



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
ÁREA ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y MATERIALES
LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN GEOLOGÍA AMBIENTAL

**“Las vetas polimetálicas de la mina Malacate dentro
del contexto de un sistema porfídico de Cu-Mo,
distrito minero La Huacana, estado de Michoacán”**

TESIS PROFESIONAL
PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO GEOLÓGO AMBIENTAL

Presenta:

Miguel Ángel Díaz Ortíz

Directores:

Ing. Jesús Castro Mora (UAEH)

Dr. Eduardo Gonzales Partida (UNAM Centro de Geociencias)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
 Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
School of Engineering and Basic Sciences
 Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales
Department of Materials and Earth Sciences

Mineral de la Reforma, Hgo., a 29 de enero de 2020

Número de control: ICBI-D/205/2020
 Asunto: Autorización de tesis.

M. EN C. JULIO CÉSAR LEINES MEDÉCIGO
DIRECTOR DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

Por este conducto le comunico que el Jurado asignado al pasante de la Licenciatura en Ingeniería en Geología Ambiental Miguel Ángel Díaz Ortiz, quien presenta el trabajo de: **"LAS VETAS POLIMETÁLICAS DE LA MINA MALACATE DENTRO DEL CONTEXTO DE UN SISTEMA PORFÍDICO DE Cu-Mo, DISTRITO MINERO LA HUACANA, ESTADO DE MICHOACÁN"**, después de revisar el trabajo ha decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, se anotan las firmas de conformidad de los integrantes del Jurado:

- PRESIDENTE: Dr. Màrius Ramírez Cardona
- PRIMER VOCAL: Ing. Jesús Castro Mora
- SEGUNDO VOCAL: Dr. Eduardo González Partida
- TERCER VOCAL: Ing. José Alfredo Meneses Lugo
- SECRETARIO: Ing. Ramón Lugo López
- PRIMER SUPLENTE: Ing. Jared Jovanni Hernández Elizalde
- SEGUNDO SUPLENTE: Dr. José Àngel Cobos Murcia

Sin otro particular, le reitero a usted la seguridad de mi atenta consideración.

Atentamente
 "Amor, Orden y Progreso"

Dr. Otilio Arturo Acevedo Sandoval
 Director del ICBI



0AAS/ML

Ciudad del Conocimiento
 Carretera Pachuca-Tulancingo km 4.5 Colonia
 Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo,
 México. C.P. 42184
 Teléfono: +52 (771) 71 720 00 ext. 2270,2280
 Fax 2109
 aactym_icbi@uaeh.edu.mx



www.uaeh.edu.mx

Dedicatorias

*Dedicada para mis padres, Angelica y Julio,
por toda su dedicación, esfuerzo y sacrificio.
Con todo el cariño del mundo, para ustedes.*

Agradecimiento especial

Le agradezco de una manera muy especial al Ing. Jesús Castro Mora, director general y fundador de Geoconsulting Ingenieros S.C., gracias por todo el apoyo y la confianza que me ha brindado para poder desarrollar este proyecto de tesis.

Gracias a usted (Ing. Jesús Castro Mora), por ser mi director de tesis, maestro, jefe y amigo. Todo el trabajo desarrollado, correcciones, observaciones y enseñanzas, ahora me han formado como un mejor geólogo y una mejor persona.

Por eso y mas, le agradezco de todo corazón, e igualmente, le reconozco su gran entrega, compromiso y profesionalismo hacia sus alumnos y con la profesión.

Agradecimientos

A mis padres (Angelica Ortiz y Julio Diaz) y mis hermanos (Erick y Julio), gracias por motivarme a cumplir todas mis metas. Por todo el apoyo y cariño que me brindan día a día, por que siempre aprendo de ustedes y a pesar de las circunstancias, siempre están ahí, para alentarme a seguir luchando por mis sueños, sin ustedes, simplemente no habría logrado esto, muchas gracias.

Un agradecimiento al Ing. Jesus Castro Mora, por ser un gran mentor, tanto en el ámbito académico, como en el profesional, por apoyarme en todas mis dudas, por compartirme y contagiarme la pasión por esta gran profesión. Muchas gracias por que todo el tiempo sigo aprendiendo de usted, agradezco su amistad, la confianza y las oportunidades que me ha brindado.

Al equipo de Geoconsulting Ingenieros S.C. (Ing. Jesus Castro y Arely Ramos), gracias por todo el apoyo, el financiamiento economico de los diferentes aspectos desarrollados en esta tesis, las enseñanzas y la confianza. Todas las experiencias vividas en los diferentes proyectos, la primera oportunidad profesional, los consejos y las atenciones, ahora forman parte de mi. Gracias por esas aventuras vividas en campo y las gratas experiencias.

Un agradecimiento en particular al Dr. Eduardo Gonzalez Partida, por aceptar ser mi asesor de tesis, gracias por su atención, dedicación, tiempo y ayuda que me brindo incondicionalmente, lo cual me beneficio para mi desarrollo personal y profesional de mi área académica.

Agradezco en particular al CONACyT ya que la tesis en parte fue financiada por el proyecto CONACyT intitulada "GEMex # 267084 ; WP - 4.1: Cooperación México-Europa para la investigación de sistemas geotérmicos mejorados y sistemas geotérmicos superalimentos", dentro del paquete de trabajo 4.1 : Determinación de Propiedades Petrológicas, de Alteración Hidrotermal, Microtermométricas, Geoquímicas, de Isótopos Estables y Geocronológicos de Afloramientos Basamentales de Áreas Aledañas a los Humeros y Acoculco Pue, Teniendo como responsable a GEOMINCO S.A. de C.V. a quien se agradece su apoyo.

Igualmente, agradezco de una forma particular a Sr. Victorino Hurtado, y su empresa Minerales Inguaran SA de CV, dueños de la mina Malacate, por todas las facilidades otorgadas para la realización de este proyecto, la información brindada y el buen trato recibido por parte de todo su personal.

Agradezco a mis sinodales: Dr. Marius Ramirez Cardona, Ing. José Alfredo Meneses Lugo, Ing. Ramón Lugo López, Ing. Jared Jovanni Hernández Elizalde, Dr. José Ángel Cobos Murcia, por todas sus enseñanzas y consejos, las cuales me ayudaron a concluir de gran forma esta tesis.

A mis amigos y compañeros que compartieron sus conocimientos conmigo para mi formación profesional y les deseo el mejor de los éxitos.

A la Universidad Autonoma del Estado de Hidalgo, mi alma mater, la cual me formó como profesionista, al personal académico y administrativo que siempre están para apoyar.

Resumen

La región de La Huacana se localiza aproximadamente 100 km al SW de la ciudad capital de Morelia, en la porción central del estado de Michoacán. Actualmente es una de las entidades federativas con una producción importante de mineral de cobre. El objetivo primordial es la caracterización mineralógica y petrológica de las rocas asociadas con la metalogénia de los yacimientos de cobre de la región. La metodología a emplear consistió en la cartografía geológica de las rocas que constituyen el Wallrock (roca encajonante) de los cuerpos mineralizados que, generalmente, consisten de estructuras tabulares brechadas, así como de aquellas que presentan mineralización diseminada de sulfuros de cobre, generalmente intrusivos graníticos y pórfidos.

Las principales zonas productoras se ubican al oriente del poblado de La Huacana, y corresponden a: el distrito minero Inguarán (mina Malacate) y a la zona conocida como el Reparó de Luna y La China; en la región de Inguarán las rocas que conforman el *Wallrock* consisten principalmente de *stocks* graníticos con una fuerte oxidación producto de la lixiviación de los minerales de cobre, mientras que en la zona del Reparó de Luna, el *Wallrock* está representado por unidades porfídicas andesíticas y dacíticas que hospedan estructuras tabulares de hasta 10 m de espesor que representan *shears* (cizallas) con fragmentos subangulosos y desarrollo de halos de turmalina cementados con sílice y con cobre de alta ley; aunque se conocen zonas, como la mina La Esmeralda que actualmente se encuentra abandonada y se ubica al poniente de la mina Malacate, en donde los cuerpos tabulares se convierten en chimeneas irregulares alojadas en intrusivos graníticos que, además, presentan diseminación de sulfuros de cobre con valores o contenidos de $\text{Cu} < 1 \text{ ppm}$ y que representa mineralización tipo pórfido cuprífero. La presencia de mineralización diseminada de cobre permite establecer la posibilidad de yacimientos tipo pórfido en la región, cuya existencia se vería probada con mayor trabajo de exploración y de investigación metalogénica.

Abstrac

The Huacana región actually is one of the most important copper producer of Mexico. The main goal of the present work was to define the most relevant petrographic and petrological features of the rocks related with the metallogeny of the copper ores located in the area. The methodology used for the current work consisted basically on the geological mapping of the wallrock units of the main orebodies, that generally consist in cocks-comb quartz veining and tabular brecciated structures, and those that shows disseminated copper-iron sulfides hosted in both, granitic and porphyry intrusive rocks. Samples collected were prepared for major and trace elements geochemistry. Major elements geochemistry was used to define the magmatic source related and for petrographic and ore microscopy determinations through thin sections and polished surface; rocks collected were analized under transmited (diascopic) and reflected (episcopic) light; photograprs obtained were analized with the assistant of Top View 3.7 software. About copper production, the main productive areas are located to the east part of La Huacana town; those locations are: Inguarán Mining District, the Malacate Mine, El Plateado and La China, Reparó de Luna. In that areas the wallrock is represented by granitic intrusions (El Malacate and Plateado) and andesitic and dacitic porphyry stocks (La China-Reparó de Luna); tabular structures are hosted on this rocks, showing 10 meters wide with strong shear patterns within subangular fragments with tourmaline halos cemented by silica within high grade copper, including brecciated structures and cocks-comb quartz veining hosted on granitic intrusions that sometimes contain disseminated copper sulfides with grades of ca. $Cu < 1\text{ppm}$ cleary of porphyry type mineralization. The presence of disseminated mineralization allows to establish the possibility of porphyry type ores that could be discover with more exploration and metallogenetic research.

Índice

Dedicatorias.....	II
Agradecimiento especial	III
Agradecimientos	IV
Resumen.....	VI
Abstrac	VII
Índice.....	1
Capítulo I. Generalidades.....	4
Introducción	4
Justificación.....	6
Objetivos	7
Objetivo General	7
Objetivos específicos.....	7
Antecedentes	8
Localización y vías de acceso	9
División Municipal y Población.....	10
Clima, Fauna y Vegetación	11
Fisiografía	13
Estado actual de los depósitos tipo pórfido en México y en el Mundo.....	14
Capitulo II. Marco Teórico.....	16
Yacimientos tipo porfido.....	16
Yacimientos epitermales	17
Geoquímica	18
Petrografía.....	19
Microtermometría	19

Capitulo III. Metodología.....	21
Cartografía.....	21
QA (aseguramiento de calidad) /QC (control de calidad)	22
ICP	23
Petrografía	24
Geoquímica por elementos menores	24
Geoquímica por elementos mayores	25
Microtermometría	25
Ablación lasser	27
Capitulo IV. Marco geológico.....	29
Marco Geológico regional del distrito minero La Huacana	29
Marco geológico local y estratigrafía de la zona.....	31
Andesita.....	32
Riolita.....	32
Conglomerado	33
Cuaternario volcánico	33
Intrusivos.....	33
Geología Estructural.....	35
Tectónica	36
Capitulo V. Estilos y formas de mineralización.....	39
Mineralizacion epitermal.....	39
Vetas.....	39
Brechas tipo shear	42
Chimeneas tipo diatrema	43
Tipo pórfido	44
Diseminados y Stockwork.....	44
Paragénesis.....	48

Pórfido.....	48
Epitermal	49
Supergénica.....	49
Alteraciones.....	52
Cloritización	52
Propilitización	52
Argilización.....	52
Sericitación (alteración Filica)	53
Alteración potásica.....	53
Contenidos Metálicos.....	55
Capítulo VI. Petrografía y Mineragrafía	58
Capitulo VII. Geoquímica e Inclusiones fluidas	68
Geoquímica de elementos menores y traza	68
Microtermometría	71
Área el Malacate.....	71
Área de La China y La Esmeralda.....	78
Metalogénia.....	88
Zonación.....	88
Sucesión de menas	90
Capitulo VIII. Discusiones.....	92
Capitulo IX. Conclusiones	96
Referencias.....	97

Capítulo I. Generalidades

Introducción

El Distrito Minero Inguarán y la región mineralizada de La Huacana se localiza en el estado de Michoacán, aproximadamente a 100 km al SW45° en línea recta de la ciudad capital de Morelia, en la porción central del estado de Michoacán. Actualmente Michoacán es una de las entidades federativas con una producción importante de mineral de cobre, cuyas principales zonas productoras se ubican al oriente del poblado de La Huacana, y corresponden a: Distrito Minero Inguarán y a la zona conocida como Mina Malacate y El Plateado, por citar los de mayor importancia, así como la zona de El Reparó de Luna, El Baluarte, La China y La Esmeralda, entre otros.

La región minera de La Huacana se caracteriza por ser una importante zona productora de metales, Cu principalmente y en menor proporción Mo, Pb, Zn, W, Ag y Au. De acuerdo al marco geológico, esta región presenta un gran potencial para hospedar mineralización tipo pórfido cuprífero, la cual muestra asociaciones genéticas con sistemas epitermales de alta temperatura representados por estructuras tabulares mineralizadas con contenidos de oro y cobre.

En la década de los años sesenta las actividades de exploración se intensificaron, concluyendo en la evaluación de yacimientos cupríferos en las localidades La Verde, San Isidro e Inguarán. La compañía Rio Tinto Mexicano realizó labores de explotación entre 1895 y 1905, hasta que el capital francés intervino y formó La Compagnie D'Inguaran que por mucho tiempo explotó a pequeña escala, al igual que la compañía Asarco Mexicana S.A de C.A que hasta después de 1969 comenzó una explotación más organizada por varias décadas; de 1972 a 1982 Asarco Mexicana, S.A obtuvo cerca de 7 millones de toneladas de mineral de cobre con una ley promedio de 1.2% y que de manera intermitente, fue explotada por Sociedad Cooperativa La Huacana (Martínez, 2014). Actualmente la mina Malacate representa la mayor producción de mineral de cobre del distritito siendo operada por la compañía Minerales Inguarán, SA de CV.

Los yacimientos de Inguarán son conocidos desde épocas prehispánicas, alcanzando un desarrollo importante hacia los siglos XVIII, XIX y en la actualidad una de las zonas cupríferas más importantes de México. Debido a la topografía de la zona donde se encuentran las minas y la morfología de las estructuras mineralizadas, la mayoría de las exploraciones se han desarrollado con base a frentes, pozos y verticales, bajo el esquema de minado subterráneo.

Los yacimientos de tipo pórfido son formados por circulación de fluidos hidrotermales ligados a la última etapa de intrusión de stocks subvolcanicos de composición tonalítica, granodiorítica, monzogranítica o andesítica de naturaleza calco-alcalina.

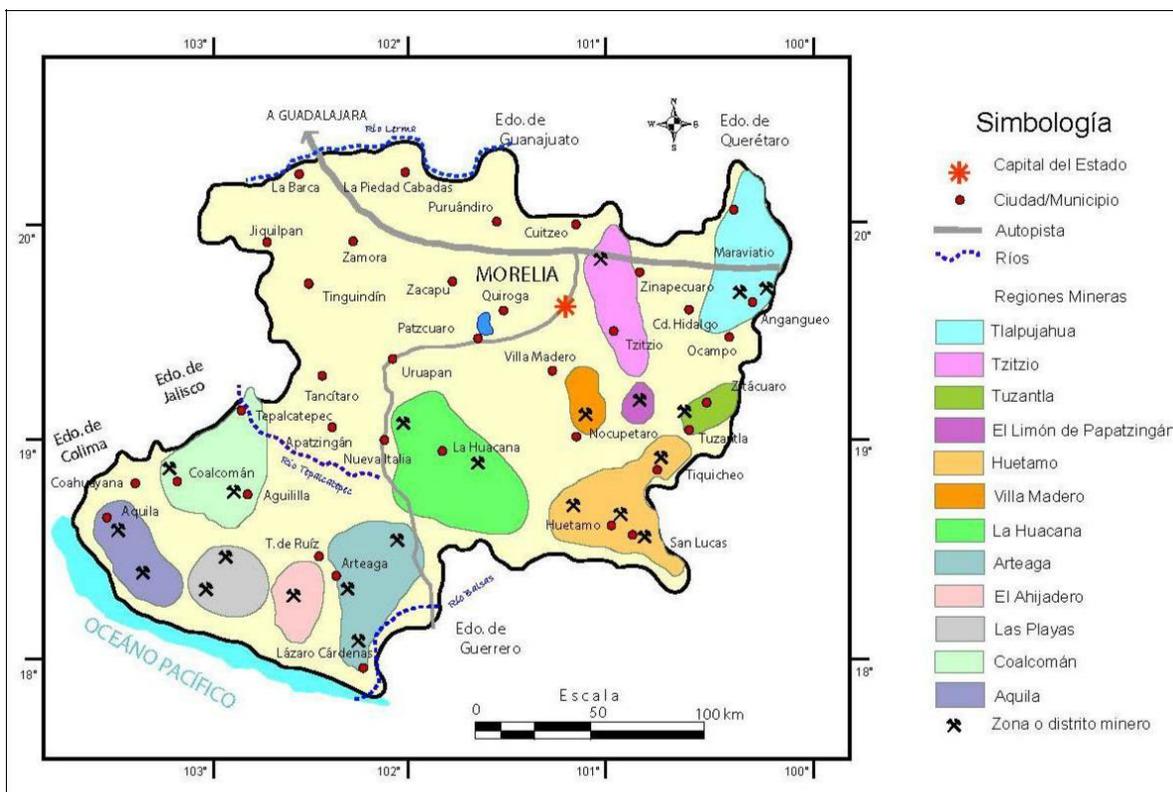


Figura 1. Regiones mineras del estado de Michoacán, extraído del panorama geológico minero del estado de Michoacán, (Martínez, 2014).

Justificación

El proyecto La Huacana-El Malacate tiene como finalidad realizar prospección geológica con el fin de expandir las zonas de explotación en la concesión perteneciente a la mina El Malacate, de igual forma se pretende mostrar la propuesta de un nuevo modelo de yacimiento tipo pórfido Cu-Mo, asociado al sistema epitermal ya probado en la zona.

Probar la existencia de un yacimiento tipo pórfido en la parte centro-sur del país ayudaría a redefinir la metalogénia en esta zona del país, debido a que la existencia de este tipo de yacimientos se ha restringido al noroeste y actualmente solo se ha definido y probado la existencia de un yacimiento tipo pórfido cuprífero en la sierra norte de Puebla.

Actualmente el cobre es uno de los metales con mayor demanda en el país, y el estado de Michoacán es uno de los máximos productores a nivel nacional, solo por debajo del estado de Sonora que es el estado con mayor producción de mineral de cobre en el país, siendo el distrito La Huacana, Michoacán uno de los más importantes; el alza en la producción de cobre pondría en un mejor contexto el distrito minero, y en especial la mina El Malacate.

Objetivos

Objetivo General

La región de La Huacana es una de las zonas con mayor importancia en la producción de mineral de cobre, por lo cual el objetivo principal es la caracterización mineralógica, geoquímica y petrológica de las rocas asociadas con la metalogénia de los yacimientos de cobre de la región.

Objetivos específicos

1. Elaboración de cartografía de geológica, de estructuras y de alteraciones a detalle, para el diseño de un plan de muestreo.
2. La identificación geológica de las rocas que constituyen el *Wallrock* de los cuerpos mineralizados, mineragrafía y petrografía; así como su caracterización geoquímica y datación de ciertos cuerpos y minerales de interés de muestras recolectadas en superficie e interior mina.
3. Proponer un modelo específico del yacimiento de la mina Malacate, basado en las evidencias petrológicas, mineralógicas, geoquímicas y de alteraciones hidrotermales, corroborado con información geológica de la mina.
4. Asociar este yacimiento con la historia geológica a nivel local y regional, así como darle una ubicación dentro del contexto metalogenético del centro-sur del país.

Antecedentes

El distrito minero de Inguarán, forma parte de la llamada “Franja Cuprífera del Estado de Michoacán” y corresponde a una región donde hay testimonios de actividad minera prehispánica, y donde tuvieron el centro más importante de extracción de Cu y Au en el antiguo Imperio Tarasco.

Algunos documentos que refieren la actividad minera del estado en el México Antiguo, específicamente en el estado de Michoacan, hacen referencia a la minería del cobre en tiempos prehispánicos, en la localidad de Xiuhquilán, al sur del estado. Por otro lado, se indica que en Sinagua, Guasaro y Ayanguitlán había una importante mina de cobre y que antes de la conquista, Churumuco era ya un centro minero, (SGM, 2007).

En sus memorias, el general Manuel González, a la sazón gobernador del estado, manifiesta que, en la Huacana, en 1877, se explotaban las minas de Inguarán (por norteamericanos), Oropeo, La Concepción, San Luis, El Predio, etc. Menciona 30 minas adicionales de cobre y 3 de plata, (SGM, 2007).

En la década de los años sesenta las actividades de exploración se intensificaron, concluyendo en la evaluación de yacimientos cupríferos en las localidades La Verde, San Isidro e Inguarán. La compañía Rio Tinto Mexicano realizó labores de explotación entre 1895 y 1905, hasta que el capital francés intervino y formó La Compagnie D´Inguaran que por mucho tiempo explotó a pequeña escala, al igual que la compañía Asarco Mexicana S.A de C.A que hasta después de 1969 comenzó una explotación más organizada por varias décadas; de 1971 a 1982 Asarco Mexicana, S.A obtuvo cerca de 7 millones de toneladas de mineral de cobre con una ley promedio de 1.2% y que de manera intermitente, fue explotada por Sociedad Cooperativa La Huacana (Martínez, 2014). Actualmente la mina Malacate representa la mayor producción de mineral de cobre del distritito siendo operada por la compañía Minerales Inguarán, SA de CV.

Localización y vías de acceso

El municipio de La Huacana se ubica en la parte sur del estado de Michoacán, aproximadamente 100 km al SW de la capital Morelia. El distrito minero de Inguarán se localiza en el municipio de La Huacana, aproximadamente 20 km al SW de la cabecera municipal. La mina Malacate se ubica en la porción sur-oriental del municipio, dentro de las coordenadas ($18^{\circ} 48'$ y $19^{\circ} 06'$ latitud norte y $101^{\circ} 35'$ y $102^{\circ} 03'$ de longitud oeste), a una altitud de 1640 msnm; en la provincia fisiográfica de la Sierra Madre del Sur, Sub-provincia de la Cordillera Costera del Sur (CRM, 1995). El municipio de La Huacana tiene una superficie aproximada de 1,952.60 km², colinda al norte con los municipios de Nuevo Urecho y Ario de Rosales, al oriente con Turicato, al sur con Churumuco y Arteaga, al poniente con Múgica y Apatzingán (INEGI, 2009).

Su acceso, partiendo de la ciudad de Morelia, se realiza por la carretera federal 120, en los transectos Morelia – Patzcuaro - Apatzingan, o por la autopista 37 D Uruapan-Lázaro Cárdenas hasta llegar a Nueva Italia y siguiendo el camino intermunicipal hasta llegar a la cabecera municipal. Luego dirigiéndose hacia el sur desde La Huacana en dirección a Lázaro Cardenas por carreteras intermunicipales y terracerías accedes a la comunidad de Inguarán y la mina El Malacate, (figura 2).

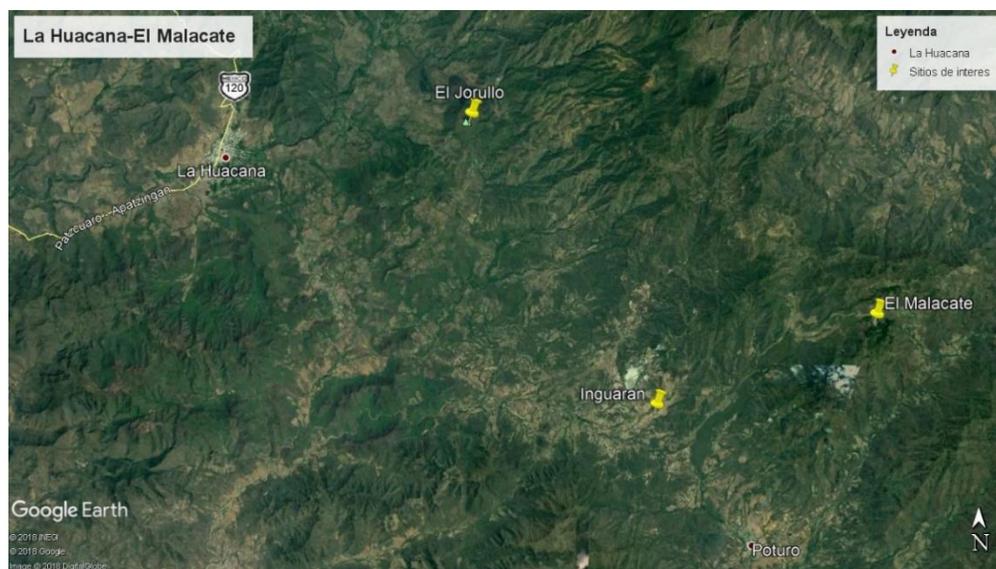


Figura 2. Mapa de ubicación de la región de La Huacana, Michoacán, extraída de Google Earth.

División Municipal y Población

De acuerdo con el prontuario de información geográfica municipal de INEGI, el municipio cuenta con 142 localidades y una población total de 31 774 habitantes (INEGI, 2009).

Las principales actividades económicas que se realizan en la zona son: cultivo de maíz (*zea mays*), sorgo (*sorghum*), ajonjolí (*sesamum indicum*), cacahuete (*chis hypogaea*), pepino (*cucumis sativus*), jitomate (*solanum lycopersicum*), tabaco (*nicotiana tabacum*) y algodón (*gossypium*). Se cría el ganado bovino, caballar, porcino y caprino. Cuenta con turismo al Manantial La Huacana y el Volcán Jorullo. Se explota el pino (*pinus*) y encino (*quercus ilex*), con respecto a la actividad minera, el municipio de La Huacana, el distrito minero de Inguarán es un importante productor de cobre-oro y en menor proporción plata, tungsteno y Wolframio, (CRM, 1995).

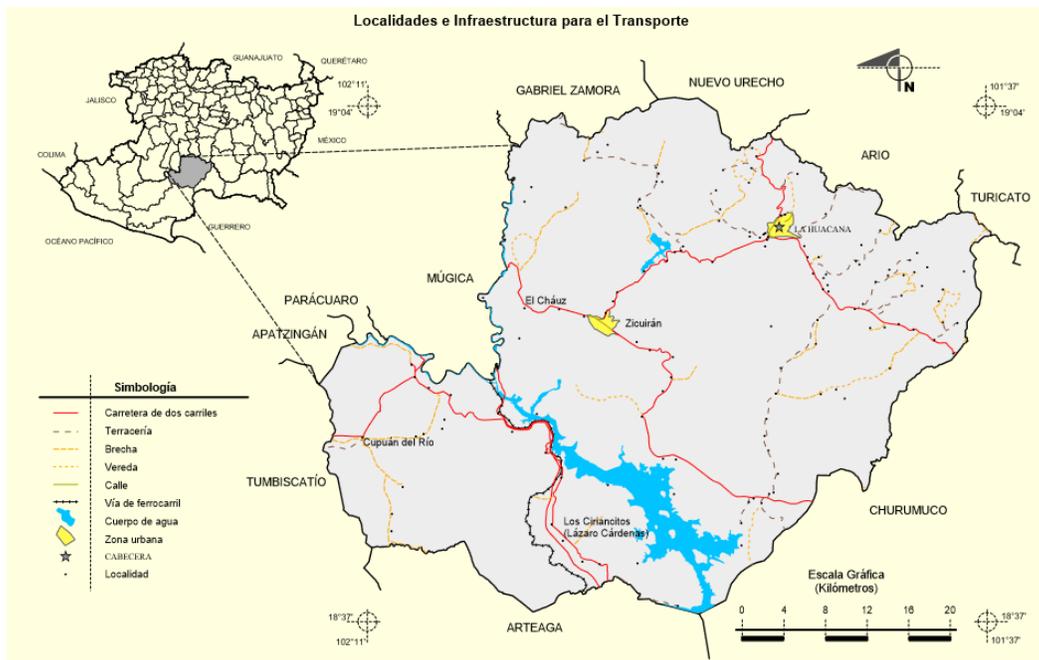


Figura 3. Mapa de ubicación y vías de acceso del municipio de La Huacana, Michoacán, extraído del Prontuario de información geográfica, (INEGI, 2009).

Clima, Fauna y Vegetación

La región tiene un clima tropical, con lluvias en verano y en algunas partes seco estepario. La precipitación pluvial anual promedio es de 800.0 mm y la temperatura media anual fluctúa entre los 30-35°C, temperatura extrema máxima registrada es de 42°C y la mínima de 15°C según reportes de la estación climatológica de Michoacán (INEGI, 2011).

La vegetación está constituida principalmente por bosques tropicales deciduos y espinosos, los cuales tienen aporte de zapote (*casimiroa edulis*), plátano (*híbridas de musa*), parota (*enterolobium cyclocarpum*), tepehuaje (*lysiloma acapulcense*), amole (*polianthes tuberosa*), cardón (*pachycereus pringlei*), huizache (*acacia farnesiana*), tepemezquite (*lysiloma divaricata*), palma real (*Sabal pumo*) y añil (*Indigofera suffruticosa*).

La superficie forestal aprovechada para fines de explotación de madera, está representada principalmente por pino (*pinus*) y encino (*quercus ilex*).

La fauna predominante de la región la conforman principalmente el coyote (*canis latrans*), conejo (*oryctolagus cuniculus*), zorrillo (*mephitidae*), ocelote (*leopardus pardalis*), mapache (*procyon*), codorniz (*coturnix coturnix*), liebre (*leporidae*), gavilancillo (*elanus leucurus*), pato (*anas bahamensis*) especies endémicas tales como el raton de campo (*Peromyscus Winkelmani*) y la tuza (*Zygoeomys trichopus*); algunas especies de serpientes (boa, cascabel) y peces (bagre y carpa).

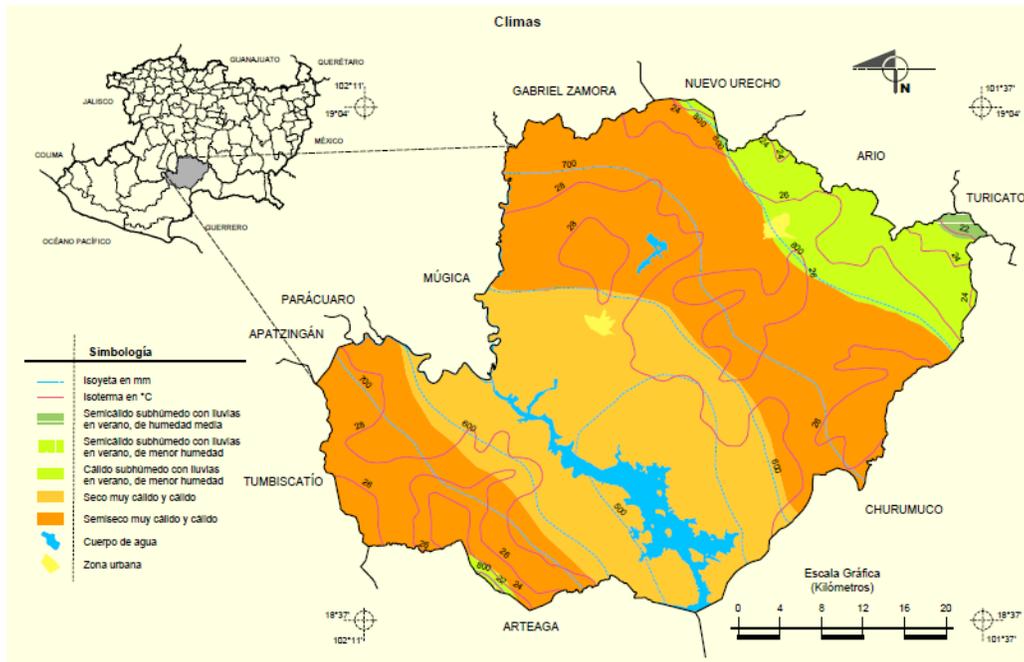


Figura 4. Mapa de climas del municipio de La Huacana, Michoacán, extraído del Prontuario de información geográfica, (INEGI, 2009).

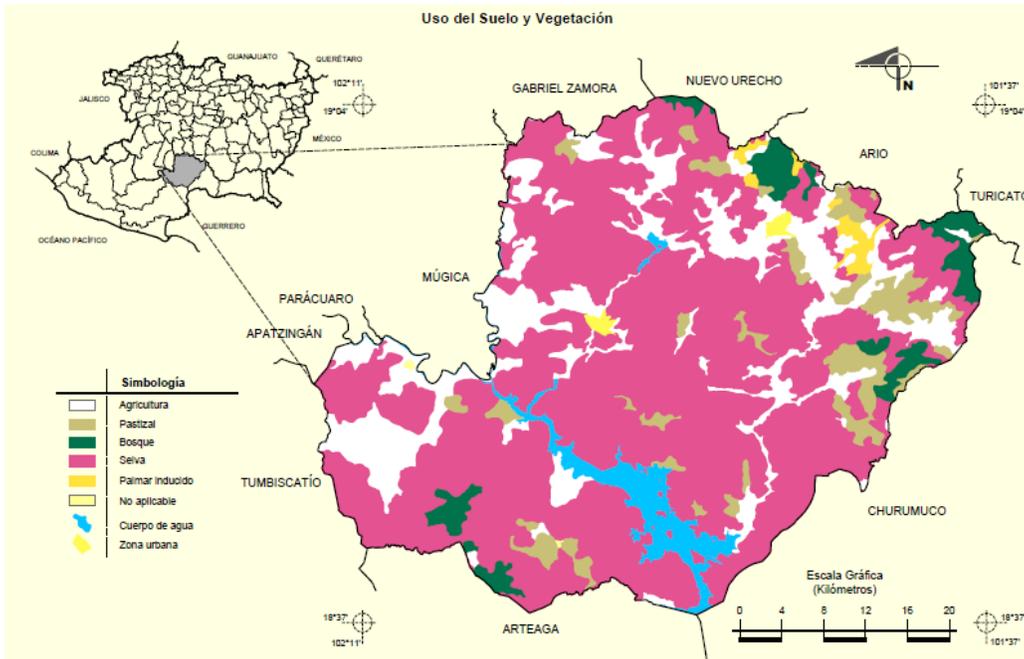


Figura 5. Mapa de uso de suelo y vegetación del municipio de La Huacana, Michoacán, extraído del Prontuario de información geográfica, (INEGI, 2009).

Fisiografía

La región de la Huacana se encuentra ubicada en los límites de en la provincia fisiográfica Sierra Madre del Sur, la cual está limitada al norte por el Eje Neovolcánico, al oriente con la Llanura Costera del Golfo Sur, las Sierras de Chiapas, Guatemala y la Cordillera Centroamericana; al sur y poniente con el Océano Pacífico, se ubica dentro de la subprovincia de la Cordillera Costera del Sur, misma que se extiende fundamentalmente a lo largo de la costa de los estados de Michoacán, Guerrero y Oaxaca (Figura 6).

La región de La Huacana está ubicada en la provincia geológica de La Faja Volcánica Transmexicana (FVT), (Ortega, et al. 1992), dicha faja se encuentra orientada preferencialmente E-W y que está constituida por rocas ígneas del Neógeno, las cuales forman la cadena más extensa de volcanes en México (Figura 7).

