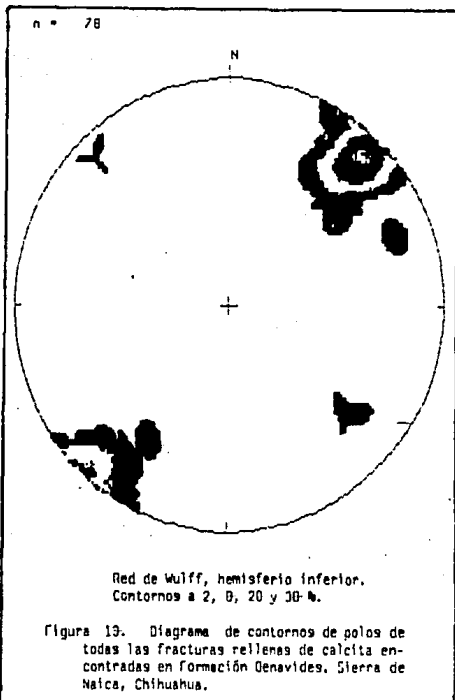


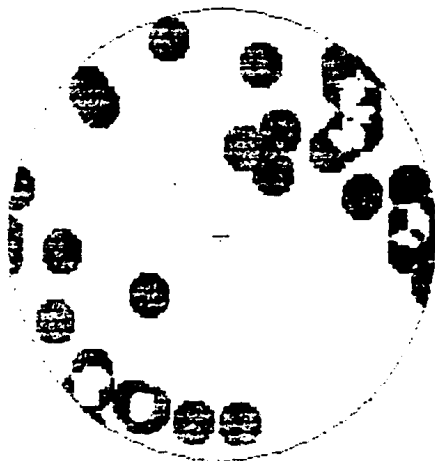
Figura 12. Diagramas de contornos donde se encontró el arreglo muy marcado para los eventos F3 y F4. De izquierda a derecha: Sitio de la Cruz, Tiro Chubasco y Tiros Ramón Corona y San Antonio. Sierra de Naica, Chihuahua.



ellos el yeso, que forma ocasionalmente cristales de gran calidad. Estas fracturas cortan a todos los eventos anteriores. También se presentan como patrones de fracturas paralelas, equidistales una de otra. Su orientación preferencial es N35E/80NW y 85SE, una dirección subordinada se da a N30W/75SW. En la Formación Loma de Plata este fracturamiento es muy claro y evidente y forma patrones conjugados de juntas con echados contrarios muy notorios. La figura 5 muestra la variabilidad de rumbos y la relación con el evento FV1. La figura 6 muestra en qué localidades se encontró este suceso.

Los datos del interior de la mina forman un gráfico disperso, pero los máximos están bien apuntados, las orientaciones principales son N43W/71SW y N02W/81W. El patrón tan disperso se debe en mucho a que el muestreo en la mina no fue sistemático, como en superficie, y además el volumen de muestreo es menor (figura 15).

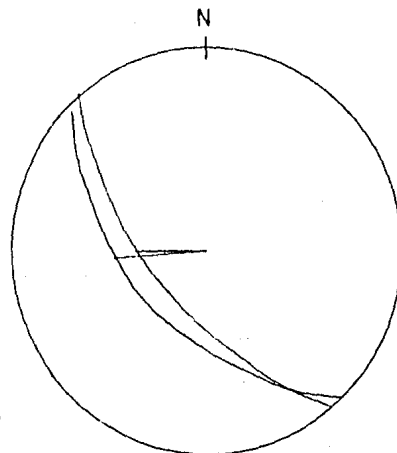
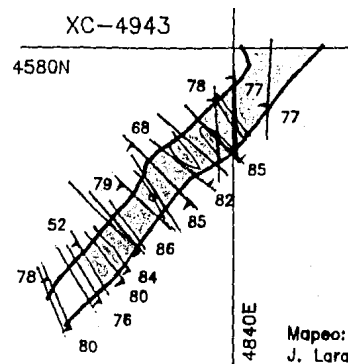
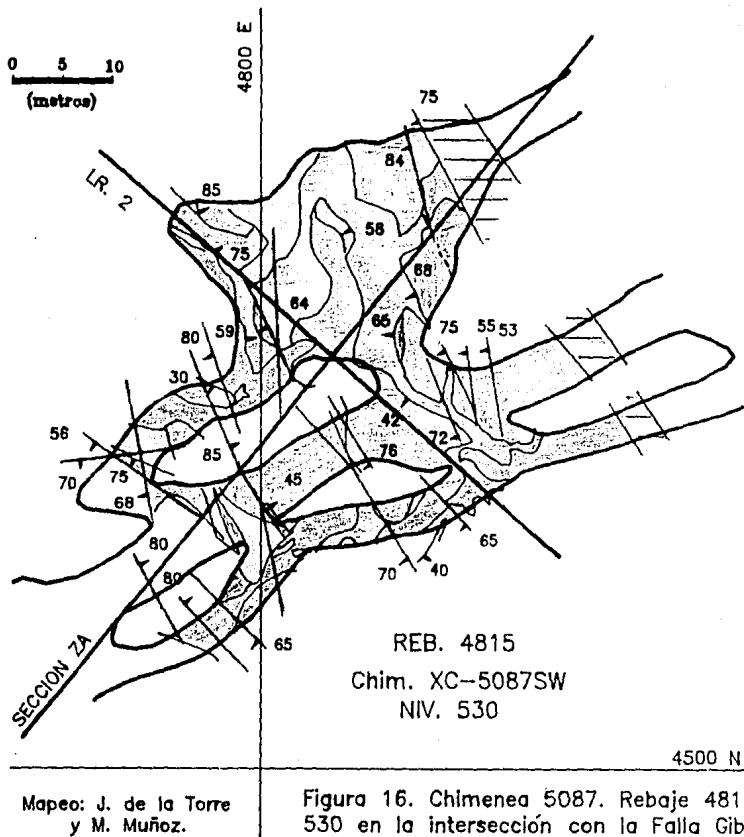
Dentro del tiempo de generación de este evento, se provoca el fallamiento en bloques. Las fallas más importantes son Gibraltar, Naica, Montaña y Estrella, de orientaciones promedio N45W, las primeras dos caen hacia el SW, en tanto que las otras son



Red de Wulff, hemisferio inferior.
Contornos a 1, 6, y 12 %.

Figura 15. Diagrama de contornos de polos de todas las fracturas vacías encontradas en la mina. Véase la dispersión, Mina de Azca, Chihuahua.

de echado contrario (figura 2). La Falla Gibraltar es importante, pues desplaza a varios de los cuerpos minerales: Mantos Gibraltar, Segundo, Azules, Remedios, Torino-Tehuacán, 4888 (Escondido), Tercero, Chimeneas Torino-Tehuacán y 5087, por hablar de los más importantes. Es una falla normal con componente derecha y componente rotacional en sentido de las manecillas del reloj si la visibilidad es desde el block del alto, como se observó en sección de líneas de corte (que no se presenta por ser objeto de un trabajo distinto). El único manto que con certeza se conoce al alto y al bajo es el Gibraltar (alto), cuyo correspondiente es el Azules Descubridora. Aún falta por entender y cuantificar la variación del salto de la falla con respecto a la distancia a que se encuentra del centro de rotación-caída. Las figuras 16 y 17 muestran la Chimenea XC5087-SW, en donde fueron medidas direcciones de estriamiento, las cuales son muy escasas en esta falla debido a la circulación de agua que trae consigo el depósito de sulfatos, en la figura 18 se muestra otro cuerpo desplazado, el Tercer Manto, donde también se tomaron mediciones.



Estereograma con la
solución de estriamiento.

Figura 16. Chimenea 5087. Rebaje 4818, Nv. 530 en la intersección con la Falla Gibraltar y XC-4943, Nivel 480-530 (Mapeos J. Lara, M. Muñoz y J. de la Torre. (leyenda en la contrapágina). Mina de Naica, Chihuahua.

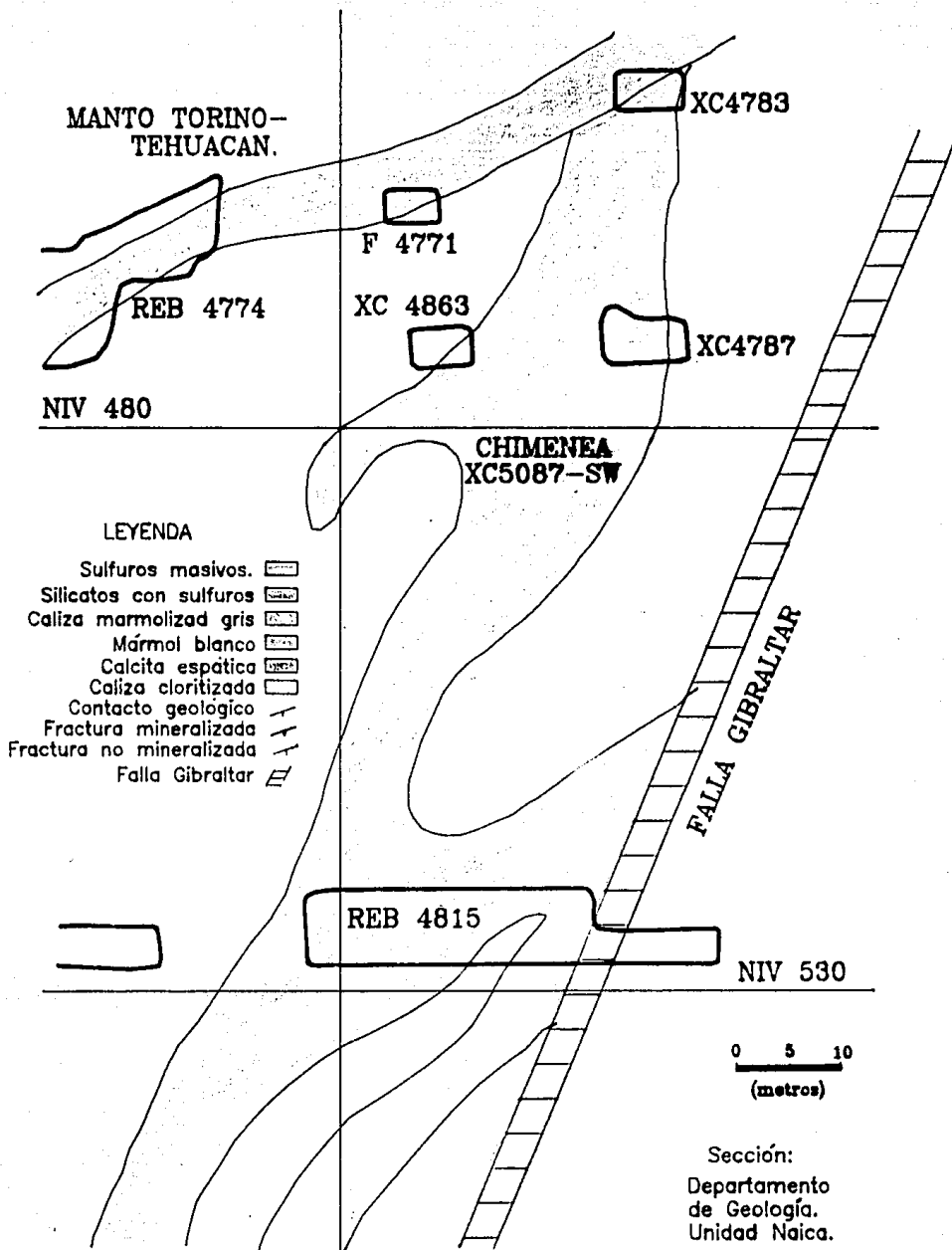


Figura 17. Sección ZA de la Chimenea 5087 (ver contrapágina) en su intersección con la Falla Gibraltar. Mina de Naica, Chihuahua.