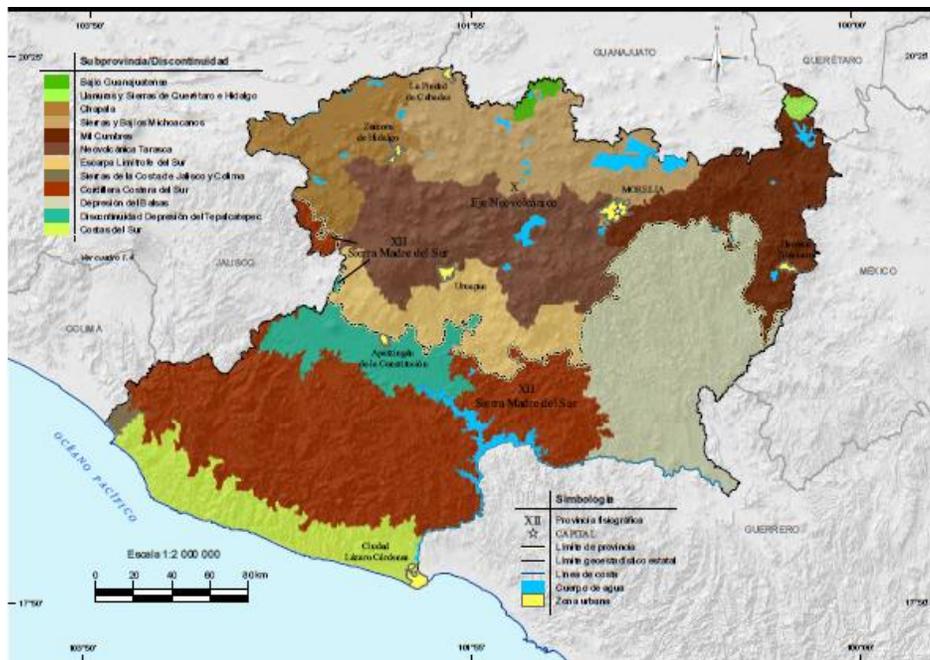


Figura 6. Mapa fisiográfico del estado de Michoacán, extraído del Anuario estadístico y geográfico de Michoacán de Ocampo 2017, (INEGI, 2017).

Estado actual de los depósitos tipo pórfido en México y en el Mundo

Los pórfidos cupríferos no son exclusivos de alguna región de la Tierra en particular, aunque está claro que las grandes acumulaciones metálicas asociadas con los mismos tienen una estrecha relación con regiones tectónicas que involucran un espesor importante de corteza en el proceso magmático.

Los pórfidos cupríferos más grandes del mundo se ubican en Chile, Estados Unidos, Canadá, pero también en Honduras, Filipinas, México, Nueva Guinea e Irán.

Las condiciones para la formación de este tipo de mineralización fueron ideales en las cordilleras occidentales de Norte y Sur América, así como en los márgenes orientales en el continente asiático y de Oceanía. Estas constituyen las zonas cupríferas más ricas del mundo. Las épocas metalogenéticas más productivas en estas regiones ocurrieron durante la última parte del Mesozoico y el Cenozoico. En la Cordillera oeste de Norte América los pórfidos tienen edades mayormente entre ~88-25 Ma, formando una especie de “campana de gauss”, con la mayor acumulación de cobre a los ~56 Ma. Por el contrario, los depósitos sudamericanos son relativamente más jóvenes, exhibiendo dos pulsos importantes entre ~64 y 30 Ma. y entre 20 y 5 Ma, con los ejemplares más espectaculares emplazados al final de ambos pulsos (Valencia et al., 2006),

Entre el Cretácico y el Paleoceno, la región noroeste de México y suroeste de Estados Unidos estuvo sujeta a una intensa actividad magmática, en comparación con la región contigua al norte, en la Meseta del Colorado, cuya condición amagmática y consiguiente ausencia de pórfidos de cobre, ha sido explicada en términos de un régimen tectónico de subducción plana. En el noroeste de México, la actividad magmática se mantuvo relativamente estática en la región de Baja California y Sinaloa, entre los 140 y ~80 Ma. Posteriormente, durante la Orogenia Larámide (~ 80–40 Ma), el eje de la actividad ígnea se desplazó hacia el oriente, presumiblemente debido a una reducción del ángulo de subducción de la placa Farallón debajo de Norte América. Como consecuencia de esta migración se desarrolló un amplio cinturón magmático, caracterizado por grandes batolitos expuestos principalmente en la región occidental del país, y extensas secuencias volcánicas de composición mayormente intermedia, las cuales están mejor preservadas en la porción oriental de Sonora. Aunque

existen evidencias en esta región del emplazamiento de sistemas de pórfido de cobre más antiguos, como son los casos de Bisbee, en Arizona y El Arco, en Baja California, ambos del Jurásico Medio (Valencia et al., 2006), y posiblemente Fortuna de Cobre, en la costa de Sonora, cuya edad relativa a las rocas fechadas más cercanas pudiera ser Cretácico Tardío pre-Larámide (Valencia-Moreno et al., 2006), el evento magmático Larámide fue extraordinariamente productivo en cuanto al emplazamiento de este tipo de mineralización. Los pórfidos de cobre asociados con este evento fueron emplazados de manera más abundante en los estados de Arizona y Nuevo México, y el noreste de Sonora. Esto es el resultado de condiciones muy particulares en un segmento específico de la subducción, arriba del cual el magma calcialcalino reaccionó con fluidos provenientes de la corteza inferior y media que generaron las condiciones físico-químicas propicias para la acumulación de grandes cantidades de cobre. Esta zona concentra varios de los depósitos más relevantes a escala mundial, entre los que sobresalen Morenci, Tyrone, Mission, Cananea y La Caridad.

La relación genética y temporal entre los depósitos epitermales y los depósitos metalíferos en pórfidos, representa un interés adicional para la exploración de ambas tipologías en regiones favorables. El conocimiento de los sistemas geotérmicos activos, que constituyen los análogos actuales de este tipo de depósitos, es una de las herramientas fundamentales para su conocimiento. Con todo, es indudable que los depósitos epitermales (junto con los mesotermiales) son los de mayor importancia global, (Camprubí y Albinson, 2006).

En la actualidad, los depósitos epitermales se cuentan entre las tipologías de depósitos minerales de mayor interés, tanto a nivel económico como científico. Dicho interés se debe principalmente al hecho que estos yacimientos son portadores principales de oro y plata, además de otros elementos, como Zn, Pb, Cu, Cd, As, Sb, Bi, Se, Te, Ga, Ge, In, Tl, Mo y Sn, (Camprubí y Albinson, 2006).

Actualmente, los depósitos tipo pórfido cuprífero, son los máximos productores de cobre y molibdeno a nivel mundial, siendo la zona de la cordillera de los andes en Chile, mayor producción en el mundo. Los depósitos epitermales, representan los máximos productores de oro y plata a nivel mundial, siendo México, el máximo productor de plata a nivel mundial, en el caso del cobre, la zona de los pórfidos de Cananea y La Caridad, en el estado de Sonora, representa los máximos productores de este metal a nivel nacional.

Capítulo II. Marco Teórico

Yacimientos tipo porfido

Los yacimientos de tipo pórfido son formados por circulación de fluidos hidrotermales ligados a la última etapa de intrusión de stocks subvolcanicos de composición tonalítica, granodiorítica, monzogranítica o andesítica de naturaleza calco-alcalina.

Este tipo de yacimientos son asociados a márgenes convergentes de placas y arcos magmáticos ligados a zonas de subducción y se encuentran relacionados a estructuras regionales que controlan el emplazamiento de los cuerpos porfídicos, generalmente en marcos tectónicos compresivos.

Los pórfidos cupríferos presentan características metálicas y litológicas muy variadas, cada caso en particular presenta su propia complejidad, la cual se caracteriza por un zoneamiento lateral y vertical de mineralización y alteración, de modo que está centrado en un intrusivo generalmente de textura porfídica.

Los pórfidos cupríferos son “depósitos de sulfuros de cobre y molibdeno consistentes en mineralización diseminada y en vetillas tipo *stockwork*, la cual fue emplazada en varios tipos de roca encajonante alteradas por soluciones hidrotermales en patrones zonados regularmente concéntricos” (Valencia et al., 2006). La concepción del modelo de (Lowell y Guilbert, 1970) se basó en un estudio realizado en el depósito de San Manuel-Kalamazoo, en Arizona, el cual fue probado y refinado con información compilada a partir de un importante número de depósitos de cobre y molibdeno reconocidos en Norte y Sur América.

Los pórfidos cupríferos fueron incluidos en la categoría de depósitos mesotermiales (Lindgren, 1933), se infirieron condiciones de formación con un rango de temperatura de 175° a 300°C y a profundidades de entre los 1-3 km. Esto fue inferido con base a la estabilidad de minerales asociados con lo que actualmente se reconoce como alteración fílica. Aunque sus estimaciones de profundidad y presión son correctas, las estimaciones de temperatura no consideraron el rol de la alteración potásica más temprana y de mayor temperatura. Adicionalmente, las vetas de pirita-enargita comúnmente asociadas a pórfidos cupríferos en el mundo fueron clasificadas por (Lindgren, 1933) también como mesotermiales

(vetas epitermales formadas topográficamente sobre o en las periferias los pórfidos), con presencia de brechas con matriz de turmalina que fueron denominadas reemplazos hipotermiales.

Estos sistemas hidrotermales en sus fases tardías se asocian a rocas carbonatadas alteradas por metasomatismo con menas de cobre (*skarn*) cercanas a las intrusiones, estos fueron clasificados como yacimientos pirometasomáticos o metamórficos.

Los depósitos que usaron (Lowell y Gilbert, 1970) para formular su modelo de pórfido cuprífero tienen sus menas hospedadas en los intrusivos. Los sulfuros de Cu-Fe-Mo que constituyen los minerales de mena se presentan en *stockworks* de vetillas y diseminación asociados a una etapa temprana de alteración K, la que consiste en biotita, magnetita y feldespato potásico. En algunos depósitos una porción de la mena se formó también durante un evento tardío de cuarzo-sericita asociado con alteración sericítica (fílica). La alteración argílica ocurre hacia la porción externa respecto a la zona sericítica y se caracteriza por caolinita y smectita las que pueden estar acompañadas de sericita y clorita. La alteración argílica avanzada se caracteriza por una asociación de cuarzo y caolinita, a veces con andalusita o alunita, está genéticamente relacionada a los depósitos de tipo pórfido, pero típicamente se forma a niveles menos profundos que aquellos en los que se producen las alteraciones potásica y fílica, pero puede continuar su desarrollo hasta etapas tardías. La alteración propilítica, caracterizada por epidota-clorita forma un halo, regularmente de varios kilómetros de radio, que desaparece gradualmente hacia fuera del yacimiento o con alguna alteración regional.

Yacimientos epitermales

Los yacimientos epitermales, tal como indica la propia etimología de este término (subaereos), se halla a escasa profundidad en referencia a la superficie terrestre. Lindgren (1933) definió el término “epitermal”, caracterizando este tipo de depósitos minerales en función de la mineralogía de las menas y de sus características texturales, así como en sus propias reconstrucciones geológicas. En tales trabajos ya se sugirió que se trataba de un tipo de depósitos metalíferos formados a partir de fluidos hidrotermales influenciados por emanaciones ígneas a temperaturas relativamente bajas (<200°C) y en condiciones de presión

“moderadas”. También es uno de los temas más interesantes para la investigación científica y para la exploración de depósitos minerales, especialmente tras la determinación de sus nexos genéticos con otras tipologías como los depósitos metalíferos en pórfidos y en skarns. Además, los recientes ajustes en la denominación y definición de los tipos y subtipos de depósitos epitermales (Einaudi et al., 2003; Sillitoe y Hedenquist, 2003).

(Hedenquist et al., 2003), realizó una clasificación de depósitos epitermales, asignando la siguiente nomenclatura, HS (sulfuración alta), IS (sulfuración media) y LS (sulfuración baja), en base al estado de oxidación-reducción (o sulfuración) del azufre en los fluidos de sistemas geotérmicos actuales, equivalentes por origen a los depósitos fósiles de uno y otro tipo. Los depósitos de sulfuración intermedia son estructuralmente muy similares a los de baja sulfuración, pues no en balde ambos conforman el conjunto de epitermales alcalinos, aunque las características geoquímicas de los fluidos mineralizantes asociados y de las mineralizaciones metálicas en sulfuración intermedia suele guardar una mayor afinidad con los depósitos de alta sulfuración.

Geoquímica

La geoquímica estudia el origen, distribución y evolución de los elementos químicos en la Tierra, contenidos en los minerales formadores de las rocas y en los productos derivados de ellas. Uno de los objetivos de la geoquímica, es determinar la abundancia de los elementos en la naturaleza, ya que esta información es básica para desarrollar hipótesis sobre el origen y la estructura de nuestro planeta.

Para los análisis geoquímicos se deben definir conceptos de concentraciones de elementos mayores, menores y traza:

Elementos mayores >1,0% peso

Elementos menores 0,1 – 1,0% peso

Elementos trazas <0,1% peso

Se denominan elementos mayores porque están presentes en altas concentraciones y controlan en gran medida la cristalización de los minerales petrogenéticos en las rocas a partir de fundidos. Ellos también controlan propiedades tales como viscosidad, densidad, etc., en magmas y rocas. Los elementos menores comúnmente sustituyen a algunos elementos en los

minerales principales. Si llegan a estar en concentraciones suficientemente altas pueden llegar a formar minerales independientes, que se denominan minerales accesorios. Los elementos trazas, están demasiado diluidos como para formar fases separadas, ellos actúan estrictamente sustituyendo a elementos mayores y trazas en las estructuras minerales. La concentración y distribución de los elementos trazas pueden ser utilizados para estudiar la evolución de los magmas, actuando como trazadores efectivos para establecer el origen de los magmas y para discriminar procesos magmáticos.

Petrografía

La petrología estudia la composición mineralógica, estructura, y textura de las rocas, su ocurrencia, distribución, y su origen en relación con condiciones físico-químicas y procesos geológicos. Se ocupa del estudio de los tres principales tipos de rocas: ígneas, metamórficas y sedimentarias, de igual forma se encarga de la descripción de otros cuerpos geológicos como estructuras mineralizadas, etc. La petrología incluye las subdisciplinas de petrología experimental y la petrografía.

Los estudios Petrográficos consisten en el estudio de rocas mediante láminas delgadas usando un microscopio petrográfico. Para el caso específico de esta investigación se usó la técnica de microscopía óptica, usando técnicas de luz transmitida (minerales anisotrópicos) y luz reflejada (minerales isotrópicos u opacos), en este caso requiere una preparación especial de láminas delgadas, debido a que se tiene que hacer una superficie pulida para poder observar a partir de luz reflejada la presencia de minerales opacos.

Microtermometría

Las microtermometría se encargan del estudio de cristales formados a partir de un fluido hidrotermal que puede llegar a atrapar gases o líquidos dentro de imperfecciones de la estructura cristalina, al formarse cavidades que se cierran y quedan selladas a medida que el cristal sigue creciendo. Las inclusiones ocupan cavidades microscópicas que quedan dentro de minerales depositados a partir de una solución hidrotermal, mismas que pueden contener distintas fases, a saber: líquidos, sólidos y/o gases.

Las inclusiones fluidas estudiadas a partir de microtermometría proporcionan resultados cuantitativos en forma de temperatura, presión y composición (P, T, X). Los datos de presión, temperatura y composición, adquieren una enorme importancia si consideramos que las rocas de la corteza terrestre son el resultado de una larga historia que puede incluir varios episodios de deformación, metamorfismo y diagénesis.

El análisis se realiza con la ayuda de un microscopio petrográfico de luz transmitida, de 1000 aumentos, al que se le ha adicionado una platina térmica que permite el calentamiento de especímenes hasta los + 650 °C, y un sistema de enfriamiento a base de nitrógeno líquido que baja la temperatura hasta – 200 °C. El método consiste en provocar la solidificación (bajo observación microscópica) de las fases fluidas, mediante la disminución progresiva de la temperatura (hasta -200 °C). El punto de solidificación de una sustancia es función de su contenido salino, por lo cual esta determinación permite el cálculo del porcentaje de sales disueltas en la fase acuosa en fluidos subsaturados. La temperatura de fusión es la temperatura a la cual el último cristal de hielo en una inclusión previamente congelada desaparece. Por convención, la salinidad es calculada a partir de la T_{ff} asumiendo que el fluido solo contiene agua y NaCl. El análisis a altas temperaturas se fundamenta en homogeneizar las diferentes fases presentes a medida que se eleva la temperatura, así como obtener información sobre la temperatura de decrepitación (explosión) de la inclusión.

Capítulo III. Metodología

Cartografía

El trabajo de cartografía consiste en la fotointerpretación de imágenes aéreas, extraídas del navegador *Google Earth Pro* versión escritorio, las cuales se obtienen al capturar pares de fotos manteniendo la misma altura, en una posición totalmente vertical, en dirección W-E y manteniendo el 60% de la imagen anterior; se analizan a partir de un estereoscopio de espejos. El estereoscopio de espejo permite tener una vista completa de toda el área traslapada ya que el sistema de espejos permite que ambos fotogramas puedan separarse de manera que no se superponga uno foto sobre otra. Consta de dos lentes de aumento y cuatro espejos, dos relativamente grandes situados a 45° sobre ambas fotos y dos más pequeños enfrentados paralelamente a los anteriores que transmite la imagen hacia arriba a los oculares de aumento, de esta forma se podrán delimitar las unidades geológicas principales, así como los rasgos de alteración hidrotermal más importantes y los rasgos estructurales más sobresalientes de la zona.

El procedimiento de trabajo consiste en mapear sobre pares estereoscópicos dibujando sobre uno de ellos. No es conveniente dibujar directamente sobre el fotograma, lo más apropiado es colocar sobre la foto un papel transparente preferentemente un acetato con una cara brillante que apoya sobre la foto y una mate para poder dibujar con lápiz sobre ella. Se trabaja bajo el estereoscopio, más cómodamente con uno de espejos. Generalmente se dibuja sobre fotos por medio ya que el traslape del 60 % asegurará un 20 % de superposición entre fotogramas alternos.

Posteriormente el trabajo de campo es el de realizar cartografía a detalle a partir de secciones geológicas. La realización de secciones consiste en trazar secciones longitudinales y transversales, con el fin de tomar datos estructurales con brújula, delimitar unidades que no se aprecian durante la fotointerpretación y otorgar mayor detalle para el trazo de los polígonos.

La traza del perfil debe hacerse lo más perpendicular posible al rumbo de los contactos litológicos. Una vez definida la traza, deben marcarse los extremos en el mapa. Se dibuja luego la línea de base del perfil a la escala del mapa. Para representar la topografía se miden

en el mapa las distancias desde uno de los extremos del perfil hasta la intersección del mismo con las curvas de nivel. Se trasladan esas distancias a la base del perfil y se las identifica con un punto. Desde cada uno de estos se levanta una normal desde la línea de base cuya altura corresponda a la cota de la curva de nivel, a la misma escala horizontal del mapa. Los contactos geológicos, fallas, discordancias y cualquier otro rasgo planar se trasladan de la misma manera a la línea de base, obteniéndose su posición en el perfil mediante la intersección de una normal a la base con la superficie topográfica.

En tareas de exploración geológica, el perfil geológico constituye la base para la preparación de programas de perforaciones ya que, a partir de él, en función de la estructura interpretada, se puede hacer una estimación de la cantidad de metros a perforar, elegir la inclinación más adecuada para los sondeos, calcular la profundidad de intersección del objetivo, etc. En estos casos el perfil debe ser a escala natural y tener, además de los datos geológicos, un adecuado control topográfico producto de un levantamiento realizado con algún instrumento de precisión (GPS).

El mapeo por perfiles implica simplemente levantar la geología mientras se camina a lo largo de una ruta predeterminada. Los contactos y otros rasgos geológicos serán extrapolados entre las observaciones realizadas en perfiles contiguos. Se camina siguiendo una ruta predeterminada levantando datos geológicos a medida que se progresa en el recorrido. Los itinerarios deben planificarse de manera de cortar lo más perpendicular posible a la estructura geológica regional. Es un método que da muy buenos resultados en el levantamiento de zonas plegadas.

Las observaciones geológicas se vuelcan en el mapa base topográfico o imagen satelital georreferenciada a medida que progresa el perfil. El GPS puede ayudar en la correcta ubicación de las observaciones sobre el mapa base. Las trayectorias y las observaciones pueden georreferenciarse con GPS o, si se cuenta con un mapa base topográfico o foto aérea, los puntos de inicio y fin de cada recorrido deben ser reconocidos en el mapa base.

QA (aseguramiento de calidad) /QC (control de calidad)

Este protocolo se define como el aseguramiento de la calidad o “*Quality Assurance*”, cuya abreviatura es “QA”; se entiende como el conjunto de acciones sistemáticas y preventivas

para asegurar la calidad y confianza en el muestreo. El control de la calidad o “*Quality Control*” es el conjunto de actividades o técnicas para monitorear, identificar errores y realizar acciones correctivas durante el muestreo y análisis.

- Aseguramiento de calidad: procedimientos o buenas prácticas para la toma, registro, mapeo y preparación de muestras, procedimientos de seguridad y otros que aseguren estándares preestablecidos de precisión y exactitud.
- Control de calidad: procedimientos tales como elección de laboratorio, análisis de duplicados, duplicados de terreno, blancos, estándares, control granulométrico, etc., que permiten controlar que los estándares en los procedimientos se mantienen en el tiempo.

El protocolo consistió en el buen empaquetamiento de la muestra, la toma de testigos, así como la toma de muestras en blanco para así rectificar la veracidad del análisis de laboratorio.

ICP

Inductively Coupled Plasma o Espectrómetro de Plasma-Masa Inducido es un método de alta resolución que permite la detección de concentraciones de elementos en el orden de partes por millón (Schäfer, 2006; Kamber y Webb, 2007). El acoplamiento de este equipo con un sistema de ablación por láser permite analizar todo tipo de muestras sin una dilución previa. Es de especial importancia notar que este método tiene una alta resolución espacial, siendo posible realizar ablaciones muy localizadas, que a su vez proporcionan sublimados consistentes en fases únicas. Por lo tanto, este método es adecuado para el análisis de muestras de rocas consistentes en numerosas fases de tamaño diminuto (Kamber y Webb, 2007).

Para el análisis por ICP, un gramo de submuestra de granulometría inferior a 125 micras se pone en disolución mediante un ataque fuerte, con digestión total o prácticamente total de la muestra, con cuatro ácidos (HCl, HNO₃, HClO₄ y HF), pasándose la disolución por un plasma excitado por radiofrecuencias. Los elementos químicos determinados (48) son los siguientes:

Ag, Al, Be, Bi, Ca, Cd, Cu, K, Mg, Mn, Mo, Ni, P, Pb, Sr, Ti, V, Y, Zn, Au, As, Ba, Br, Ce, Co, Cr, Cs, Eu, Fe, Hg, Ir, La, Lu, Na, Nd, Rb, Sb, Sc, Se, Sm, Sn, Ta, Th, Tb, U, W, Yb, S.

El control de calidad analítica se realiza a partir de patrones internacionales internos y de los duplicados preparados al efecto. La precisión y exactitud de los resultados ha sido considerada aceptable.

Petrografía

Este método consiste en la adquisición de muestras de mano de las unidades geológicas de interés (muestras alteradas y no alteradas), las estructuras mineralizadas y el *Wallrock* de las estructuras. En campo se marca con plumón indeleble la zona específica dentro de la muestra, para que esta sea orientada y la sección delgada sea de una zona de la muestra ya conocida y descrita a nivel macroscópica. Las muestras son tratadas bajo el protocolo de muestre minero QA/QC.

Las muestras se envían al laboratorio del SGM (Oaxaca), para su tratamiento y preparación en sección delgada, con la especificación que su preparación será para análisis petrográfico y minerográfico (superficie pulida).

El análisis de las secciones delgadas se lleva a cabo en un microscopio óptico petrográfico/minerográfico y el análisis fue a partir de luz transmitida (nicoses cruzados y paralelos), así como con el método luz reflejada para minerales opacos (minerografía), las imágenes se obtienen mediante el software TopView x86 para Windows.

Geoquímica por elementos menores

Consiste en el muestreo de las estructuras mineralizadas por el método *Chip sampling* (muestreo por esquirlas), de bajo al alto de la estructura para evitar la contaminación de esta, se toma alrededor de 2 k de muestra, tratadas bajo el protocolo de muestreo minero QA/QC.

Las muestras son analizadas a partir de un equipo ICP, para obtener los porcentajes de concentración de elementos de interés económico del proyecto en concentraciones de ppm en caso del Au y Ag o en porcentaje (%) para el caso de Cu, Mo, Pb y Zn.

Geoquímica por elementos mayores

Este método es específico para las muestras de rocas graníticas o porfídicas, así como para las muestras de *Wallrock*. El muestreo consiste en la toma de un ejemplar de gran volumen por el método *Bulk sampling* de aproximadamente 2 k de peso de muestra fresca y tratadas bajo el protocolo de muestro minero QA/QC.

Las muestras son analizadas mediante un equipo de ICP, para obtener los porcentajes de concentración de elementos mayores, para así definir las afinidades magmáticas de estas rocas que conforman parte económica del yacimiento.

Microtermometría

El método consiste en el muestreo de las estructuras mineralizadas que contengan minerales de cuarzo o calcita. La muestra tomada es un ejemplar de mano compuesta en su mayoría por los minerales antes mencionados y tratadas bajo el protocolo de muestro minero QA/QC.

Las muestras se enviaron al laboratorio de microtermometría de yacimientos minerales del campus Juriquilla de la UNAM y analizadas bajo un equipo de microscopio óptico el cual calienta las muestras a más de 600°C y enfriadas a -50°C con el fin de conocer las temperaturas homogenización y los niveles de ebullición al momento de la formación del yacimiento.

La forma de preparación de la muestra dependerá de la dureza de la roca o mineral que se desea estudiar, pero independientemente de esto, hay que considerar que las inclusiones fluidas son frágiles por lo cual, las muestras deben ser tratadas cuidadosamente. Las técnicas de preparación deben de estar diseñadas para evitar el calentamiento de la muestra y su deformación mecánica.

Sección delgada doblemente pulida: Para preparar una sección de este tipo se requiere realizar ocho pasos. (Goldstein, 2003):

1. Impregnación de la muestra de roca.
2. Reducción del tamaño de la muestra mediante corte.

3. Esmerilado de la superficie que será montada.
4. Pulido de la superficie a ser montada.
5. Montaje de la roca pulida sobre al vidrio.
6. Corte del excedente de roca en el vidrio.
7. Devastado de la roca montada hasta obtener el espesor apropiado y
8. Pulido de la superficie de la sección delgada.

Una vez realizado el pulido final, se procede a desmontar la muestra del portaobjeto y a hacerle la limpieza requerida.

Fragmentos con crucero: Algunos minerales que presentan buen crucero como son la calcita, dolomita, halita, fluorita, yeso y anhidrita, producen un pulido natural libre de hoyos e irregularidades. Aunque el desprender fragmentos de estos minerales con crucero se considera como un “método sucio y rápido” de obtener pequeños pedazos de mineral con lados paralelos que fungen como muestras ya preparadas, estas presentan grandes ventajas con respecto a otras técnicas debido a que son fáciles de preparar, se preservan las inclusiones en materiales suaves (Goldstein, 2003).

Placas rápidas: Estas láminas se consideran como “ahorradoras de tiempo”, aunque estas se preparan siguiendo la trayectoria de los ocho pasos mencionados arriba, solo que en este caso, el último paso (pulido final de la superficie) no se realiza hasta estar seguro que la muestra tiene las inclusiones que se requieren para el estudio de esa muestra. Para saber si la muestra tiene inclusiones, al finalizar el paso 7, la superficie se cubre con un aceite de inmersión de índice de refracción similar al del mineral estudiado y de esta manera se puede ver al microscopio si existen o no inclusiones, de existir estas, se procede a terminar el pulido de la muestra, en caso contrario, la muestra es desechada ahorrando el tiempo del pulido final (Goldstein y Reynolds, 1994, Goldstein, 2003). Una descripción amplia de las técnicas de preparación de muestras de rocas en láminas delgadas para análisis microscópicos la presenta (Roedder 1984) y (Shepherd. et al.,1985,) entre otros.

El manejo que se le debe de dar a las muestras una vez que las secciones delgadas doblemente pulidas han sido preparadas debe de ser el más adecuado para evitarles cualquier daño, por ejemplo, evitar: tratamiento con ácidos, ponerlas en contacto directo con otras muestras, o bien, si son muestras para estudios microtermométricos no se les debe realizar otro tipo de análisis que implique el uso de haces de electrones por ejemplo en un SEM, en una platina de CL, (Goldstein 2001) o aplicación de fluorescencia UV, (Pironon y Pradier 1992) ya que el uso de estas técnicas provocan sobrecalentamiento que se puede traducir en perturbaciones de las inclusiones fluidas.

Ablación laser

La separación de circones se realiza siguiendo métodos estándares que incluyen: machacado de la muestra, tamizado, separación por mesa Gemeni, separación magnética mediante Frantz y concentración de circones utilizando líquidos densos. Posteriormente, los circones son montados a mano en una cinta de doble contacto junto a estándares de circón. Sobre la muestra se coloca un anillo de plástico de aproximadamente 1 cm de alto. Se vierte resina sobre la muestra y se le deja endurecer durante 8 horas aproximadamente. La muestra es posteriormente separada de la cinta de doble contacto y luego pulida su superficie para tener una máxima superficie de exposición de los circones. Para muestras magmáticas se montan unos 50 circones, mientras que para muestras detríticas se tienen más de 150 circones. Luego las muestras fueron fotografiadas bajo la lupa para identificar fracturas e inclusiones (sólidas y líquidas) en los granos. Seguido a esta etapa se toman imágenes de catodoluminescencia (CL) de los circones. Este tipo de imágenes entrega información de zonaciones y sobrecrecimientos en los circones no visibles bajo la lupa. Esta información es muy relevante para definir la mejor zona de ablación (borde o centro) dependiendo de la finalidad del estudio y para la interpretación de la información cronológica. Antes del análisis, los montajes son sometidos a un baño ultrasónico con agua ultrapura para limpiar y eliminar o disminuir la posible contaminación por manipulación de la muestra. Para muestras magmáticas se analizan entre 30 a 50 circones. Para muestras algo más complejas (tobas, andesitas) se recomienda analizar aproximadamente 50 circones.

La ablación por láser se realiza utilizando un equipo electroestimulación. La muestra se transportada al equipo ICP-MS DRC II por medio de gas argón. Las mediciones se realizan

con el método de (Kamber y Webb, 2007). Primeramente, en tres secciones pulidas con el fin de probar la eficiencia del método en el material seleccionado. Las siguientes variables para las series temporales se toman en cuenta: 28 isótopos se analizan con tiempos de retención de 20 ms. Las series de tiempo de ablación tienen una duración de 165 s, que incluyeron 402 puntos de lectura (PL). Las mediciones dan inicio después de 30 s de precalentamiento y terminan 10 s antes del fin de la macro, sin embargo, sólo se consideran las mediciones incluidas entre 10 y 130 s (280 PL en total) después del inicio de la ablación. La cuantificación de un barrido sencillo, que tiene un tiempo de retención de 20 ms, tiene errores muy altos. Sin embargo, si cinco o más barridos producen los mismos resultados, el error medio desciende dramáticamente. El procedimiento para obtener las muestras consistió en permitir al láser penetrar en un punto fijo de la muestra sin desplazamiento del rayo (Schäfer, 2006). Esto produce una menor variación entre los valores individuales de cada PL, en contraste con la ablación de una muestra por medio de una línea continua a través del mismo tipo de facies (Schäfer, 2006). En un intento previo de aplicar el método de la línea continua se observó una variación considerable, comparable a las observaciones de (Kamber y Webb 2007). Ellos atribuyeron esta variación a la contaminación proveniente de la sección pulida y recomendaron discontinuar el uso de este método.

Capítulo IV. Marco geológico

Marco Geológico regional del distrito minero La Huacana

El marco geológico de la zona de La Huacana es conocido únicamente a nivel regional. La quinta edición de la Carta Geológica de la República Mexicana (Ortega-Gutiérrez, et al, 1992) ubica la región e el límite sur de Provincia Geológica Faja Volcánica Transmexicana.

Trabajos preliminares llevados a cabo por el Consejo de Recursos Minerales a escala 1:500,000 (CRM, 1995) identifican como principales unidades geológicas a secuencias vulcanosedimentarias del cretácico inferior, cubiertas por tobas y lavas de composición variables de cretácico superior y el Paleogeno; todo esto afectado por stocks graníticos de edades Cretácico y Terciario, sobre los cuales existe una cobertura de rocas volcánicas del Terciario Superior e incluso del Holoceno, estas últimas relacionadas con las fases eruptivas recientes del volcán Jorullo.

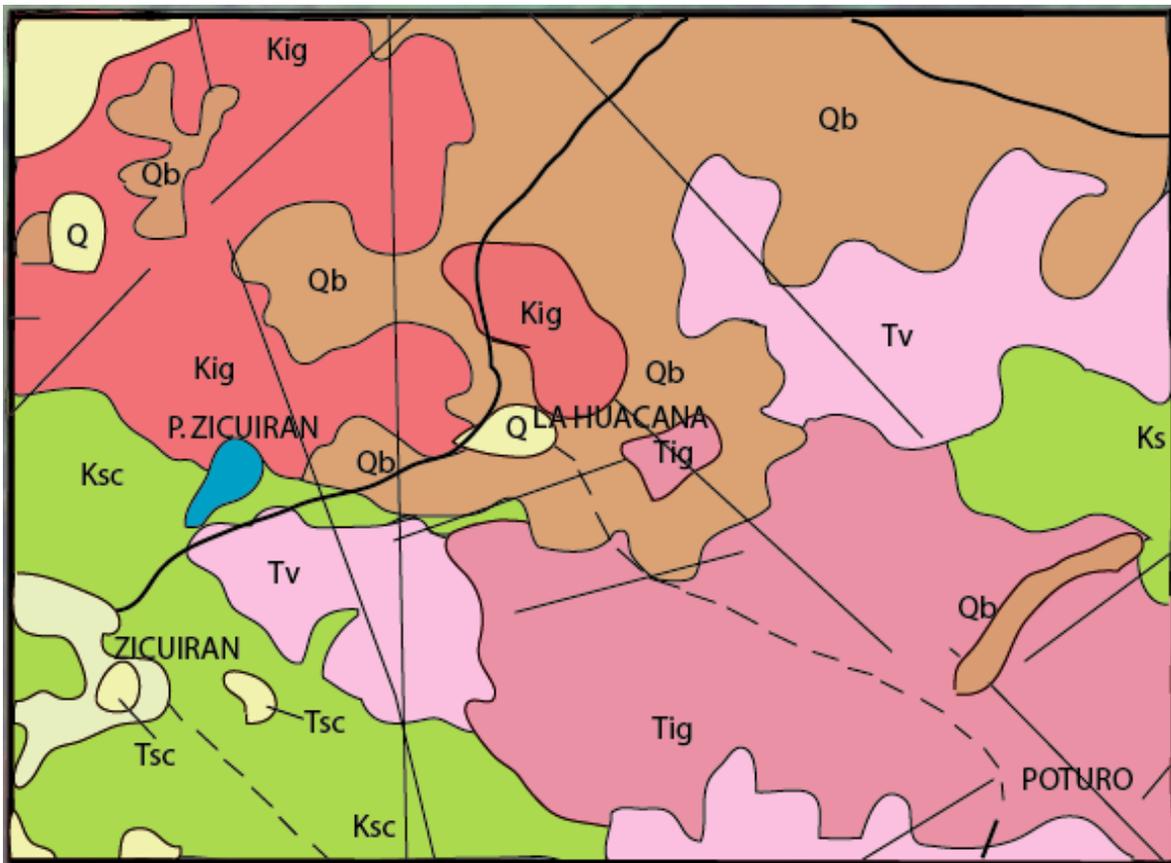


Figura 7. Cartografía geológica regional zona de La Huacana, estado de Michoacán. Se presenta un recorte del mapa geológico publicado en la Monografía Geológico Minera del estado de Michoacán, (CRM, 1995).

A nivel regional, la región de la Huacana se encuentra conformada por sucesiones de rocas sedimentarias y volcánicas de edades Mesozoicas y Cenozoicas, afectadas a su vez por cuerpos intrusivos de composición granítica y granodiorítica de edades variables que van de Cretácico superior al Oligoceno. La actividad magmática generada durante el final del Mesozoico y el Cenozoico, derivó en la formación de distintos depósitos minerales alojados en las diferentes unidades geológicas que se describen a continuación:

Las rocas más antiguas que se encuentran aflorando en la región, corresponden a la secuencia vulcanosedimentaria Ziguatanejo-Coalcomán, dicha secuencia es de edad Cretácico inferior (Albiano) y se conforma por intercalaciones de andesitas y basaltos almohadillados interestratificados con areniscas lutitas, calizas y conglomerados polimicticos.

Sobreyaciendo estas unidades cretácicas, se encuentran una serie de paquetes de rocas volcánicas, con edades que van del Cretácico superior al Eoceno, estas rocas volcánicas consisten en Andesitas y tobas andesíticas. Sobre estas andesitas, se encuentra la cobertura de riolitas y tobas riolíticas de edades Oligoceno – Mioceno.

La faja volcánica transmexicana se encuentra representada por un conglomerado polimictico de edad Mioceno – Plioceno, este conglomerado se compone por fragmentos de andesita, Riolita y basalto, esta unidad sobreyace a las unidades volcánicas del Paleógeno y subyace derrames basálticos Cuaternarios, así como a pequeños depósitos aluviales del Holoceno.

Las unidades descritas anteriormente, se encuentran afectadas por cuerpos intrusivos de composición granítica y granodiorítica, los cuales, según *Damon, et al., 1981*, son de edad Eoceno – Oligoceno (31 a 35 ma). Dichos intrusivos fueron los causantes de la mineralización presente en la nombrada “Faja Cupriferá Michoacana”, la cual consiste en estructuras tabulares como vetas, brechas y chimeneas, así como stockwork y disseminados.

Marco geológico local y estratigrafía de la zona

Las unidades geológicas expuestas corresponden a paquetes de rocas ígneas intrusivas y extrusivas, de composición acido-intermedia de edades Mesozoicas y Cenozoicas, (CRM,1995). Hacia el norte, los intrusivos se encuentran cubiertos principalmente, por derrames basálticos, andesíticos y niveles piroclásticos productos de actividad volcánica Terciaria, (CRM, 1995).

Columna estratigráfica

Era	Periodo	Época	Litología	Descripción
Cenozoico	Cuaternario	Pleistoceno	Aluvi3n	Dep3sitos de talud y avanicos aluviales.
			Basaltos	Derrames basálticos con estructura fluidal.
	Ne3geno	Plioceno	Conglomerado Polimigtico	Conglomerado polimictico de color rojizo, compuesto en su mayoría por fragmentos de la riolita, andesita, dacita y basaltos.
		Mioceno	Riolita con Brecha Riolitica	Derrames y tobas de composici3n riolítica, así como brechas volcánicas compuestas por fragmentos riolíticos y dacíticos.
	Pale3geno	Oligoceno	Intrusivo	Composici3n granítica-granodiorítica
			Andesita con Brecha Andesitica	Derrames andesíticos y brechas volcánicas compuestas por fragmentos de andesita y andesita basáltica.
		Eoceno		
Mesozoico	Cretácico	Inferior	Arenisca y conglomerado	Conglomerados polimicticos con horizontes de limolita, arenisca, caliza y pedernal.
			Brecha Andesitica	Brecha volcánica andesítica de arco insular con textura porfídica.

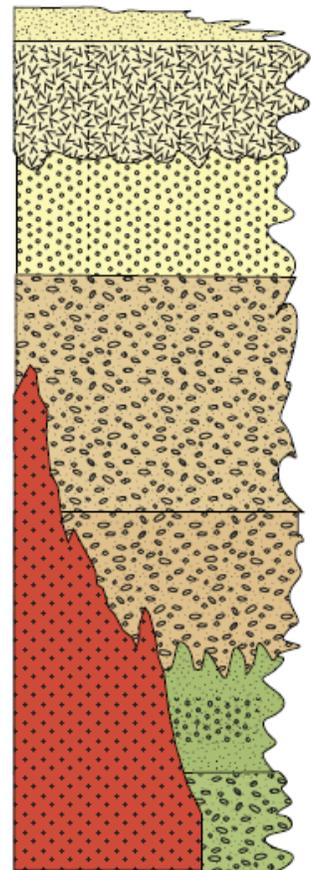


Figura 8. Columna estratigráfica de la zona de la Huacana.

La región de Inguarán, específicamente en la zona de El Malacate, se encuentran expuestas y se han reconocido seis principales unidades geológicas, dichos paquetes de rocas se encuentran afectados por diferentes eventos hidrotermales generados por la intrusión de diferentes stocks de composiciones variadas. Igualmente, las unidades andesíticas, riolíticas y graníticas se encuentran alojando cuerpos mineralizados como vetas, brechas, chimeneas y stockwork.

Andesita

Esta unidad consiste en derrames andesíticos y brechas volcánicas compuestas por fragmentos de andesita y andesita basáltica. Las andesitas presentan un color verdoso con texturas que van de afanítica a porfídica y fenocristales de feldespatos y plagioclasas, estos últimos en algunas zonas se observan con indicios de alteración, de igual forma se observan otras alteraciones como cloritización, propilitización y oxidación. Esta unidad tiene una edad Eoceno (53 ± 3 Ma), según *Pemex, 1986* y fueron datadas por el método de K/Ar. Estratigráficamente, estas andesitas se encuentran sobreyaciendo la secuencia vulcanosedimentaria Zihuatanejo de Cretácico Inferior

Su distribución se encuentra al norte y al poniente de la región de Inguarán y El Malacate, específicamente, esta unidad andesítica aflora en las zonas conocidas como La China, El Reparó de Luna, La Esmeralda y La Verdosa, en estas zonas, las andesitas parte del Wallrock de las estructuras mineralizadas que se explotan en la zona, como lo son brechas, chimeneas, vetas y diseminados de cobre en su mayoría.

Riolita

La unidad riolítica consiste en derrames y tobas de composición riolítica, así como brechas volcánicas compuestas por fragmentos riolíticos y dacíticos. La riolita, generalmente, presenta texturas afanítica, aunque llegan a observarse texturas porfídicas con fenocristales de plagioclasa, tiene una coloración rojiza producto de la oxidación, igualmente, se observan zonas con ligera alteración argílica, esta roca compone domos volcánicos que se observan en las cercanías de La Huacana. La unidad se presenta con algunos derrames en las cercanías de la zona de Inguarán, actuando como Wallrock de las vetas en algunos de los niveles

superiores de la mina El Malacate, también se encuentra aflorando al norte de la región de Inguarán y en la zona conocida como El Reparó de Luna y El Plateado.

Se obtuvieron dataciones radiométricas por el método K/Ar de 43 ± 2 Ma, (Pémex, 1986), en la zona de Las Cañas, en el municipio de Arteaga, dándole una edad Eoceno, aunque las unidades que la sobreyacen, como las brechas y tobas se extienden hasta el Mioceno.

Conglomerado

Esta unidad consiste en un conglomerado polimictico de color rojizo, compuesto en su mayoría por fragmentos bien redondeados de la riolita que sobreyace en su mayoría, así como fragmentos de andesita, dacita y basaltos. Esta unidad se presenta en pequeños afloramientos en las cercanías de Inguarán y la mina El Malacate, pero se observan afloramientos de mayor dimensión entre los poblados de La Huacana y Nueva Italia. A este paquete de rocas se le ha dado una edad de Plioceno ($5 - 2.5$ Ma) y se le ha atribuido su origen a rocas que componen la Faja Volcánica Transmexicana, estratigráficamente se encuentra de bajo de derrames basálticos del Cuaternario.

Cuaternario volcánico

Los basaltos que conforman esta unidad, consisten derrames basálticos con una estructura fluidal en coloraciones que van de gris a negro con algunos tonos rojizos por oxidación. Su edad se ha determinado del Pleistoceno – Holoceno. Estas coladas basálticas y material piroclástico que también se observa, representan los eventos más recientes, relacionado al vulcanismo de la Faja Volcánica Transmexicana.

Intrusivos

Los intrusivos presentan una marcada diferenciación magmática, observándose variaciones entre granito y granodiorita con textura fanerítica de grano fino a medio, en el que se distinguen cristales de cuarzo, plagioclasas, con algunas micas y anfíboles. A nivel macroscópico, se observan alteraciones producto de la actividad hidrotermal, siendo minerales como clorita y epidota los de mayor abundancia, de igual forma se observan indicios de la alteración de las plagioclasas y micas (producto de alteración ¿?).

En la mayor parte del desarrollo de la mina El Malacate, los intrusivos conforman el *Wallrock* de las estructuras mineralizadas. De igual forma, se aprecian zonas de sulfuros diseminados (pirita, calcopirita y bornita).

Estos cuerpos intrusivos han sido relacionados a los batolitos de Michoacan y Guerrero, así como datados por el método Rb/Sr (Schaaf, 1990), y K/Ar (Damon et al., 1983), edades de entre 42 ± 4 Ma a 32.1 ± 0.8 Ma, teniendo edades de entre el Eoceno – Oligoceno y asociados a la fase tardía del magmatismo Laramídico.

Geología Estructural

Estructuralmente, la región de La Huacana, obedece a patrones estructurales regionales, dichos sistemas estructurales, quedan bien definidos, gracias a las estructuras y geoformas que se pueden distinguir tanto a nivel regional como a nivel local, sienten NW – SE, NE – SW y N – S, los sistemas principales de fallas y fracturas.

El sistema de fallas NW – SE, corresponde al más antiguo de estos sistemas y se asocia a la tectónica compresiva y distensiva del margen pacífico durante el Eoceno – Oligoceno, dichos movimientos formaron grandes cizallas con movimiento lateral izquierdo, (Martini, 2008).



Figura 9. Mapa esquemático de la porción central de la Sierra Madre del Sur; en donde se muestran los principales patrones de cizalla lateral izquierda de la región. (Martini, 2008).

Estas grandes cizallas se encuentran asociadas al emplazamiento de los principales intrusivos en la región, así como brechas, que actualmente representan cuerpos con mineralización económica. Las principales estructuras mineralizadas en la región de La Huacana, corresponden a vetas y brechas de fallas con rumbos que varían entre NW 60° SE y NW 80° SE.

El sistema estructural NE – SW, se encuentra representado por grandes barrancas, y fallas de componente normal con algunos desplazamientos laterales izquierdos, dichas estructuras se pueden observar tanto a nivel regional como a nivel local, de igual forma, este sistema estructural NE – SW, se encuentra afectando el sistema de fallas NW – SE, descrito anteriormente, en la mina El Malacate, la veta principal, corresponde a una falla (falla El Malacate), la cinemática de esta falla provoca ramaleo y brechados en diferentes niveles de la falla. Esta falla El Malacate varía en rumbos que varían desde NE 40° SW, hasta W – E. Este mismo comportamiento estructural se observa en otras regiones importantes de La Huacana, como en el caso de las fallas El Plateado, e Inguaran.

Por último, el sistema de fallas N – S, son los eventos estructurales más jóvenes, pues dichas fallas, se encuentran afectando los sistemas antes descritos, en la región de Inguaran, específicamente en la mina El Malacate y el nivel La Sorpresa, un sistema de fallas (El Perro) de componente normal con los bloques cayendo al poniente y con movimiento lateral derecho, se encuentran afectando, los sistemas de vetas, desplazándolos hasta 100 m. al norte.

Para el caso de la zona de la Mina El Malacate, el principal un sistema de fallas, es lateral de tipo sinistral de rumbo NE 40-50-SW con extensiones de varios kilómetros, algunos de los cuales ejercen un control entre los contactos de las secuencias vulcanosedimentaria con los stocks principales; estos sistemas de fallas corresponden a lo que localmente se conoce como falla El Malacate, que en algunos casos alberga estructuras brechadas con contenidos de Cu de alta ley. Importante considerar que quizá estos sistemas reconocidos correspondan a la parte conjugada o secundaria a los patrones muy regionales definidos por Martini 2008, cuyos rumbos predominantes parecen ser NW-SE. Por su parte, otro sistema de fallas normales de rumbo NE-30-SW se reconoce en la porción suroccidental a la mina El Malacate; sistema que corresponde a los conductos principales de emplazamiento de los sistemas hidrotermales asociados a la mineralización epitermal. Numerosas discontinuidades de rumbo NNW-SSE parecen corresponder a fallas secundarias que tienen injerencia a nivel más local.

Tectónica

Las rocas volcánicas y plutónicas que constituyen la Sierra Madre del Sur, conforman una amplia provincia magmática, la cual antecede al desarrollo tectónico – magmático, de la

provincia Faja Volcánica Transmexicana. La región de La Huacana, se ubica en los límites de estas dos provincias magmáticas, guardando en su estratigrafía y evolución geológica, similitudes genéticas de ambos procesos tectónico – magmáticos.

Los avances recientes en el conocimiento de la estructura y la estratigrafía cenozoicas del sur de México revelan una evolución caracterizada por eventos de deformación orogénica iniciados en el Cretácico Tardío, seguidos por episodios de truncamiento de la margen continental y extinción gradual del magmatismo de arco en la Sierra Madre del Sur, antes del desarrollo del Faja Volcánica Transmexicana, (Moran et al., 2005).

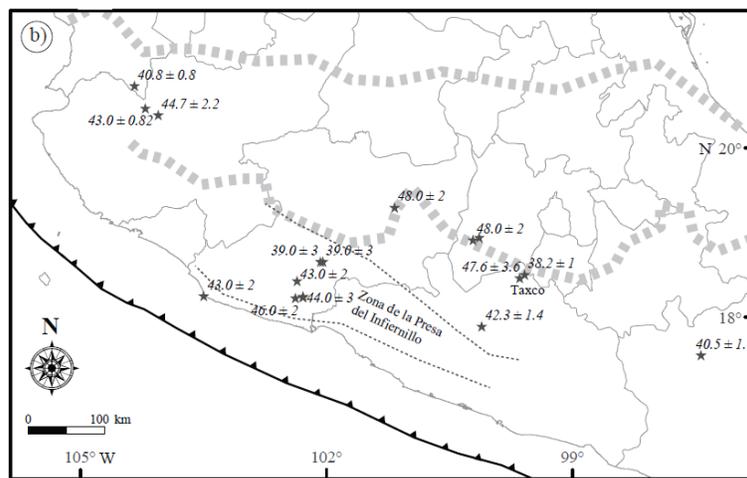


Figura 10. Datos geocronológicos en la región sur del estado de Michoacán de Ocampo, (Moran et al., 2005).

Los datos geocronológicos de las rocas ígneas terciarias de la SMS indican que el magmatismo de arco del Paleoceno y Eoceno predominó en las regiones de Michoacán y occidente de Guerrero, y posteriormente migró hacia el oriente de Guerrero y occidente de Oaxaca, formando un amplio arco para el Oligoceno temprano, (Moran et al., 2000). Hubo una ausencia general de magmatismo de arco hasta el inicio del Mioceno medio, tiempo en el que ocurren las primeras manifestaciones de volcanismo en la parte central y oriental de la FVTM. Este gap magmático puede ser explicado por el cambio relativamente rápido en la inclinación de la placa subducida, a partir del truncamiento de la margen continental, y por el tiempo necesario para que la cuña del manto, bajo la FVTM, tuviera las condiciones de transformación metasomática que le permitieran producir los volúmenes de magma necesario para generar volcanismo, (Moran et al., 2000; Moran et al., 2005).

Los estudios sobre la deformación y el magmatismo del sur de México han mostrado que la región ubicada al sur de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), aunque comparte algunas características estratigráficas y magmáticas con el norte de México, manifiesta diferencias sobresalientes en su evolución tectónica. Estas diferencias parecen estar definidas principalmente por la influencia de las interacciones tectónicas en la margen del Pacífico, diferentes en el sur de México con respecto a las del norte de México, y por las variaciones en el basamento y en las estructuras tectónicas preexistentes. Aunque no se ha estudiado con detalle, las diferencias en las estructuras durante el emplazamiento de magmas que implican un cambio en el estilo tectónico del sur con respecto al norte de México son evidentes durante el Eoceno u Oligoceno, (Moran et al., 2005).

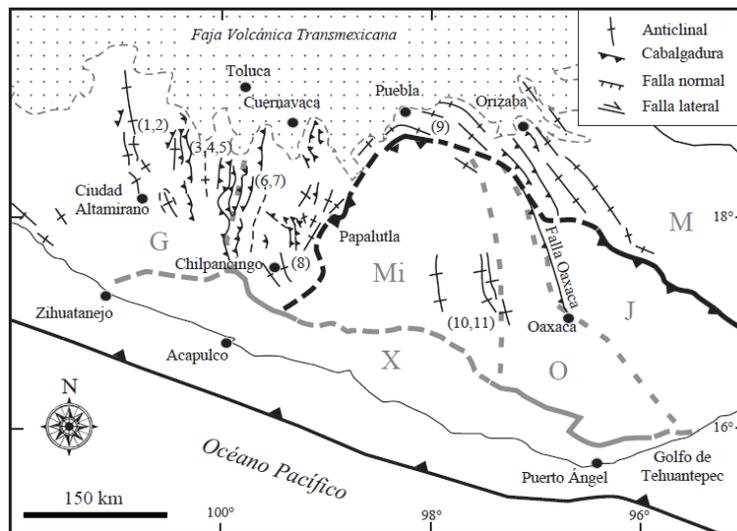


Figura 11. Estructuras regionales en la región sur del estado de Michoacán de Ocampo, (Moran et al., 2005).

Para el Eoceno e inicios del Oligoceno se han reconocido dos episodios de fallamiento lateral, principalmente izquierdo, que variaron en tiempo y espacio y que activaron fallas de orientación al NW y N-S sucesivamente. Este último conjunto de fallas parece haber sido activo sólo en el norte de la Sierra Madre del Sur. El reconocimiento de estos episodios de deformación sugiere que las direcciones de extensión relacionadas al fallamiento lateral variaron de NNW-SSE a NE-SW, y que localmente activaron fallas normales en discontinuidades preexistentes, (Moran et al., 2005).

Capítulo V. Estilos y formas de mineralización

Los afloramientos de las áreas mineralizadas de Inguarán, La Esmeralda, La China, El Reparó de Luna y La Verdosa, forman parte de una franja cuprífera alojada granitos, con una orientación NW-SE, observándose cambios en su composición a cuarzo-monzonita, granito, granodiorita, pórfido andesítico y dacítico, (CRM, 1995). La mineralización está representada por vetas, chimeneas brechadas, brechas tabulares, rellenos de fisuras y zonas de diseminación, originados por soluciones hidrotermales de temperaturas altas a medias, encajonadas en rocas graníticas de composición granítica-granodiorítica en su mayoría.

Para el caso particular de La Huacana y de las zonas productoras, las unidades de rocas expuestas y relacionadas con la mineralización están representadas por cuerpos intrusivos de composición ácido – intermedia, los cuales muestran en algunas zonas diseminación de sulfuros de Cu y Fe. En el Distrito Minero La Huacana se han distinguido dos tipologías de yacimientos minerales, representados en cuatro tipos principales de mineralización:

- Mineralización epitermal
 - Vetas
 - Brechas tipo shear
 - Chimeneas tipo diatrema
- Mineralización tipo pórfido
 - Diseminados y Stockwork

Mineralización epitermal

Vetas

El sistema de vetas El Malacate son cuerpos irregulares deformados con un rumbo principal E-W, afectados por un fallamiento lateral y perpendicular a la estructura que llega a desplazar la veta hasta 1000 m. al norte, este fallamiento se observa en todos los niveles de la mina, la deformación causa ramaleo en ciertos niveles de la veta. La estructura llega a tener una potencia de hasta 5 m. y una longitud de 1 km.

Las estructuras cuentan con una mineralización de cuarzo como mineral de ganga, así como sulfuros de Cobre - Hierro (Calcopirita, Calcosita, Bornita y Pirita) en asociación con Oro como minerales de mena, lo cual nos habla de una fase hidrotermal de temperatura media – alta.

En los niveles más inferiores de la mina la mineralización cambia, disminuyendo los contenidos en metales preciosos y aumentando en metales base, hasta tener contenidos económicos de Plomo – Zinc y anomalías económicas de Molibdeno, esto asociado a alteraciones de mayor temperatura, y por las guías de exploración observadas en mina, permite pensar que en estas zonas nos encontramos debajo del nivel de ebullición, representado por calcita hojosa (Bladded Calcite).



Figura 12. Vetas de cuarzo con calcopirita-bornita-calcosita (zona de la Mina Malacate).

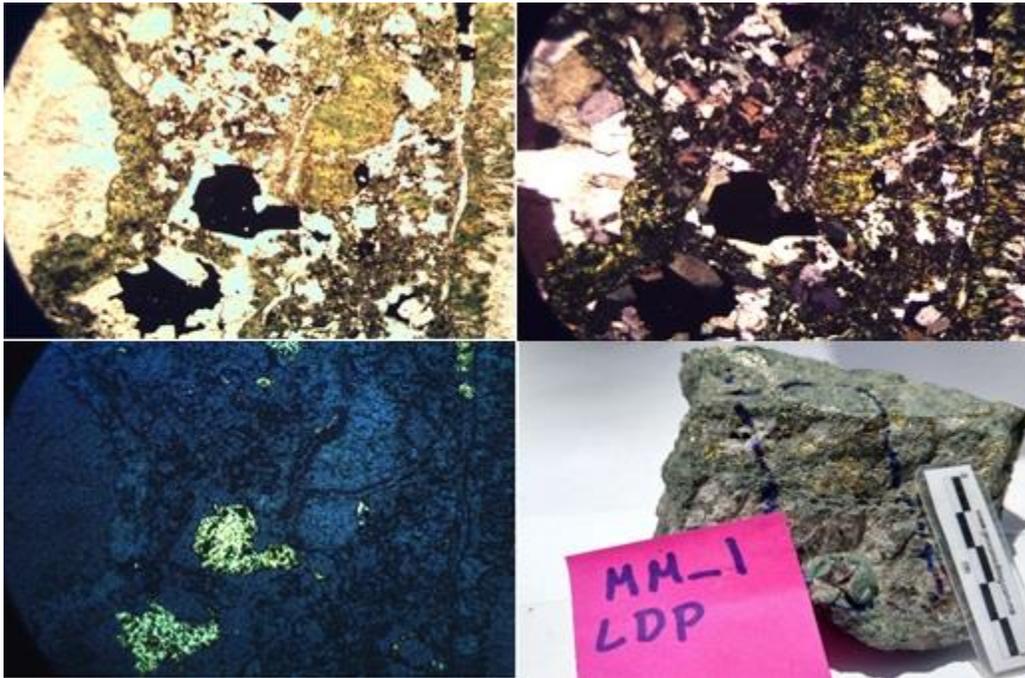


Figura 13. Fotomicrografías de una veta de cuarzo, A) nicoles paralelos: se aprecia Cloritización y minerales opacos, B) nicoles cruzados: estructura tabular de cuarzo con cristales de clorita y minerales opacos, C) luz reflejada: cristales de calcopirita, D) muestra a nivel muestra de mano.

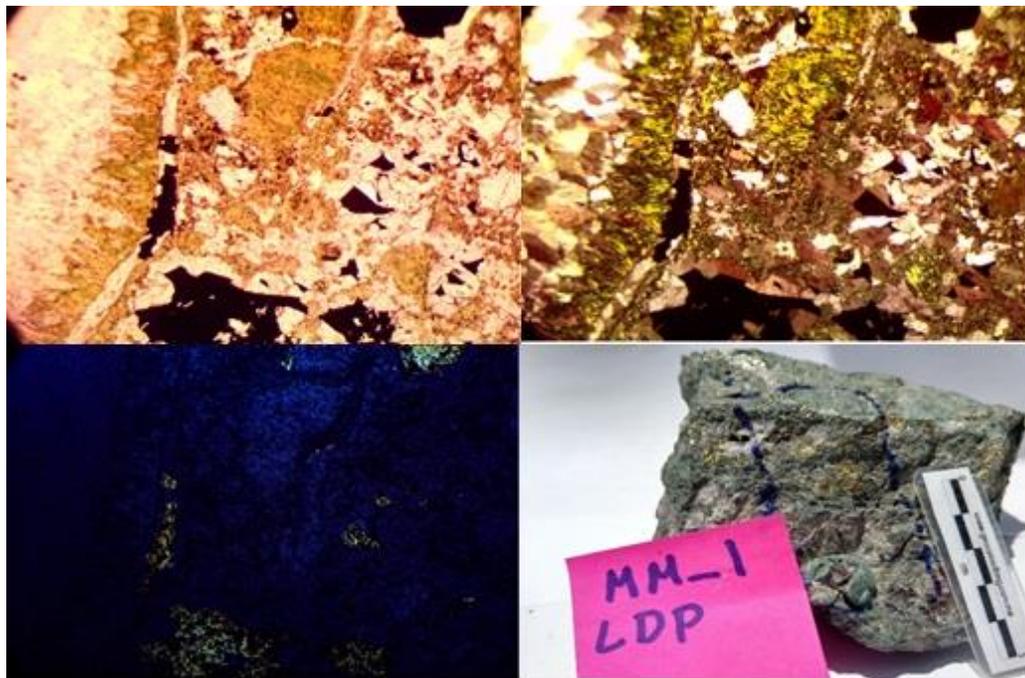


Figura 94. Fotomicrografías de una veta de cuarzo, A) nicoles paralelos: se aprecia Cloritización y minerales opacos, B) nicoles cruzados: estructura tabular de cuarzo con cristales de clorita, así como minerales opacos, C) luz reflejada: cristales de calcopirita y pirita, D) muestra a nivel muestra de mano.



Figura 15. Fotomicrografías de una veta de cuarzo, A) nicoles paralelos: se aprecian minerales opacos, B) nicoles cruzados: cristales euhedrales de cuarzo con minerales opacos, C) luz reflejada: cristales de calcopirita y calcosita, D) muestra a nivel muestra.

Brechas tipo shear

Las brechas tipo shear corresponden a estructuras tabulares que albergan mineralización económica de minerales de cobre (Bornita, calcopirita y Coovelita) de cobre en su mayoría, con anomalías importantes en molibdeno, plomo y zinc, la actividad epitermal relacionada a la formación de estos cuerpos, aprovecharon las fisuras preexistentes para la circulación de fluidos hidrotermales.

Estos cuerpos se encuentran en las zonas conocidas como La China y Reparo de Luna, y su Wallrock en su mayoría es la andesita con textura porfídica descrita anteriormente. Cabe resaltar que los resultados de microtermometría arrojaron temperaturas superiores a los 350°C, lo cual nos habla de un ambiente de sulfuración intermedia – alta y por eso su mineralización en metales base con algunos contenidos en molibdeno y minerales de cobre de alta temperatura.

Estructuralmente, estas brechas se asocian a estructuras bien definidas en el entorno regional por Marini, 2008. Estas estructuras consisten en cizallas con movimiento lateral izquierdo, mediante las cuales se presume, sirvieron como conductos para el emplazamiento de intrusivos y circulación de fluidos hidrotermales.



Figura 16. Mineralización tipo shear representado por estructuras tabulares brechadas asociada a fallas laterales con calcopirita-bornita-Covelita alojada en intraclastos cementados por sílice (zona La China-Reparo de Luna).

Chimeneas tipo diatrema

Las chimeneas tipo diatrema son cuerpos tabulares con formas ovoides o circulares, las cuales se desarrollan con buzamientos verticales con variaciones de no más de 15° , son contenido consiste en fragmentos angulosos de intrusivo y andesita porfídica con mineralización de cobre en su mayoría (calcopirita – bornita) con metales base y molibdeno, estos metales se encuentran cementados por sílice, tienen el desarrollo de halos de turmalina y alteraciones presumiblemente fílica (sericita).

Este tipo chimeneas se encuentran directamente relacionadas con los cuerpos intrusivos y regularmente las asociadas a sistemas porfídicos tienen la característica de ser ciegas (no afloran) y

aumentar su magnitud hacia profundidad. Aunque este tipo de brechas afloran en la zona de La Esmeralda, no están restringidas a esta zona, pues al interior de la mina El Malacate, se pueden observar este tipo de brechas, donde también se ha observado el desarrollo de alteración potásica.

Este tipo de condiciones suelen desarrollarse alrededor de los 450° con salinidades superiores al 20% en su contenido de NaCl y ambientes gaseosos, a los cuales se relaciona el desarrollo de Turmalina.

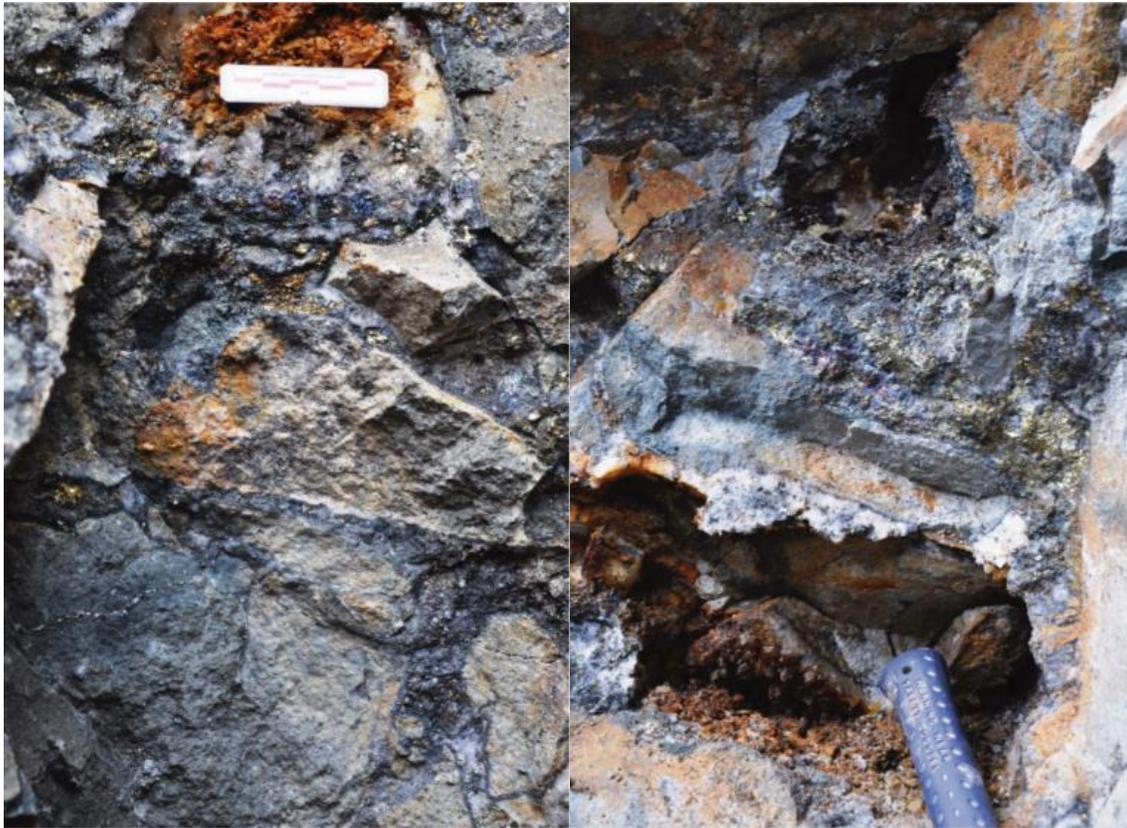


Figura 17. Chimeneas tipo diatrema con mineralización de calcopirita-bornita en brechas cementadas por sílice, estas se desarrollan en intrusivos de composición granítica, con intraclastos de rocas intrusivas y halos de turmalina (zona de La Esmeralda).

Tipo pórfido

Diseminados y Stockwork

La unidad granítica y andesítica que conforman el Wallrock de los stockwork, las vetas y los demás cuerpos mineralizados, se encuentran albergando mineralización diseminada de sulfuros, teniendo como potenciales minarles de mena, bornita, calcopirita, molibdenita y oro en bajas leyes, estos metales se encuentran asociados genéticamente con diferentes alteraciones que afectan estas unidades porfídica y granítica.

La mineralización supergena, queda representada por minerales secundarios de cobre y hierro, como lo son la Azurita, Malaquita y Hematita, estos minerales tienen su origen por la lixiviación de aguas meteóricas afectando los sulfuros primarios y formando concentraciones que pueden resultar económicas.

La disseminación de sulfuros de Cobre, hierro y molibdeno en cuerpos intrusivos graníticos y pórfidos de afinidad andesítica, se encuentran ampliamente expuestos en la región. Los sistemas de Stockwork forman vetillas rellenas de sílice con mineralización similar a las vetas principales, pero su comportamiento estructural es variado.

Los sistemas porfídicos se forman a temperaturas altas y se alteran por actividad hidrotermal y salinidades altas, las condiciones mostradas con los diferentes análisis, resultan en las condiciones ideales para la formación de este tipo de depósitos.

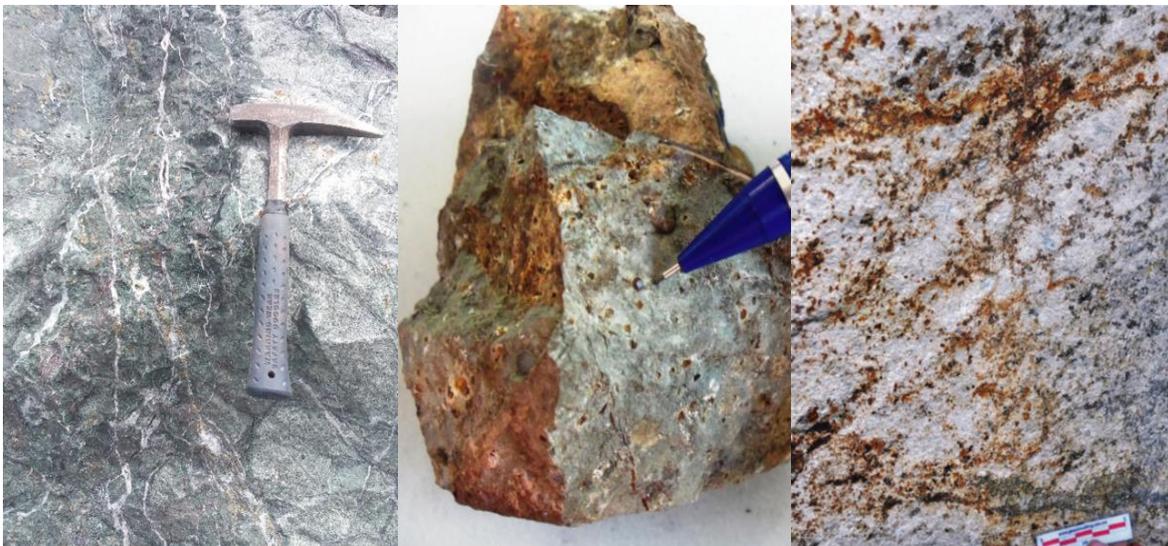


Figura 18. Disseminación de sulfuros de Cu-Fe en cuerpos intrusivos graníticos y pórfidos de afinidad riodacítica, los cuales se encuentran ampliamente expuestos en la región.