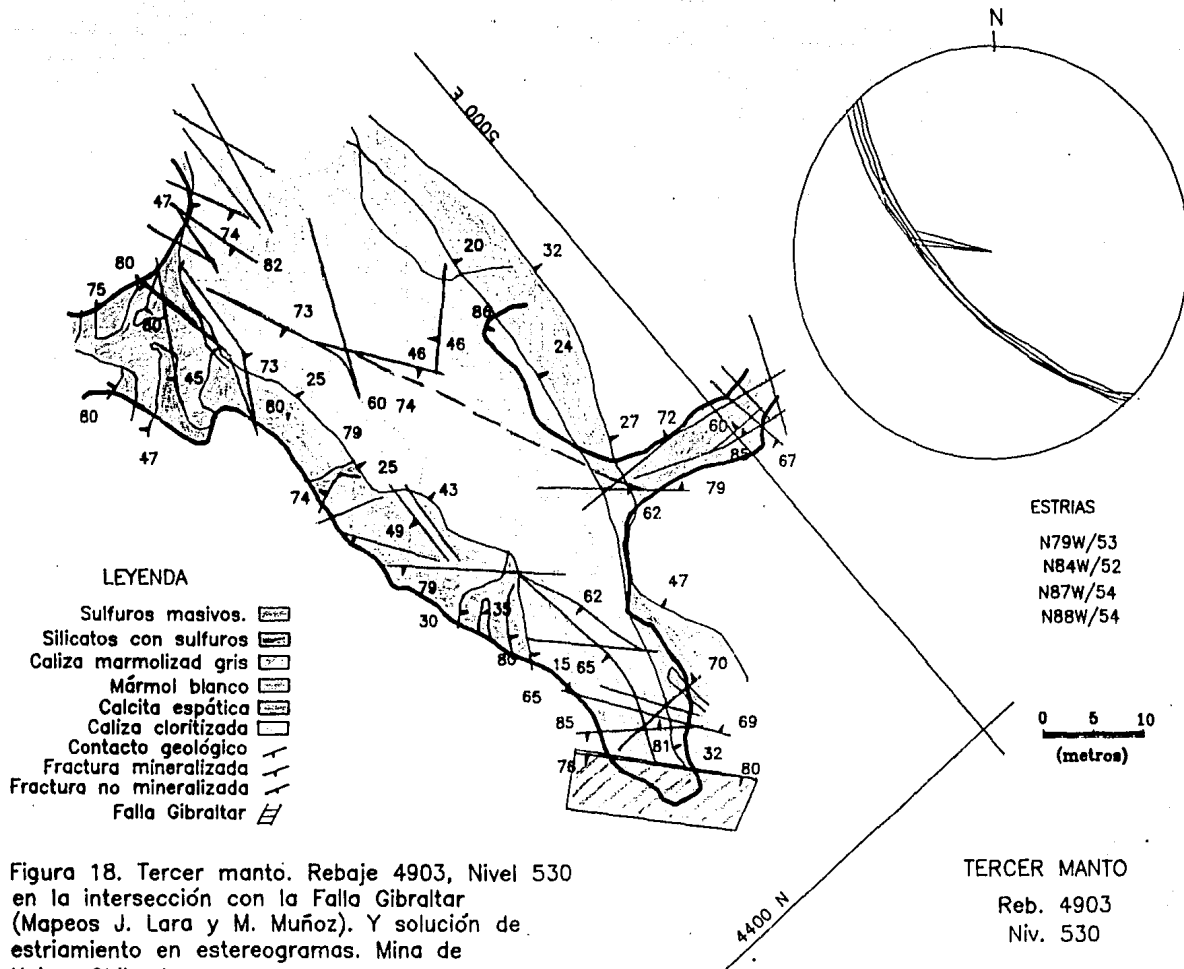


Figura 18. Tercer manto. Rebaje 4903, Nivel 530 en la intersección con la Falla Gibraltar (Mapeos J. Lara y M. Muñoz). Y solución de estriamiento en estereogramas. Mina de Naica, Chihuahua.

Mapeo: J. Lara y M. Muñoz.

DISCUSION.

Se designarán los esfuerzos principales como S1 el esfuerzo principal máximo; S2 el principal intermedio y S3 el principal mínimo.

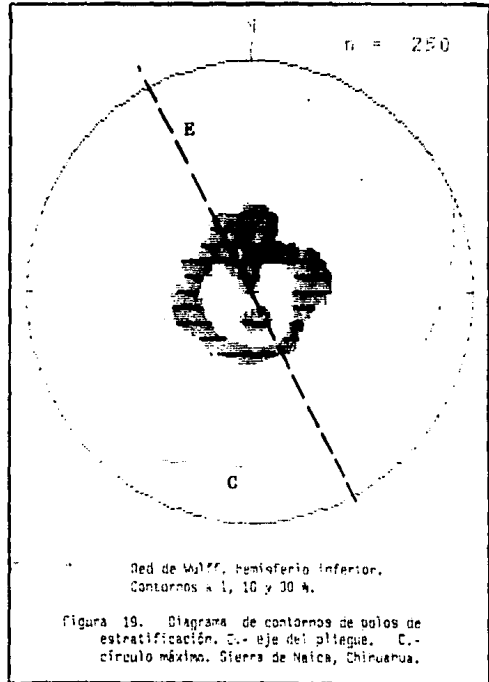
La secuencia de rocas que aflora en la Sierra de Naica se depositó durante el Albiano, no se encuentran rocas de edad posterior ya que, o bien por erosión fueron removidas, o no existió depósito posterior.

A principios del Terciario, sucede una etapa compresiva que se le ha llamado Orogenia Laramide. Durante esta etapa se forman los pliegues y cabalgaduras que caracterizan al Sistema Cordillerano.

En Naica la manifestación a nivel global en las tres sierras es un pliegue asimétrico inclinado cuyo eje está orientado N33W, aunque es difícil ser preciso, pues sufrió un combamiento posterior que oscurece el rumbo real. A nivel Sierra de la Mina se tiene un pliegue simétrico secundario que fue provocado por el mismo sistema de esfuerzos que el pliegue regional; es muy difícil establecer el rumbo del eje de esta estructura debido al combamiento mencionado, siendo tentativamente N27W (figura 19) con base en técnicas geométricas, pues la cartografía no responde con claridad esta pregunta. Franco (1978a) al medir secciones estratigráficas reconoció corrimientos de bajo ángulo. Durante el levantamiento de las secciones estructurales para este trabajo fueron encontrados dos planos de corrimiento.

El sistema de esfuerzos que genera el patrón principal de FV1 es el mismo que forma el plegamiento y su orientación es:

- S1 S57W/horizontal
- S2 vertical
- S3 N33W/horizontal



obtenido a partir del plegamiento y de la observación del fallamiento de desplazamiento lateral cartografiado, el S1 es posible que haya tendido hacia S50W, con base en el fracturamiento. Los corrimientos a rumbo tal vez se deban a una distribución diferencial de S1. Es común que el frente compresivo no se comporte como un solo plano. En el reconocimiento se observaron algunos corrimientos horizontales, pero de dimensiones tan restringidas que la posibilidad de que se deban al cizalleo capa a capa durante el desarrollo del plegamiento (Ramsay y Hubert, 1987) es razonable; además estos planos suceden en los contactos de caliza masiva con caliza de estratificación gruesa. Formas de fracturas generadas en este sistema se originan cuando el esfuerzo principal máximo es mayor al principal mínimo (Olson y Pollard, 1989), la figura 20 muestra las relaciones entre los esfuerzos inferidos, el fracturamiento y el plegamiento.