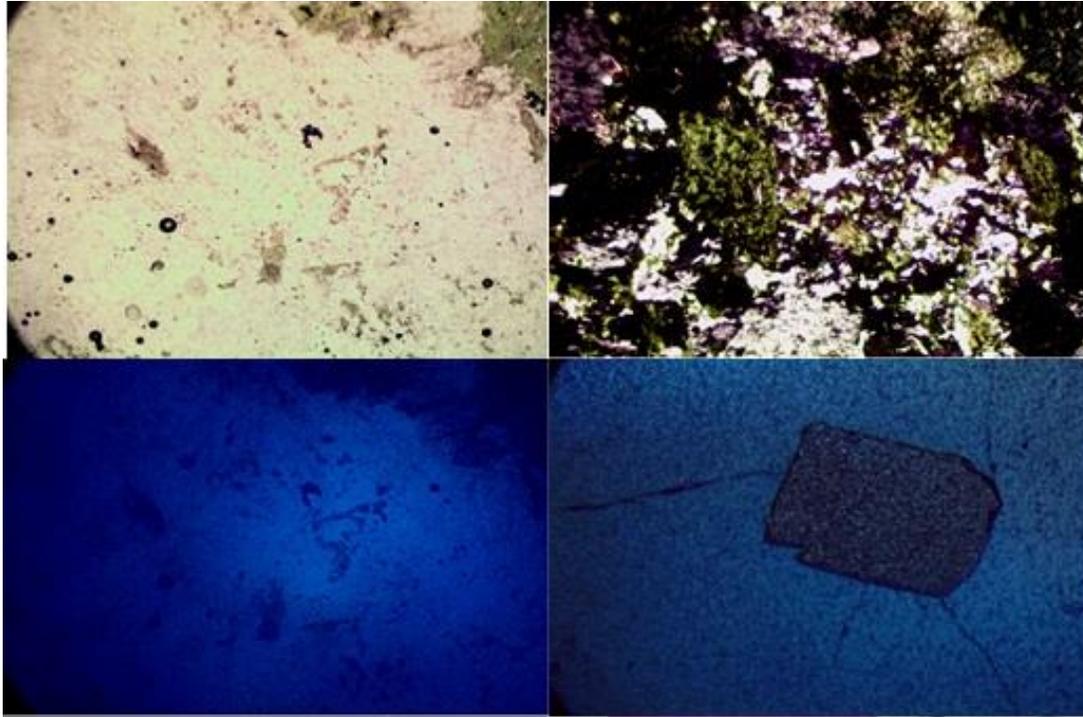


Figura 19. Fotomicrografías de las rocas graníticas de composición cuarzofeldespática, A) nicoles paralelos: se aprecian minerales opacos, así como Cloritización, B) nicoles cruzados: cristales euhedrales de cuarzo con minerales opacos, los feldespatos muestran indicios de alteración C) luz reflejada: cristales de calcopirita, D) cristal de pirita.

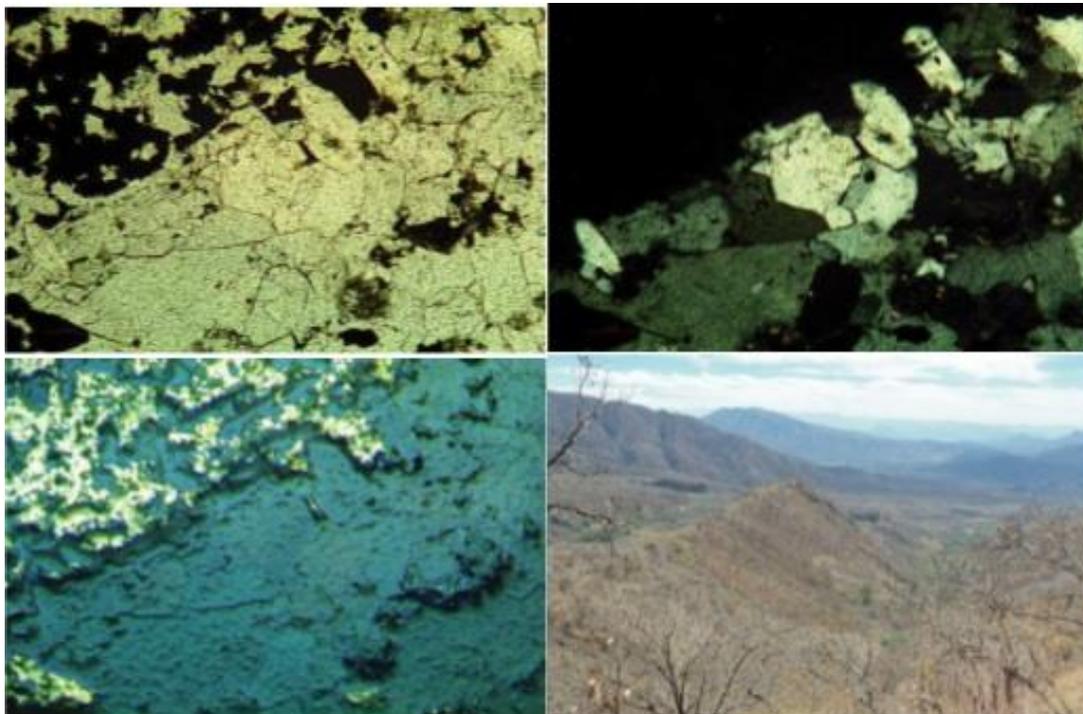


Figura 20. Fotomicrografías de un granito de composición cuarzo - feldespática. (A) Luz paralela; (B) Nícoles Cruzados; (C) Luz reflejada: Se distinguen cristales de calcopirita.

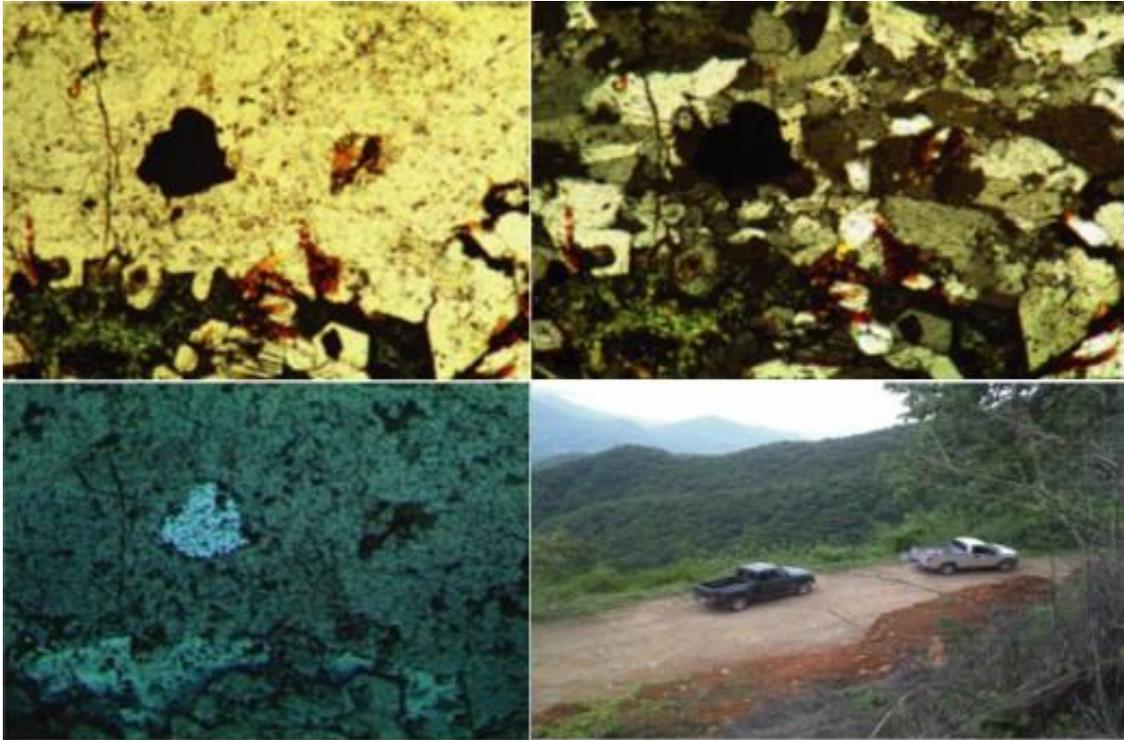


Figura 21. Fotomicrografías de un granito cuarzo - feldespático. (A) Luz paralela; (B) Nícoles Cruzados; (C) Luz Reflejada que destaca la presencia de cristal de calcosita.

Paragénesis

En la zona se ha determinado la presencia de mineralización metálica de Bornita, Calcopirita, Calcosita, Covelita, Galena, Esfalerita, Molibdenita, Pirita y carbonatos de cobre (Azurita y Malaquita), de esta forma se pueden distinguir fases de mineralización, una hipogena y otra supergena, de esta forma los eventos de mineralización hipogena se puede dividir en diferentes eventos, la mineralización del pórfido pudo estar relacionada a diferentes eventos, dependiendo sus diferentes alteraciones (propilítica, argílica, sericítica y posiblemente potásica), el depósito epitermal se relaciona a las fases tardías de la actividad hidrotermal del pórfido, y por la presencia de minerales metálicos, se pueden distinguir tres eventos, la fase de alta temperatura, asociado a las brechas, la fase de sulfuración intermedia alta y la de sulfuración intermedia. Por último, se observan eventos de mineralización supergena, por procesos de lixiviación de los sulfuros

Pórfido

La paragénesis asociada al sistema porfídico, se pueden distinguir principalmente en cuatro eventos, el primero y de mayor temperatura, corresponde al que se relaciona con la alteración potásica, y se representa por la asociación biotita, pirita, cuarzo, calcita, sericita y feldespato potásico, la mineralización de mena correspondiente a este evento está definida por minerales de alta temperatura como, bornita, calcopirita, calcosita, molibdenita y oro. Este evento mineralizante se desarrolló en temperaturas que superan los 450°C.

El segundo evento corresponde a la alteración filica (cuarzo – sericita), esta alteración se distingue por la asociación cuarzo, sericita y algunos minerales de arcilla, los minerales de mena son, calcopirita, bornita, calcosita, molibdenita y oro, las condiciones de formación de esta alteración rondan los 400°C, con salinidades cercanas al 15% - 20% de NaCl.

La alteración argílica representa la alteración de las plagioclasas que constituyen las unidades graníticas y porfídicas, suelen encontrarse en asociación de minerales de arcilla con sericita en menor cantidad, no se observa mineralización metálica asociada a esta alteración, pero las condiciones de formación representan temperaturas cercanas a los 350°C con salinidades del 10% - 15% de NaCl.

El último de estos eventos paragenéticos, relacionado con la fase de menor temperatura y la zona más distal del sistema porfídico, es la asociación clorita, epidota, calcita, pirita, esta alteración representa la alteración de minerales maficos como biotita y anfíboles, las menas en los sistemas porfídicos no suelen encontrarse relacionadas a esta alteración y para el caso de la zona de estudio, la alteración propilítica no presenta mineralización metálica con potencial económico.

Epitermal

Los eventos hidrotermales que constituyen la mineralización de tipo epitermal, a la cual se le atribuye la existencia de estructuras de tipo vetas, brechas, chimeneas y stockwork, representa, actualmente, la mineralización económica en la zona. Dentro de este sistema epitermal se han podido distinguir, tres eventos paragenéticos, resultado de sus asociaciones minerales. El primero y de mayor temperatura, corresponde a una fase de alta sulfuración, con una asociación de minerales de cobre de alta temperatura, como lo son calcopirita, bornita y calcosita, esto acompañado de molibdenita, la mineralogía de ganga se compone de cuarzo, sericita, arcillas y turmalina, este último se asocia a alteraciones relacionadas con sistemas porfídicos.

El segundo de estos eventos corresponde a una fase de sulfuración intermedia, con mineralización de metales base como lo son, calcopirita, bornita, galena, esfalerita, pirita y oro, con minerales de ganga como cuarzo, calcita, clorita y epidota. El tercero de los eventos, corresponde a la asociación calcopirita, bornita, pirita y oro, la mineralización de ganga constituye la asociación clorita, epidota, cuarzo y calcita.

Con esto se puede definir un sistema epitermal de sulfuración intermedia – alta, donde en la zona de El Malacate se encuentra una transición al sistema porfídico.

Supergénica

La mineralización supergena corresponde a la interacción de aguas meteóricas con la mineralización hipogena, que, para este caso, corresponde a sulfuros de cobre y hierro en su mayoría, formando a partir de este proceso, carbonatos de cobre (azurita y malaquita) y

óxidos de hierro (hematita), para el caso de yacimientos tipo pórfido, la mineralización supergena, representa zonas económicas.

Paragenesis Mineral

	Pórfido				Epitermal		Supergena
	Alteración Potásica	Sericita	Argílica	Propilítica	- T°	-T°	
Calcopirita							
Bornita							
Calcosita							
Molibdenita							
Oro							
Galéna							
Esfalerita							
Pirita							
Azurita							
Malaquita							
Hematita							
Cuarzo							
Calcita							
Clorita							
Epidota							
Arcillas							
Sericita							
Biotita							
Feldespato K							
Tumalina							

Figura 22. Esquema de paragénesis mineral en la región de La Huacana.



Figura 23. Bladed Calcite (Calcita hojosa) que representa el nivel de ebullición del sistema Epidermal de la mina Malacate (Nivel Sorpresa 2). Distrito Minero Inguarán.

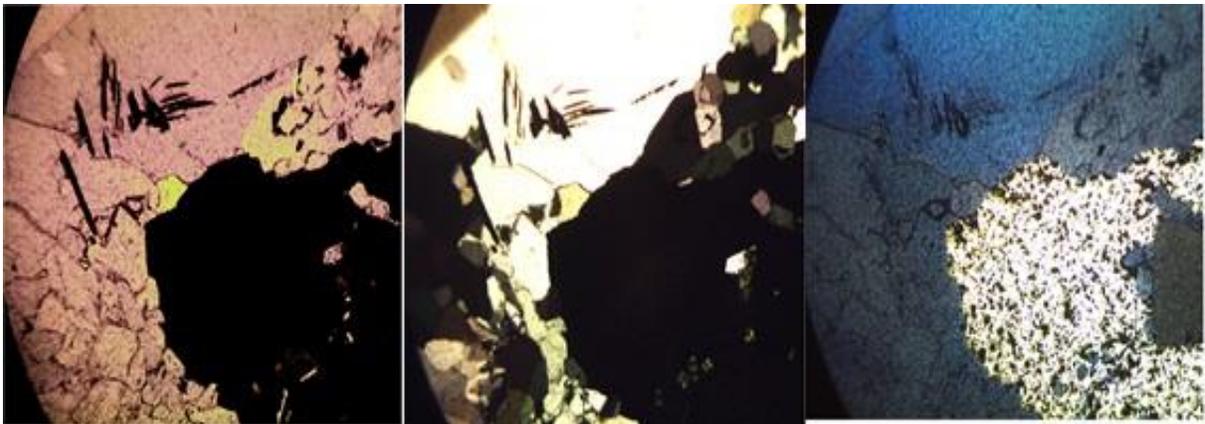


Figura 24. Fotomicrografías de una veta de cuarzo, A) nicols paralelos: se aprecian minerales opacos, así como Cloritización, B) nicols cruzados: cristales euhedrales de cuarzo con minerales opacos y minerales alterados a clorita C) luz reflejada: asociación mineral Calcosita-Calcopirita y Pirita.

Alteraciones

Las alteraciones hidrotermales detectadas han sido Argilización, Cloritización, Propilitización y Sericitación (alteración Filica). Este tipo de alteraciones concuerdan con los rangos de temperaturas y salinidades obtenidas, de igual forma este tipo de alteraciones son típicas en un yacimiento de tipo pórfido, según la zonación horizontal y vertical con la cual se definieron los modelos de este tipo de yacimientos (Lowell y Guilbert, 1970). A continuación, se describen las alteraciones detectadas en la zona de estudio:

Cloritización

La cloritización es una de las alteraciones más comunes en este tipo de rocas, en esta zona, la presencia de esta alteración se atribuye a la circulación de aguas meteóricas, o a las fases tardías de menor temperatura asociada a la actividad hidrotermal. A nivel macroscópico, se observan tonos verdes en las rocas intrusivas y porfídicas, a nivel microscópico, se observa la alteración de minerales ferromagnesianos (anfíboles y biotitas) a clorita, en asociación con cuarzo y sulfuros como piritita. Esta alteración suele ir de la mano con la propilitización en este tipo de ambientes hidrotermales.

Propilitización

La alteración propilitica es la más común dentro de los ambientes hidrotermales, teniendo una asociación de clorita y epidota, en la zona, esta alteración se encuentra afectando las rocas graníticas y porfídicas, así como las vetas hidrotermales, aunque a nivel macro se observa muy similar a la cloritización, a nivel micro, se puede observar una asociación clorita – epidota. Las condiciones, según los análisis de microtermometría, arrojan que existieron las condiciones de salinidad y temperatura necesarias para formación de estos minerales, teniendo en algunas zonas, temperaturas inferiores a los 150°C y salinidades inferiores al 5% de NaCl.

Argilización

La argilización se distingue por la presencia de minerales de arcilla tales como caolinita y montmorillonita, dichos minerales provienen de la alteración de las plagioclasas. En las

cercanías de la mina El Malacate, los cuerpos intrusivos, así como las unidades porfídicas y hacia las partes más externas de los cuerpos mineralizados, se puede observar esta alteración a simple vista, con los análisis petrográficos, se pudo observar, como las plagioclasas que conforman los intrusivos y las unidades porfídicas muestran indicios de afectación, hasta observarse completamente minerales de arcillas. Con los análisis de microtermometría, se pudo comprobar que las condiciones de temperatura y salinidad necesarias para la formación de esta alteración, si existieron, con temperaturas que rondan los 400°C y salinidades de entre el 5% y 15% en porcentaje de NaCl.

Sericitación (alteración Filica)

La alteración fílica, o sericitación, consiste en la alteración de los silicatos, pasando micas, en la zona e estudio, esta alteración no es visible a nivel macro, pero con los análisis petrográficos, se observó la existencia de minerales de bajo relieve y alta birrefringencia (sericita), estos minerales se observan en una asociación con cuarzo en su mayoría, pero también es distinguible con los minerales arcillosos (alteración argílica), igualmente, se observa la presencia de calcosita (SCu₂) y pequeños cristales de turmalina, cuando hay presencia de este mineral de alta birrefringencia. Las inclusiones fluidas dieron resultados de temperaturas superiores a los 400°C con salinidades que rondan el 15% en porcentaje de NaCl, lo cual representa salinidades que van de medias a bajas.

Alteración potásica

La alteración potásica constituye en los sistemas porfídicos, la zona de mayor interés económico, y representa una asociación mineral de feldespatos potásicos, biotita, piritita, calcita, cuarzo, con pequeños indicios de sericita. Para la zona de estudio, esta alteración se ha registrado afectando la unidad granítica y en pequeños afloramientos al interior de la mina El Malacate, con mayor trabajo de exploración, se podría llegar a encontrar esta zona, donde predomine la alteración potásica.

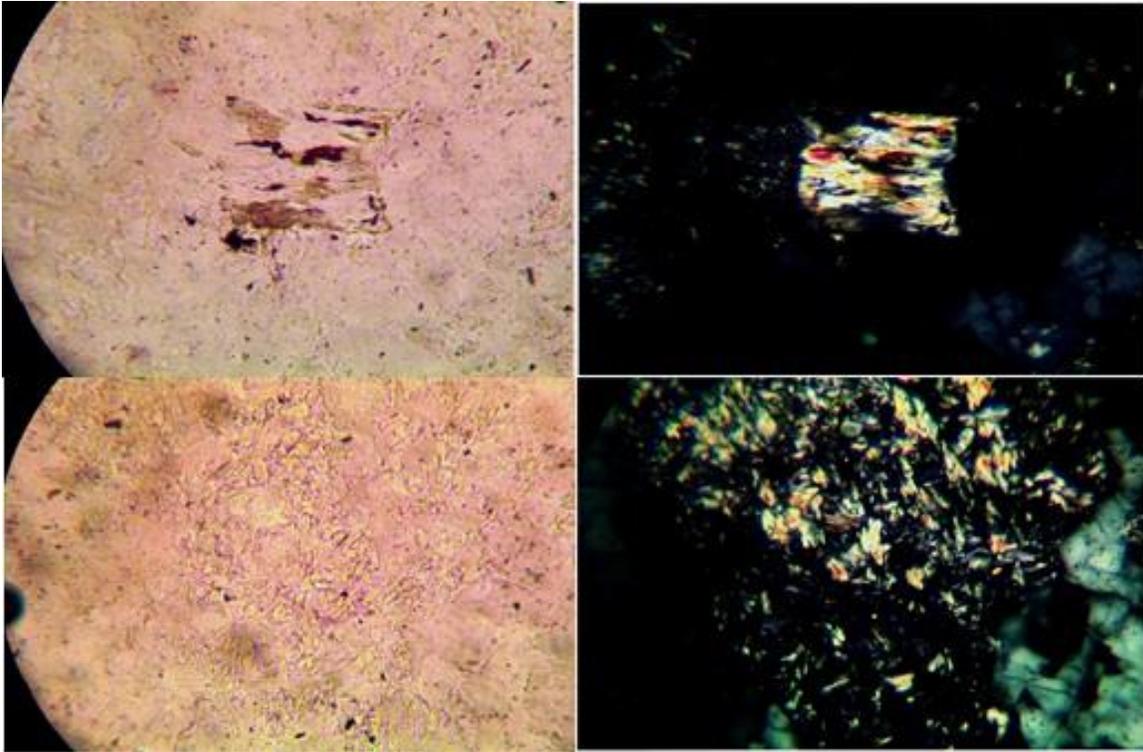


Figura 25. Fotomicrografías de las rocas graníticas de composición cuarzofeldespática, A) y C) nicols paralelos: minerales de bajo relieve C) y D) nicols cruzados: minerales de alta birrefringencia, presumiblemente sericita (alteración Filica)

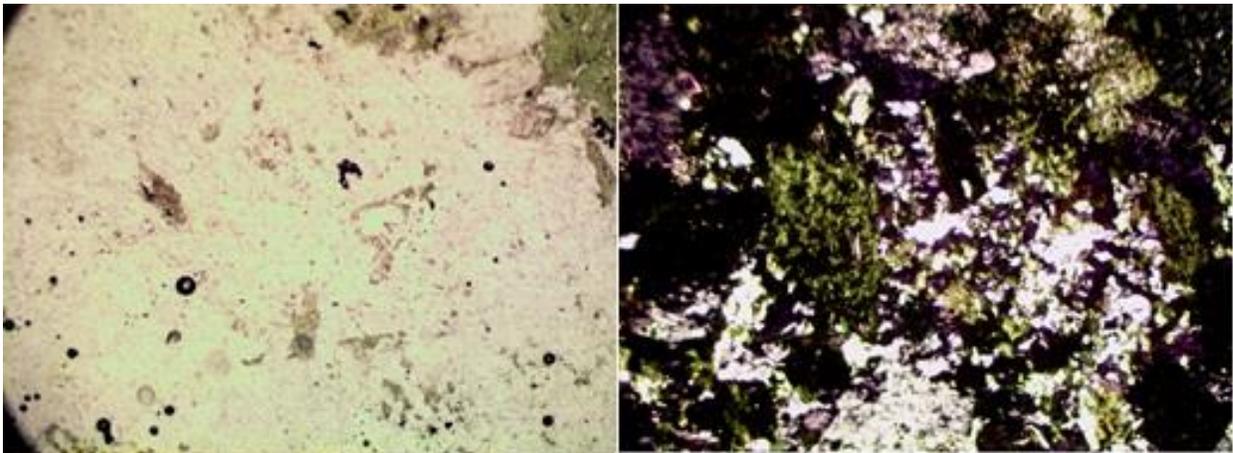


Figura 26. Fotomicrografías de las rocas graníticas de composición cuarzofeldespática, A) nicols paralelos: se aprecian minerales opacos, así como Cloritización, B) nicols cruzados: cristales euhedrales de cuarzo con minerales opacos, los feldspatos muestran indicios de alteración argílica.

Contenidos Metálicos

La mina el Malacate se encuentra a una altura de 1638 msnm (nivel 0), y cuenta con tres niveles principales, 1) nivel El Malacate, 2) nivel la Sorpresa 2 y 3) nivel el Milagro. Respecto a la irregularidad de la veta por las diferentes fases de hidrotermalismo y las diferentes temperaturas en cada fase, los valores de la mineralización cambian en cada nivel como se explica en la siguiente tabla.

Nivel		Ley Au	Ley Cu
0-100 m. Nivel El Malacate	Au>Cu	3 gr./Ton	1 %
100-200 m. Nivel La Sorpresa 2	Au=Cu	1 gr./ton	1.5%
200-255 m. Nivel El Milagro	Au<Cu	0.5-1 gr./Ton	5%

Tabla 1. Comportamiento de leyes promedio en los niveles de la mina El Malacate.

En el siguiente esquema (figura 27), podemos observar una sección transversal de la mina El Malacate, a partir de los cambios tan marcados que se observan en los contenidos metálicos, podemos interpretar como las condiciones y mineralización del yacimiento cambia, pues, en los niveles El Malacate y La Sorpresa, se puede entender como una fase de sulfuración intermedia, con presencia de metales preciosos, en el nivel más profundo (El Milagro), la transición a metales base nos indica el cambio a un sistema de sulfuración intermedia – alta, esto debajo del nivel de ebullición, con presencia de molibdeno y minerales de cobre de alta temperatura, la alteración potásica que se llega a apreciar en estos niveles más profundos, nos hace pensar que la zona económica del sistema porfídico se puede encontrar cerca, la zona de la alteración potásica representa la zona de mayor temperatura dentro del contexto porfídico.

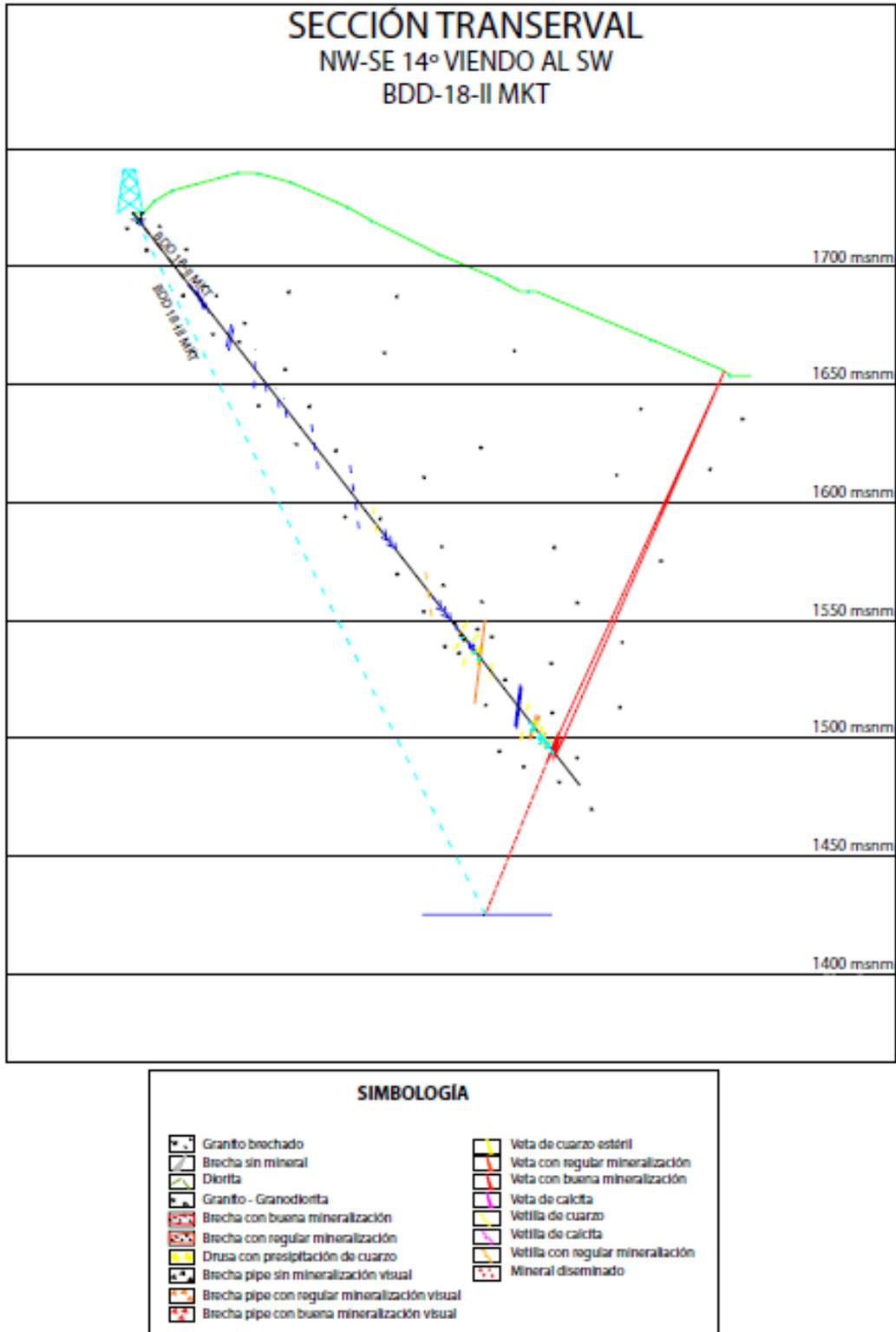


Figura 27. Sección transversal NW – SE, Mina El Malacate, La estructura en color rojo representa la estructura principal, Veta El Malacate.

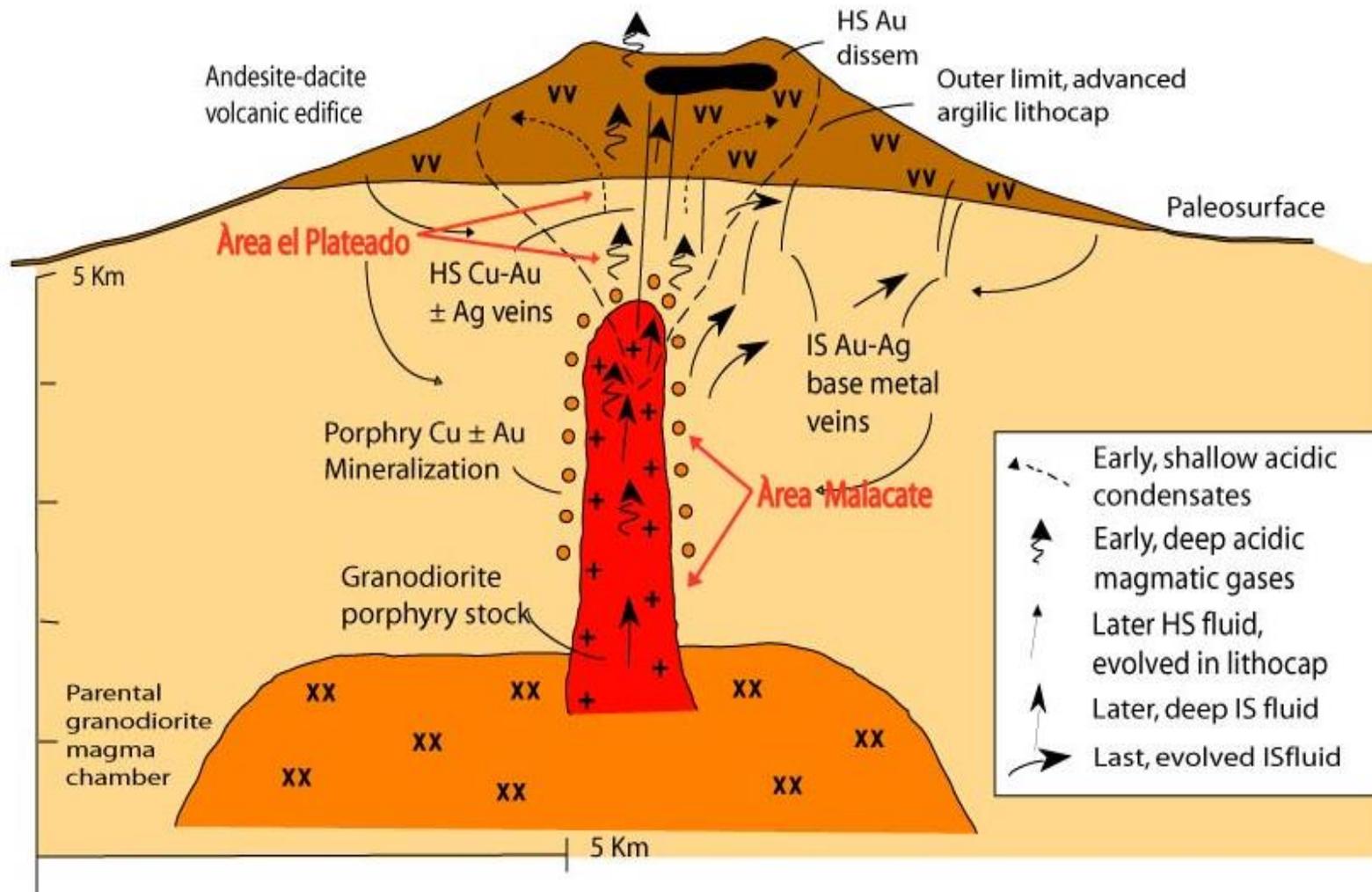


Figura 28. Modelo ideal de un pórfido, tomado de Sillitone y Hednquist, con modificaciones menores, (Sillitone y Hednquist, 2002).

Capítulo VI. Petrografía y Minerografía

Ficha técnica

Clave	MM1
Ubicación	Interior de mina El Malacate
Muestreo	Single sampling
Observación	Veta de cuarzo con Cu

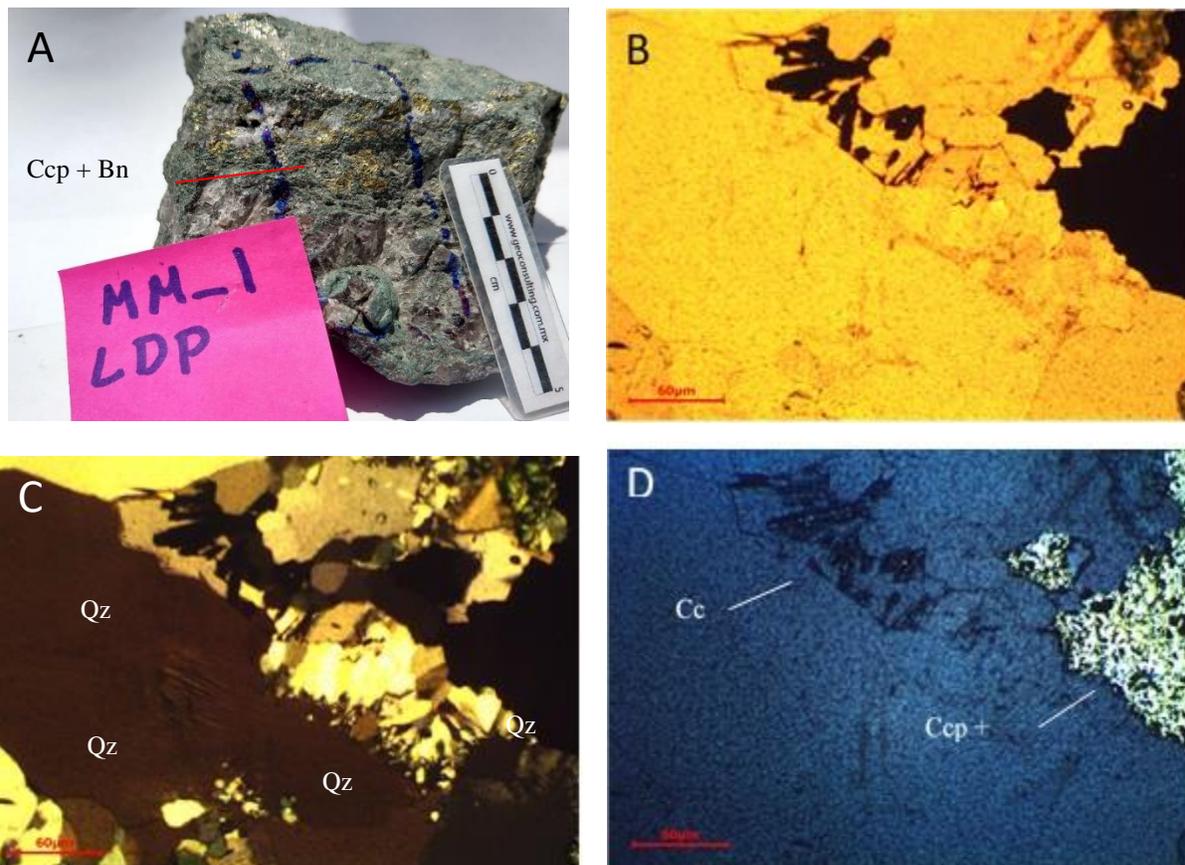


Figura 29. A. Muestra de interior de mina El Malacate. B. Fotomicrografía con luz transmitida en nicoles paralelos que muestra los metales en color oscuro. C. Nícoles cruzados permiten observar que los metales descritos se encuentran aglutinados por una matriz rica en cuarzo, los metales en color oscuro corresponden en su mayoría calcopirita, bornita y calcosita. D. Fotomicrografía con luz reflejada, se aprecian cristales de calcopirita y bornita en forma masiva, la calcosita se encuentra alojada en pequeñas cavidades.

Ficha técnica

Clave	MM2
Ubicación	Interior de mina El Malacate
Muestreo	Single sampling
Observación	Veta con textura brechada

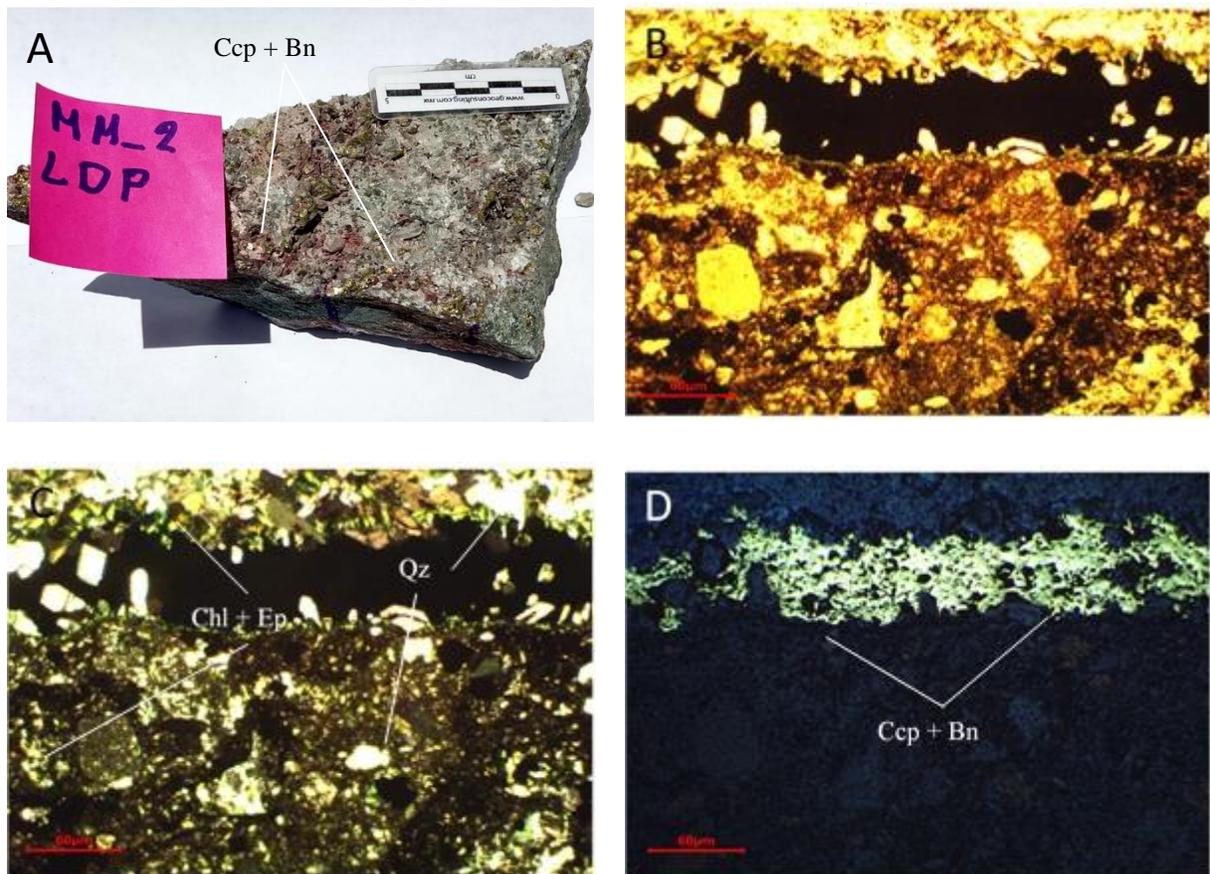


Figura 30. A. Muestra de interior de mina El Malacate. B. Fotomicrografía con luz transmitida en nicoles paralelos que muestra los metales en color oscuro en una matriz brechada. C. Nícoles cruzados, permiten observar que los metales descritos se encuentran aglutinados por una matriz rica en cuarzo, con minerales de alteración (clorita y epidota), formando una estructura brechada, los metales en color oscuro corresponden en su mayoría calcopirita y bornita. D. Fotomicrografía con luz reflejada, se aprecian cristales de calcopirita y bornita en forma masiva.

 Ficha técnica

Clave	MM3
Ubicación	Interior de mina El Malacate
Muestreo	Single sampling
Observación	Veta de cuarzo con Cu

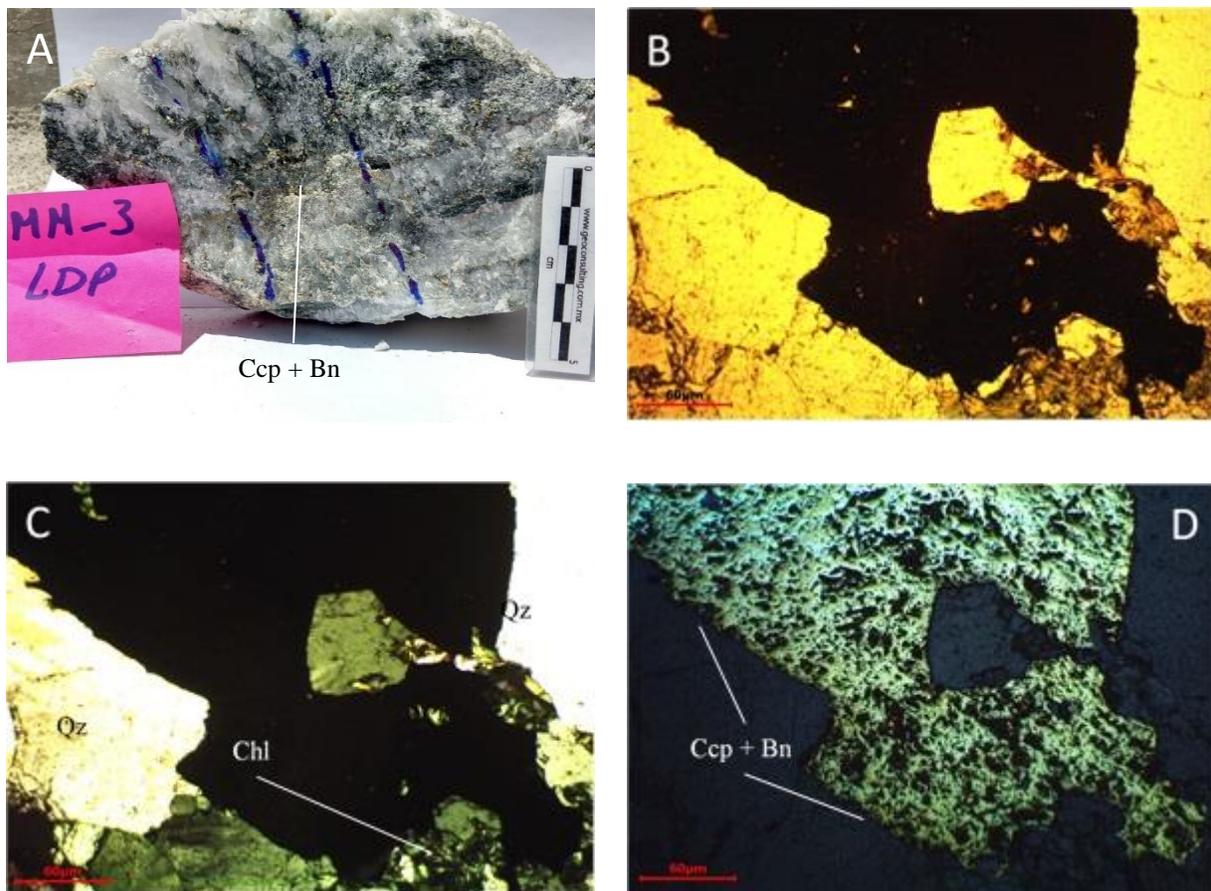


Figura 31. A. Muestra de interior de mina El Malacate. B. Fotomicrografía con luz transmitida en nicols paralelos que muestra los metales en color oscuro. C. Nicols cruzados, permiten observar que los metales descritos se encuentran aglutinados por una matriz rica en cuarzo, con pequeños cristales de clorita, los metales en color oscuro corresponden en su mayoría calcopirita y bornita. D. Fotomicrografía con luz reflejada, se aprecian cristales de calcopirita y bornita en forma masiva.

 Ficha técnica

Clave	MM4
Ubicación	Interior de mina El Malacate
Muestreo	Single sampling
Observación	Veta con textura brechada

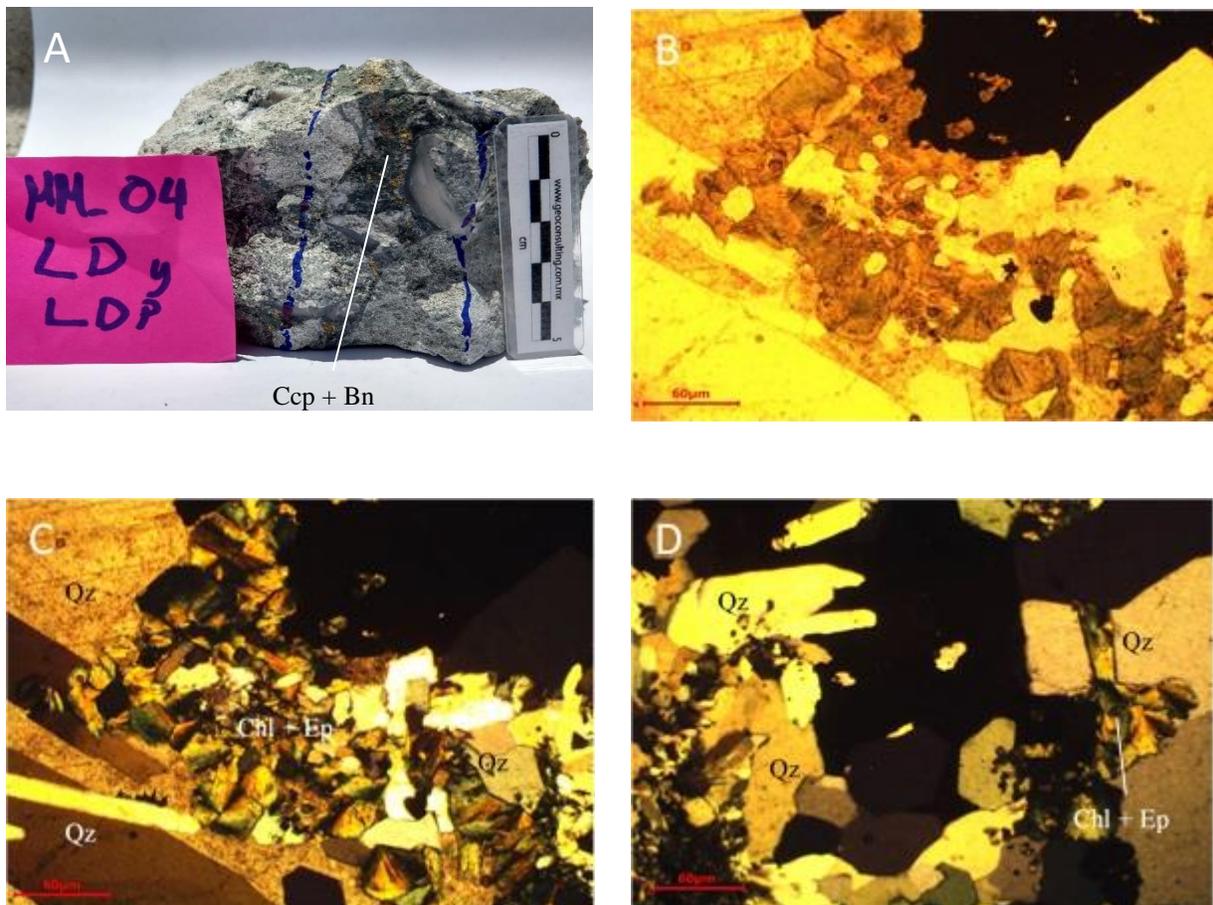


Figura 32. A. Muestra de interior de mina El Malacate. B. Fotomicrografía con luz transmitida en nicoles paralelos que muestra los metales en color oscuro en una matriz brechada. C. Nícoles cruzados, permiten observar que los metales descritos se encuentran aglutinados por una matriz rica en cuarzo, con minerales de alteración (clorita y epidota), formando una estructura brechada, los metales en color oscuro corresponden en su mayoría calcopirita y bornita. D. Nícoles cruzados, se observa una matriz de cuarzo con minerales de alteración (clorita y epidota) alojando minerales opacos.

 Ficha técnica

Clave	HM5
Ubicación	Interior de mina El Malacate
Muestreo	Single sampling
Observación	Veta con textura brechada

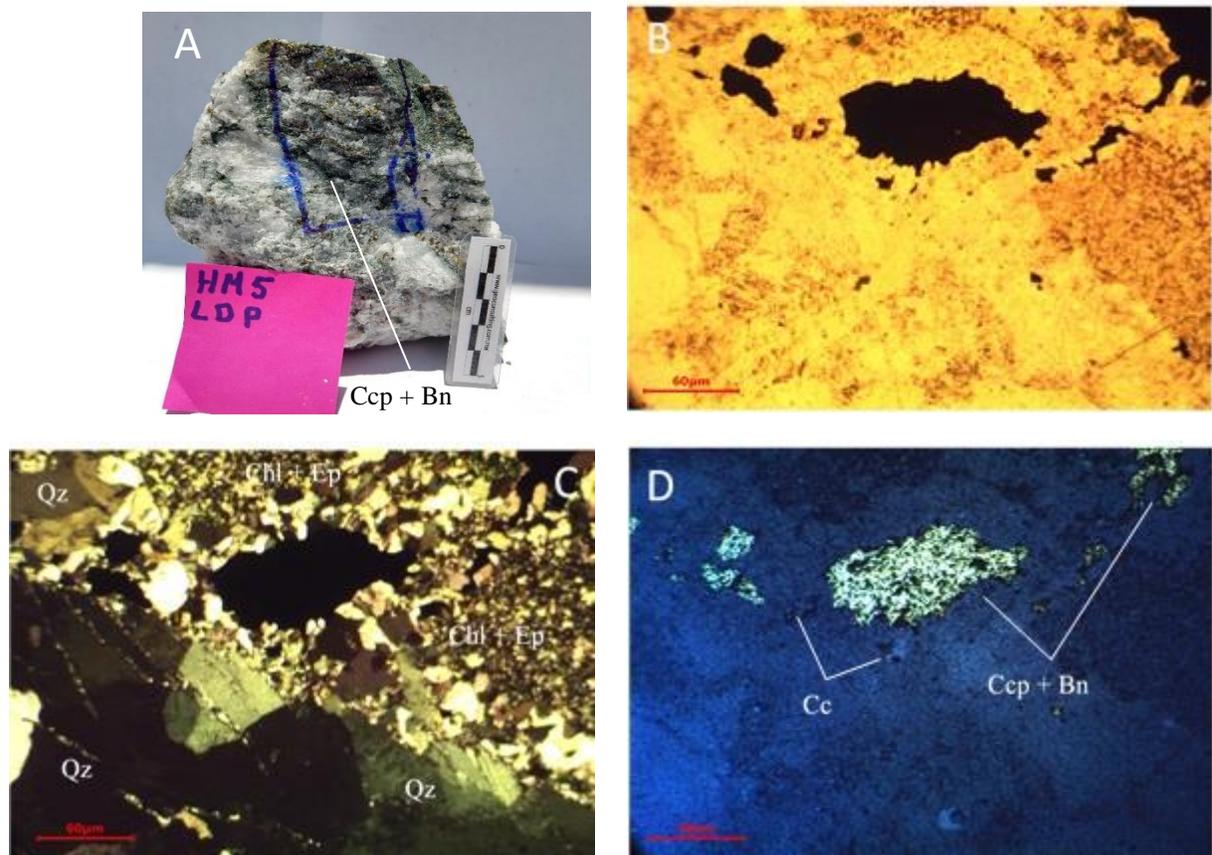


Figura 33. A. Muestra de interior de mina El Malacate. B. Fotomicrografía con luz transmitida en nicols paralelos que muestra los metales en color oscuro con minerales con relieve alto. C. Nicols cruzados, permiten observar que los metales descritos se encuentran aglutinados por una matriz rica en cuarzo, con minerales de alteración (clorita y epidota) con alto relieve, formando una estructura brechada, los metales en color oscuro corresponden en su mayoría calcopirita, bornita y calcosita. D. Fotomicrografía con luz reflejada, se aprecian cristales de calcopirita y bornita en forma masiva, la calcosita se aloja en pequeñas cavidades.

Ficha técnica

Clave	4557
Ubicación	Interior de mina El Malacate
Muestreo	Single sampling
Observación	Mozo-granito

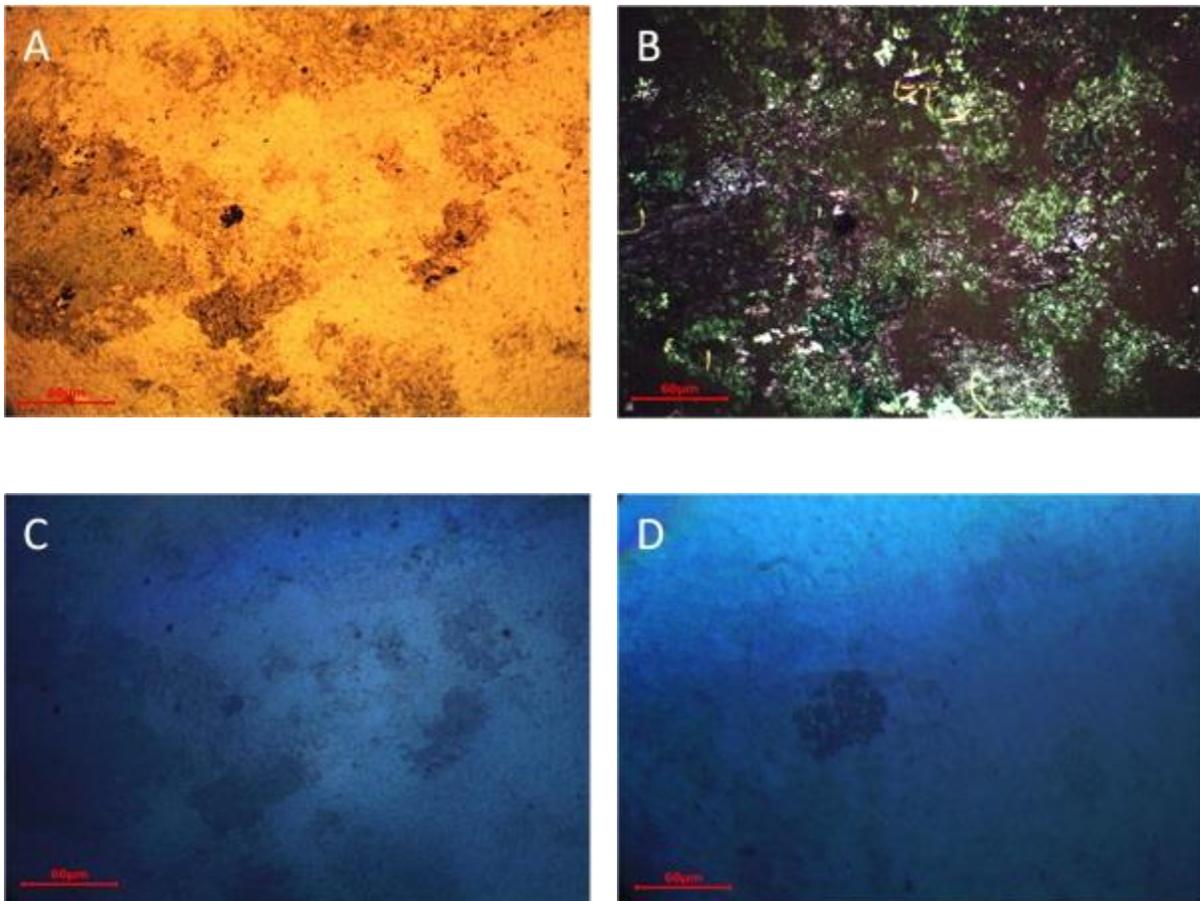


Figura 34. Fotomicrografías de un granito cuarzo feldespático de la región de La Huacana, los feldespatos, plagioclasas y minerales maficos, se encuentran alterándose a clorita, epidotas y arcillas. A. Luz paralela. B. Nícoles Cruzados. C y D. Luz Reflejada que destaca la presencia de cristal de calcopirita.

Ficha técnica

Clave	H1
Ubicación	
Muestreo	Single sampling
Observación	Intrusivo cuarzo feldespatico

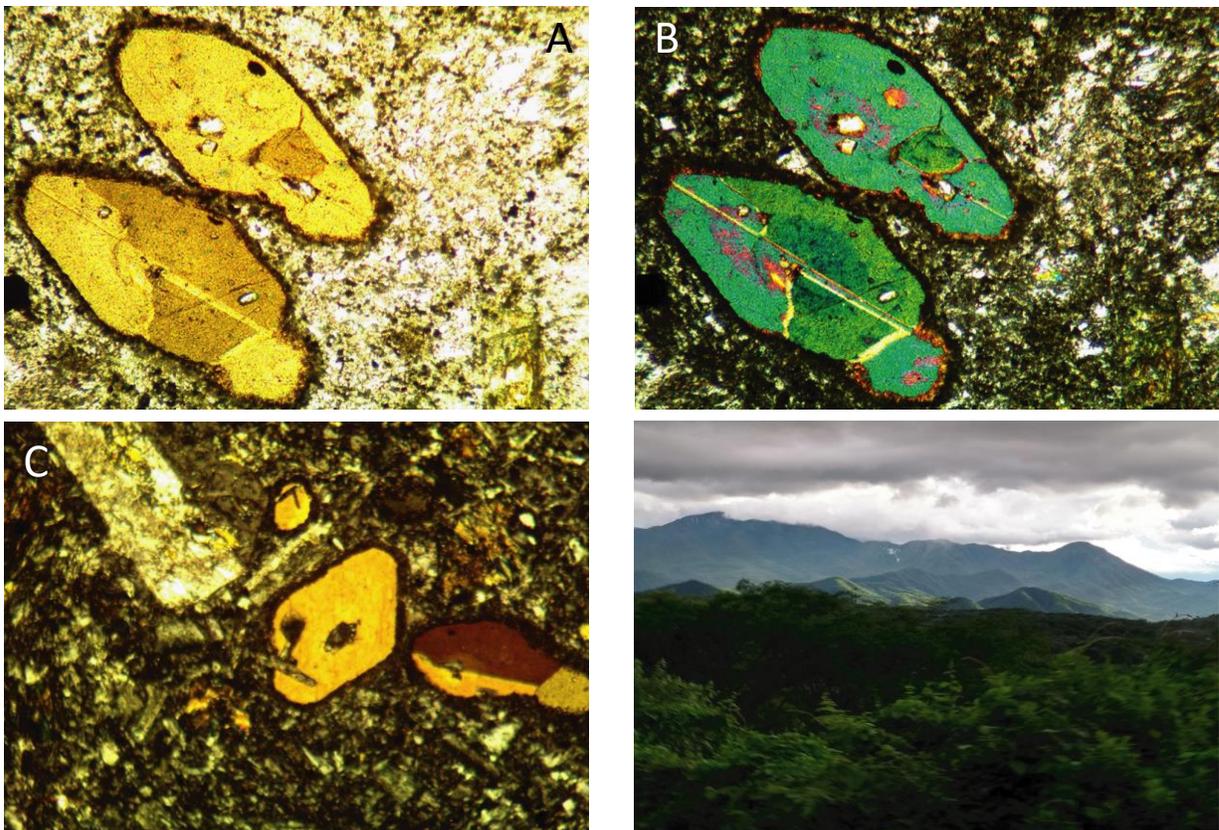


Figura 35. Fotomicrografías de las rocas porfídicas de composición intermedia de la región de La Huacana. A. Luz paralela. B. Nícoles Cruzados; Se distinguen cristales euhedrales maclados de minerales ferromagnesianos fuertemente cloritizados (A y B). En (C) se aprecia la presencia de fenocristal de titanaugita en matriz rica en plagioclasas tipo oligoclasa-andesina.

Ficha técnica

Clave	H2
Ubicación	
Muestreo	Single sampling
Observación	Intrusivo cuarzo feldespatico

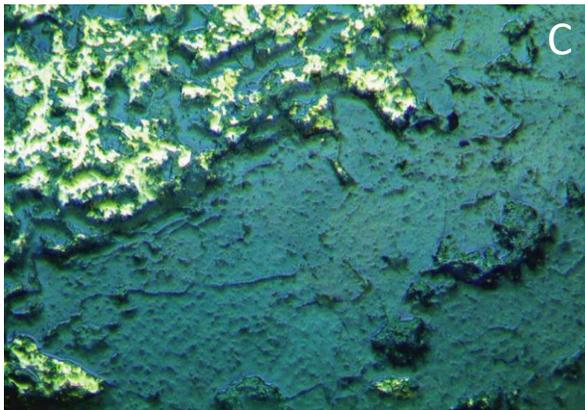
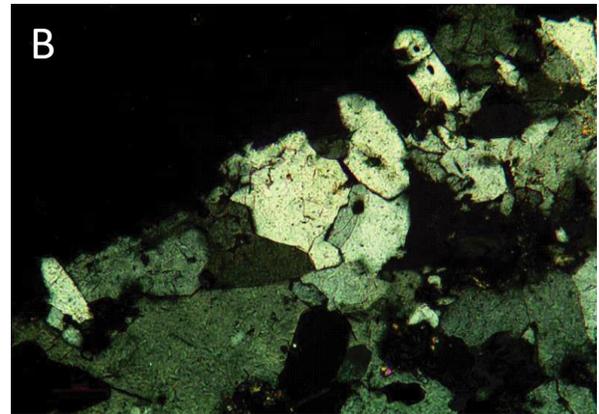
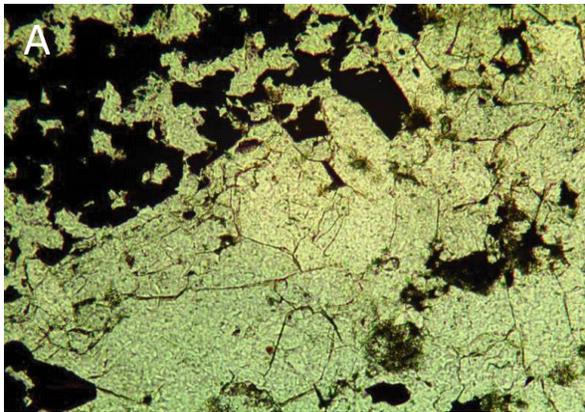


Figura 36. Fotomicrografías de las rocas graníticas de composición cuarzofeldespática de la región de La Huacana. A. Luz paralela. B. Nícoles Cruzados. C. Luz reflejada: Se distinguen cristales de calcopirita como relleno de cavidades en las fracturas del cuerpo intrusivo.

Ficha técnica

Clave	H3
Ubicación	
Muestreo	Single sampling
Observación	Intrusivo cuarzo feldespatico

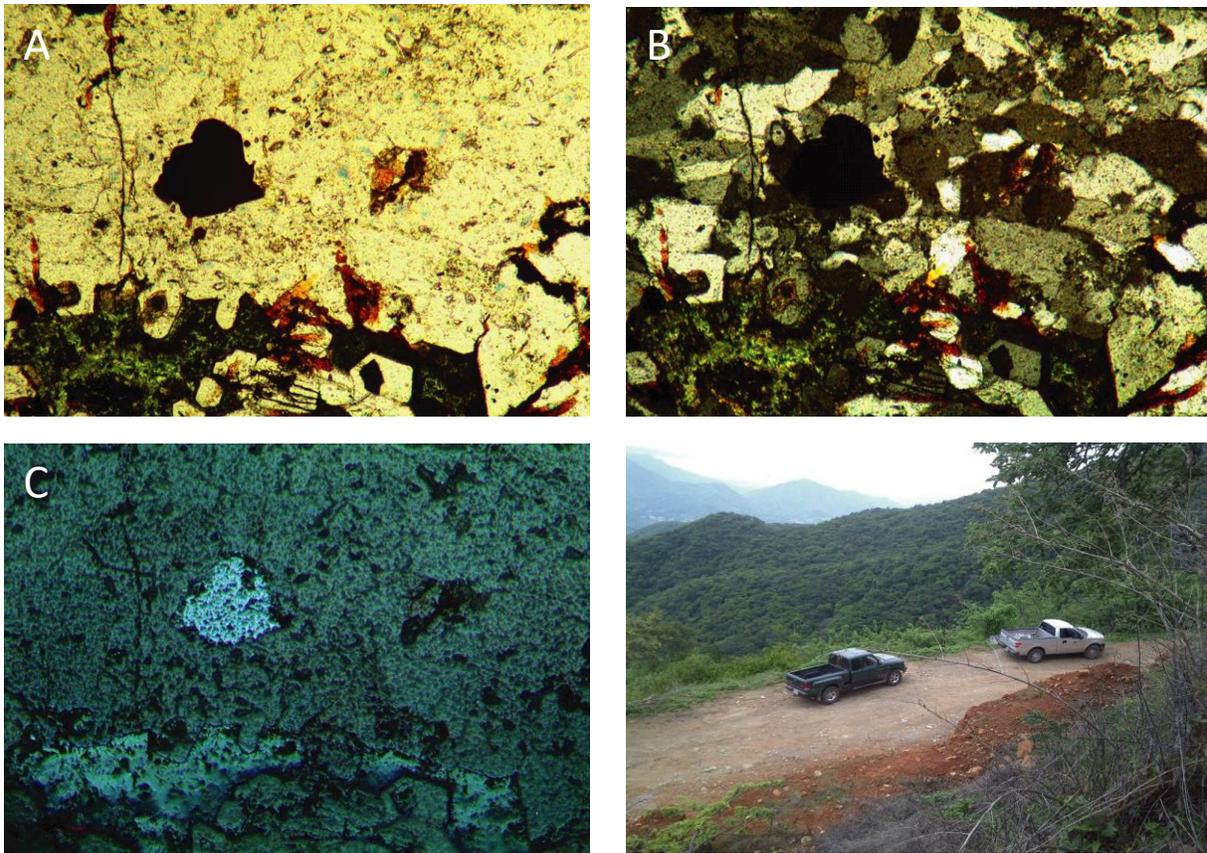


Figura 37. Fotomicrografías de un granito cuarzo feldespático de la región de La Huacana. A. Luz paralela. B. Nícoles Cruzados. C. Luz Reflejada que destaca la presencia de cristal de calcosita (Cu_2S).

Ficha técnica

Clave	H4
Ubicación	
Muestreo	Single sampling
Observación	Intrusivo cuarzo feldespatico

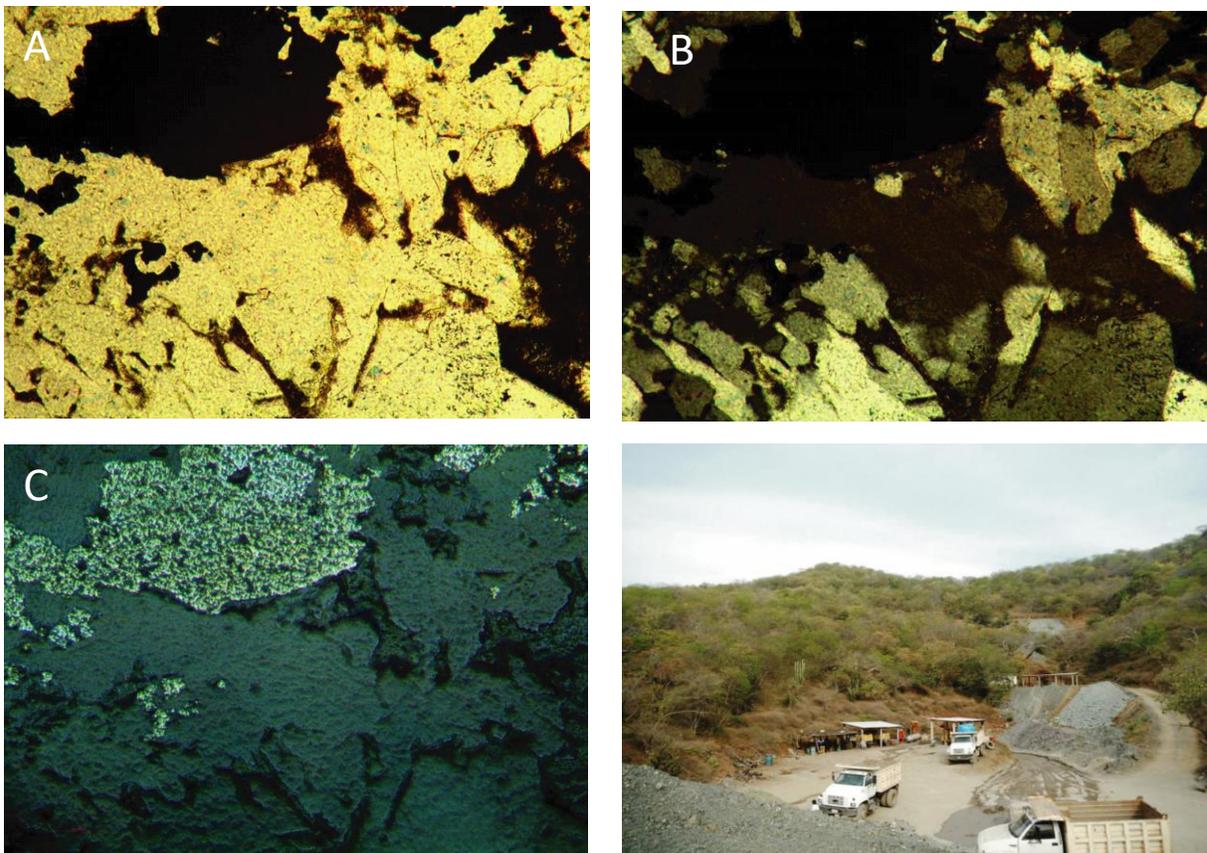


Figura 38. Fotomicrografías de las rocas graníticas de composición cuarzofeldespática de la región de La Huacana. A. Luz paralela. B. Nícoles Cruzados. C. Luz reflejada: Se distinguen cristales de pirita-calcopirita como relleno de cavidades en las fracturas del cuerpo intrusivo.