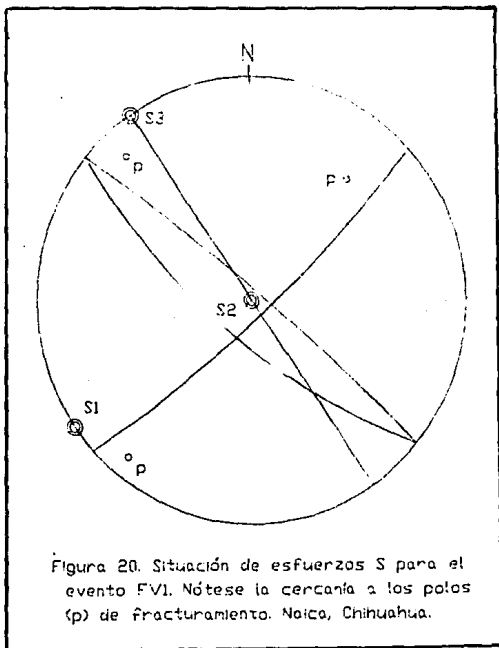
Al liberarse estas presiones y debido a la deformación por plegamiento que sufre la secuencia, se forma una familia oblicua al primero. Es posible que se desarrolle poco tiempo después que el evento inicial.

En cuanto a la segunda etapa del fracturamiento FCa2 se tiene poco claro qué pudo causarla, tal vez fue formada por esfuerzos remanentes del periodo compresivo del Eoceno o bien

cuando el régimen de esfuerzo tectónico pasa a ser subordinado a la carga litostática, pero no existen evidencias claras, aunque se supone más factible la segunda hipótesis. El relleno es de calcita, pero bien poco se pudo averiguar sobre su origen. De la medición de orientaciones se obtienen los siguientes datos:

- S1 S57W/74
- S2 S55E/07
- S3 N33E/15

se considera que patrones perpendiculares como los de FCa2 pueden generarse en un ciclo de carga-descarga, esto en términos dinámicos equivale a que el esfuerzo compresivo tectónico pase de ser mayor a igual y posteriormente menor a la presión litostática.



En probetas ensayadas a carga-compresión-descarga se producen este tipo de fracturas cuando la deformación típica es menor al 1 % (Padilla, 1987). La figura 21 relaciona el fracturamiento con el probable arreglo de esfuerzos.

El tercero y cuarto evento pueden conceptualizarse dinámicamente como uno solo, aunque temporalmente puede apreciarse una evolución en formas y rellenos.

Con base en la morfología de las fracturas, este periodo se inicia en un régimen de esfuerzos donde S1 es principalmente litostático, paulatinamente esta presión se ve aumentada, manteniéndose la dirección aproximadamente igual. Este incremento se refleja en juntas anastomosadas que poco a poco tienden a formas rectas equidistantes, como se ve en superficie en la evolución de $FCaOx3$ a $FOxCa4$, cuando sucede el evento mineralizante que se ha llamado F4, en general, es el momento en que el esfuerzo principal es mayor, siendo S1 muy superior a S2 y a S3, posteriormente el empuje disminuye y se generan algunos arreglos anastomosados (Olson y Pollar, 1989) de óxidos-calcita o de sulfuros. En la mina el predominio de formas rectas en fracturas mineralizadas es evidente, aunque se presentan casos de fracturamiento alabeado y anastomosado, que puede relacionarse con la evolución superficial, por ejemplo la figura 8 muestra un cuerpo pequeño, la Chimenea San Patricio, cuyo control es una sola fractura de donde abren bolsas limitadas por fracturamiento paralelo acompañante.

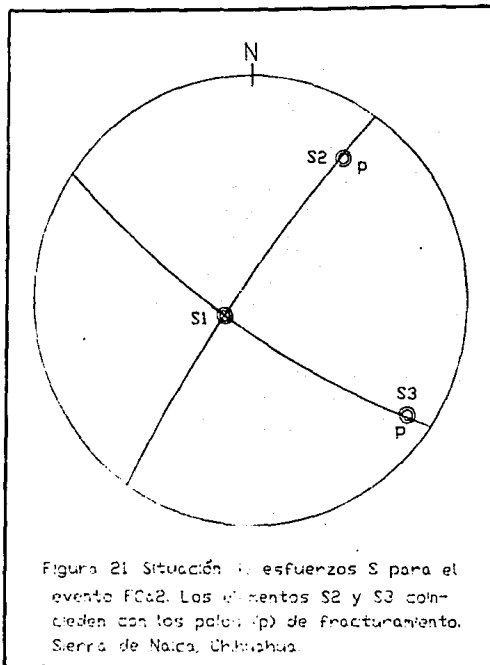


Figura 21 Situación de esfuerzos S para el evento FCa2. Los ejes S2 y S3 coinciden con los polos (p) de fracturamiento. Sierra de Naica, Chihuahua.

Patrones conjugados como los encontrados se dan cuando la deformación típica varía entre 1 y 5 % (Padilla, 1987). Aunque el fracturamiento principal que resuelve el S1 está bien marcado, los patrones subordinados son varios, aunque no con grandes dispersiones (figuras 10 y 11), esto puede deberse a un valor de S2 no muy superior a S3.

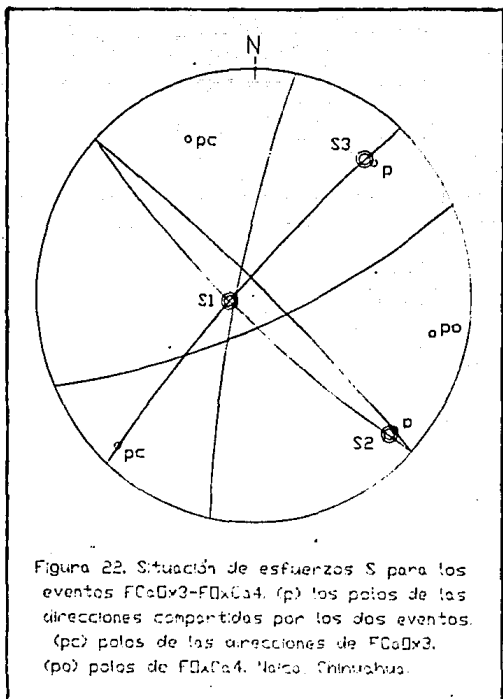


Figura 22. Situación de esfuerzos S para los eventos F0aDx3-F0x0a4. (p) los polos de las direcciones compartidos por los dos eventos. (pc) polos de las direcciones de F0aDx3. (po) polos de F0a0a4. Merca. Chiriquhua.