Capítulo VII. Geoquímica e Inclusiones fluidas

Geoquímica de elementos menores y traza

Muestra	Rbo	Echado	Nombre	Localización	Espesor (m)	Au (4)	Ag	Cu	Pb	Zn	Mo
						ppm	(30) ppm	(30) ppm	(30) ppm	(30) ppm	(30) ppm
MT01	NE70°SW	85°SE	Cuatitas 1	Lote Esmeralda 2	2	0.015	<2	959	59	54.5	<0.6
MT02	NE85°SW	62°NW	Cuatitas 2	Lote Esmeralda 2	1.3	0.001	<2	3820	<14	12.2	<0.6
MT03	NE65°SW	64°SE	El Frenton	El Frenton	53	0.004	<2	463	50	66.1	13.5
MT04	E-W	36°S	La Roja	Camino a las Cuatitas	1.2	0.011	<2	7852	1296	282.6	29.1
MTO5	NE55°SW		El Comal	Camino a las Cuatitas	0.9	0.001	<2	88	43	35.9	18.8
MT06	NW60°SE	60°SW	La Rosa	Área Las Guayabas	2	0.001	<2	26	<14	42	<0.6
MTO6A	NW60°SE	60°SW	La Rosa	Área Las Guayabas	2	0.001	<2	10	<14	47.8	<0.6
MT07	NE15°SW		Las Guayabas	Área Las Guayabas	3	0.001	<2	<2	<14	118.5	<0.6
MT07A	NE15°SW		El Guayabas	Guayabas	3	0.001	<2	<2	<14	124.6	<0.6
MT08	NW40°SE	75° SW	Recodo El	El Recodo	1.9	0.002	<2	27	<14	84.5	<0.6
MT08A			El Recodo	El Recodo	1.4	0.001	<2	916	<14	67.1	<0.6
MT08B			El Recodo	El Recodo		0.025	<2	481	57	16.3	55.4
MT08C	NW70°SE	55° SW	El Recodo	El Recodo	1.7	0.004	<2	144	17	65.2	<0.6
MT08D			El Recodo	El Recodo	1.3	0.01	<2	88	20	23.6	46.5
MT09	NE55°SW	85°SE	La Tabla Las	Cercanías	1.1	0.01	<2	353	<14	<0.4	23.5
MT10	NE78°SW	80°SE	Cuatitas Las	Las Cuatitas	1	0.012	<2	361	265	178.9	<0.6
MT10A			Cuatitas Las	Las Cuatitas		0.011	<2	2312	63	46.7	205.2
MT10B			Cuatitas Las	Las Cuatitas		0.007	<2	1175	219	347	12.2
MT10C			Cuatitas Las	Las Cuatitas		0.009	<2	2218	138	125.9	<0.6
MT10D	NE78°SW	80°SE	Cuatitas Las	Las Cuatitas	1.5	0.014	<2	1962	100	70.8	10.9
MT10E	NE78°SW	80°SE	Cuatitas	Las Cuatitas	1.2	0.008	<2	592	155	69.9	14.9

Tabla 2. Resultados de la segunda campaña de muestreo, lote Esmeralda 2 a partir de análisis geoquímico multielemental.

Muestra	Rbo	Echado	Nombre	Localización	Espesor (m)	Au	Ag	Cu (30)	Pb	Zn	Mo
						(4)	(30)	(30)	(30)	(30)	(30)
						ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
MT0-11	NE60SW	80NW	Los Encinos 1	La Esmeralda 2	0.6	0.02	<0.5	767	5	37	11
MT0-12	NW70SE	55SW	Lupita	La Esmeralda 2	4	0.016	0.6	36	7	9	5
MT12B	NW70SE	55SW	Lupita	La Esmeralda 2	4	0.005	<0.5	18	10	7	4
MT013	NE20SW	76NW	Los Aguacates	La Esmeralda 2	2.5	0.003	<0.5	8	<4	19	2
MT14	NE45SW	80SE	Las Trancas	La Esmeralda 2	0.5	0.011	2	1600	<4	45	17
MT15	NE75SW	80NW	La Delgada	La Esmeralda 2	0.5	0.629	<0.5	113	29	233	1
MT16	NE55SW	70NW	La Cruz	La Esmeralda 2	3	0.468	3.4	2230	21	17	9
MT17	NE55SW	70NW	La Cruz	La Esmeralda 2	1.5	0.085	<0.5	943	7	108	8
MT18	NE84SW	74NW	Msa1	La Esmeralda 2	0.45	0.037	0.7	2480	799	345	40
MT19	NE84SW	69NW	Mesa 2	La Esmeralda 2	0.2	0.011	<0.5	126	8	154	<1
MT20	NE77SW	44NW	La Cruz	La Esmeralda 2	0.6	0.24	0.8	2050	<4	60	16
MT21		80NW	Las Cuatitas	La Esmeralda 2		0.032	7.8	>10000	52	82	3

Tabla 3. Resultado de la primera campaña de muestreo. Lote Esmeralda 2

Muestra	Rbo	Echado	Nombre	Localización	Espesor (m)	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	Mo
						(4)	(30)	(30)	(30)	(30)	(30)
						ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
M1	NW80SE	85SW	Obra antigua	La China	2	0.093	<2	22000	<14	<0,4	<0.6
M2	NW80SE	85SW	Obra antigua	La China	2	0.016	<2	3346	<14	112,0	<0.6
MB1	NW24SE	87SW	Veta	Baluarte	0.4	0.005	<2	109	62	67.7	19
MB2	NW30SE	70SW	Veta	Baluarte	1	0.017	11.9	133	4280	138	304.8
MB3	NW20SE		Veta	Baluarte	0.5	0.008	<2	57	603	121.6	50.5
MB4	NW33SE	85SW	Veta 2	Baluarte	10	0.013	<2	67	300	110.1	20.7
MB5	NW60SE		Veta 1	Baluarte	3	0.003	<2	69	14	292.4	<0.6
MB6	NW75SE	76SW	Brecha	Baluarte	0.5	0.018	<2	72	52	37	119

Tabla 4. Resultados de la segunda campaña de muestreo, Lote La China-San Cristóbal a partir de análisis geoquímico multielemental.

Muestra	Rbo	Echado	Nombre	Localización	Espesor (m)	Au	Ag	Cu (30)	Pb	Zn	Mo
						(4) ppm	(30) ppm	ppm	(30) ppm	(30) ppm	(30) ppm
M1			Veta Malacate	El Malacate		0.05		0.05			
M2			Veta Malacate	El Malacate		0.08		0.02			
M3			Veta Malacate	El Malacate		0.04		4.90			
M4			Veta Malacate	El Malacate		0.06		0.15			
M5			Veta Malacate	El Malacate		0.03		0.02			
M6			Veta Malacate	El Malacate		0.05		0.05			
M7			Veta Malacate	El Malacate		0.08		5.37			
M8			Veta Malacate	El Malacate		0.42		0.03			
M9			Veta Malacate	El Malacate		0.38		0.02			
M10			Veta Malacate	El Malacate		0.85		0.04			
M11			Veta Malacate	El Malacate		0.12		0.03			
M12			Veta Malacate	El Malacate		0.08		0.04			
M13			Veta Malacate	El Malacate		0.06		0.05			
M14			Veta Malacate	El Malacate		0.07		0.82			
M15			Veta Malacate	El Malacate		0.04		0.04			
M16			Veta Malacate	El Malacate		0.06		0.03			
M17			Veta Malacate	El Malacate		2.36		1.36			
M18			Veta Malacate	El Malacate		0.52		0.05			
M19			Veta Malacate	El Malacate		0.06		0.11			
M20			Veta Malacate	El Malacate		0.58		0.04			
M21			Veta Malacate	El Malacate		0.04		5.40			
M22			Veta Malacate	El Malacate		0.05		0.07			
M23			Veta Malacate	El Malacate		0.48		1.52			
M24			Veta Malacate	El Malacate		0.08		0.04			

Tabla 5. Resultados de muestreo de la mina El Malacate a partir de análisis geoquímico multielemental.

Microtermometría

Área el Malacate.

Los minerales estudiados fueron cuarzo de ganga mineral, las inclusiones fluidas fueron del tipo liquido + vapor (L+V), con un predominio de la fase liquida.

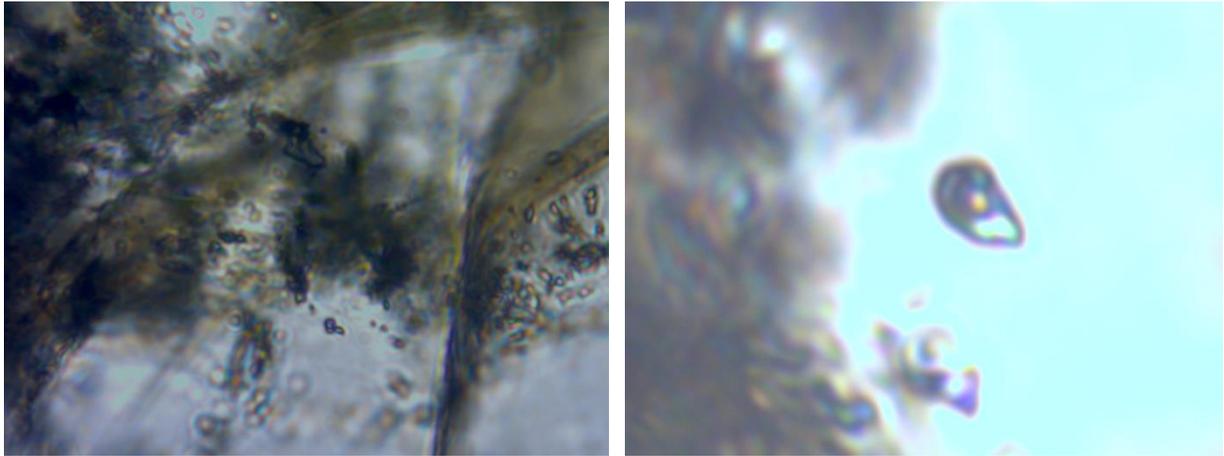


Figura 39. Micro placa fotográfica de cuarzo de la muestra HM # 1 de la mina el Malacate la Huacana Mich. Tamaño de la inclusión 10 micrones.

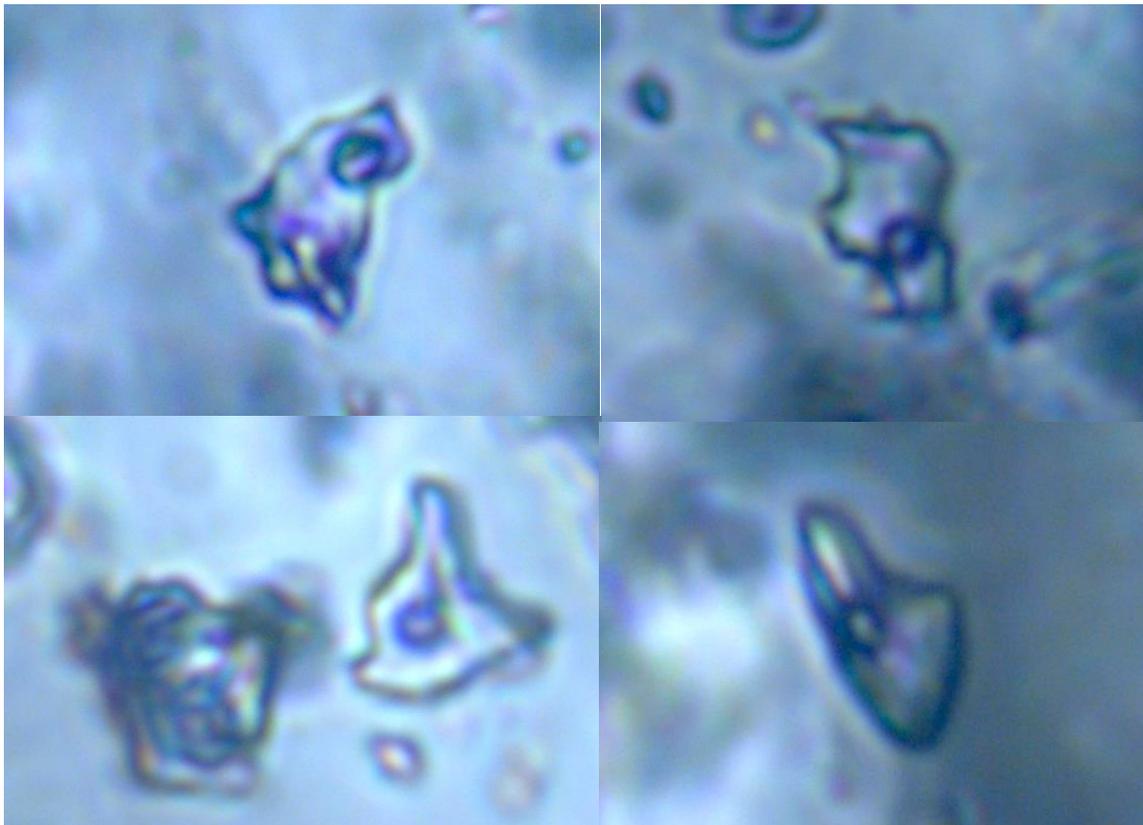


Figura 40. Micro placa fotográfica de cuarzo de la muestra HM # 2 de la mina el Malacate, la Huacana Mich, Tamaño de las inclusiones 50 micrones.

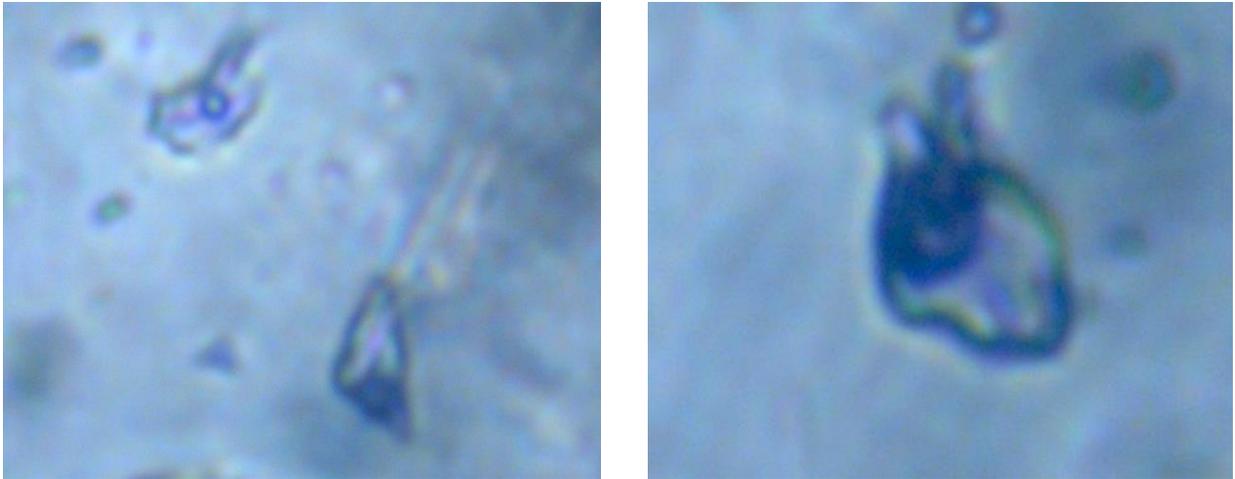


Figura 41. Micro placa fotográfica de cuarzo de la muestra HM # 3 de la mina el Malacate, la Huacana Mich. Tamaño de las inclusiones 50 micrones.

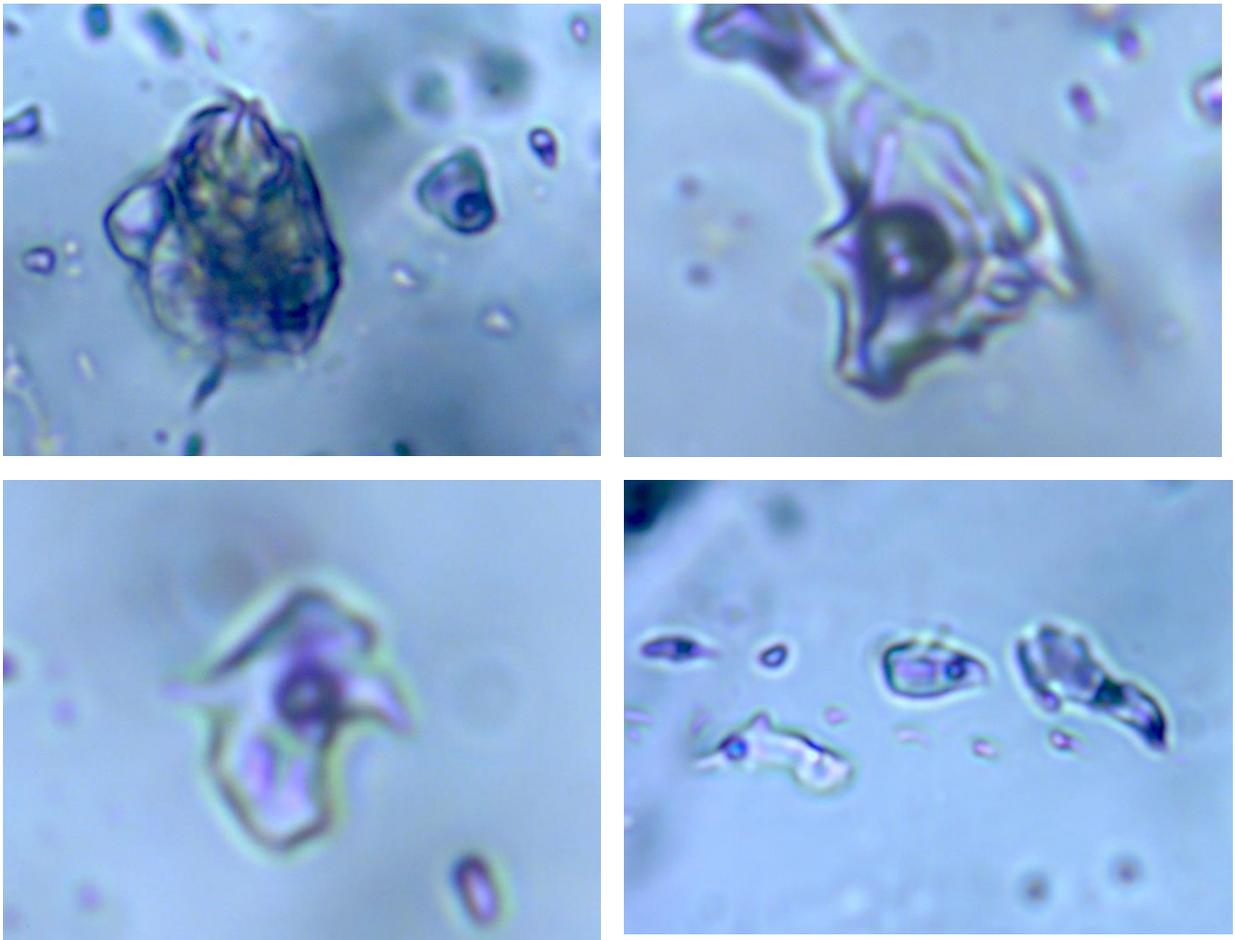
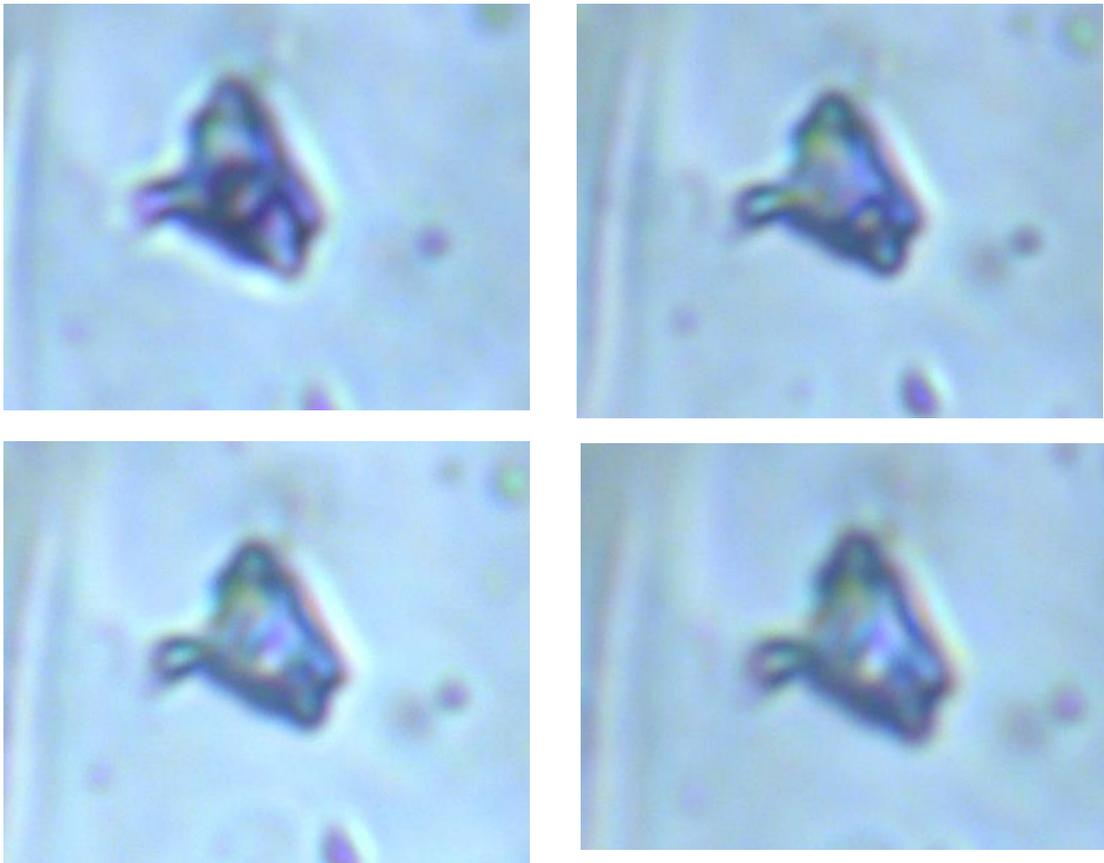


Figura 42. Micro placa fotográfica de cuarzo de la muestra HM # 4 de la mina el Malacate la Huacana Mich. Tamaño de las inclusiones 50 micrones.



*Figura 43. Micro placa fotográfica de cuarzo de la muestra HM # 5 de la mina el Malacate la Huacana Mich.
Tamaño de las inclusiones 50 micrones.*

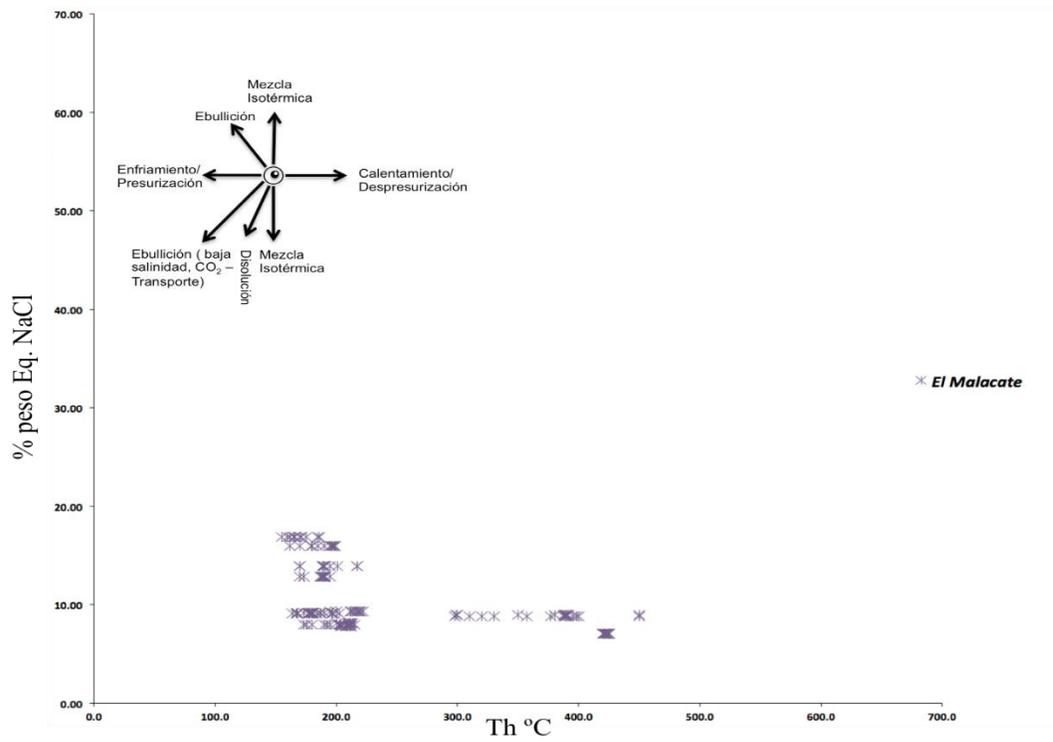


Figura 44. Diagrama que muestra el comportamiento de la salinidad & temperatura de homogeneización para las muestras analizadas de La Mina El Malacate.

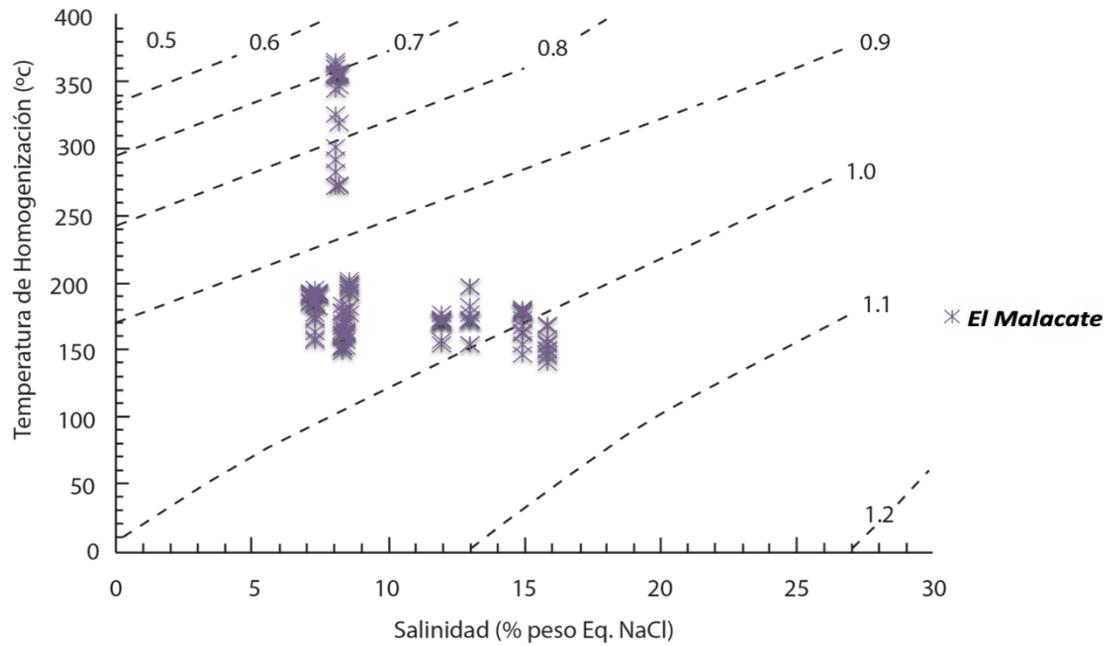


Figura 45. Diagrama que muestra el comportamiento de la salinidad & temperatura de homogeneización con curvas de iso-densidades para las muestras analizadas de La Mina El Malacate

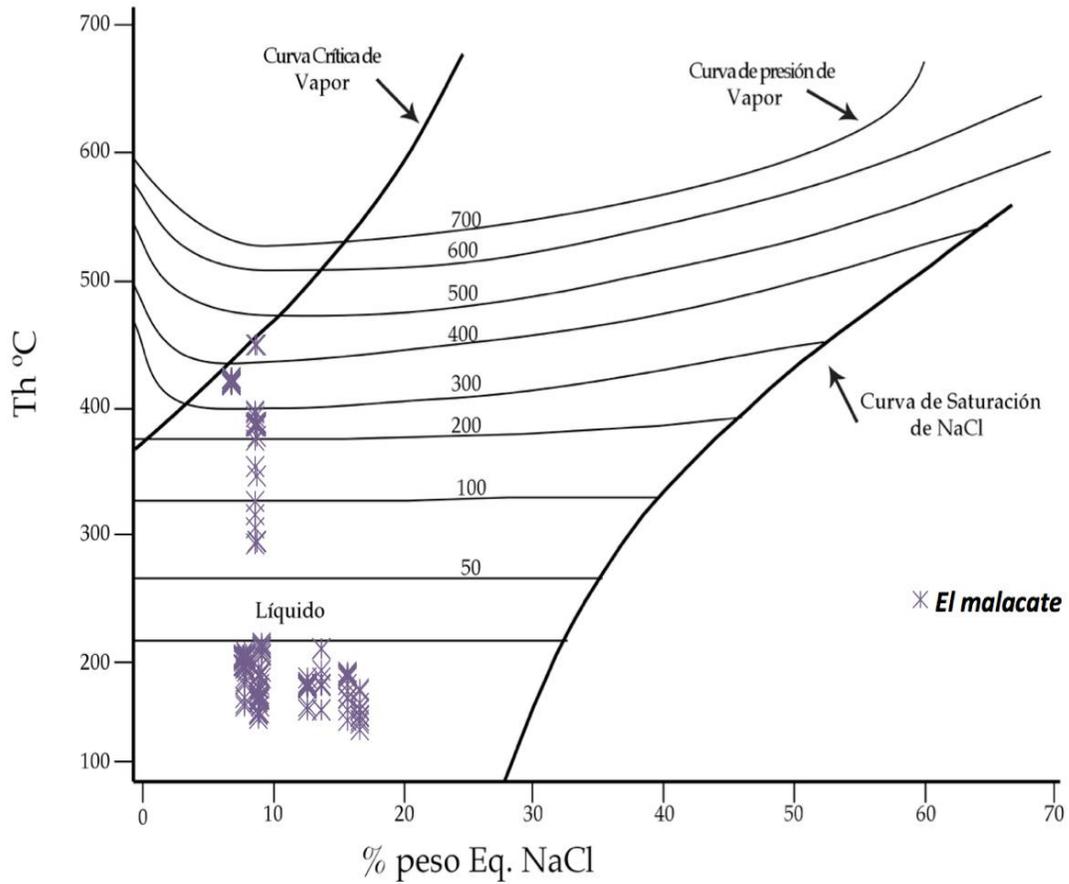


Figura 46. Diagrama que muestra el comportamiento de la salinidad & temperatura de homogeneización con curvas de isobaras para las muestras analizadas de La Mina El Malacate.

Muestra Mineral	HM-1			HM-2			HM-3			HM-4			HM-5			HM-7		
	Cuarzo			Cuarzo			Cuarzo			Cuarzo			Cuarzo			Cuarzo		
	Th°C	Tff°C	NaCl%	Th°C	Tff°C	NaCl%												
422.00	-4.4	7.02	210.00	-5.20	8.14	390.00	-5.70	8.81	220.00	-6.10	9.34	201.00	-10.00	13.94	155.00	-13.00	16.89	
425.00	-4.4	7.02	211.00	-5.20	8.14	389.00	-5.70	8.81	222.00	-6.10	9.34	189.00	-10.00	13.94	186.00	-13.00	16.89	
423.00	-4.4	7.02	211.00	-5.20	8.14	388.00	-5.70	8.81	219.00	-6.10	9.34	217.00	-10.00	13.94	185.00	-13.00	16.89	
422.00	-4.4	7.02	210.00	-5.20	8.14	389.00	-5.70	8.81	218.00	-6.10	9.34	170.00	-10.00	13.94	160.00	-13.00	16.89	
422.00	-4.4	7.02	211.00	-5.20	8.14	377.00	-5.70	8.81	217.00	-6.10	9.34	170.00	-10.00	13.94	165.00	-13.00	16.89	
425.00	-4.4	7.02	212.00	-5.20	8.14	400.00	-5.70	8.81	215.00	-6.10	9.34	217.00	-10.00	13.94	170.00	-13.00	16.89	
424.00	-4.4	7.02	213.00	-5.20	8.14	395.00	-5.70	8.81	212.00	-6.10	9.34	189.00	-10.00	13.94	171.00	-13.00	16.89	
421.00	-4.4	7.02	211.00	-5.20	8.14	398.00	-5.70	8.81	212.00	-6.10	9.34	190.00	-10.00	13.94	175.00	-13.00	16.89	
420.00	-4.4	7.02	200.00	-5.20	8.14	450.00	-5.70	8.81	213.00	-6.10	9.34	195.00	-10.00	13.94	162.00	-13.00	16.89	
421.00	-4.4	7.02	190.00	-5.10	8.00	357.00	-5.70	8.81	200.00	-6.10	9.34	189.00	-10.00	13.94	165.00	-13.00	16.89	
420.00	-4.4	7.02	192.00	-5.10	8.00	298.00	-5.70	8.81	195.00	-6.10	9.34	190.00	-10.00	13.94	166.00	-13.00	16.89	
422.00	-4.4	7.02	195.00	-5.10	8.00	330.00	-5.70	8.81	190.00	-6.00	9.21	190.00	-10.00	13.94	170.00	-12.00	15.96	
423.00	-4.4	7.02	180.00	-5.10	8.00	320.00	-5.70	8.81	197.00	-6.00	9.21	170.00	-9.00	12.85	162.00	-12.00	15.96	
425.00	-4.4	7.02	173.00	-5.10	8.00	310.00	-5.70	8.81	180.00	-6.00	9.21	173.00	-9.00	12.85	179.00	-12.00	15.96	
424.00	-4.4	7.02	215.00	-5.10	8.00	450.00	-5.80	8.95	181.00	-6.00	9.21	189.00	-9.00	12.85	180.00	-12.00	15.96	
420.00	-4.4	7.02	175.00	-5.10	8.00	299.00	-5.80	8.95	179.00	-6.00	9.21	189.00	-9.00	12.85	185.00	-12.00	15.96	
425.00	-4.4	7.02	202.00	-5.10	8.00	300.00	-5.80	8.95	173.00	-6.00	9.21	188.00	-9.00	12.85	190.00	-12.00	15.96	
421.00	-4.4	7.02	204.00	-5.10	8.00	350.00	-5.80	8.95	178.00	-6.00	9.21	188.00	-9.00	12.85	195.00	-12.00	15.96	
420.00	-4.4	7.02	203.00	-5.10	8.00	380.00	-5.80	8.95	179.00	-6.00	9.21	187.00	-9.00	12.85	196.00	-12.00	15.96	
421.00	-4.4	7.02	204.00	-5.10	8.00	388.00	-5.80	8.95	187.00	-6.00	9.21	189.00	-9.00	12.85	198.00	-12.00	15.96	
422.00	-4.4	7.02	204.00	-5.00	7.86	390.00	-5.80	8.95	168.00	-6.00	9.21	189.00	-9.00	12.85	199.00	-12.00	15.96	
			212.00	-5.00	7.86	389.00	-5.80	8.95	168.00	-5.90	9.08	190.00	-9.00	12.85	196.00	-12.00	15.96	
			212.00	-5.00	7.86	390.00	-5.80	8.95	164.00	-5.90	9.08	190.00	-9.00	12.85	198.00	-12.00	15.96	
			204.00	-5.00	7.86	390.00	-5.80	8.95	168.00	-5.90	9.08	190.00	-9.00	12.85	197.00	-12.00	15.96	
			205.00	-5.00	7.86	391.00	-5.80	8.95	167.00	-5.90	9.08	191.00	-9.00	12.85				
			208.00	-5.00	7.86				177.00	-5.90	9.08	195.00	-9.00	12.85				
			209.00	-5.00	7.86				178.00	-5.90	9.08							
			210.00	-5.00	7.86				179.00	-5.90	9.08							
			211.00	-5.00	7.86				196.00	-5.90	9.08							
			211.00	-5.00	7.86				177.00	-5.90	9.08							
			212.00	-5.00	7.86				197.00	-5.90	9.08							
									181.00	-5.90	9.08							
									177.00	-5.90	9.08							

										187.00	-5.90	9.08						
										168.00	-5.90	9.08						
										202.00	-5.90	9.08						
										184.00	-5.90	9.08						
MAXIMO	425.00	-4.40	7.02	215.00	-5.00	8.14	450.00	-5.70	8.95	222.00	-5.90	9.34	217.00	-9.00	13.94	199.00	-12.00	16.89
PROMEDIO	422.29	-4.40	7.02	203.87	-5.09	7.99	372.32	-5.74	8.87	189.86	-5.99	9.19	189.42	-9.46	13.35	179.38	-12.46	16.39
MINIMO	420.00	-4.40	7.02	173.00	-5.20	7.86	298.00	-5.80	8.81	164.00	-6.10	9.08	170.00	-10.00	12.85	155.00	-13.00	15.96
DESV.STD	1.79	0.00	0.00	11.14	0.08	0.11	41.98	0.05	0.07	18.03	0.09	0.11	11.20	0.51	0.55	14.50	0.51	0.48
RANGO	5.00	0.00	0.00	42.00	0.20	0.27	152.00	0.10	0.13	58.00	0.20	0.26	47.00	1.00	1.09	44.00	1.00	0.94
MUESTRAS	21			31			25			37			26			24		

Tabla 6. Resultados microtermométricos de inclusiones fluidas en la mina Malacate Las Huacana Mich.