No se encontraron evidencias de acortamiento, lo cual indica que la presión confinante no era muy grande o bien que su valor no se acercaba al de S1.

A partir de las direcciones de fracturamiento se infirieron las siguientes direcciones de esfuerzo:

S1 S75W/74

S2 S46E/08

S3 N39E/12

obteniéndose los mismos valores en ambos eventos (F3 y F4). La figura 22 resume las orientaciones del sistema y sus relaciones con las familias de rasgos.

Los diques fueron emplazados al inicio de este periodo y su fracturamiento responde a los esfuerzos actuantes en el momento, en la figura 23 se presenta el arreglo mecánico interpretado en los intrusivos y se compara con el obtenido en el resto de la secuencia, sus orientaciones son:

S1 N85W/68

S2 S52E/16

S3 N32E/08

aunque los rumbos de los S1 parecen significativamente diferentes sólo implican una rotación de 6 grados que se explica como una variación del esfuerzo en el tiempo. En muchas ocasiones es a partir de intrusivos que abren los mantos, este es el caso del Segundo, Tercero, Quinto y Gibraltar, aunque no en toda la extensión del cuerpo. Como se ve en la figura 2 para el caso del Manto Gibraltar, en los niveles 430 a 480 se comporta casi vertical, para después horizontalizar y tomar una tendencia estratiforme echada entre 15 y 20 grados. El fracturamiento en el dique se conserva a pesar de estos cambios en el rumbo del cuerpo, lo cual hace pensar en la interacción directa entre el sistema de esfuerzos y el intrusivo.

Es este empuje el que comba al anticlinal producido en el primer evento, imprimiéndole la forma cómica que presenta.

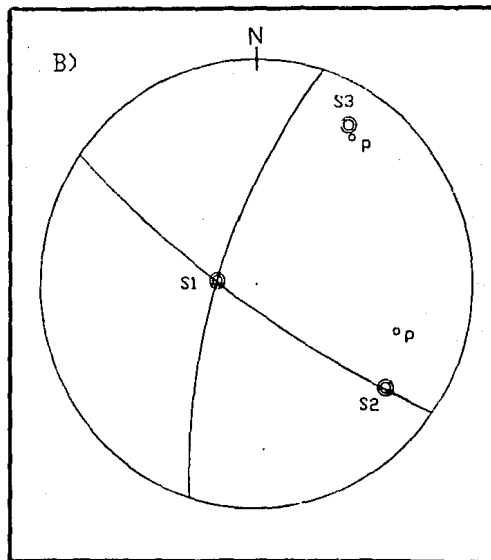
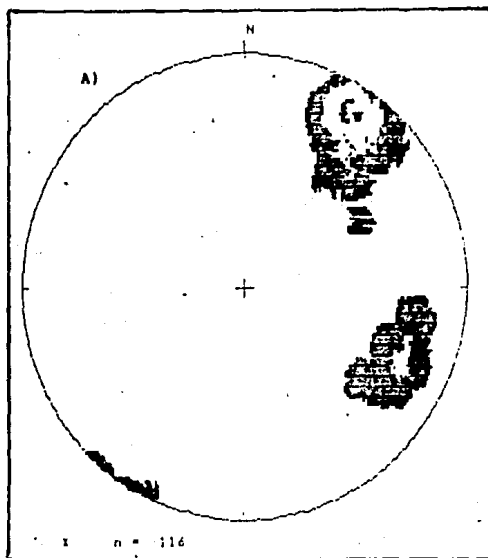


Figura 29. Datos de fracturamiento levantados en dique A). Diagrama de contorno de todos los polos de fracturamiento. B). Situación de esfuerzos S durante el emplazamiento de los diques, se aprecia la cercanía de los polos p de las máximas concentraciones. Sierra de Naica, Chihuahua.

Sobre el mecanismo que produjo este esfuerzo debió de ser un empuje que aumentó considerablemente el valor de S1, tal vez hasta hacerlo 2 o 3 veces mayor a S3 (Olson y Pollard, 1989) y que además haya estado acompañado por hidrotermalismo de por lo menos entre 250 y 280 grados centígrados en promedio (Erwood, et.al. 1979) y metamorfoseara las calizas llegando a producir hasta wollastonita. Con base en lo anterior la existencia de un intrusivo que provoque tales consecuencias y no aflore, es posible.

En el Colorado Plateau se han medido sistemas extensionales (Wong y Humphrey, 1989) que al disminuir la presión confinante podrían semejar la relación de esfuerzos descrita, pero no se ha reportado hidrotermalismo y es dudoso que llegue a estados similares.

Ren, et.al. (1989) encuentra en el stock Little Cottonwood en Colorado, USA, un esfuerzo tectónico horizontal a S67W para los 28 m.a. que actúa como S2. Los diques de Naica se fecharon en 26 +/- 1 m.a. (Rostad, 1981), pero no se encontraron evidencias de un sistema tectónico más que la formación de fracturas en trenes parecidos al primer evento compresivo.

Los sistemas extensivos que se han encontrado asociados al magmatismo sinorogénico del sistema del Western Great Basin en California y Arizona, USA, tienen condiciones parecidas de esfuerzos (Barton y Hanson, 1989), pero la opción plutónica sigue presente.

La orientación de los esfuerzos principales para F3 y F4 es la misma, se hace esta distinción en parte por sus formas, pero principalmente por el relleno que se vio en superficie, en la mina se encontraron tres tipos de fracturas: con silicatos-sulfuros, sulfuros y calcita-sulfuros (en los 3 tipos casi exclusivamente galena), pero no se logró apreciar las relaciones geométricas entre ellas debido a su espaciamiento, solamente se puede decir que los tres tipos cortan a cuerpos de silicatos, en tanto que a cuerpos de sulfuros sólo las cortan aquellas de calcita-sulfuros, por lo cual puede relacionarse con el evento FOxCa4 de afloramientos, es claro que los cuerpos de silicatos se emplazan primero que los de sulfuros puesto que gran número de chimeneas parten de ellos y otras no sólo nacen, sino terminan en mantos (figura 17), además el sulfuro se encuentra embebido en una matriz silicatada en los mantos.

La diferencia del relleno de fracturas se explica por la evolución de contenidos metálico y de tipo de fluidos durante el tiempo de depósito.

En este trabajo se enfatizan los tiempos de deformación y ruptura del macizo y cada uno se relaciona a un evento, pues cada estado de esfuerzos produce sus propios efectos (Leepinasse y Pêcher, 1986), es por esto que el conocimiento de las etapas en que la roca fue rota y el relleno que vino consigo, ol-

vidándose en mucho el concepto de fracturamiento premineral y posmineral que se maneja puede dar un entendimiento más global del yacimiento. Para Naica, Jurado (1975) hizo énfasis en la Geología Estructural con el concepto descrito. Las direcciones que él encuentra fueron reconocidas, a excepción de las N20E/45NW o SE que interpreta como posteriores a la formación de silicatos y al momento de formación de sulfuros.

Un evento térmico y verticalmente compresivo como el que produce la mineralización, si bien utiliza los canales previamente abiertos por situaciones anteriores, también produce su propio sistema de juntas. Knapp y Knigh (1977) encuentran que incrementos moderados de temperatura producen grandes incrementos en la presión de poro, principalmente en el intervalo de 200 a 400 grados, que es en el cual los datos de inclusiones fluidas se encuentran principalmente (Erwood, et.al. 1979), con lo cual se produce la propagación de fracturas a partir de poros aislados o de líquidos atrapados (aguas de formación a nivel intracrystalino o inclusiones fluidas a nivel intercrystalino) siguiendo la dirección de esfuerzos imperante. De esta forma la generación de fracturas en un evento hidrotermal es un proceso común e incluso mecánicamente normal al superar estas presiones hidráulicas la resistencia a la tensión de la roca. Kowallis, et. al. (1987) encuentra, incluso, un mejor apuntamiento estadístico de polos de microfracturas que de mesofracturas para un mismo sistema.

Gerla (1987) interpreta una variación en el origen de las fracturas y por tanto de su forma, con respecto a tiempos de enfriamiento y a la posición de las direcciones S1 y S3 en un plutón. Aunque en este caso estas temperaturas no son alcanzadas puede hacerse una similitud, además se observa una evolución de formas anastomosadas a rectas equidistales y posteriormente a rectas aisladas a través del tiempo. En cuanto a la duración de estos eventos no debió ser grande, Norton (1982, en Ren, et. al. 1989) estimó tiempos de enfriamiento de los 800 grados hasta el gradiente geotérmico regional de entre 150 a 200 mil años en un stock.

El posible intrusivo de Naica puede relacionarse con los últimos eventos del Supergrupo Volcánico Superior, los cuales están fechados en 27 m.a. (McDowell y Clabaug, 1981(1984)) si se considera que a nivel regional se tiene relativamente cerca esta provincia y que la edad de 26 +/- 1 m.a. (Rostad, 1981) coincide bien con los datos del evento volcánico.

El quinto evento está ligado a la última etapa de franco enfriamiento del foco caliente que generó hidrotermalismo y a la descarga de este empuje. Su componente principal es prácticamente vertical, el S2 y S3 debieron de evolucionar en el tiempo hasta hacerse casi iguales, lo cual explica que se forme al principio un sistema bien orientado en sentido N47W y otro de orientación muy difusa (figura 7). En muchos lugares da la impresión que las relaciones S1>S2=S3 debieron de mantenerse no

muy grandes (Olson y Pollard, 1989), pues hay tanto arreglos rectos como anastomosados.

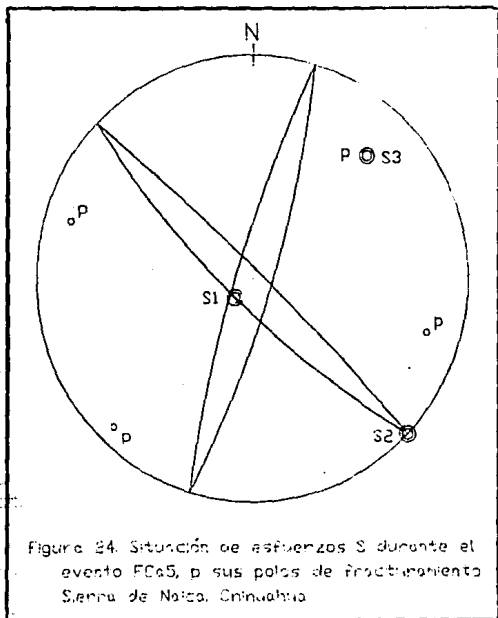


Figura 24. Situación de esfuerzos S durante el evento FCo5, p sus polos de fracturamiento Sierra de Naica, Chihuahua

Se encuentran también fracturas rellenas de cuarzo amatista, las cuales probablemente se deban a la última etapa hidrotermal o bien a este quinto evento; son muy escasas y sólo fueron observadas cortando a los mantos Segundo y Cuarto (que en realidad son la misma estructura), debido a su falta de representantes no pudieron encontrarse relaciones geométricas más que con el sexto evento, el cual las corta.

Las componentes del esfuerzo inferidas se expresan en la figura 24 y son:

- S1 S43W/75
- S2 S47E/horizontal
- S3 N43E/15

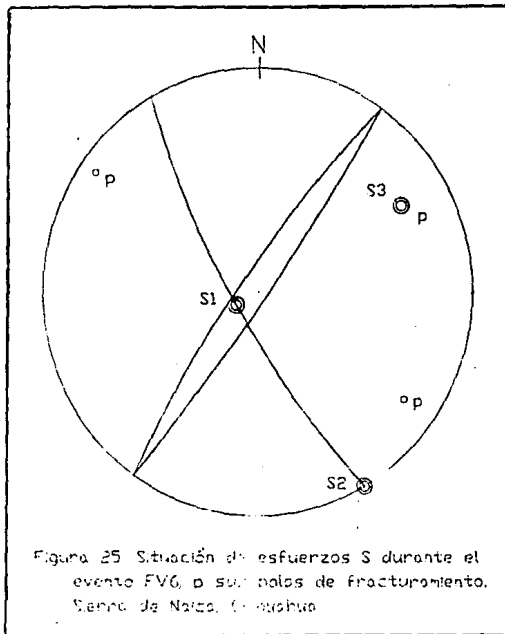
El último evento es el más vistoso en el área, pues forma las fallas de expresión más clara como son la Gibraltar y Naica de orientación N35W a N45W que caen hacia el suroeste y la Montaña y Estrella, que conservan la orientación, pero caen al noreste. Las fracturas acompañantes son principalmente oblicuas a las fallas y en menor cantidad paralelas a ellas. Es este evento el responsable de haber impreso la morfología que algo modificada por los agentes exógenos se presenta en el área a nivel regional se relaciona con el sistema Sierras y Valles (Basin & Ranges). Es un evento muy posterior a los anteriores.