MUESTRA MINERAL #		Th(°C)			Tff(°C)			Salinidad (Wt%NaCl eq)			
		Max	Media	Min	Max	Media	Min	Max	Media	Min	
HM-1	CUARZO	21	425.00	422.29	420.00	-4.40	-4.40	-4.40	7.00	7.00	7.02
HM-2	CUARZO	31	215.00	203.87	173.00	-5.00	-5.09	-5.20	8.10	8.00	7.86
HM-3	CUARZO	25	450.00	372.32	298.00	-5.70	-5.74	-5.80	8.90	8.90	8.81
HM-4	CUARZO	37	222.00	189.86	164.00	-5.90	-5.99	-6.10	9.34	9.19	9.08
HM-5	CUARZO	26	217.00	189.42	170.00	-9.00	-9.46	-10.00	13.94	13.35	12.85
HM-7	CUARZO	24	199.00	179.38	155.00	-12.00	-12.46	-13.00	16.89	16.39	15.96

Tabla 7. Resultados microtermométricos resumidos de inclusiones fluidas en la mina Malacate Las Huacana Mich.

Las temperaturas de fusión final (Tff) presentan un rango que va de $T_{ff} = -4.4$ a -12.4 lo que corresponde a salinidades del orden de 7 % a 16.8 % peso Equivalente NaCl. Las mismas inclusiones fluidas al ser calentadas a alta temperatura presentaron temperaturas de homogeneización (Th) en un rango de $T_h = 155$ °C a 450 °C. Lo anterior denota un sistema hidrotermal de alta a baja temperatura y salinidades medias a bajas, los fluidos más calientes corresponden a las salinidades más bajas en donde al orden de los 200 °C, el fluido aumenta su densidad pasando de 0.7 a 1.03 gr/cm³, y pierde considerablemente su presión pasando de 420 bar a 25 bars. Todo lo anterior denota un fluido que estuvo sujeto a un fenómeno de ebullición.

Área de La China y La Esmeralda

Los minerales estudiados fueron cuarzo de ganga mineral, las inclusiones fluidas fueron del tipo líquido + vapor (L+V), y a líquido + vapor + sólido (cubo de NaCl) con un predominio de la fase líquida, mientras que, para la zona de La Esmeralda, los minerales estudiados fueron cuarzo de ganga mineral, las inclusiones fluidas fueron del tipo líquido + vapor (L+V), con un predominio de la fase líquida.

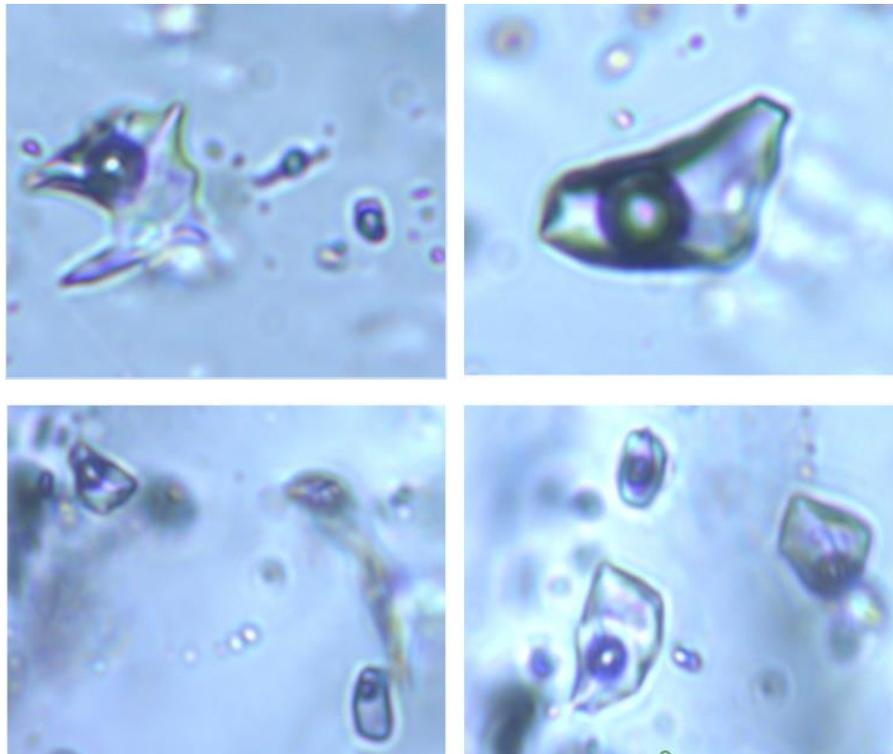


Figura 47. Micro placa fotográfica de cuarzo de la muestra HCH # 1 de la mina La China, la Huacana Mich. Tamaño de la inclusión 10 micrones.

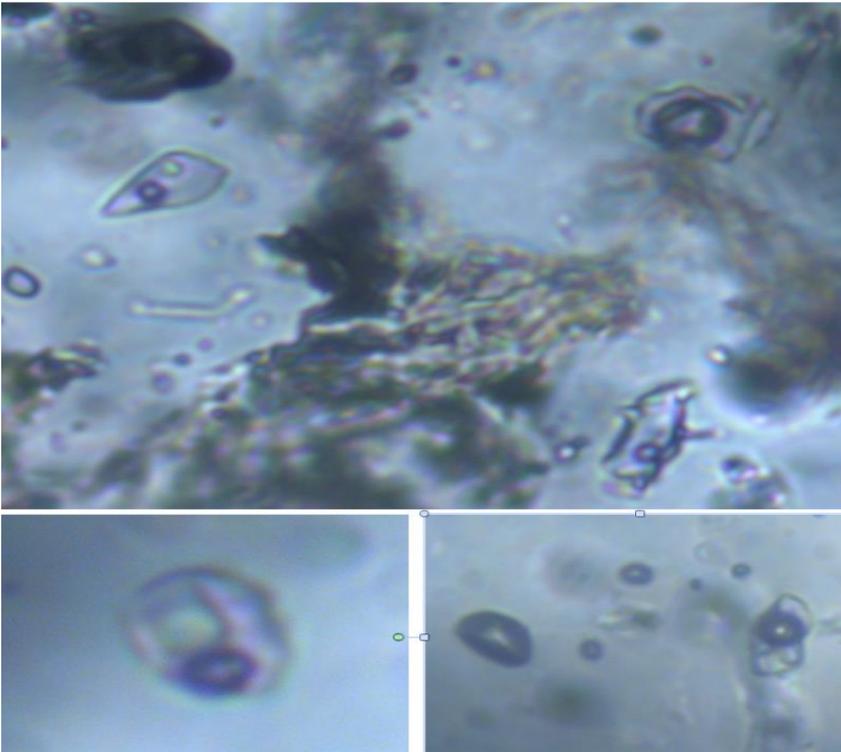
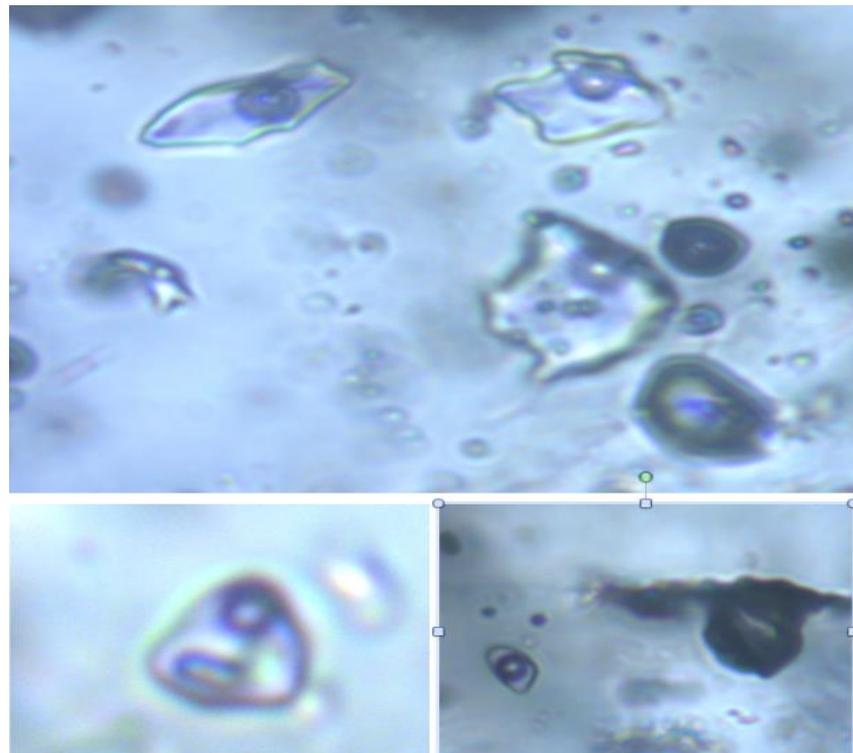


Figura 48. Micro placa fotográfica de cuarzo de la muestra HCH # 2 de la mina La China la Huacana Mich. Se observa un comportamiento heterogéneo en la relación de fases a L+V+S a V 100%, y L+V, lo que es un prueba de ebullición. Tamaño de la inclusión 15 micrones.

Figura 49. Micro placa fotografica de cuarzo de la muestra HCH # 2 de la mian La China la Huacana Mich.,:Se observa un comportamiento heterogeneo en la relacion de fases a L+V+S a V 100%, y L+V, lo que es un prueba de ebullición. Tamaño de la inclusion 15 micrones.



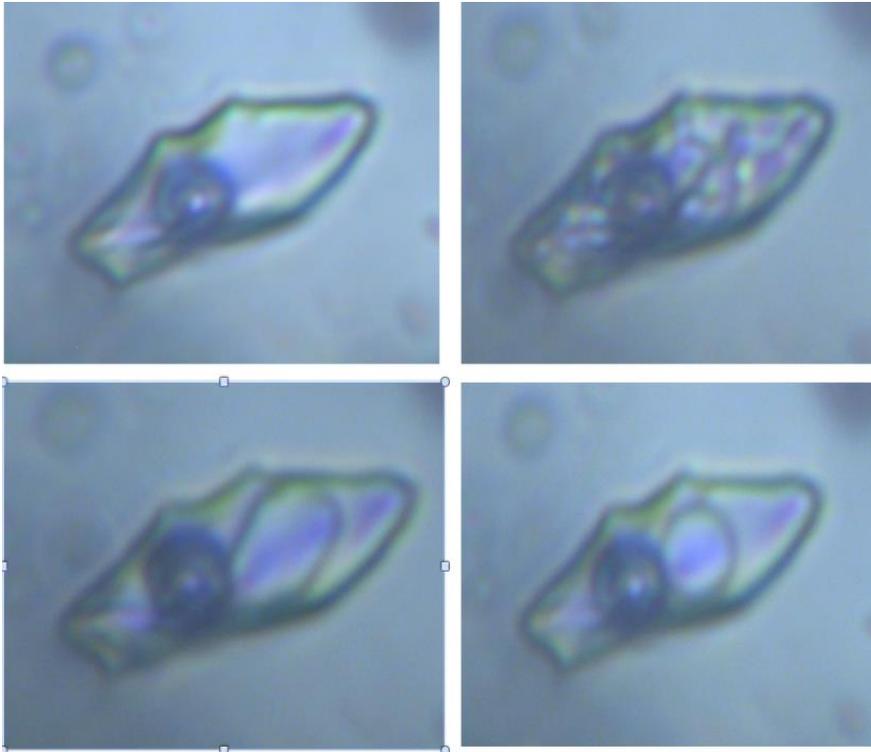
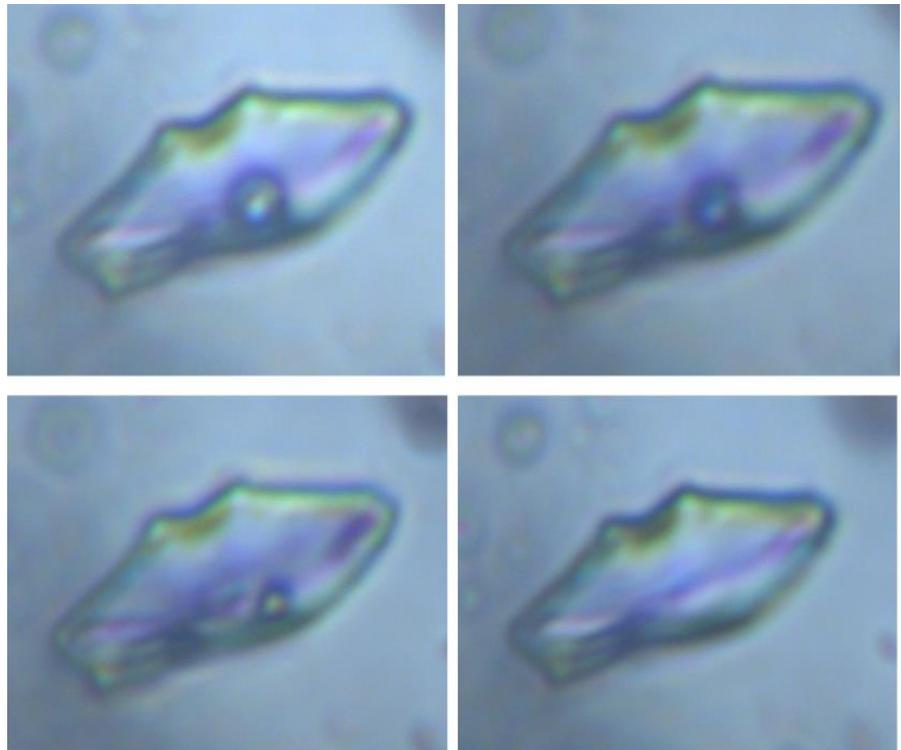


Figura 50. Micro placa fotográfica de cuarzo de la muestra HCM # 1 de la mina La China la Huacana Mich. Se observa una inclusión a L+V. Tamaño de la inclusión 15 micrones. Se muestra una secuencia fotográfica de una inclusión a L+V a 205^oc luego a -21.1 °C que es la temperatura eutéctica del sistema H₂O-NaCl., luego a - 10^oC y finalmente a - 6.8 °C que es la fusión final del hielo que indica la salinidad del fluido que en este caso es de 10.24 % Eq. Peso NaCl.

Figura 51. Micro placa fotográfica de cuarzo de la muestra HCM # 1 de la mina La China la Huacana Mich. Se observa una inclusión a L+V. Tamaño de la inclusión 15 micrones, donde: con el calentamiento progresivo la fase vapor va disminuyendo hasta desaparecer a los 280 °C que es la temperatura de homogeneización la fase líquida (dado que desaparece la fase vapor dentro de la líquida).



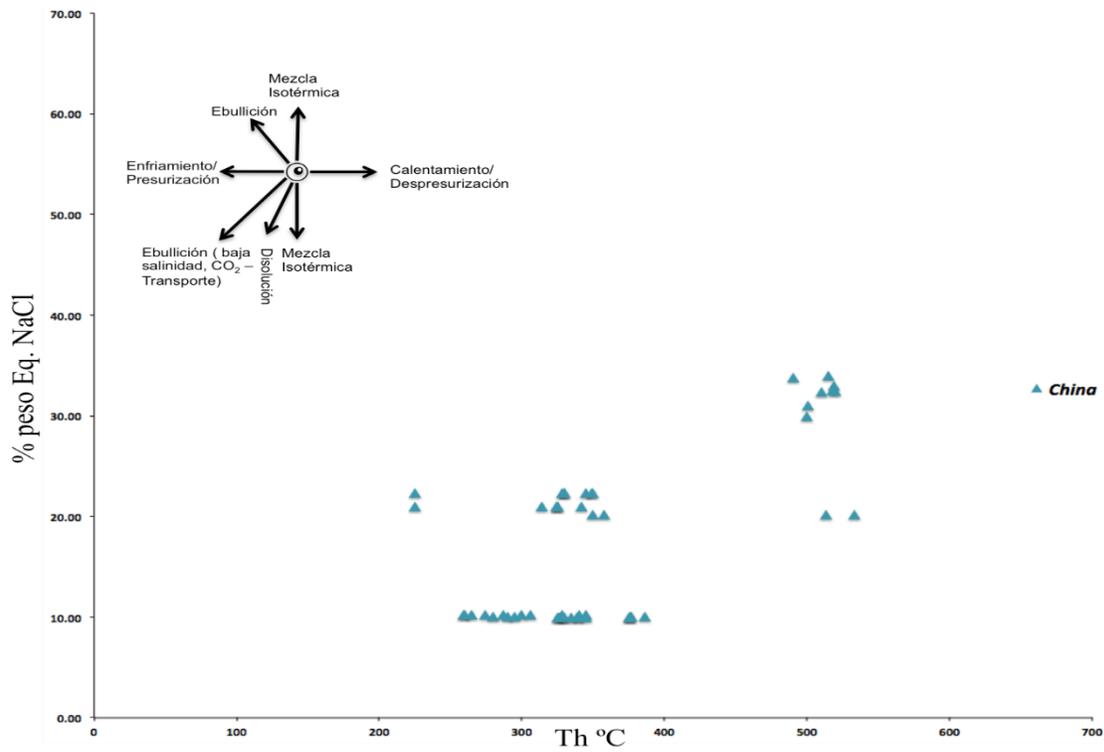


Figura 52. Diagrama que muestra el comportamiento de la salinidad & temperatura de homogeneización para las muestras analizadas de La Mina La China.

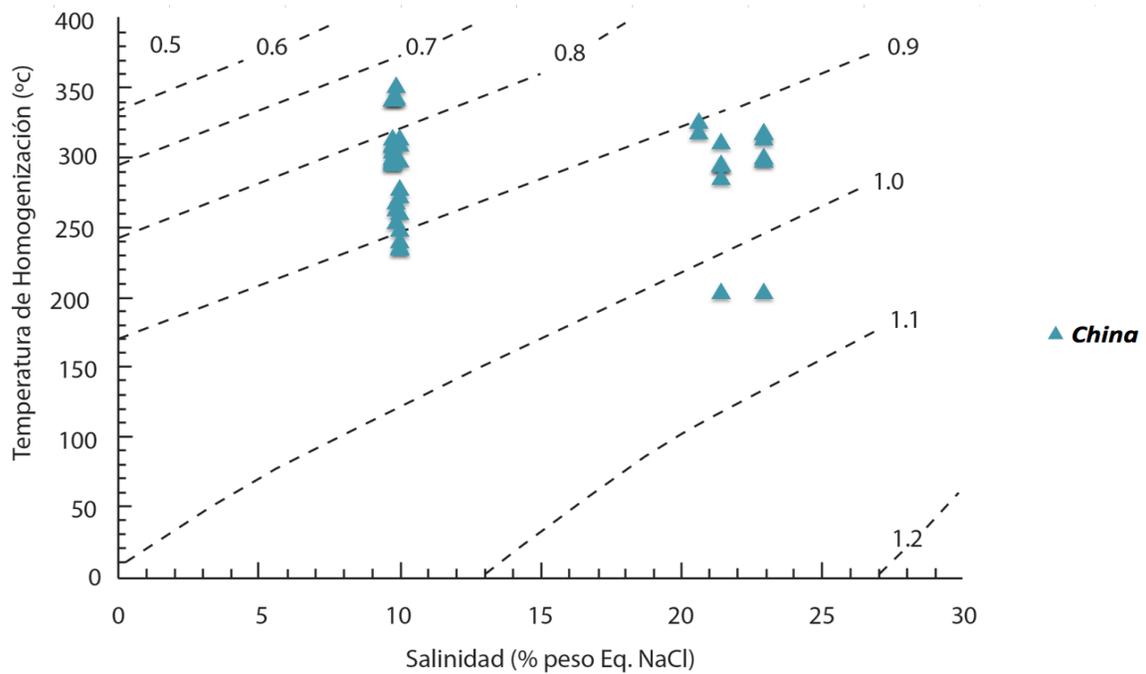


Figura 53. Diagrama que muestra el comportamiento de la salinidad & temperatura de homogeneización con curvas de iso-densidades para las muestras analizadas de La Mina La China.

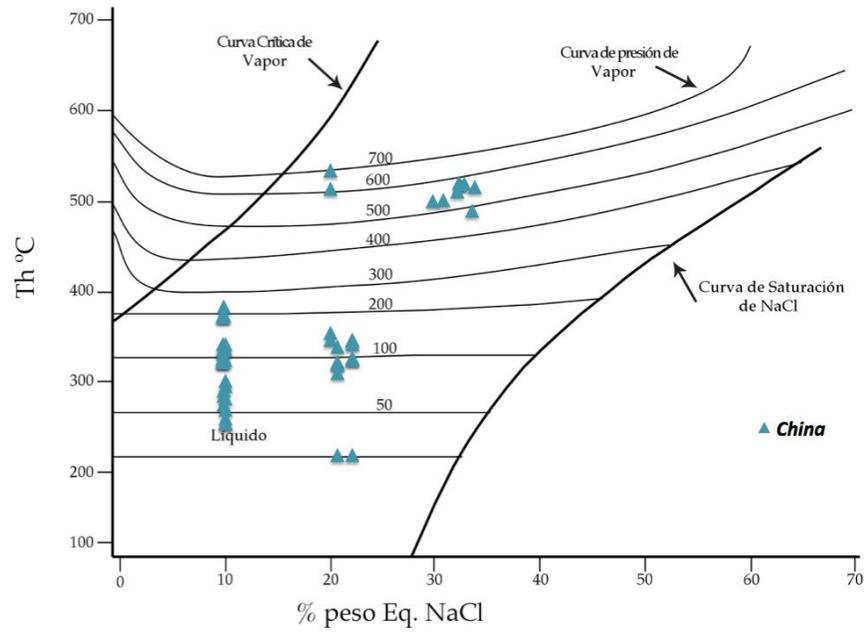


Figura 54. Diagrama que muestra el comportamiento de la salinidad & temperatura de homogeneización con curvas de iso - baras para las muestras analizadas de La China.

Muestra Mineral	HCH			HCH-2		
	Cuarzo			Cuarzo		
	Th°C	Tff°C	NaCl%	Th°C	Tff°C	NaCl%
	265.00	-6.80	10.24	358.00	-17.00	20.22
	260.00	-6.80	10.24	350.00	-17.00	20.22
	300.00	-6.80	10.24	513.00	-17.00	20.22
	259.00	-6.80	10.24	533.00	-17.00	20.22
	274.00	-6.80	10.24	325.00	-18.00	20.97
	287.00	-6.80	10.24	314.00	-18.00	20.97
	306.00	-6.80	10.24	325.00	-18.00	20.97
	340.00	-6.80	10.24	342.00	-18.00	20.97
	345.00	-6.80	10.24	324.00	-18.00	20.97
	328.00	-6.80	10.24	225.00	-18.00	20.97
	280.00	-6.70	10.11	330.00	-20.00	22.38
	290.00	-6.70	10.11	350.00	-20.00	22.38
	295.00	-6.70	10.11	349.00	-20.00	22.38
	386.00	-6.70	10.11	345.00	-20.00	22.38
	376.00	-6.70	10.11	225.00	-20.00	22.38
	377.00	-6.70	10.11	328.00	-20.00	22.38
	376.00	-6.60	9.98	330.00	-20.00	22.38
	375.00	-6.60	9.98	519.00	223.00	33.00
	345.00	-6.60	9.98	520.00	220.00	32.50
	340.00	-6.60	9.98	518.00	225.00	32.60
	339.00	-6.60	9.98	515.00	230.00	34.00
	335.00	-6.60	9.98	510.00	230.00	32.40
	330.00	-6.60	9.98	500.00	144.00	30.00
	329.00	-6.60	9.98	501.00	164.00	31.00
	325.00	-6.60	9.98	490.00	240.00	33.80
	326.00	-6.60	9.98			
	327.00	-6.60	9.98			
MAXIMO	386.00	-6.80	1.24	533.00	240.00	34.00
PROMEDIO	322.72	-6.70	10.10	397.56	54.40	24.91
MINIMO	259.00	-6.60	9.98	225.00	-20.00	20.22
DESV.STD						
RANGO						
MUESTRAS		27			25	

MUESTRA MINERAL #	Th(°C)			Tff(°C)			Salinidad (Wt%NaCl eq)			
	Max	Media	Min	Max	Media	Min	Max	Media	Min	
HCH CUARZO	27	386.00	322.78	259.00	-6.60	-6.70	-6.80	10.24	10.10	9.98
HCH-2 CUARZO	25	533.00	397.56	225.00	240.00	54.40	-20.00	34.00	24.90	20.22

Tabla 8. Resultados microtermométricos de inclusiones fluidas en la mina En La China (CHINA HCH2 Y HCH), Las Huacana Mich.

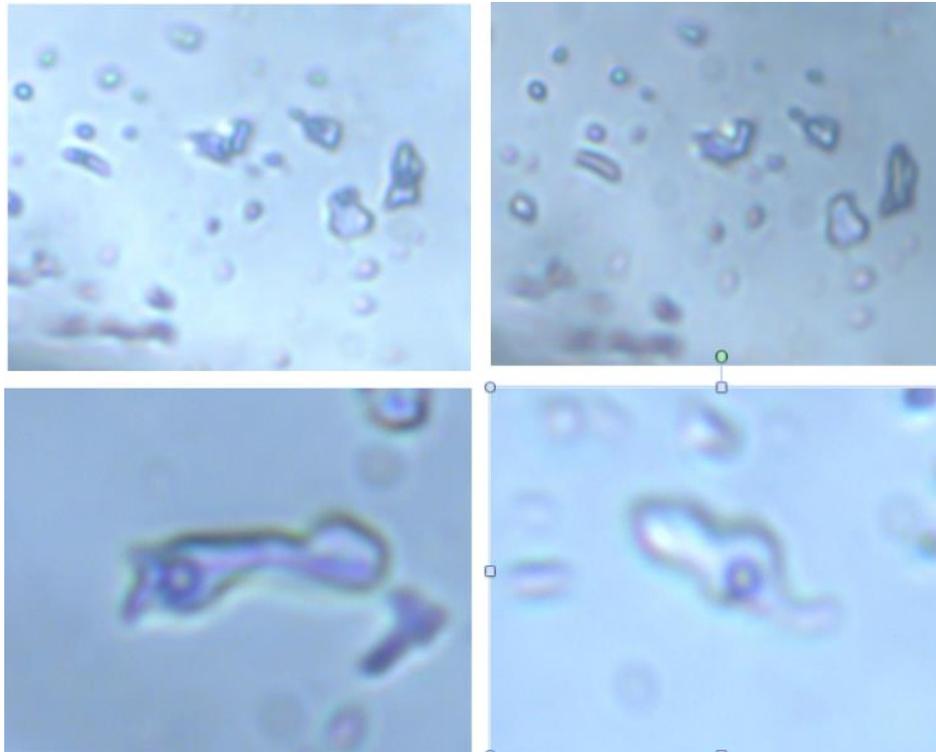


Figura 55. Micro placa fotográfica de cuarzo de la muestra HE # 1 de la mina La Esmeralda la Huacana Mich. Se observa una inclusión a L+V. Tamaño de la inclusión 5 micrones.

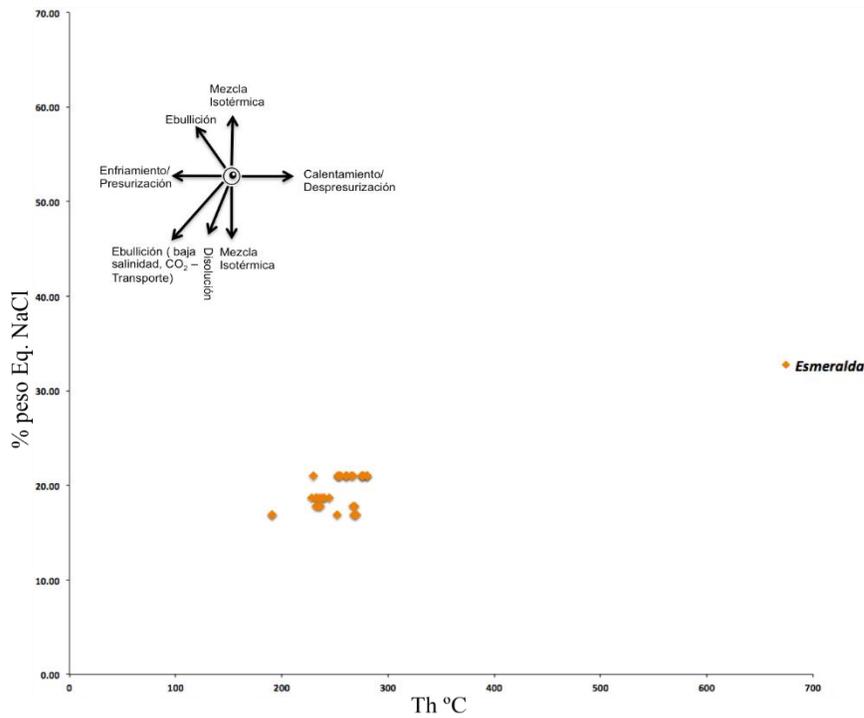


Figura 56. Diagrama que muestra el comportamiento de la salinidad & temperatura de homogeneización para las muestras analizadas de La Mina La Esmeralda.

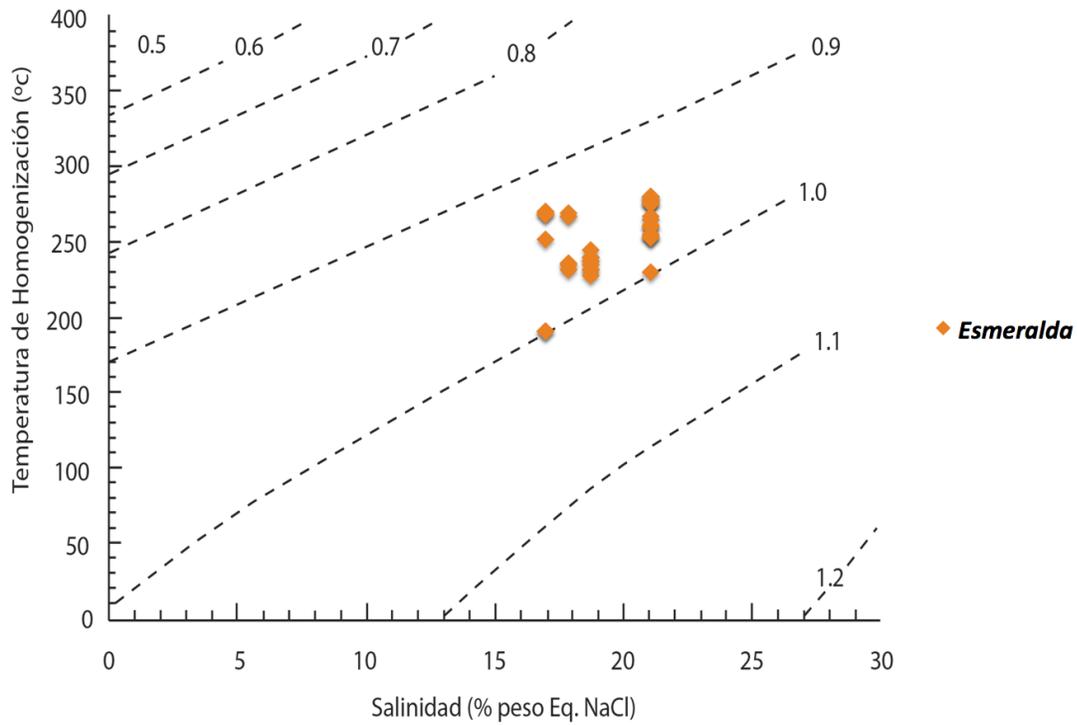


Figura 57. Diagrama que muestra el comportamiento de la salinidad & temperatura de homogeneización con curvas de iso-densidades para las muestras analizadas de La Mina La Esmeralda.

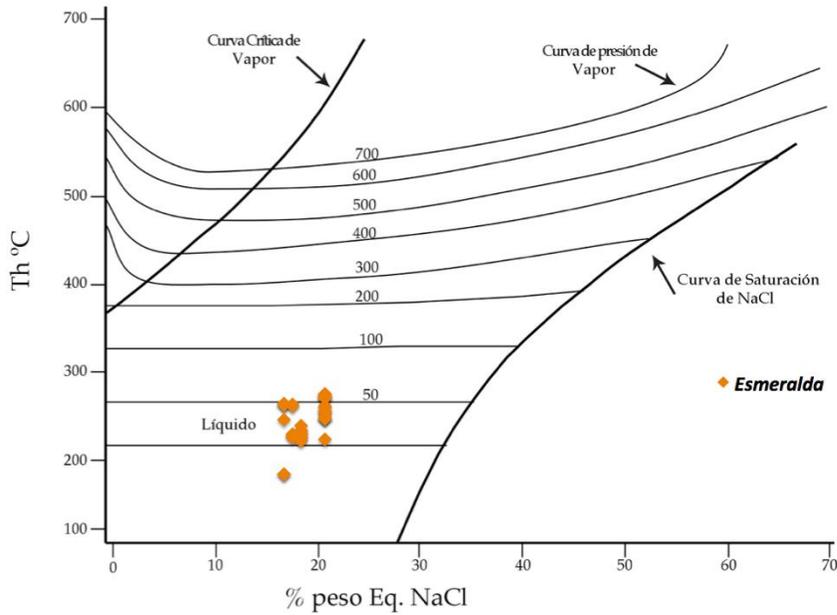


Figura 58. Diagrama que muestra el comportamiento de la salinidad & temperatura de homogeneización con curvas de iso-barras para las muestras analizadas de La Esmeralda.