Henry (1989) afirma, con base en el trabajo propio y en el de otros autores que el fallamiento principal del sistema Sierras y Valles se da entre los 17 y los 19 m.a. y el fallamiento debido a la apertura del Golfo de California entre los 5 y 6 m.a. Sobre la generación de este sistema distensivo hay una gran cantidad de información. En este trabajo las orientaciones que se encuentran para los esfuerzos principales pueden verse en la figura 25 y son:

- S1 S60W/75
- S2 S30E/horizontal
- S3 N60E/15

la mayor cantidad de fracturas están orientadas a 25 grados de S3 y se asocian a la recuperación elástica posterior al fallamiento.

Sin embargo, la observación más detenida del fallamiento y del estriamiento revela que el movimiento de la falla Gibraltar no sólo es de caída, como se observa en los estereogramas de las figuras 16 y 18. El estriamiento da un cabeceo de 60 grados a la horizontal y un componente derecho de desplazamiento horizontal, lo cual implica no sólo un sistema distensivo donde el esfuerzo máximo máximo S1 es sólo vertical, sino que la existencia de una componente horizontal, que inclina a S1 se evidencia. Además, el bloque del alto cae, se desplaza horizontalmente y rota, lo cual implica un sistema de fuerzas resultante de esfuerzos distribuidos no homogéneamente.



Se mencionan otro tipo de fracturas, las vacías sólo en silicatos y en mucho menor cantidad sólo en sulfuros. Sus orientaciones siguen a FV6, sin embargo sólo se les encuentra dentro de los cuerpos. Estas juntas se acentúan con el tiempo, al estar expuesta la roca debido al minado. Probablemente se deben al relajamiento y debilitamiento del macizo a partir de direcciones de fracturamiento previamente impresas. Aunque la roca de Naica, por lo general es de buena calidad, estas juntas causan bloques inestables en los rebajes.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

A nivel regional han sido tres los principales eventos de deformación que han sufrido las rocas de la Sierra de Naica: plegamiento y fracturamiento durante la compresión Eocénica, empuje vertical, producido tal vez por un intrusivo, que forma los canales e introduce las soluciones mineralizantes que dan origen a los yacimientos minerales actualmente en explotación, por último el sistema distensivo de Cuencas y Valles afectó la secuencia y dio como resultado la actual morfología de esta provincia.

Estos tres eventos mayores forman 6 sistemas reconocibles de fracturamiento, 4 de ellos se deben a la compresión en distintas orientaciones y sus familias asociadas a la descarga y a la recuperación elástica del macizo.

Areas como Tiro Chubasco o Tiro Zolá (cercano a los Tiros Zolá y Fortuna), con base en el agrupamiento estadístico de sus fracturas F3 y F4 representan blancos de exploración en superficie y a profundidad que no han sido aún atacados.

Es necesario buscar la continuación de los cuerpos dislocados por la Falla Gibraltar con base en su movimiento de caída, lateral y rotación, pues varios cuerpos terminan en mineral económico al chocar con esta estructura.

Es importante reconocer sistemas compresivos verticales, pues, como en este caso, los yacimientos económicos se asocian directamente a él. En Naica se tiene además de claras manifestaciones del estado de esfuerzos del evento mineralizante muchas fracturas cuyos rellenos ensayan valores metálicos, pero este tipo de afloramientos se están acabando y es necesario comprender con base en otros criterios, cuál ha sido el proceso que se ha llevado a cabo y poder relacionarlo con la prospección.

Este estudio ha sido realizado con base en observaciones de campo, revisión bibliográfica y aprehensión de la cartografía existente. Las inclusiones fluidas pueden aportar una mejor comprensión del modelo o refutarlo al poder armar lo sucedido tanto dinámica como térmicamente. Ensayes de mecánica de rocas en laboratorio podrían ayudar a comprender el comportamiento mecánico preciso del área.

Datos sobre otros yacimientos del mismo tipo podrían redondear un modelo estructural de su ocurrencia a nivel más general.

Fundamentalmente el problema consiste en poder inferir la existencia o no de la mineralización a profundidad. Las técnicas estructurales analíticas pueden ser muy útiles en las diferentes etapas de la exploración: en un principio pueden

servir para comprender que las condiciones mecánicas han formado zonas favorables; durante la exploración sistemática permitirá orientar hacia dónde enfocar los blancos y durante la explotación serán de utilidad en la interpretación de masas dislocadas de mena y en mecánica de rocas para el minado de los cuerpos.

Es necesario ampliar el número de técnicas para explorar y comprender los yacimientos, la Geología Estructural juega un papel muy importante en casi todos los criaderos al servirles como guía para su formación, al deformarlos y, en muchas ocasiones, fallarlos. Por lo anterior resulta necesario que este tipo de análisis, tanto a escalas regionales como a detalle, sean realizados en forma más amplia y sistemática.