Muestra	HE-1			HE-2		
	Cuarzo			Cuarzo		
Mineral	Th°C	Tff°C	NaCl%	Th°C	Tff°C	NaCl%
	252.00	-13.00	16.89	280.00	-18.00	20.97
	269.00	-13.00	16.89	280.00	-18.00	20.97
	270.00	-13.00	16.89	253.00	-18.00	20.97
	191.00	-13.00	16.89	230.00	-18.00	20.97
	191.00	-13.00	16.89	253.00	-18.00	20.97
	268.00	-13.00	16.89	254.00	-18.00	20.97
	267.00	-14.00	17.79	255.00	-18.00	20.97
	269.00	-14.00	17.79	260.00	-18.00	20.97
	232.00	-14.00	17.79	261.00	-18.00	20.97
	235.00	-14.00	17.79	260.00	-18.00	20.97
	236.00	-14.00	17.79	267.00	-18.00	20.97
	240.00	-15.00	18.63	265.00	-18.00	20.97
	245.00	-15.00	18.63	280.00	-18.00	20.97
	232.00	-15.00	18.63	275.00	-18.00	20.97
	237.00	-15.00	18.63	277.00	-18.00	20.97
	232.00	-15.00	18.63	276.00	-18.00	20.97
	235.00	-15.00	18.63	275.00	-18.00	20.97
	240.00	-15.00	18.63			
	228.00	-15.00	18.63			
MAXIMO	270.00	-13.00	18.63	280.00	-18.00	20.97
PROMEDIO	240.47	-14.11	17.86	264.76	-18.00	20.97
MINIMO	191.00	-15.00	16.89	230.00	-18.00	20.97
DESV.STD						
RANGO						
MUESTRAS		19			17	

MUESTRA	MINERAL	#	Th(°C)			Tff(°C)			Salinidad (Wt%NaCl eq)		
			Max	Media	Min	Max	Media	Min	Max	Media	Min
HE-1	CUARZO	19	270.00	240.47	191.00	-13.00	-14.11	-15.00	18.60	17.90	16.89
HE-2	CUARZO	17	280.00	264.76	230.00	-18.00	-18.00	-18.00	21.00	21.00	20.97

Tabla 9. Resultados microtermométricos de inclusiones fluidas en la mina Esmeralda (HE-1 y 2), Las Huacana Mich.

Los fluidos sub-saturados a baja temperaturas de fusión final (Tff) presentan un rango que va de $T_{ff} = -6.6$ a -6.6 lo que corresponde a salinidades del orden de 9.98 % a 10.24 % paso Equivalente NaCl. Las mismas inclusiones fluidas al ser calentadas a alta temperatura presentaron temperaturas de homogeneización (Th) en un rango de $T_h = 259$ °C a 386 °C.

En la muestra HCH-2 se presenta ebullición con fluidos sub-saturados y saturados, en estos últimos las temperaturas de fusión final (Tff) presentan un rango que va de $T_{ff} = -17$ a -20 lo que corresponde a salinidades del orden de 20 % a 22.38 % paso Equivalente NaCl. Las inclusiones del tipo S+L+V presentan fusiones del cubo de sal en el rango de 144 °C a 240 °C lo que equivale a salinidades de 30 al 34 % NaCl., y con T_h de 490 °C a 520 °C., lo que significa que se está ante la presencia de fluidos magmáticos de ebullición, condición muy buena para la precipitación mineral. Para la zona de La Esmeralda los fluidos sub-saturados a baja temperatura de fusión final (Tff) presentan un rango que va de $T_{ff} = -13$ a -18 lo que corresponde a salinidades del orden de 16.89 % a 20.97 % paso Equivalente NaCl. Las mismas inclusiones fluidas al ser calentadas a alta temperatura presentaron temperaturas de homogeneización (Th) en un rango de $T_h = 230$ °C a 386 °C.

Lo anterior denota un sistema hidrotermal de alta temperatura y salinidades altas, los fluidos más calientes corresponden a las salinidades altas muy agrupadas con poca dispersión y temperaturas altas con presiones del orden de los 50 bars., y densidad pasando de 0.92 a 1.0 gr/cm³. Todo lo anterior denota un fluido que estuvo sujeto a un fenómeno de ebullición.

Metalogenia

Zonación

La mineralización tiene su origen por el emplazamiento de cuerpos intrusivos de afinidad calciocalina, dicho proceso, generó diferentes eventos hidrotermales que alteraron los paquetes de rocas intrusivas y porfídicas, de igual forma, se dio el desarrollo de un depósito epitermal. A partir de trabajo de cartografía y fotointerpretación, se identificó una zonación para el caso de este depósito mineral, la cual se ajusta en muchas zonas con la tipología ideal de un yacimiento tipo porfido. Los contactos entre estas zonas, no se identifican de forma clara y la mineralogía dominante se encuentra controlada por la profundidad, temperaturas y composición de fluidos hidrotermales. A continuación, se describe la zonación:

- a) Zona de intrusivo y andesita porfídica: se trata de paquetes de intrusivos de composición monzo-granítica, granítica y granodiorítica, así como pórfidos andesíticos sin mineralización metálica aparente, ni alteraciones hidrotermales, solo con pequeños indicios de oxidación de los minerales ferromagnesianos y afectación producto de la erosión.
- b) Zona de pórfido: consiste en cuerpos intrusivos de composición monzogranítica, granítica y granodiorítica, así como pórfidos andesíticos con alteraciones hidrotermales aparentes, siendo el caso de las alteraciones propilítica, argílica y filica, las de mayor abundancia, la alteración potásica se presenta en pequeños afloramientos interior mina, lo cual puede representar que estas alteraciones de mayor temperatura se encuentran a mayor profundidad, así como la zona metálica del pórfido, lo que representaría las leyes económicas de diseminados de cobre, molibdeno y oro. Igualmente, esta zona de pórfido, encajona vetillos de tipo stockwork.
- c) Zona del depósito epitermal: esta zona consiste en cuerpos tabulares bien definidos, compuestos por estructuras mineralizadas de tipo veta, brechas de falla y brechas tipo pipe. Dichas estructuras cuentan con mineralogías variadas, por ejemplo, las zonas de mayor temperatura presentan mineralogías de turmalina, cuarzo buggy, así como alteraciones de alta temperatura, asociadas a minerales metálicos como, calcopirita, bornita, calcosita y molibdenita. Las zonas de menor temperatura dentro del sistema epitermal, minerales como la calcita, que en ciertas zonas como en El Malacate, representan los niveles de ebullición, así como cuarzo y alteraciones de menor

temperatura asociadas a los metales base y preciosos, como cobre, plomo, zinc, plata y oro.

De esta forma, con la interpretación de la petrografía, mineragrafía, contenidos metálicos, microtermometría y paragénesis, se pueden definir zonaciones un poco más marcadas por la ubicación de diferentes tipos de mineralización, pero con cierta incertidumbre, debido a que las zonas de alteración hidrotermal, se van degradando a algunas de menor temperatura o gradando a algunas otras de mayor temperatura, sin marcar límites bien definidos. De forma general, se puede deducir, que los niveles superiores de la mina El Malacate, así como zonas de La Esmeralda, forman parte del sistema de menor temperatura, por arriba del nivel de ebullición, con mayor presencia de metales preciosos, por lo cual se puede ver que, en estas zonas, los fluidos, su temperatura, salinidad y presión, disminuía, pero la densidad del fluido aumenta conforme disminuyen los otros valores. Sin embargo, los niveles inferiores de El Malacate, así como las zonas de brechas en La China, La Esmeralda y El Reparó de Luna, se encuentran ligados a un sistema de mayor temperatura, el cual se encontraría debajo del nivel de ebullición, pero encima y directamente relacionado con el pórfido, en estas zonas los metales preciosos decrecen, pero los metales base aumentan, se observó que en estas zonas, los fluidos aparte de tener mayor temperatura, muestran mayor saturación de NaCl, una menor densidad y mayor presión, lo cual explicaría la mineralogía observada en estas zonas.

Sucesión de menas

A partir de la definición de los eventos paragenéticos y la zonación del depósito mineral, se propone una sucesión de eventos formadores de las menas metálicas. El sistema hidrotermal, al cual se encuentra asociado el depósito tipo epitermal y tipo pórfido, tiene su origen durante el Cenozoico, época durante la cual, el desarrollo del arco magmático que daría origen a la sierra madre del sur, provocara la intrusión de cuerpos intrusivos de afinidad calcialcalina. La intrusión de estos cuerpos generaría el desarrollo de actividad hidrotermal, la cual daría lugar a la alteración de estos intrusivos, así como otros plutones y rocas porfídicas preexistentes. Posteriormente, durante la fase tardía de esta actividad hidrotermal, vendría el desarrollo del sistema epitermal de intermedia – alta sulfuración. A continuación, se describe la sucesión:

- a) El desarrollo de un arco insular durante el cretácico inferior (hace 145 a 100 m.a.), provoco la formación de la secuencia vulnosedimentaria Zihuatanejo. Estas secuencias vulcanosedimentarias, que afloran en gran parte de la Sierra Madre del Sur, son resultado de una actividad magmática desarrollada en los límites de placas durante el cretácico inferior.
- b) La tectónica compresiva generada a finales del cretácico e inicios del paleógeno (hace 70 a 50 m.a.), provocaría una regresión marina, grandes sistemas de estructuras regionales (fallas normales y laterales NW – SE y NE – SW) y actividad magmática que daría lugar a los cuerpos porfídicos y derrames de composición andesítica.
- c) La actividad magmática Laramídica y post-Laramídica, durante el eoceno y el oligoceno (hace 40 a 20 m.a.), generaría la intrusión de cuerpos plutónicos de afinidad calcialcalina, dichos intrusivos provocarían el desarrollo de actividad hidrotermal.
- d) La actividad hidrotermal generada por los intrusivos, formó a su paso, las diferentes alteraciones presentes en este paquete de estas rocas, de esta forma, las menas metálicas de cobre, molibdeno y oro en su mayoría, quedaron depositadas en estas rocas intrusivas.
- e) El sistema hidrotermal, generaría un depósito tipo epitermal de sulfuración intermedia – alta, dichas condiciones quedan expuestas por los análisis de microtermometría, así como por la mineralogía metálica de mena (cobre, molibdeno, oro, plomo, zinc y plata), ganga (cuarzo buggy, calcita bladed, feldespato potásico, arcillas, sericita, turmalina, clorita y epidota) y alteraciones de altas temperatura (potásica, fílica, argílica y

propilítica), el sistema epitermal, generó mineralización de estructuras preexistentes, como fallas, fracturas y chimeneas, el resultado quedo en vetas, brechas de falla y brechas de tipo pipe.

- f) Los eventos de tectónica compresiva y distensiva pos-Laramídica, genero la reactivación de antiguos sistemas de fallas (NW – SE y NE – SW) y formación de otras nuevas (N – S), dichas estructuras se encuentran afectando los diferentes cuerpos mineralizados.

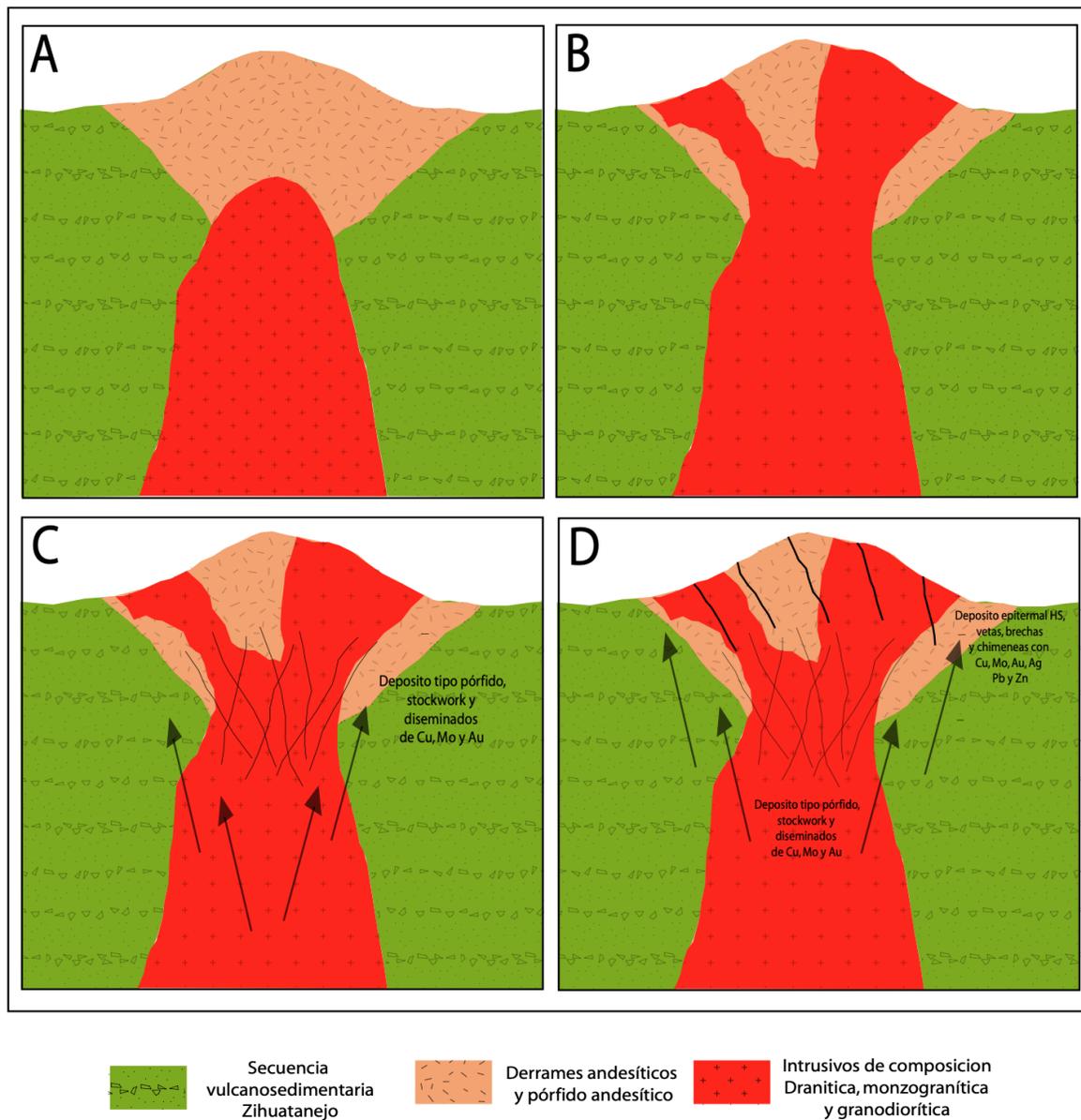


Tabla 59. Esquema resumido de la sucesion de menas en la región de La Huacana.

Capítulo VIII. Discusiones

La mineralización de cobre, corresponde a fases hidrotermales de alta temperatura, localizadas por debajo de los niveles de ebullición, dentro del entorno de emplazamiento de sistemas porfídicos de Cu-Mo. Es común que este tipo de sistemas magmático-hidrotermales presenten una relación con porciones más superficiales con sistemas epitermales que llegan a albergar mineralización de metales base, como Pb-Zn (por “debajo” del nivel de ebullición y “encima” del ámbito de los pórfidos) y depositación de metales preciosos como Au-Ag, por “encima” del nivel de ebullición; en este sentido, y derivado del conocimiento geológico de la zona.

El Plateado correspondería a una zona de sulfuración intermedia con presencia de metales base, la presencia de oro (que en la Mina Malacate es del orden de 1ppm) puede incrementarse significativamente hacia otras porciones de la región, especialmente porque han sido reconocidas “zonas diagnósticas” como la de ebullición en el nivel Sorpresa II de la Mina Malacate, así como en otras porciones de la región, como en el caso del área Baluarte, al sur del Reparó de Luna.

Cabe destacar que, la roca encajonante (wallrock) de la Mina Malacate, y de la mineralización de cobre de las vetas de dicha zona, corresponde a intrusivos graníticos, que con frecuencia son de tipo porfídico y con diseminación de sulfuros que podrían estar albergando un depósito diseminado de Cobre-Molibdeno.

En términos exploratorios, el nivel “Sorpresa” de la mina Malacate representa el “nivel de ebullición” del sistema epitermal, por encima del cual prevalecen los valores de oro presentes en las vetas de cuarzo que actualmente son explotadas, mientras que, “por debajo” de dicho nivel, el predominio es de metales base. Asimismo, conviene resaltar que en la periferia de la mina Malacate, el marco geológico está representado por *stocks* graníticos y brechas hidrotermales que hospedan, mayoritariamente, mineralización de cobre similar a la que se presenta en los grandes sistemas porfídicos, como aquellos que se encuentran en la franja de pórfidos del sur de Perú y Chile, en la cordillera de los Andes; es por esta razón que en el presente estudio se incluyeron muestras colectadas de los alrededores de la mina Malacate, específicamente en la zona conocida como La Esmeralda, localizada a 4.5 km en línea recta al poniente de la zona estudiada, con el fin de establecer criterios correlativos que sean extrapolables al *countryrock* de la mina Malacate.

Por lo tanto, el distrito la Huacana, la mina El Malacate se puede clasificar como un yacimiento epitermal ácido de sulfuración intermedia-alta, por encima de lo que puede representar la transición a sistemas porfídicos de mineralización Cu-Mo, como se muestra en la siguiente figura (figura 60).

El comportamiento microtermométrico de las muestras analizadas, consiste en condiciones de yacimientos epitermales de sulfuración intermedia – alta, con condiciones cercanas a las de un depósito tipo pórfido (figura 61), por lo cual, la zonación, se pudieron establecer zonas que ajustan a los modelos tradicionales de yacimientos tipo pórfido, con alteraciones hidrotermales y mineralogía semejantes, (figura 62).

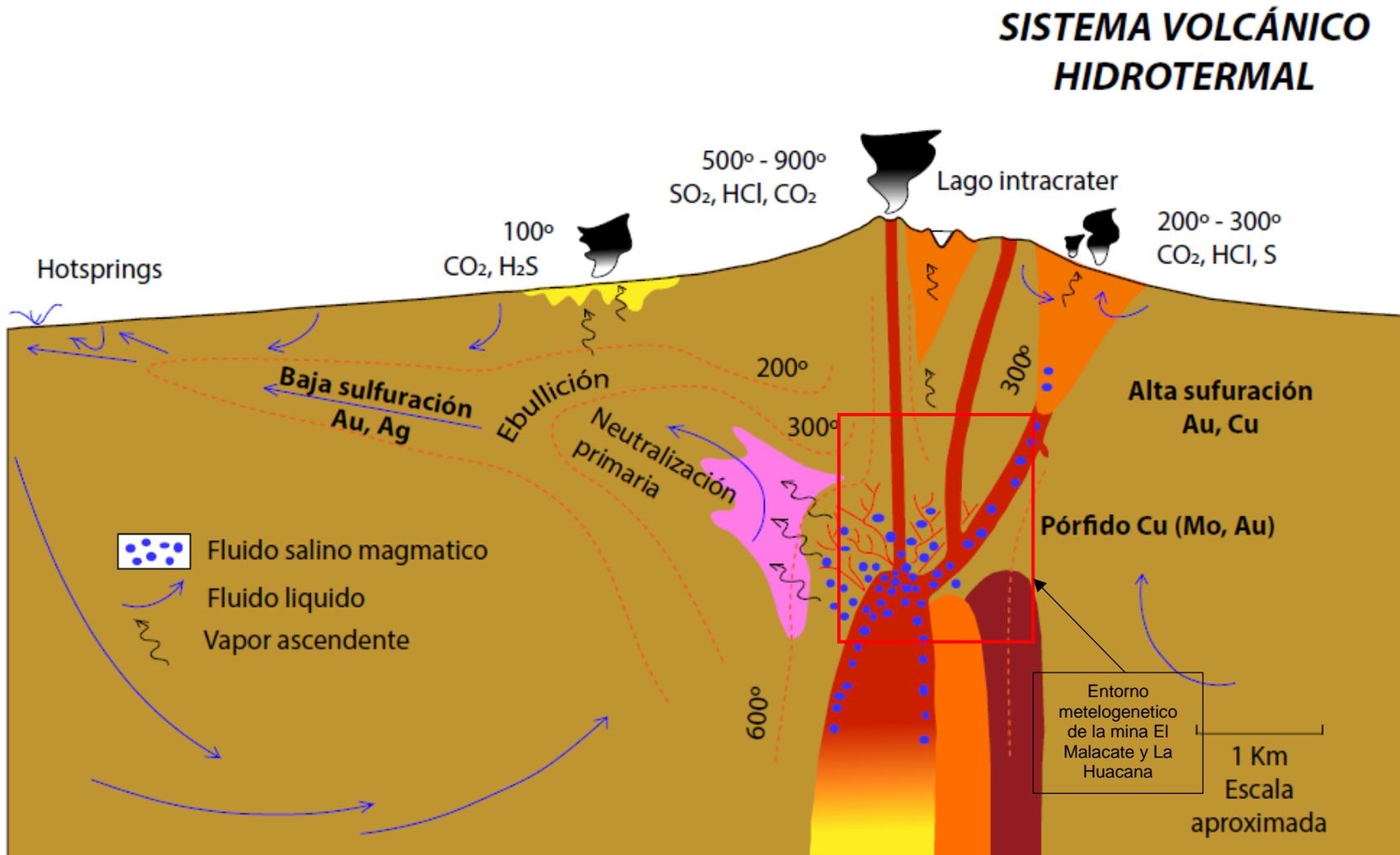


Figura 60. Modelo de yacimientos hidrotermales de baja y alta sulfuración, la zona del Malacate se podría ubicar a partir de las evidencias geoquímicas, Microtermométricas y petrológicas, dentro de la transición a yacimientos epitermales de alta sulfuración a yacimientos tipo pórfido, extraído de (Hedenquist, 1998) con modificaciones menores.

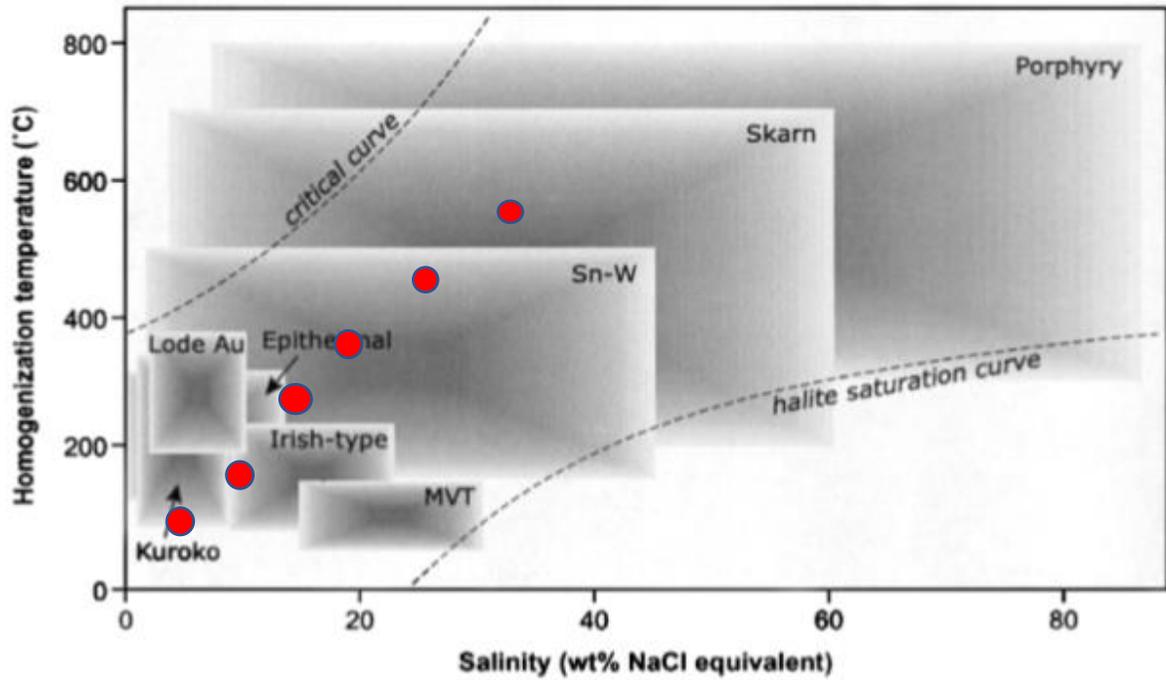


Figura 61. Comportamiento de Th y salinidades registradas con análisis de inclusiones fluidas de muestras de la zona de La Huacana, modelo extraído de Wilkinson, 2001 con modificaciones menores.

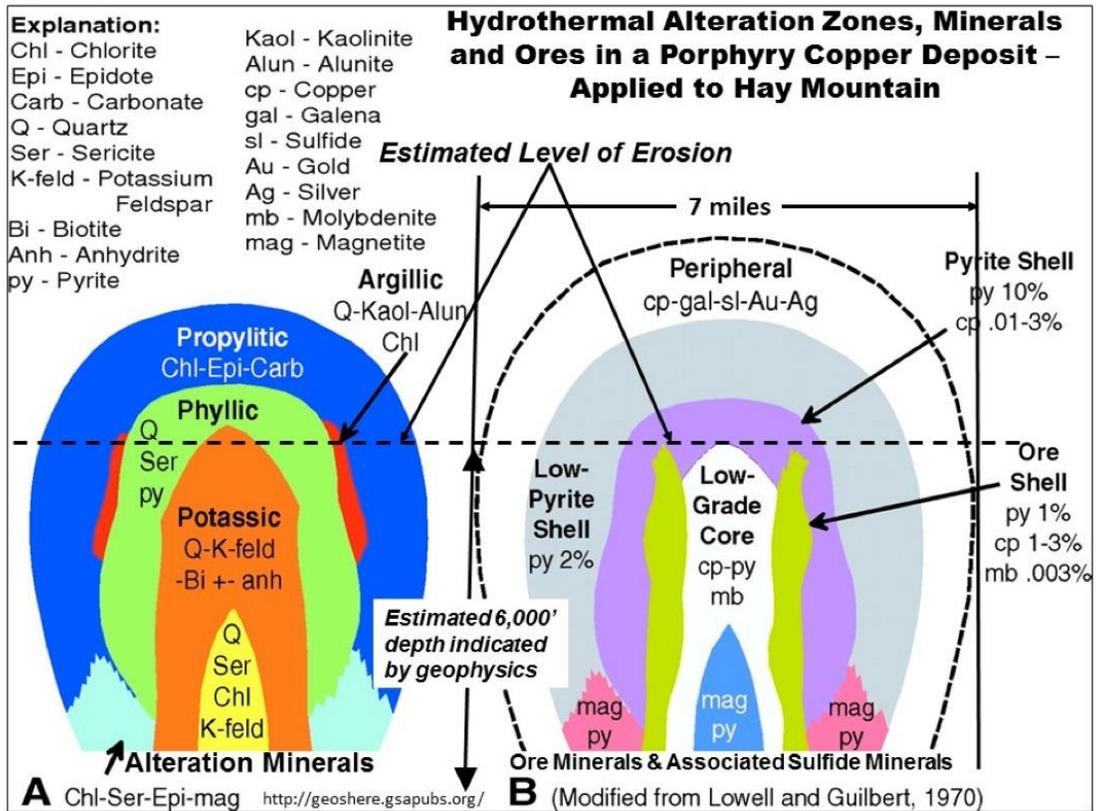


Figura 62. Modelo de zonación vertical y lateral propuesto por Lowell y Guilbert, 1970 con modificaciones menores, actualmente en la región de la Huacana se han distinguido las zonas de alteración Argílica, Filica, Propilítica y Potásica en zonas muy restringidas con asociaciones minerales similares a las descritas en el modelo.

Capítulo IX. Conclusiones

Según el modelo típico de los yacimientos hidrotermales, así como sus características geoquímicas, mineralógicas y petrológicas, se puede inferir con las observaciones superficiales y dentro mina que la zona de la Huacana tiene al potencial para albergar un yacimiento tipo pórfido.

La zona presenta un yacimiento epitermal de sulfuración intermedia-alta, esto se comprueba con los datos de microtermometría. Las características texturales de los intrusivos, y en general de las rocas que hospedan la mineralización cuprífera, así como la presencia anómala de oro y metales base, incluido el cobre en las estructuras tabulares brechadas, como en las vetas de cuarzo, permiten establecer de manera casi concluyente que, el sistema hidrotermal de alta temperatura al cual se relaciona la mineralización de cobre, se encuentra ligado a niveles epitermales de sulfuración intermedia, hacia la porción superior de las actuales zonas de explotación (Mina Malacate) y a dominios porfídicos (diseminados) hacia niveles inferiores, como en la zona de la mina Esmeralda.

Las alteraciones hidrotermales caracterizadas hasta el momento (Algílica, Filica, Propilitica y Potásica en pequeños afloramientos), concuerdan con las temperaturas y salinidades analizadas, igualmente, con las características que se presentan en muestras de la zona La Esmeralda, dan pauta para afirmar que existieron las condiciones necesarias para la formación de alteraciones de mayor temperatura, por lo cual sería muy probable que a mayores profundidades, la alteración Potásica se encontrara en forma consistente, esto asociado a la zona económica de un depósito tipo pórfido.

A partir de geoquímica de elementos traza se ha reportado la presencia anómala de Molibdeno, sobre todo en aquellas muestras que presentan valores económicos de cobre. Esta situación permite pensar en la posible existencia de un depósito tipo pórfido de cobre-molibdeno con valores económicos de oro, paragenéticamente este tipo de mineralización se asocia a magmas de afinidad calcalina relacionados a ambiente de arco magmático, entorno típico para este tipo de yacimientos, y que regionalmente, se ajusta al entorno metalogénico de La Huacana y mina El Malacate.

Referencias

- Barra, F., Valencia, V., Ochoa-Landín, L., y Chesley, J. (2005), Laramide Porphyry Cu-Mo Mineralization in Northern Mexico: Age Constraints from Re-Os Geochronology in Molybdenite, México, *Economic Geology*, 100 (1), 1605–1616.
- Camprubi, A., y Albinson, T., (2007), Depósitos epitermales en México: actualización de su conocimiento y reclasificación empírica, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 58 (1), 27-81.
- Capello, J., y Parello, J. (1989), Porfidos cupríferos ricos en oro; una revisión, *Revista Geológica de Chile*, 16 (1), 73-92.
- Consejo de Recursos Minerales (CRM) y Secretaria de Comercio y Fomento Industrial, (SECOFI).1995: Monografía Geológica-Minera del estado de Michoacán. Publicación M15E, México.
- Einaudi, M., Hedenquist, J., y Inan, E. (2003), Sulfidation State of Fluids in Active and Extinct Hydrothermal Systems: Transitions from Porphyry to Epithermal Environments, *Society of Economic Geologists and Geochemical Society, Special Publication (10)*, 1-50.
- Goldstein R. (2001), Fluid inclusions in sedimentary and diagenetic systems. *Lithos* 55, (2001). 159-193.
- Goldstein H. (2003), Petrographic analysis of fluid inclusions. In I. Samson, A. Anderson, & D. Marshall, eds..Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation. Mineralogical Association of Canada, *short Course Series 32 (2003)*, 9-49.
- Goldstein, R. H. And Reynolds, T. J. (1994), Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals. *SEPM Short course 31 (1994)*, 199.
- Hedenquist, J., y Richards, J. (1988), The influence of geochemical techniques on the development of genetic models for porphyry copper deposits, *Reviews in Economic Geology*, 10 (10), 235-256.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2009). Prontuario de información geográfica La Huacana, Michoacán de Ocampo. INEGI.
- Kamber, B., y Webb, G. (2001), The geochemistry of late Archaean microbial carbonate: Implications for ocean chemistry and continental erosion history, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65 (2001), 2509-2525.
- Kamber, B., y Webb, G. (2007), Transition metal abundances in microbial carbonate: A pilot study based on in situ LA-ICP-MS analysis, *Geobiology*, 5 (2001), 375-389.

-
- Lowell, J., y Guilbert, J. (1970), Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits, *Economic Geology* ; 65 (4), 373–408.
 - MaksaeV, V. (2003), Evolucion del conocimiento de los procesos involucrados en la génesis de los pórfidos cupríferos, *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 34 (6), 336.
 - Martínez, M., (2014). Prospección Minera Y Potencial Geológico De las Concesiones La China, San Cristóbal Y Esmeralda 2 en El Distrito Minero La Huacana, Estado de Michoacán, (Tesis de licenciatura), Universidad Nacional Autónoma de México.
 - Ortega-Gutiérrez, et al, 1992. Quinta edición de la carta geológica de la República Mexicana, escala 1:4000000, UNAMCRM.
 - Petróleos Mexicanos, 1986, Prospectos-Oropeo Hoja Las Cañas.
 - Pironon J. (2004), Fluid inclusions in petroleum environments: analytical procedure for PTX reconstruction. *Acta Petrológica Sinica*, 20(6). 1333-1342.
 - Pironon, J., y Pradier, B. (1992), Ultraviolet-fluorescence alteration of hydrocarbon fluid inclusions, *Org. Geochem*, 18 (4). 501-509.
 - Rascón-Heimpel, M., Valencia-Moreno, M., Ochoa-Landín, L., y Calmus, T. (2012), Geología y geoquímica del pórfido cuprífero Los Alisos, distrito minero de La Caridad, Sonora, México, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 29 (2), 355–383.
 - Roedder, E (1981), Origen of fluid inclusions and changes that occur after trapping, Hollister y Crawford (eds.), *Miner. Assoc. Canada. Short Course in fluid inclus*, 6 (1981), 101-137.
 - Roedder, E. (1984), Fluid inclusion. *Min. Soc. Amer. Reviews in Mineralogy*, 12, 644.
 - Schäfer, N., 2006, Ni-Anomalien in Cold-Seep Karbonaten aus dem nordwestlichen Schwarzen Meer: Ist Ni ein kritisches Element bei der anaeroben Oxidation von Methan? (tesis de maestría), Universidad de Göttingen, Göttingen, Alemania.
 - Servicio Geológico Mexicano. (2016). Panorama geológico minero y potencial geológico minero del estado de Michoacán de Ocampo. Secretaria de Economía.
 - Simmons, S., y Sawkins, F. (2005), Mineralogic and fluid inclusion studies of the Washington Cu-Mo-W-bearing breccia pipe, Sonora, México*, *Economic Geology*, 78 (1), 521-526.
 - Spencer, E., Wilkinson, J., Creaser, R., y Seguel, J. (2015), The Distribution and Timing of Molybdenite Mineralization at the El Teniente Cu-Mo Porphyry Deposit, Chile, *Economic Geology*, 110 (1), 387–421.

- Stern, C., Skewes, M., y Arevalo, A. (2011), Magmatic Evolution of the Giant El Teniente Cu-Mo Deposit, Central Chile, *Journal Petrology*, 52 (7 & 8), 1591-1617.
- Valencia-Moreno, M., Ochoa-Landín, L., Noguez-Alcántara, B., Ruiz, J., y Pérez-Segura, E. (2006), Características metalogénicas de los depósitos de tipo pórfido cuprífero en México y su situación en el contexto mundial, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 58 (1), 1-26.
- Wilkinson, J. (2001), Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits, *Lithos*, 55 (2001), 229–272.