REFERENCIAS CITADAS

- Barton, Mark D. and Hanson, R. Brookx. 1989. Magmatism and the development of low-pressure metamorphic belts: Implication from the Western United States and thermal modeling. Geological Society of America, Bull. V. 101, p. 1051-1065.
- Bravo-Medina, Nephtalí. 1968. Geología de los depósitos de minerales en el Distrito Minero de Naica, Chihuahua. Inédito. IPN. Tesis profesional, 40 p.
- Burrows, R.H. 1910. Geology of Northern Mexico. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo VII, p. 85-103.
- Coolbaugh, D.F. 1978. Memorandum to Dr. Kenneth Lowther. 08/31/78. Inédito. Archivo técnico. Compañía Fresnillo. S.A. de C.V.
- 1979. Memorandum to Dr. G. K. Lowther. 10/02/79. Inédito. Archivo técnico. Compañía Fresnillo S.A. de C.V.
- Erwood, Robin; Kesler, Stephen and Yoke, Paul. 1979. Compositionally distinct, saline hidrothermal solutions, Naica Mine, Chihuahua, Mexico. Economic Geology, Vol. 74, p. 95-108.
- Franco-Rubio, Miguel. 1978a. Estratigrafía del Albiano-Cenomaniano en la región de Naica, Chihuahua y su relación con los yacimientos de plomo y zinc. Inédito. UNAM, Fac. de Ciencias, tesis de maestría, 129 p.
- 1978b. Estratigrafía del Albiano-Cenomaniano en la región de Naica, Chihuahua. UNAM, Instituto de Geología. Revista, Vol. 2, No. 2, p 132-149.
- García-Milán, Enrique. 1973. Estudio geológico de los yacimientos metalíferos de Naica, Estado de Chihuahua. Inédito. Trabajo recepcional UASLP, 53 pp.
- 1975. Cartografía geológica, hojas N-4, N-5, N-9, N-10 y N-11, escala 1:1,000. Inédito. Compañía Fresnillo S.A. de C.V.
- Gerla, Philip J. 1988. Stress and fracture evolution in a cooling pluton: an example from the Diamond Joe Stock, Western Arizona U.S.A. Journal of Volcanology and Geothermal Research, Vol. 34, p. 267-282.
- González, Raúl. 1976. Bosquejo geológico de la Zona Noreste. Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, Vol. XXVIII, No. 1 y 2, p. 2-49.

- Guth, Peter L. 1987. MICRONET: Interactive Equal-area and equal-angle nets. *Computers and Geosciences*, Vol. 13, No. 5, p. 541-543.
- Henry, Christopher D. 1989. Late Cenozoic Basin and Range structure in western Mexico adjacent to the Gulf of California. *Geological Society of America, Bull.* V.101, p. 1147-1156.
- Jurado-Acuña, Carlos A. 1975. Yacimientos minerales de Naica, Chihuahua. Inédito. IPN, tesis profesional, 55 p.
- Kamb, W.B. 1959. Ice petrofabrics observations from the Blue Glacier, Washington, in relation to theory and experiment. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 64, No. 11, p. 1891-1909.
- Kowallis, Bart J., Wang, Herbert F. and Jang, Bo-An. 1987. Healed microcracks orientations in granite from Illinois borehole UPH-3 and their relationships to the rock's stress history. *Tectonophysics*, Vol. 135, p. 297-306.
- Knapp, Richard B. and Knight, Jerry E. 1977. Differential thermal expansion of pore fluids: fracture propagation and microearthquake production in hot pluton environments. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 82, No. 17, p. 2515-2522.
- Lespinasse, Marc and Pêcher, Arnaud. 1986. Microfracturing and regional stress field: a study of preferred orientations of fluid-inclusions planes in a granite from the Massif Central, France. *Journal of Structural Geology*, Vol. 8, No. 2, p. 169-180.
- Lofquist, D.J. 1986. Depositional environments and petrology of Cretaceous carbonates hosting Pb-Zn-Ag mineralization at Santa Eulalia and Naica, Chihuahua, Mexico. Unpublished M.S. thesis, University of Arizona. 41 p.
- Lugo-Hubb, José. 1989. La geomorfología en México. *Ciencia y desarrollo*, Vol XV, No. 87, p. 69-79.
- McDowell, Fred W. and Clabaugh, Stephen E. 1981 (1984). The igneous history of the Sierra Madre Occidental and its relation to the tectonic evolution of the western Mexico. *UNAM, Instituto de Geología, Revista*, Vol 5, No. 2, p. 195-206.
- Olson, John and Pollard, David, D. 1989. Inferring paleostress from natural fracture patterns: A new method. *Geology*, V.17, p 345-348.
- Padilla y Sánchez, Ricardo J. 1987. Apuntes de Geología Estructural. DEPFI, UNAM. D-69. 128 p.

- Palacios-Martínez, Hugo A. 1977. Cartografía geológica, hoja N3 escala 1:1,000, Inédito. Compañía Fresnillo S.A. de C.V.
- Palacios-Martínez, Hugo A.; Molina, Manuel; González, Rafael y Carrasco, Luis. 1986. Naica. AIME, Minas Mexicanas, Tomo 2, p. 51-68.
- Ragan, Donald M. 1973. Structural Geology, an introduction to geometrical techniques. 3d, ed. Wiley and Sons, 393 p.
- Ramsay, John G. 1967. Folding and fracturing of rocks. McGraw-Hill, 568 p.
- Ramsay, John G. and Huber, Martin. 1983. The techniques of modern structural geology. Volume 1. Strain Analysis. Academic Press. 350 p.
- Ren, Xiofen; Kowallis, Bart J. and Best, Myron G. 1989. Paleostress history of the Basin and Range province in the Western Utah and eastern Nevada from healed microfracture orientations in granites. Geology, V. 17, p. 487-490.
- Rostad, Ora H. 1981. Age date, felsite dike, Naica mine. Inédito, Archivo técnico. Amax-Fresnillo. Compañía Fresnillo S.A. de C.V.
- Trejo de la Cruz, Pantaleón. 1978. Cartografía Geológica, hojas EN-21, RN-22 y EN-23, escala 1:1,000. Inédito. Compañía Fresnillo S.A. de C.V.
- Torres-Guerrero, Daniel. 1989. Geología del Distrito Minero de Naica, Chihuahua, México. Inédito. IPN, tesis profesional, 64 pp.
- Trigos-Suzan, Guillermo. 1987. Mineralogía de opacos de Naica. Inédito. Informe privado. Departamento de Investigaciones Geológicas, Compañía Fresnillo S.A. de C.V.
- Trigos-Suzán, Guillermo. 1988. Oro en Naica. Inédito. Informe privado. Departamento de Investigaciones Geológicas, Compañía Fresnillo S.A. de C.V.
- Wong, Ivan G. and Humphrey, James R. 1989. Contemporary seismicity, faulting, and the state of stress in the Colorado Plateau. Geological Society of America, Bull. V. 101. p. 1127-1146.
- Wilson, I.F. 1956. El Distrito Minero de Naica, Chihuahua, México. Cong. Geol, Internal. 20. México. Librogúa de la excursión A-2 y A-5, p.63-75.